



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EFFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Carlos Javier Chicojay Morales

Asesorado por el Ing. Agr. Carlos Vinicio Godínez Miranda

Guatemala, febrero de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS JAVIER CHICOJAY MORALES

ASESORADO POR EL ING. AGR. CARLOS VINICIO GODÍNEZ MIRANDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
VOCAL V	Br. Carlos Enrique Gómez Donis
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EFFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 26 de agosto de 2016.



Carlos Javier Chicojay Morales

Guatemala, 07 de noviembre de 2017


Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al Informe Final del Trabajo de Graduación titulado "EFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA", del estudiante de Ingeniería Ambiental, Carlos Javier Chicojay Morales quien se identifica con el carné universitario número 2012-13155 y DPI 2324 78465 0101.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,



Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
Asesor
CARLOS VINICIO GODÍNEZ MIRANDA
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 2,212



Guatemala, 12 de enero de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.001.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **040-2016** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **Carlos Javier Chicojay Morales**.
Identificado con número de carné: **2324 78465 0101**.
Identificado con registro académico: **2012-13155**.
Previo a optar al título de **INGENIERO AMBIENTAL**.

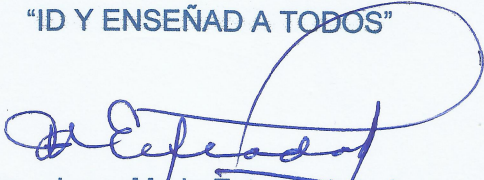
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EFFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Agrónomo: **Carlos Vinicio Godínez Miranda**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.002.2018

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del **Trabajo de Graduación** de la carrera de **Ingeniería Ambiental** del estudiante, **CARLOS JAVIER CHICOJAY MORALES**, titulado: **"EFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero 2018

Cc: Archivo
CSWD/karen

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR



Agencia Centroamericana de Administración de Programas de Ingeniería y de Ciencias



Universidad de San Carlos
de Guatemala

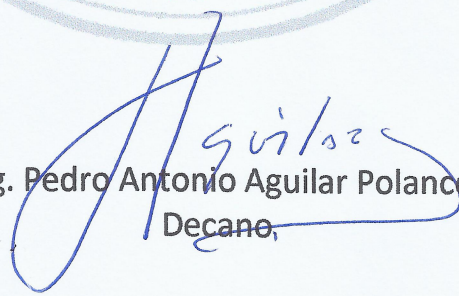


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 051.2018

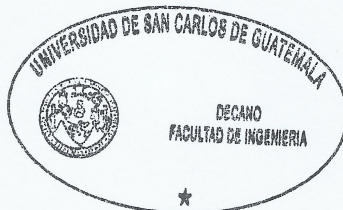
El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EFFECTO DE LA CANÍCULA PROLONGADA SOBRE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado el estudiante universitario: **Carlos Javier Chicojay Morales**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano,

Guatemala, febrero de 2018

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por darme la sabiduría, fuerza, salud y la oportunidad de desarrollarme en mi formación académica y no abandonarme en los momentos difíciles.
- Mi madre** María Consuelo Morales de Chicojay por su cariño y paciencia que ha demostrado a lo largo de mi vida, por estar siempre en los momentos difíciles. Su apoyo, comprensión y amor será siempre mi inspiración. Este también es su logro.
- Mi padre** Aníbal Chicojay por haberme brindado la oportunidad de estudiar, brindarme su ayuda siempre que la necesito, por darme en todo momento su apoyo, comprensión y amor lo cual siempre será mi inspiración. Este también es su logro.
- Mi hermano** Aníbal Estuardo Chicojay Morales, por ser una importante influencia en toda mi vida y darme su apoyo siempre que lo necesité.
- Mis tíos** Josefina, Yolanda y Manuel Morales por su cariño incondicional y confianza a lo largo de mi vida.

Mi tía

Ana Esperanza Morales (q. e. p. d) por haber sido una segunda madre para mí, el haberme brindado el apoyo y el cariño que siempre necesité y alentarme a no rendirme; su recuerdo aún sigue siendo una gran motivación para mí. Este acto está dedicado especialmente a ella.

Mis abuelos

Por darme todo su amor y comprensión a lo largo de mi vida y darme sus consejos siempre que los necesité.

Mejor amiga

Alejandra Pineda por estar siempre apoyándome sin importar las circunstancias y no dejarnos vencer ante las adversidades que se nos presentaron en el camino.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la facilidad de mis estudios y ser mi segundo hogar.
Mis padres	María Consuelo Morales de Chicojay y Aníbal Chicojay por apoyarme y brindarme los estudios necesarios para completar este ciclo de mi vida.
Mi hermano	Aníbal Chicojay por apoyarme en los momentos difíciles y estar siempre que lo he necesitado.
Mi mejor amiga	Alejandra Pineda por estar a mi lado, animarme, brindarme su apoyo y comprensión en todo momento y superar todos los obstáculos que se nos han presentado juntos.
Mis abuelos	Por su cariño, apoyo e influencia en mi desarrollo desde mi niñez.
Mis tíos y primos	Por su cariño y apoyo.
Familia Pineda Vásquez	Por el apoyo y aceptación que me han brindado estos años y siempre hacerme sentir bienvenido.

Mis amigos más cercanos

Alejandra Pineda, Rita Astún, Victoria Miranda, Stacy Chacón, Lucía Blanco, Diego Plutarco, Nery Moreno, Luis Velásquez, Cesar Saquec, José Axpuc, Verenice Guerra, Sharon Mazariegos, Nancy Garcia, Ivonne Liere, Elisa Chew, Arabella Cajas, Mirian Méndez, Laura de León y Caroline Soto por ser una parte muy importante en el desarrollo de mi carrera y sin su apoyo en todo momento, no lo hubiera logrado.

Mis amigos del colegio

Sheryl Pedroza, Brenda Loaiza, Dan Macajola, Victor Zuñiga y Kevin Santisteban por su amistad a lo largo de los años.

Mi asesor

Ing. Agr. Carlos Vinicio Godínez Miranda no solo por su apoyo en la elaboración de mi trabajo de graduación, si no ser una persona influyente en mi formación profesional.

Los ingenieros

Alejandra Ma, Karla Pérez, Adela Marroquín, Carlos Muñoz, Claudio Castañón, Dilma Mejicanos, Walter Bardales y Dennis Argueta por la formación y apoyo que me brindaron.

Insivumeh

Por el apoyo brindado en la recolección de datos para la elaboración de este trabajo de graduación.

2.7.1.2.	Contaminantes atmosféricos según su origen.....	17
2.7.1.3.	Principales contaminantes atmosféricos en Guatemala.....	18
2.7.1.3.1.	Partículas totales suspendidas.....	19
2.7.1.3.2.	Partículas menores a 10 micras.....	20
2.7.1.3.3.	Partículas menores a 2,5 micras.....	22
2.7.1.3.4.	Dióxido de nitrógeno	23
2.7.1.3.5.	Ozono.....	24
2.7.1.3.6.	Monóxido de carbono....	26
2.7.1.3.7.	Dióxido de azufre	27
2.7.1.3.8.	Deposición ácida y sólidos totales de precipitación	28
2.7.2.	Fuentes de contaminación atmosférica.....	28
2.7.2.1.	Fuentes naturales.....	28
2.7.2.2.	Fuentes domésticas	29
2.7.2.3.	Fuentes comerciales	30
2.7.2.4.	Fuentes industriales	30
2.7.2.5.	Fuentes móviles	32
2.7.3.	Exposición de la población urbana a niveles de contaminación	34
2.7.3.1.	¿Cómo afecta la contaminación atmosférica la salud de los seres humanos y los ecosistemas?	36

	2.7.3.1.1.	Efectos en la salud humana.....	36
	2.7.3.1.2.	Efectos en el ecosistema	39
2.8.		Gases de efecto invernadero.....	39
2.9.		Factores que influyen en la calidad del aire.....	40
	2.9.1.	Precipitación	42
	2.9.2.	Fenómeno El Niño en Guatemala.....	44
2.10.		¿Qué es canícula?.....	49
	2.10.1.	Canícula en Guatemala en los años 2014 y 2015 ..	49
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	55
	3.1.	Variables.....	55
	3.1.1.	Variables dependientes	55
	3.1.2.	Variables independientes.....	55
	3.2.	Delimitación de campo de estudio	55
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	56
	3.4.	Recursos materiales disponibles	56
	3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	56
	3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	56
	3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	57
	3.8.	Análisis estadístico	81
	3.8.1.	Interpretación del coeficiente de correlación.....	84
4.		RESULTADOS	85
5.		INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	155

CONCLUSIONES..... 163
RECOMENDACIONES..... 167
BIBLIOGRAFÍA..... 169
APÉNDICES..... 173
ANEXO 175

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Temperatura promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en grados centígrados.....	3
2.	Precipitación promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en milímetros.....	3
3.	Evapotranspiración potencial promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en milímetros	4
4.	Radiación solar promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en cal/cm ² *min.....	4
5.	Capas de la Tierra.....	5
6.	Porcentaje de masa total de la atmósfera, inferior a los 80 km.....	6
7.	Perfil vertical de la temperatura de las regiones atmosféricas de la tierra.....	9
8.	Composición actual del aire	12
9.	Partículas suspendidas en centros urbanos.....	22
10.	Concentración de NO ₂ y O ₃	25
11.	Concentración de CO.....	27
12.	Efectos del SO ₂ en la salud	37
13.	Comportamiento del fenómeno El Niño en Guatemala	44
14.	Mapa de perspectiva de lluvia para marzo de 2016.....	46
15.	Mapa de perspectiva de temperaturas mínimas absolutas para marzo de 2016	47
16.	Mapa de perspectiva de temperatura media para marzo de 2016	48

17.	Mapa de los lugares poblados con familias afectadas por la canícula de 2014.....	52
18.	Datos de temperatura promedio en grados centígrados de 2000 a 2016.....	58
19.	Datos de precipitación promedio en milímetros de 2000 a 2016	60
20.	Datos de evapotranspiración potencial en milímetros de 2000 a 2016.....	62
21.	Datos de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto de 2000 a 2016	64
22.	Datos de concentración de partículas menores de 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	66
23.	Datos de concentración de partículas menores de 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016.....	68
24.	Datos de concentración de dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	70
25.	Datos de concentración de Dióxido de Azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016	72
26.	Datos de concentración de sedimentación ácida en unidades de pH de 2000 a 2014.....	74
27.	Datos de concentración de monóxido de carbono en partes por millón de 2000 a 2015.....	76
28.	Datos de concentración de ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2015.....	78
29.	Datos de concentración de partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2012	80
30.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de PM ₁₀	85
31.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de PM ₁₀	87
32.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de PM ₁₀ ..	89
33.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de PM ₁₀	91

34.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de PM _{2,5}	93
35.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de PM _{2,5}	95
36.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de PM _{2,5}	96
37.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de PM _{2,5}	98
38.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de NO ₂	99
39.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de NO ₂	101
40.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de NO ₂	103
41.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de NO ₂	105
42.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de SO ₂	107
43.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de SO ₂	109
44.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de SO ₂	111
45.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de SO ₂	113
46.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de sedimentación ácida.....	115
47.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de sedimentación ácida.....	117
48.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de sedimentación ácida.....	119
49.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de sedimentación ácida.....	121
50.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de CO.....	123
51.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de CO.....	125
52.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de CO..	127
53.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de CO.....	129
54.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de O ₃	131
55.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de O ₃	133

56.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de O ₃	135
57.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de O ₃	137
58.	Promedio de temperatura <i>versus</i> promedio de PTS	139
59.	Promedio de precipitación <i>versus</i> promedio de PTS	141
60.	Promedio de evapotranspiración potencial <i>versus</i> promedio de PTS.....	143
61.	Promedio de radiación solar <i>versus</i> promedio de PTS	145

TABLAS

I.	Emisiones nacionales durante el periodo 1990-2000, en miles de toneladas	XXIX
II.	Composición media de la atmósfera.....	8
III.	Concentraciones de compuestos en atmósfera limpia y contaminada...16	
IV.	Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero durante el periodo 1990-2000, en miles de toneladas	19
V.	Contaminantes emitidos según actividad doméstica	29
VI.	Emisiones comparativas de motores de servicio pesados (camiones) g/mi (g/km) con gasolina y con diésel	33
VII.	Emisiones de motores pequeños de servicio con gasolina de dos y cuatro tiempos g/hp-h	34
VIII.	Calidad del aire en la ciudad de Guatemala, según año y contaminante (2000-2007).....	35
IX.	Formas de precipitación.....	43
X.	Consecuencias provocadas por canícula según DIPLAN-MAGA	54
XI.	Datos mensuales de temperatura promedio en grados centígrados, estación Insivumeh de 2000 a 2016.	57
XII.	Datos mensuales de precipitación promedio en milímetros, estación Insivumeh de 2000 a 2016.....	59

XIII.	Datos mensuales de evapotranspiración potencial en milímetros, estación Insivumeh de 2000 a 2016.....	61
XIV.	Datos mensuales de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto, estación Insivumeh de 2000 a 2016	63
XV.	Concentración de partículas menores de 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016	65
XVI.	Concentración de partículas menores de 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016.....	67
XVII.	Concentración de dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016	69
XVIII.	Concentración de dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016.....	71
XIX.	Concentración de sedimentación ácida en unidades de pH de 2000 a 2014.....	73
XX.	Concentración de monóxido de carbono en partes por millón de 2000 a 2016.....	75
XXI.	Concentración de ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016	77
XXII.	Concentración de partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016	79
XXIII.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	85
XXIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y PM ₁₀ de 2000 a 2016	86
XXV.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	87

XXVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y PM ₁₀ de 2000 a 2016.....	88
XXVII.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	89
XXVIII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y PM ₁₀ de 2000 a 2016.....	90
XXIX.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	91
XXX.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y PM ₁₀ de 2000 a 2016.....	92
XXXI.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016.....	93
XXXII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y PM _{2,5} entre los años 2009 a 2016.....	94
XXXIII.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016.....	94
XXXIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y PM _{2,5} entre los años 2009 a 2016.....	95
XXXV.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016.....	96
XXXVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y PM _{2,5} entre los años 2009 a 2016.....	97

XXXVII.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016.....	97
XXXVIII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y PM _{2,5} entre los años 2009 a 2016	98
XXXIX.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	99
XL.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y NO ₂ de 2000 a 2016.....	100
XLI.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	101
XLII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y NO ₂ de 2000 a 2016.....	102
XLIII.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	103
XLIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y NO ₂ de 2000 a 2016	104
XLV.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016.....	105
XLVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y NO ₂ de 2000 a 2016.....	106
XLVII.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016	107
XLVIII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y SO ₂ entre los años 2006 a 2016	108

XLIX.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016.....	109
L.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y SO ₂ entre los años 2006 a 2016.....	110
LI.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016.....	111
LII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y SO ₂ entre los años 2006 a 2016.....	112
LIII.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016.....	113
LIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y SO ₂ entre los años 2006 a 2016.....	114
LV.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014.....	115
LVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014.....	116
LVII.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014.....	117
LVIII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014.....	118

LIX.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014	119
LX.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014.....	120
LXI.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014.....	121
LXII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014	122
LXIII.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015.....	123
LXIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y CO entre los años 2000 a 2015	124
LXV.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015.....	125
LXVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y CO entre los años 2000 a 2015.....	126
LXVII.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015.....	127
LXVIII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y CO entre los años 2000 a 2015..	128
LXIX.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015.....	129

LXX.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y CO entre los años 2000 a 2015	130
LXXI.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015	131
LXXII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y O ₃ entre los años 2000 a 2015	132
LXXIII.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015.....	133
LXXIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y O ₃ entre los años 2000 a 2015.....	134
LXXV.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015.....	135
LXXVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y O ₃ entre los años 2000 a 2015...	136
LXXVII.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015	137
LXXVIII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y O ₃ entre los años 2000 a 2015	138
LXXIX.	Promedio de temperatura en grados centígrados <i>versus</i> promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012.....	139
LXXX.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y PTS entre los años 2000 a 2012	140

LXXXI.	Promedio de precipitación en milímetros <i>versus</i> promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012.....	141
LXXXII.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y PTS entre los años 2000 a 2012.....	142
LXXXIII.	Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros <i>versus</i> promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012	143
LXXXIV.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y PTS entre los años 2000 a 2012.....	144
LXXXV.	Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto <i>versus</i> promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012.....	145
LXXXVI.	Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y PTS entre los años 2000 a 2012.....	146
LXXXVII.	Resumen coeficiente de correlación entre temperatura y contaminante atmosférico de 2000 a 2016	147
LXXXVIII.	Resumen proporción de variabilidad compartida entre temperatura y contaminante atmosférico de 2000 a 2016	148
LXXXIX.	Resumen coeficiente de correlación entre precipitación y contaminante atmosférico de 2000 a 2016	149
XC.	Resumen proporción de variabilidad compartida entre precipitación y contaminante atmosférico de 2000 a 2016.....	150
XCI.	Resumen coeficiente de correlación entre evapotranspiración potencial y contaminante atmosférico de 2000 a 2016	151
XCII.	Resumen proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y contaminante atmosférico de 2000 a 2016	152

XCIII.	Resumen coeficiente de correlación entre radiación solar y contaminante atmosférico de 2000 a 2016	153
XCIV.	Resumen proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y contaminante atmosférico de 2000 a 2016.....	154

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
NO₂	Dióxido de nitrógeno
SO₂	Dióxido de azufre
pH	Potencial de hidrógeno
CO	Monóxido de carbono
O₃	Ozono troposférico
m	Metro
mm	Milímetro
µm	Micrómetro
µm/m³	Microgramos sobre metro cúbico
ppm	Partes por millón
Cal/cm²*min	Calorías sobre centímetro cuadrado por minuto
PTS	Partículas totales en suspensión
°C	Grados centígrados
PM_{2.5}	Partículas menores a 2,5 micrómetros
PM₁₀	Partículas menores a 10 micrómetros

GLOSARIO

Calidad del aire	Estado de contaminación del aire en un lugar o zona determinada.
Canícula	Temporada del año en la cual el calor es más fuerte, tanto en el hemisferio Sur como en el Norte (desfasados seis meses entre sí), disminución o ausencia de lluvia dentro de las épocas de lluvia, los vientos secos impiden el paso de la humedad, por lo que aparece un calor seco más perceptible.
Contaminación atmosférica	Presencia en el aire de materias o formas de energía que implican riesgo, daño o molestia grave para las personas y la naturaleza.
Deposición ácida	Sedimentación ácida o lluvia ácida, se forma cuando la humedad del aire se combina con los óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y trióxido de azufre.
Dióxido de azufre	Gas incoloro, de olor acre, irritante, soluble en agua y reactivo, formado principalmente por procesos que implican quema de combustibles fósiles.
Dióxido de nitrógeno	Gas café rojizo de olor picante, resultante del óxido nítrico combinado con oxígeno de la atmósfera.

Efpem	Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media.
Estación de muestreo de calidad del aire	Conjunto de equipos científicos destinados a la captación y análisis de muestras de aire, con el propósito de determinar la calidad del mismo.
Fenómeno El Niño	Es un patrón climático recurrente que implica cambios en la temperatura de las aguas en la parte central y oriental del Pacífico tropical.
Fuente fija	Edificación o instalación, temporal o permanente, donde se realizan operaciones que dan origen a la emisión de contaminantes del aire.
Fuente móvil	Vehículos, equipos y maquinaria no fijos con motores de combustión y similares, que en su operación emitan contaminantes a la atmósfera.
Incap	Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
Monóxido de carbono	Gas incoloro, casi inodoro, insípido, inflamable. Se produce, entre otras causas, a partir de la combustión incompleta de materiales orgánicos.

Musac	Museo de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
Ozono troposférico	Alótropo triatómico de oxígeno; gas azul pálido con olor acre característico. Es un oxidante altamente reactivo, muy tóxico. En la tropósfera, se forma principalmente debido a reacciones fotoquímicas con hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.
Partículas menores a 10 micrómetros	Contaminante atmosférico, sólido o líquido con diámetro inferior a 10 micrómetros.
Partículas menores a 2,5 micrómetros	Contaminante atmosférico, sólido o líquido con diámetro inferior a 2,5 micrómetros.
Partículas totales suspendidas	Contaminante atmosférico, sólido o líquido con diámetro inferior a 100 micrómetros.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.

RESUMEN

La presencia de gases, partículas líquidas y sólidas, ruido, calor y energía, en la capa atmosférica donde viven y se desarrollan los seres humanos, tiene un impacto importante en su calidad de vida, sobre todo en los grandes conglomerados urbanos, en los cuales, sus habitantes están expuestos todos los días a estos contaminantes atmosféricos.

El comportamiento de estos contaminantes atmosféricos es tan variable como la dirección de los vientos, la presencia de lluvias, la formación de nubes, o el apareamiento de arcoíris. Sin embargo, además de los efectos propios de las variables climáticas normales, en 2014 ocurrió a nivel nacional un escaso período de lluvias, con zonas en las que no llovió por más de 45 días. Este fenómeno tuvo un alto impacto en los cultivos de maíz y frijol, y agravó el problema del hambre, sobre todo en el Corredor Seco. La Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional (Sesan) tuvo que implementar un plan de respuesta ante la crisis. Por otra parte, ninguna institución analizó el efecto de la llamada “canícula prolongada” sobre la calidad del aire, sobre todo en la ciudad de Guatemala, dejando la incógnita de si, además de los efectos negativos que esta sequía tuvo en los cultivos y en la seguridad alimentaria, también habrá agravado los niveles de contaminación atmosférica, afectando la calidad de vida de los habitantes de la ciudad y exponiéndolos a niveles más críticos de contaminación.

Con la finalidad de establecer si existe alguna relación entre el comportamiento de los contaminantes atmosféricos y las variaciones a corto plazo en temperatura, precipitación, presión atmosférica y dirección de vientos, en la ciudad de Guatemala, se realizó el presente estudio.

El trabajo se desarrolló en la ciudad de Guatemala, en los sitios donde funcionan las estaciones de control de calidad del aire, administradas por la Universidad de San Carlos de Guatemala e Insivumeh. Las estaciones se ubican en:

1. Efpem:

- Dirección: Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media (Efpem), 32 calle de la avenida Petapa, zona 12.
- Coordenadas: N14°35.264´ W90°32.731´
- Altitud: 1,504 msnm

2. Centro histórico:

- Dirección: Museo de la Universidad de San Carlos de Guatemala, 9 avenida y 10 calle zona 1.
- Coordenadas: N14°38.326´ W90°30.657´
- Altitud: 1,508 msnm

3. Incap:

- Dirección: Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (Incap), calzada Roosevelt 6-25, zona 11.
- Coordenadas: N14°36.968´ W90°32.393´
- Altitud: 1,527 msnm

4. Calzada San Juan:

- Dirección: Motores Hino de Guatemala, S.A. entre 11 y 12 calle, zona 7
- Coordenadas: N14°37.362´ W90°32.885´
- Altitud: 1,540 msnm

5. USAC:

- Dirección: edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad Universitaria zona 12.
- Coordenadas: N14°35.101´ W90°33.284´
- Altitud: 1,522 msnm

6. Insivumeh:

- Dirección: Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh), 7 avenida 14-57 zona 13.
- Coordenadas: N14°35.243´ W90°31.959´
- Altitud: 1,516 msnm

En dichas estaciones de monitoreo de calidad del aire se obtuvieron los datos sobre las concentraciones de los contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles, de los años 2000 a 2016. Estos contaminantes son:

- Partículas totales suspendidas (PTS),
- Partículas menores a 10 micras (PM₁₀),
- Partículas menores a 2,5 micras (PM_{2.5}),
- Dióxido de nitrógeno (NO₂),
- Dióxido de azufre (SO₂),
- Sedimentación ácida (pH),
- Ozono (O₃); y,
- Monóxido de carbono (CO).

Además, se recolectaron los datos de las variables meteorológicas de temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial de los años 2000 a 2016. Asimismo, se tomó en consideración que en el 2014 ocurrió una prolongada sequía, la cual pudo tener algún efecto sobre estas variables.

Una vez se tuvieron los datos de los contaminantes y de las variables meteorológicas, se analizó si existía algún grado de correlación entre cada variable y cada contaminante atmosférico por separado, incluyendo en dicho análisis el fenómeno de la sequía prolongada.

OBJETIVOS

General

Analizar los efectos de la canícula prolongada de 2014, en el comportamiento de ocho contaminantes atmosféricos, en seis puntos de monitoreo de calidad del aire, ubicados en la ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Determinar si existe una correlación estadística entre el incremento de la temperatura ambiente y el incremento o decremento de la concentración de cada contaminante atmosférico.
2. Determinar si existe una correlación estadística entre el decremento de la precipitación y el incremento o decremento de las concentraciones de cada contaminante atmosférico.
3. Determinar si el aumento de la tasa de evapotranspiración potencial tiene una correlación estadística con el incremento o decremento de las concentraciones de cada contaminante atmosférico.
4. Determinar si el aumento de la radiación solar tiene una correlación estadística con el incremento de las concentraciones de cada contaminante atmosférico.

HIPÓTESIS

Hipótesis nula

Los efectos directos de la canícula prolongada de 2014 (aumento de temperatura, decremento de la precipitación, aumento de tasa de evapotranspiración potencial y aumento de la radiación solar) no tuvieron correlación estadística con el comportamiento de ocho contaminantes atmosféricos (partículas totales en suspensión, partículas menores a 10 micras, partículas menores a 2,5 micras, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, sedimentación ácida, ozono y monóxido de carbono) en la ciudad de Guatemala, durante el período que este fenómeno climático afectó al territorio guatemalteco.

Hipótesis alternativa

Los efectos directos de la canícula prolongada de 2014 (aumento de temperatura, decremento de la precipitación, aumento de tasa de evapotranspiración potencial y aumento de la radiación solar) si tuvieron correlación estadística con el comportamiento de ocho contaminantes atmosféricos (partículas totales en suspensión, partículas menores a 10 micras, partículas menores a 2,5 micras, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, sedimentación ácida, ozono y monóxido de carbono) en la ciudad de Guatemala, durante el período que este fenómeno climático afectó al territorio guatemalteco.

INTRODUCCIÓN

“La contaminación atmosférica en la ciudad de Guatemala se ha incrementado de acuerdo a la medición base de 1990 de la Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático”¹. Según este estudio, en 1990 los principales contaminantes eran: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos volátiles y dióxido de azufre.

Hacia el 2000 los índices de concentración de los contaminantes mostraban mayores concentraciones como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla I. **Emisiones nacionales durante el periodo 1990-2000, en miles de toneladas**

Contaminante		1990	2000	Diferencia
Dióxido de carbono (CO ₂)	Emisiones	7489.62	21320.82	13831.20
	Remociones	-42903.73	-26718.01	-16185.71
Metano (CH ₄)		199.56	230.29	30.74
Óxido nitroso (N ₂ O)		20.71	55.33	34.62
Óxidos de nitrógeno (NO _x)		43.79	89.72	45.93
Monóxido de carbono (CO)		961.66	1651.45	689.8
Compuestos volátiles (COVDM)		105.95	3256.85	3150.90
Dióxido de azufre (SO ₂)		74.5	75.15	0.65

Fuente: IARNA, *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. p. 164.

Las principales fuentes de contaminación atmosférica son de origen humano (antropogénicas), como los vehículos y fábricas con motores de

¹ IARNA. *Panorama del medio ambiente en Guatemala*. p. 202.

combustión interna que utilizan combustibles fósiles. En la ciudad de Guatemala son las principales causas del incremento de gases de efecto invernadero y de contaminantes que causan serios daños al sistema respiratorio de los habitantes de la ciudad, quienes están expuestos a estos contaminantes durante largos períodos de tiempo. En menor grado, a lo largo de la historia se han registrado deposiciones masivas de arena volcánica, agudizando enfermedades respiratorias, en personas asmáticas principalmente. Estas deposiciones naturales han provenido del volcán de Pacaya, ubicado a 47,5 km al sur de la ciudad de Guatemala, en el municipio de San Vicente Pacaya, Escuintla.

Además, de acuerdo a los antecedentes de los incrementos de concentración de los contaminantes atmosféricos, las variables meteorológicas juegan un papel importante en el desarrollo de estos contaminantes, principalmente en época seca; normalmente de enero a mayo, en la ciudad de Guatemala; aunque las variaciones climáticas han ampliado este período de enero a junio o julio; por lo que el estudio sugiere la investigación del efecto de la canícula prolongada de 2014 sobre los contaminantes atmosféricos, considerando que durante un evento anormal de canícula, se incrementa la radiación solar, la temperatura, la evapotranspiración potencial, el estrés hídrico de las plantas (lo que reduce su fijación de dióxido de carbono CO_2) y se combina con sistemas de alta presión, reduciendo las lluvias e impidiendo el ingreso de las masas de aire, incrementando los niveles de contaminantes atmosféricos primarios y secundarios.

Por ello, se planteó realizar un análisis estadístico, para determinar si existía algún efecto directo entre la calidad del aire en la ciudad de Guatemala y los eventos de una canícula prolongada. Para el efecto, se realizó el cálculo de correlación entre cada variable meteorológica con cada contaminante atmosférico que influye negativamente en la calidad del aire.

1. ANTECEDENTES

En 2001, se determinó que las principales fuentes emisoras de contaminantes fueron la conversión de bosques y sabanas (43,3 %), el transporte (28,3 %), la industria manufacturera (10,8 %) y otros sectores que incluyen las emisiones residenciales, comerciales e institucionales (7,7 %).²

En 2007, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales indicó que durante el decenio anterior, las emisiones totales aumentaron en 13.8 millones de toneladas de CO₂, equivalentes a un aumento de 184 % respecto a los datos reportados para el año base de 1990.³

En 2007, en términos generales todos los gases de efecto invernadero mostraron incrementos netos en sus emisiones, pero no uniformes. A su vez se observó una disminución en la capacidad de absorber CO₂ en un 38 %.⁴

En 2007, durante la época seca se reportaron resultados más elevados para la mayoría de contaminantes, en relevancia las PM10 junto con las PTS las cuales rebasaron los promedios anuales sugeridos.⁵

En 2008, el Laboratorio de Monitoreo del Aire para la ciudad de Guatemala de la Universidad de San Carlos de Guatemala, reveló resultados de contaminación de impacto global los cuales indicaban, que las partículas totales

² IARNA. *Panorama del medio ambiente en Guatemala*. p. 202.

³ IARNA. *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. p. 164.

⁴ *Ibíd.*

⁵ *Ibíd.* p. 167.

en suspensión (PTS), partículas totales en suspensión en su fracción (PM10), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y lluvia acida excedían en todas las mediciones los valores guías sugeridos, siendo los puntos de muestreo con mayor contaminación las zonas de alto tránsito vehicular.⁶

Los niveles que sobrepasaron las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud fueron los de PTM, con 143 miligramos por metro cúbico (el valor recomendado es 75 mg/m³); los de PM₁₀, con 80 miligramos por metro cúbico (aconsejado, 20) y los de SO₂, 46 miligramos por metro cúbico (recomendación de 20).⁷

En 2011, la OMS estableció como límite que en el ambiente no se exceda de los 20 microgramos de partículas contaminantes por metro cúbico anual. Ciudad de Guatemala tiene una media de 48 microgramos.⁸

En 2014, se observaron cambios meteorológicos en la atmósfera que provocaron la disminución de lluvias en regiones de Nor-Oriente y Centro del territorio guatemalteco, sin descartar que por el incremento en la temperatura del océano Pacífico –fenómeno de El Niño (2014-2015)-, se inició el período de Canícula (disminución importante en lluvias, altas temperaturas e incremento en la velocidad del viento norte).⁹

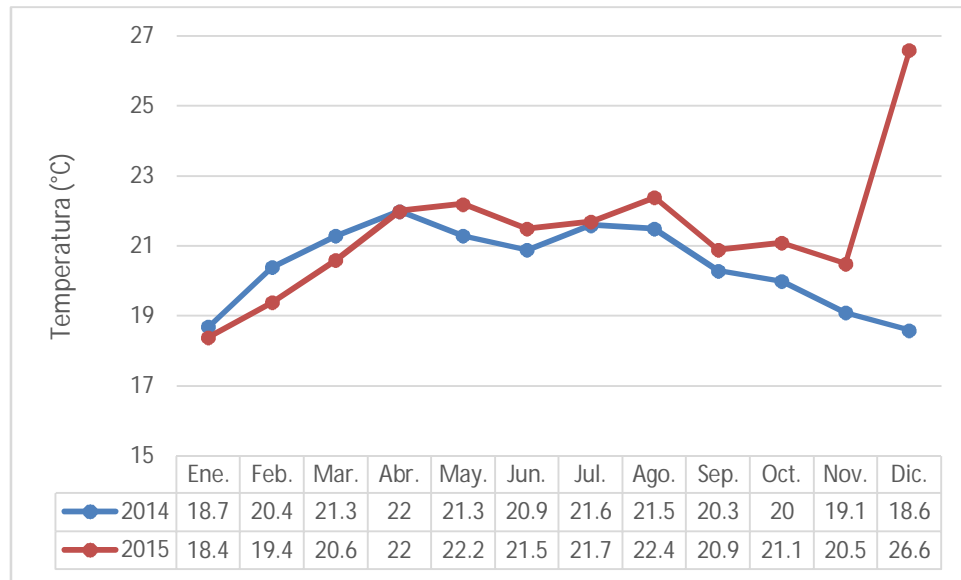
⁶ IARNA. *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. p. 167.

⁷ IARNA. *Panorama del medio ambiente en Guatemala*. p. 207.

⁸ *Ibíd.*

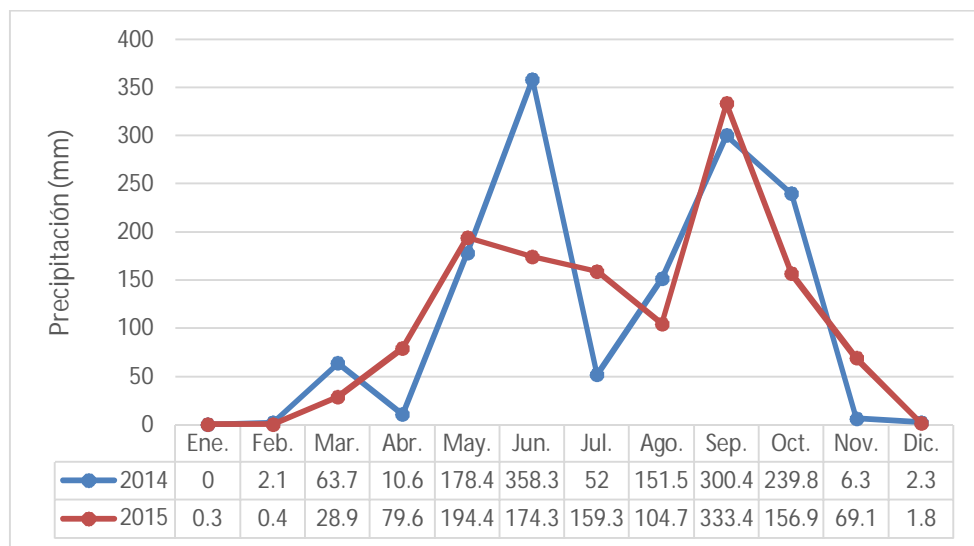
⁹ Insivumeh. *Boletín Climático No. 8-2015*.

Figura 1. **Temperatura promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en grados centígrados**



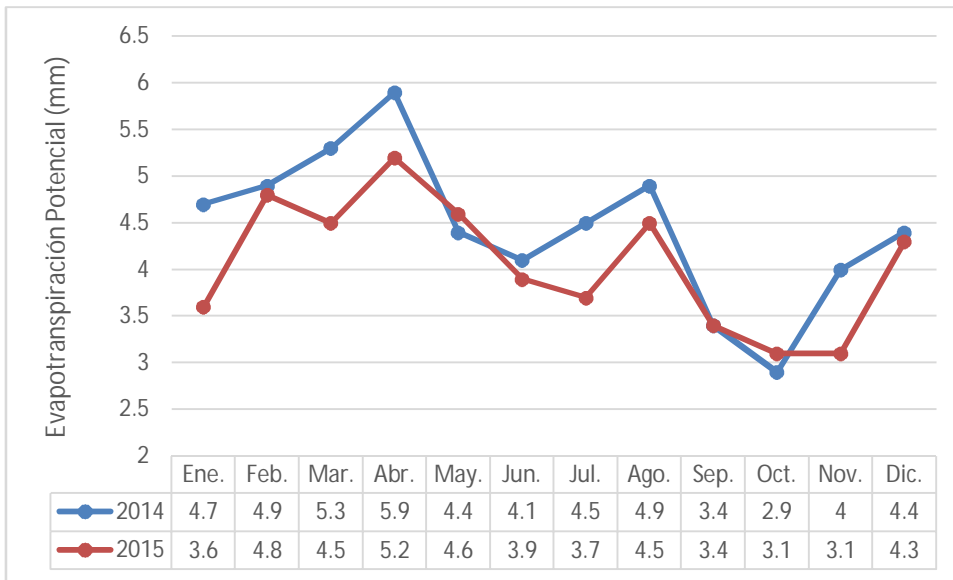
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 2. **Precipitación promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en milímetros**



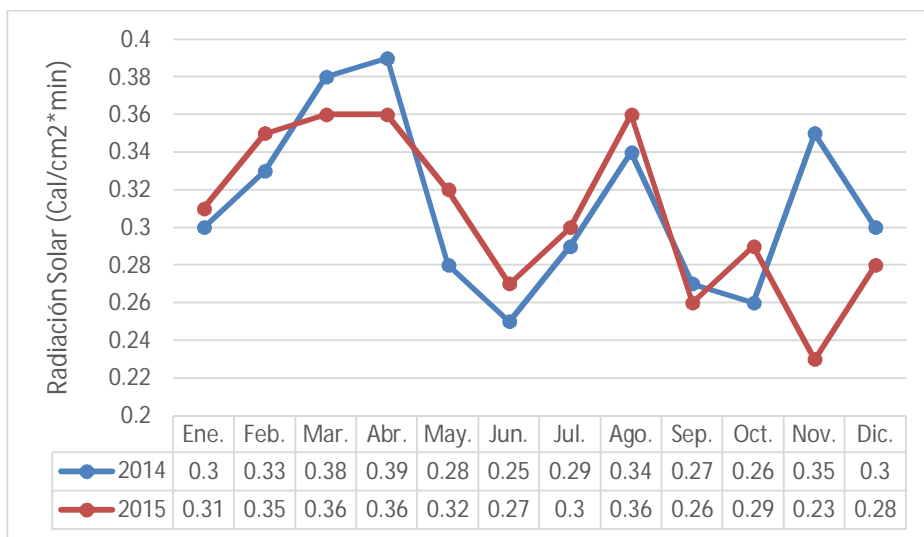
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 3. **Evapotranspiración potencial promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en milímetros**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 4. **Radiación solar promedio de la ciudad de Guatemala en 2014 y 2015 en cal/cm²*min**



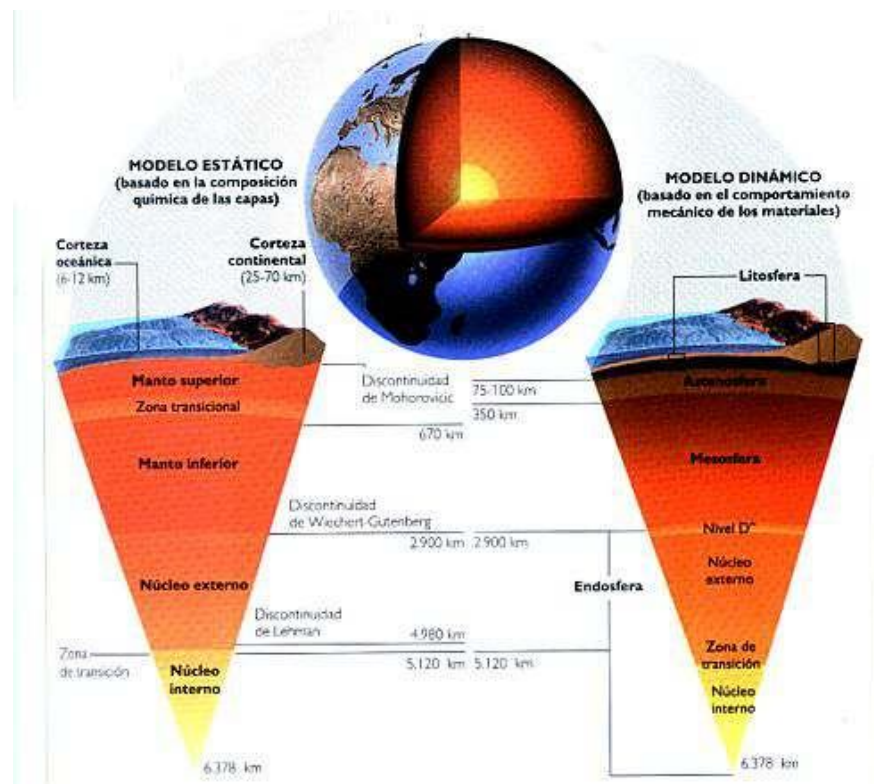
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ¿Qué es la atmósfera?

La atmósfera es una capa gaseosa de aproximadamente 10000 km de espesor que rodea la litosfera e hidrosfera. Está compuesta de gases y de partículas sólidas y líquidas en suspensión atraídas por la gravedad terrestre. En ella se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta, regula la entrada y salidos de energía de la tierra y es el principal medio de transferencia del calor.

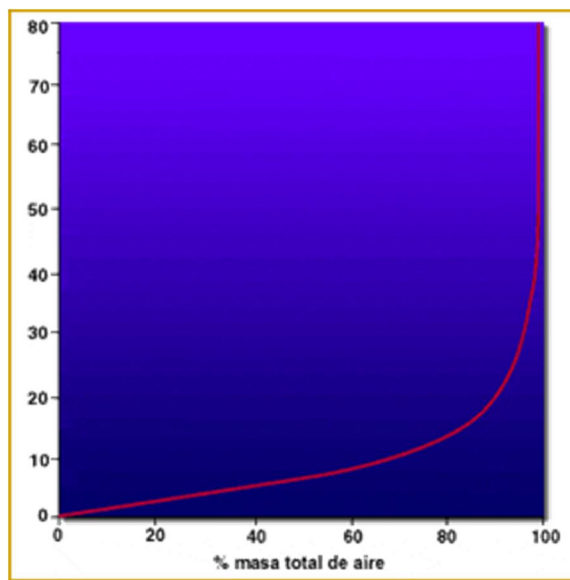
Figura 5. Capas de la Tierra



Fuente: *Estructura interna de la tierra*. <https://historiaybiografias.com/tierra/>. Consulta: agosto 2017.

Por compresión, el mayor porcentaje de la masa atmosférica se encuentra concentrado en los primeros kilómetros. Es así como el 50 % de ella se localiza bajo los 5 km, el 66 % bajo los 10 km y sobre los 60 km se encuentra solo una milésima parte.

Figura 6. **Porcentaje de masa total de la atmósfera, inferior a los 80 km**



Fuente: *Definición y masa total*. http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/fratmosf.htm. Consulta: agosto 2017.

2.2. **Propiedades fundamentales de la atmósfera**

La atmósfera posee propiedades relacionadas con su estado físico y composición química.

2.2.1. Composición de la atmósfera

Los gases fundamentales que forman la atmósfera son: nitrógeno (78,084 %), oxígeno (20,946 %), argón (0,934 %) y dióxido de carbono (0,033 %). Otros gases de interés presentes en la atmósfera son el vapor de agua, el ozono y diferentes óxidos.

También hay partículas de polvo en suspensión como, por ejemplo, partículas inorgánicas, pequeños organismos o restos de ellos y sal marina.

El aire se encuentra concentrado cerca de la superficie, comprimido por la atracción de la gravedad y, conforme aumenta la altura, la densidad de la atmósfera disminuye con gran rapidez. En los 5,5 kilómetros más cercanos a la superficie se encuentra la mitad de la masa total y antes de los 15 kilómetros de altura está el 95 % de toda la materia atmosférica.

Tabla II. **Composición media de la atmósfera**

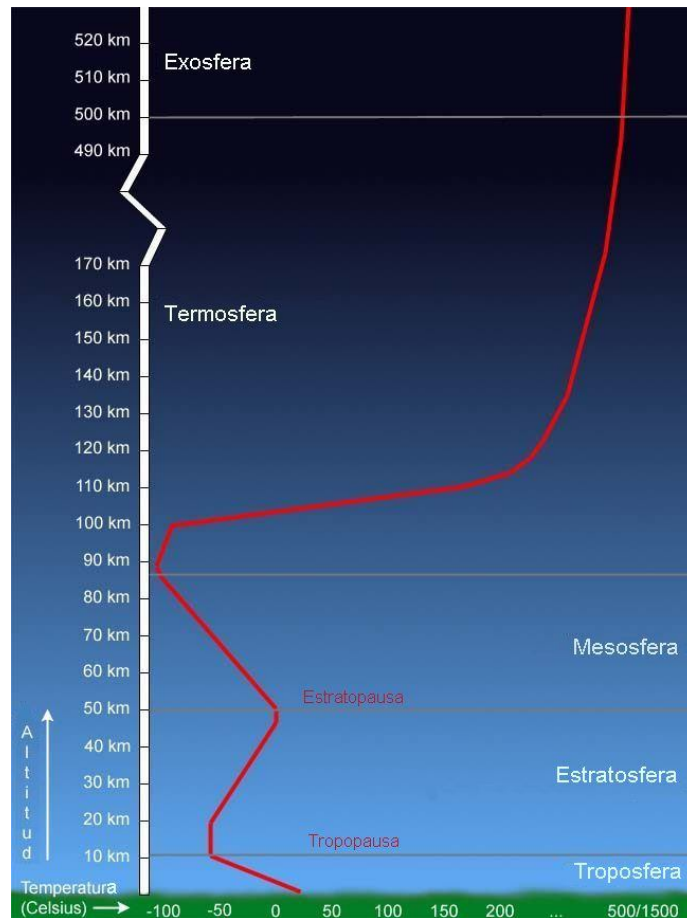
Gas	Composición en volumen (ppm)
N ₂	780,900
O ₂	209,500
A	9,300
CO ₂	300
Ne	18
He	5.2
CH ₄	2.2
Kr	1
N ₂ O	1
H ₂	0.5
Xe	0.08
O ₃	0.02
NH ₃	0.006
NO ₂	0.001
NO	0.0006
SO ₂	0.0002
H ₂ S	0.0002

Fuente: KIELY, Gerard. *Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. p. 134.

2.2.2. Estructura de la atmósfera de la tierra

La capa de gas que rodea a la tierra varía en estructura en la medida en que la distancia aumenta extremadamente desde la superficie. La atmósfera de la tierra está dividida en regiones basadas en primer lugar sobre consideraciones de gradientes de temperatura.

Figura 7. **Perfil vertical de la temperatura de las regiones atmosféricas de la tierra**



Fuente: *El Planeta Tierra*. <http://www.jmarcano.com/planeta/planet/beginner/atmosfera3.html>.

Consulta: agosto 2017.

La temperatura en la superficie varía desde bajo cero °C en las regiones polares y las áreas de alta montaña hasta valores de aproximadamente de 70 °C en las regiones áridas de los desiertos. Las temperaturas correspondientes del aire próximo a la superficie de la tierra (unos pocos metros) son bajas por debajo de 0 °C y altas aproximadamente de 50 °C. En las áreas muy calientes, la

temperatura del aire es de 10 a 20 °C más fría que las temperaturas calientes de la superficie.

Generalmente, en las latitudes medias, la temperatura desciende con el aumento de la altitud en la troposfera. Esto se conoce como gradiente de temperatura positivo. El aumento continúa hasta una altitud conocida como la tropopausa, por encima del cual la temperatura aumenta otra vez en la región conocida como la estratosfera. La altura de la troposfera es aproximadamente de 10 km por encima de la superficie terrestre, mientras que la estratosfera se extiende de 20 a 30 km más lejos.

La zona inferior de 0 a 2 km de la troposfera se puede dividir además en ciertas regiones. Esta región entera (de 0 a 2 km) se denomina la capa límite atmosférica (CLA).

La CLA es aquella región donde la velocidad del viento está afectada por la resistencia cortante de la superficie terrestre. Es poco profunda en los océanos o las grandes aguas navegables interiores, donde alcanzan aproximadamente una altura de 500 m.

2.3. ¿Qué es el aire?

El aire no es más que una mezcla de una serie de gases. El aire atmosférico se compone de nitrógeno, oxígeno, que es la sustancia que permite la vida de animales y humanos, dióxido de carbono, vapor de agua y pequeñas cantidades de otros elementos (argón, neón, entre otros).

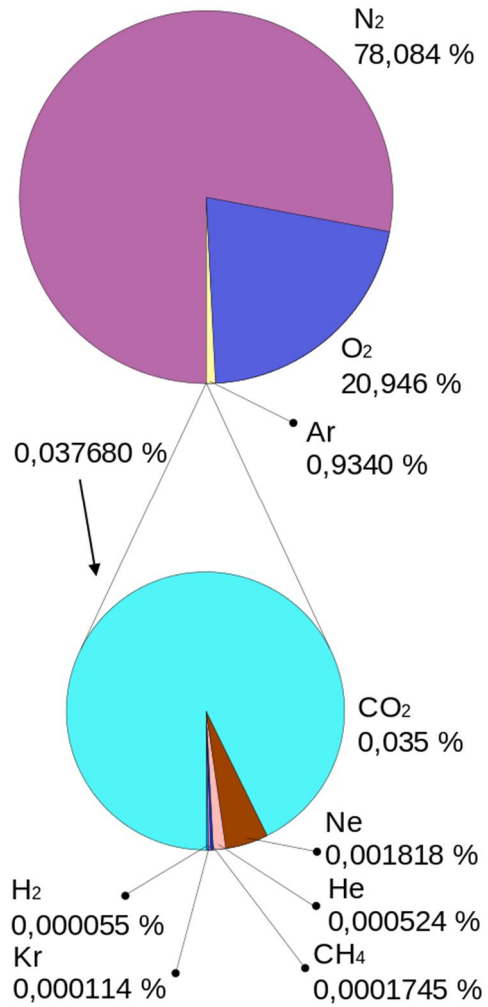
A mayor altura en la atmósfera el aire también contiene ozono, helio e hidrógeno. Normalmente, cuando el viento no sopla, no sentimos el aire que nos rodea. Pero tan pronto como el aire empieza a soplar, seremos capaces de sentir las moléculas de aire en nuestra cara.

2.4. ¿Cómo está compuesto el aire?

La composición del aire oscila según la estación del año y la altitud y especialmente variable es la presencia del agua. Cuando el aire contiene poca agua se denomina aire seco, mientras que si ocurre al contrario y hay abundancia de H₂O se dice del aire que es húmedo.

- Nitrógeno: 78 %. Diluye el oxígeno y previene la quema rápida en la superficie de la tierra. Los seres vivos lo necesitan para producir proteínas. El nitrógeno no puede ser utilizado directamente desde el aire. El ciclo del nitrógeno es la manera en que la naturaleza suministra el nitrógeno necesario para los seres vivos.
- Oxígeno: 21 %. Es utilizado por todos los seres vivos, esenciales para la respiración y necesarios para la combustión o la quema.
- Argón: 1 %. Se utiliza en bombillas de luz.
- Dióxido de carbono: 0,03 %. Las plantas lo utilizan para producir oxígeno. El dióxido de carbono actúa como una manta e impide el escape de calor en el espacio exterior. Los científicos creen que la extracción de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, agrega más dióxido de carbono a la atmósfera.
- Vapor de agua: 0,0 a 4,0 %. Esencial para los procesos de vida. También previene la pérdida de calor de la tierra.
- Gases de rastreo: son gases que se encuentran en cantidades muy pequeñas. Incluyen neón, helio, criptón y xenón.

Figura 8. **Composición actual del aire**



Fuente: LIFEDER. *Composición del aire atmosférico y contaminante.*
<https://www.lifeder.com/composicion-del-aire/>. Consulta: agosto 2017

2.5. Calidad del aire

La calidad del aire es una indicación de cuanto el aire esté exento de contaminantes atmosféricos, y por lo tanto apto para ser respirado, esto depende de la concentración de contaminantes que son dañinos a la salud y se encuentran diluidos en un área determinada, a esto se le llama inmisiones; por otro lado, a la expulsión, a la atmósfera, de sustancias líquidas, sólidas o gaseosas procedentes de fuentes fijas o móviles producto de la combustión o de procesos productivos se le llama emisión.

Actualmente los controles estatales y la reglamentación se han incrementado y la calidad de los combustibles también se ha mejorado. Sin embargo el tránsito vehicular se ha incrementado exponencialmente, transformándose en la principal fuente contaminante en las ciudades. A nivel mundial se ha descubierto que las emisiones de anhídrido carbónico derivadas de la combustión del petróleo están participando en forma determinante en el incremento de la temperatura global a causa del efecto invernadero. Las principales fuentes antropogénicas de contaminación del aire son:

- Las fábricas o instalaciones industriales, que no tengan los filtros adecuados para las emisiones aéreas.
- Centrales termoeléctricas.
- Vehículos automotores con motor de combustión interna.

La calidad del aire puede ser comprometida también por causas naturales como por ejemplo:

- Erupciones volcánicas.
- Vientos fuertes con transporte de partículas en suspensión.

2.5.1. ¿Qué factores determinan la calidad del aire?

El aire que respiramos tiene una composición muy compleja y contiene alrededor de mil compuestos diferentes. Los principales elementos que se encuentran en el aire son nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Sin estos tres compuestos, la vida en la Tierra sería imposible.

La calidad del aire está determinada por su composición. La presencia o ausencia de varias sustancias y sus concentraciones son los principales factores determinantes de la calidad del aire. Debido a esto, la calidad del aire se expresa mediante la concentración o intensidad de contaminantes, la presencia de microorganismos, o la apariencia física.

Ejemplos de contaminantes que son importantes indicadores de la calidad del aire son el dióxido de azufre y las partículas de polvo y suciedad.

2.6. Calidad del aire en Guatemala

La ciudad de Guatemala ha experimentado en las últimas dos décadas un rápido y desordenado crecimiento hacia los municipios que componen la totalidad del departamento, con limitaciones de infraestructura, servicios básicos y un incremento desmedido del tráfico vehicular. Este crecimiento ha traído como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira, especialmente en zonas y horas pico de alto flujo vehicular, terminales de transporte, salida y acceso de autobuses; repercutiendo en el estado de salud de las personas; por lo que se hace necesario un estricto control de la fuente principal de la contaminación atmosférica: el parque automotor.

Pese a que la contaminación del aire tiene manifestaciones perceptibles por los sentidos humanos, como olor, color, irritabilidad, entre otros.; no es un método confiable para medir los niveles de contaminación del aire y por lo tanto, es necesario recurrir a métodos científicos capaces de medir con exactitud la concentración de determinados contaminantes en el aire.

El monitoreo de la calidad del aire es una importante herramienta para las autoridades ambientales en su labor de protección de la calidad del medio ambiente. En Guatemala, actualmente existe una red de monitoreo de contaminantes atmosféricos, la cual ha estado a cargo de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con seis puntos de control que han funcionado en diferentes periodos de registro, ubicados en:

- Avenida Petapa, zona 12 (alto flujo vehicular).
- Museo de la Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 1 (bajo flujo vehicular).
- Incap, zona 11 (alto flujo vehicular).
- Calzada San Juan, zona 7 (alto flujo vehicular).
- Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12 (bajo flujo vehicular).
- Insivumeh, zona 13 (bajo flujo vehicular).

2.7. Contaminación atmosférica

También conocida como contaminación del aire debido a la presencia de sustancias contaminantes en este, que no se dispersan en forma adecuada y afectan la salud o el bienestar de las personas, o producen otros efectos dañinos en el ambiente; tiene su origen en la actividad industrial (fuentes fijas) y la utilización de vehículos (fuentes móviles), principalmente.

La contaminación liberada a la atmósfera en forma de gases, vapores o partículas sólidas capaces de mantenerse en suspensión con valores superiores a los normales, perjudica la vida y la salud, tanto del ser humano como de los ecosistemas y sus componentes.

Tabla III. **Concentraciones de compuestos en atmósfera limpia y contaminada**

Parámetro	Concentración (ppb)		Tiempos de residencia aproximados
	Atmósfera limpia	Atmósfera contaminada	
Partículas		> 100 g/m ³	
CO	120	1,000-10,000	65 días
CO ₂	320,000	400,000	15 años
SO ₂	0.2-10	20-200	40 días
NO	0.01-0.6	50-750	1 día
NO ₂	0.1-1	50-250	1 día
HNO ₂	0.001	1-8	
HNO ₃	0.02-0.3	3-50	1 día
O ₃	20-80	100-500	
NH ₃	1-6	10-25	20 días
CH ₄	1,500	2,500	8-10 años
N ₂ O	300		10-150 años
H ₂ S	0.2		
Pb	5 x 10 ⁻³ µg/m ³	0.5-3 µg/m ³	

Fuente: KIELY, Gerard. *Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. p. 456.

2.7.1. ¿Qué es un contaminante atmosférico?

Los contaminantes atmosféricos son aquellas materias o formas de energía que no están de manera natural en la atmósfera o que sí están presentes, pero en unas concentraciones diferentes.

2.7.1.1. Tipos de contaminantes atmosféricos

- Gases: son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los clorofluorocarbonos (CFC), entre otros.
- Partículas: provienen de humos o cenizas de las combustiones, de los aerosoles, polvo de minas o ciertas industrias, entre otros.
- Energía: se encuentran dentro de esta clasificación lo que conocemos como contaminación acústica, contaminación lumínica o contaminación electromagnética.

2.7.1.2. Contaminantes atmosféricos según su origen

- Contaminantes primarios: son aquellos que se emiten desde un foco identificable.
 - SO₂
 - CO
 - NO_x
 - SO_x
 - Partículas
 - Hidrocarburos
 - Metales

- Contaminantes secundarios: son los que se forman en la atmósfera por reacciones químicas.
 - O₃
 - Otros oxidantes fotoquímicos –nitrato de peroxiacetilo
 - Hidrocarburos oxidados

- Contaminantes de referencia: Se definen por los EE. UU., UE y OMS.
 - CO
 - NO₂
 - O₃
 - SO₂
 - PM10 (materia particulada de diámetro < 10 m)
 - Plomo

2.7.1.3. Principales contaminantes atmosféricos en Guatemala

“Guatemala contribuye únicamente con el 0,04 % del total anual mundial de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (WRI, 2008). Sin embargo, los resultados preliminares del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (MARN, 2007) revelan que, durante el pasado decenio, las emisiones totales aumentaron en 13.8 millones de toneladas de CO₂, equivalentes a un aumento de 184 % respecto a los datos reportados para el año base de 1990.”¹⁰

¹⁰ IARNA. *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. p. 164.

En términos generales, todos los gases de efecto invernadero (GEI) muestran incrementos netos en sus emisiones, aunque no uniformes; el mayor incremento fue en CO₂ y el menor en dióxido de azufre (SO₂).

Se observa también una disminución en la capacidad de remover (absorber) CO₂ en un 38 %, lo cual significa que el país se encamina hacia un balance desfavorable entre la capacidad de emisión y de absorción de GEI.

Tabla IV. **Emisiones nacionales de gases de efecto invernadero durante el periodo 1990-2000, en miles de toneladas**

Año	Dióxido de carbono (CO ₂)		Metano (CH ₄)	Óxido nitroso (N ₂ O)	Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Monóxido de carbono (CO)	Compuestos volátiles (COVDM)	Dióxido de azufre (SO ₂)
	Emisiones	Remociones ^{*/}						
1990	7, 489.62	-42, 903.73	199.56	20.71	43.79	961.66	105.95	74.5
2000	21, 320.82	-26, 718.01	230.29	55.33	89.72	1, 651.45	3, 256.85	75.15
Diferencia	13, 831.20	-16, 185.71	30.74	34.62	45.93	689.8	3, 150.90	0.65
Fuente: MARN, 2007.								
*/ Los valores con signo negativo significan que son absorciones de CO ₂ .								

Fuente: IARNA. *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. p. 164.

2.7.1.3.1. Partículas totales suspendidas

Las partículas totales en suspensión (PTS) son partículas diminutas, sólidas y líquidas, presentes en el aire en gran número, originadas por polvo de construcciones, procesos industriales (molido de piedra, fabricación de cemento, entre otros), incendios forestales, la quema de cultivos, combustión de productos

derivados del petróleo y carbón vegetal utilizados en actividades industriales, domésticas y de transporte.

También tienen su origen natural en las erupciones volcánicas y procesos de erosión. Su medición se realiza con análisis gravimétrico con tiempo de 24 horas de exposición de un impacto de alto volumen.

Los valores guía o normas utilizadas para este contaminante son los valores de referencia de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos que para una medición de 24 horas es de 240 mg/m³ y para un promedio anual es de 75 mg/m³.

El índice de concentración de partículas totales suspendidas, PTS.

$$PTS = \frac{\text{Número de casos superiores al valor guía } n}{\text{Total de observaciones muestrales } N}$$

Es la proporción entre el número de casos superiores al valor guía de 75 mg/m³, respecto al total de observaciones muestrales tomadas en el área urbana durante el periodo comprendido del año 1995 a 2002.

2.7.1.3.2. Partículas menores a 10 micras

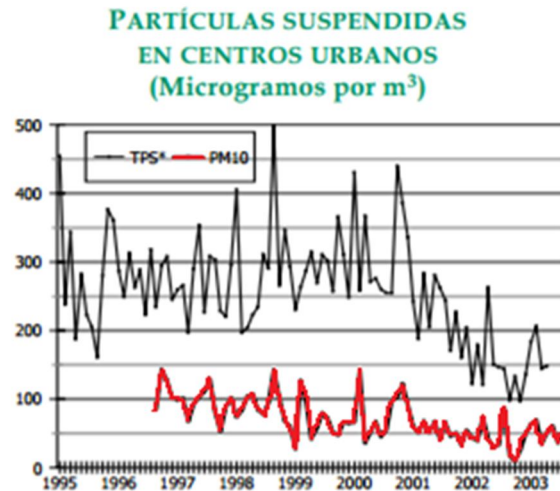
Las partículas totales en suspensión en su fracción respirable se conocen como PM₁₀ y son todas aquellas partículas sólidas o líquidas dispersas en el aire con un diámetro menor a 10 micras. Por lo regular se conforman por polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen; se originan principalmente de los procesos de combustión industrial, doméstica y de transporte; de forma natural se producen por erosión, erupciones volcánicas e incendios forestales.

Las partículas PM_{10} tienen la particularidad de ingresar y quedarse en los pulmones, sirviendo como medio de transporte para sustancias altamente peligrosas como metales pesados e hidrocarburos y por tanto tienen un efecto altamente dañino en la salud. Se mide PM_{10} por método gravimétrico con un tiempo de exposición de 24 horas con un filtro adecuado para este contaminante.

Para este contaminante los valores guías o normas utilizados son los valores de referencia de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos que para una medición de 24 horas es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y promedio anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El índice de concentración de partículas menores a 10 micras es la proporción entre el número de casos superiores al valor guía, respecto al total de observaciones muestrales tomadas en el área urbana durante el periodo comprendido de 1995 a 2002.

Figura 9. **Partículas suspendidas en centros urbanos**



Fuente: IARNA. *Clima y Calidad del Aire*. [www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F %20- %20Clima %20y %20calidad %20del %20aire.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F%20-%20Clima%20y%20calidad%20del%20aire.pdf). Consulta: abril 2016.

El comportamiento temporal promedio del material particulado, figura 9, se tiene en cuenta los altos niveles de emisión promovidos por los incendios forestales de 1998 y la erupción del volcán de Pacaya en el 2000.

2.7.1.3.3. **Partículas menores a 2,5 micras**

Las PM_{2,5} tienen su origen principalmente en fuentes de carácter antropogénico como las emisiones de los vehículos de diésel, mientras que las partículas de mayor tamaño pueden tener en su composición un importante componente de tipo natural, tales como partículas de polvo procedente de las intrusiones de viento del norte de África (polvo del Sahara).

Las partículas suspendidas con fracciones menores a 2,5 micrómetros son las que por su tamaño pueden penetrar más profundamente en el sistema respiratorio, hasta el punto de poder interferir directamente en el intercambio gaseoso en la sangre en los alveolos pulmonares, provocando no solo problemas del sistema respiratorio sino problemas cardiacos; siendo los más afectados niños y ancianos.

Para este contaminante los valores guías utilizados son los valores de referencia de la Organización Mundial de la Salud que para una medición de 24 horas establece que la concentración de PM_{2,5} debe ser como máximo de 25 µg/m³ y anualmente un promedio de 10 µg/m³.

2.7.1.3.4. Dióxido de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son emitidos principalmente por los vehículos. Dentro de este grupo de contaminantes gaseosos, el dióxido de nitrógeno es el componente más importante por su agresividad química. El dióxido de nitrógeno contribuye a la formación del smog fotoquímico y deposición o lluvia ácida (al combinarse con el agua forma ácido nítrico). El NO₂ se monitorea con tubos pasivos que se exponen durante 30 días y luego se analizan colorimétricamente.

Las exposiciones directas al NO₂ pueden incrementar la susceptibilidad a infecciones respiratorias y disminuyen la eficiencia respiratoria y la función pulmonar en asmáticos.

El dióxido de nitrógeno causa daños a bosques, sistemas acuáticos, edificios, monumentos históricos y provoca corrosión de metales debido a la lluvia ácida.

Para el NO₂ el valor guía utilizado es el valor de referencia de la Organización Mundial de la Salud que para un promedio anual es de 40 µg/m³.

El índice de concentración de dióxido de nitrógeno es la proporción entre el número de casos superiores al valor guía de 40 µg/m³, respecto al total de observaciones muestrales tomadas en el área urbana durante el periodo comprendido de 1995 a 2002. La unidad de medida de gas emitido es microgramos por metro cúbico.

2.7.1.3.5. Ozono

El ozono es una especie reactiva de oxígeno. En la capa estratosférica actúa como filtro de las radiaciones ultravioletas, previniendo el ingreso de los rayos más peligrosos para el medio ambiente y el hombre, pero en la tropósfera (baja atmósfera) los altos niveles representan un riesgo para la salud humana y la vegetación.

Las emisiones de los vehículos, óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos en especial, son factores importantes en la formación de ozono, en general los valores de O₃ son mayores fuera de la ciudad porque el ozono se forma a través de una reacción fotoquímica.

Se monitorea con tubos pasivos expuestos durante siete días y luego se analizan colorimétricamente. Actualmente el ozono se monitorea de forma continua con monitores automáticos.

Disminuye la visibilidad ya que en conjunto con los otros contaminantes provocan el smog (fenómeno de los denominados de obscurecimiento que

resulta de la niebla natural contaminada por contaminantes industriales o mezcla de humo y niebla).

Para el ozono el valor guía utilizado es el valor de referencia de la Organización Mundial de la Salud, que en promedio anual es de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El índice de concentración de ozono es la proporción entre el número de casos superiores al valor guía de $60 \text{ mg}/\text{m}^3$, respecto al total de observaciones muestrales tomadas en el área urbana durante el período comprendido de 1995 a 2002.

Figura 10. **Concentración de NO_2 y O_3**



Fuente: IARNA. *Clima y Calidad del Aire*. [www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F %20- %20Clima %20y %20calidad %20del %20aire.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F%20-%20Clima%20y%20calidad%20del%20aire.pdf). Consulta: abril 2016.

La gráfica anterior indica que el ozono se ha reducido notablemente entre 1995 y 2003.

2.7.1.3.6. Monóxido de carbono

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro y tóxico. Se encuentra en la atmósfera y se produce por la combustión incompleta de productos carbonosos y derivados del petróleo, siendo una de las sustancias más vigiladas en los estudios de contaminación atmosférica de las ciudades.

Una importante fuente de emisión de monóxido de carbono son los motores en mal estado ya que al no realizar una combustión adecuada liberan grandes cantidades de dicho gas; el cual es un problema muy frecuente en nuestro medio.

Para este contaminante los valores guías utilizados son los valores de referencia de la Organización Mundial de la Salud que para una medición de 8 horas establece que la concentración de CO debe ser como máximo de 9 ppm.

El índice de concentración de carbono es la proporción entre el número de casos superiores al valor guía de 9 ppm para una medición de 8 horas, respecto al total de observaciones muestrales tomadas en el área urbana.

Figura 11. **Concentración de CO**



Fuente: IARNA. *Clima y Calidad del Aire*. [www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F %20- %20Clima %20y %20calidad %20del %20aire.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F%20-%20Clima%20y%20calidad%20del%20aire.pdf). Consulta: abril 2016.

2.7.1.3.7. Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es un gas que pertenece a la familia de los gases de óxidos de azufre, que se producen principalmente de la combustión de compuestos que contienen azufre, carbón y aceite y durante ciertos procesos industriales y en la producción de acero.

La vida media de este gas en la atmósfera es corta, de unos 2 a 4 días. Casi la mitad vuelve a depositarse en la superficie seca (deposición seca) o húmeda (lluvia) y el resto se convierte en iones sulfato (SO_4^{2-}).

Las emisiones de SO_2 producen lesiones en el follaje y fruto de árboles y plantas, en selvas, bosques y áreas de cultivo, debido a que alteran la fotosíntesis.

2.7.1.3.8. Deposición ácida y sólidos totales de precipitación

La deposición ácida también recibe el nombre de lluvia ácida y se origina cuando se liberan contaminantes gaseosos a la atmósfera, como el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno los cuales al reaccionar con el agua del ambiente forman ácido sulfúrico y ácido nítrico respectivamente.

Los sólidos totales de precipitación son aquellos que se depositan por la lluvia y se constituyen en partículas sólidas solubles o insolubles en agua.

Para la deposición ácida el valor guía utilizado es el valor de referencia de la Organización Mundial de la Salud que para un promedio mensual es de 5,5 a 7,5 unidades de pH. Para los sólidos totales se utiliza la normativa alemana que es de 0,65 g/m²/día.

2.7.2. Fuentes de contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica proviene de fuentes diversas, las cuales son:

2.7.2.1. Fuentes naturales

Las emisiones de contaminantes naturales varían de un lugar a otro, con las condiciones estacionales, geológicas y meteorológicas y con el tipo de vegetación. Las actividades humanas también pueden contribuir a crear condiciones que aumentan la proporción de contaminantes de fuentes naturales.

Las erupciones volcánicas presentan una fuente natural concentrada y localizada de todo tipo de gases y partículas. En este caso, las partículas varían de tamaño desde cantos rodados hasta partículas muy pequeñas (0,001 μm).

La energía de las erupciones volcánicas en muchos casos es suficiente para forzar el paso de gases y partículas pequeñas a través de las capas inferiores de la atmosfera hacia la estratosfera, donde los procesos naturales de eliminación son muy lentos. En consecuencia, estos contaminantes permanecen suspendidos en la atmósfera durante largos periodos.

2.7.2.2. Fuentes domésticas

En las áreas residenciales las actividades domésticas son la causa principal de la emisión de contaminantes.

Tabla V. **Contaminantes emitidos según actividad doméstica**

Actividad	Contaminantes emitidos
Calentamiento de espacios	CO, CO ₂ , NO _x , SO _x , hollín, humo (si se queman combustibles fósiles en la residencia).
Cocina	Grasa (como sólidos, líquidos y vapores), partículas, olores.
Limpieza	Vapores de disolventes, polvo, pelusa, propelentes de latas de aerosol.
Jardinería	Plaguicidas, fertilizantes (algunos pueden ser muy tóxicos).
Pintura	Principalmente vapores de disolventes.
Lavado de ropa	Partículas de detergente y de jabón, pelusa.

Fuente: GLYNN, Henry. *Ingeniería Ambiental*. p. 510.

Otra fuente de contaminación del aire, derivada de actividades domésticas y comerciales, se asocia con la eliminación de residuos sólidos. En el pasado, la

quema de hojas, los incineradores de patio y los tiraderos al aire libre eran fuentes comunes de emisiones de partículas y de gases. En la actualidad los residuos sólidos se eliminan en operaciones de relleno sanitario o por combustión en incineradores municipales grandes y eficientes.

2.7.2.3. Fuentes comerciales

Las fuentes comerciales de contaminación del aire incluyen las industrias de servicios públicos. Como ejemplo, la limpieza en seco de la ropa; casi todo el disolvente que se utiliza en el proceso se evapora hacia la atmósfera. Las emisiones por lavado en seco van desde 15,9 kg de disolvente perdido por 100 kg de ropa lavada en máquinas lavadores pequeñas no controladas hasta menos de 10 kg de disolvente perdido por 100 kg de ropa lavada en máquinas industriales grandes.

Otros establecimientos o actividades comerciales que liberan contaminantes en la atmósfera incluyen restaurantes, hoteles, escuelas, la imprenta y la aplicación de pintura. La preparación de alimentos origina la eliminación de 0,5 a 1 kg de residuos sólidos alimenticios. Se producen alrededor de 5 kg de residuos sólidos por cama de hospital diarios y 4 kg de residuos por grupo escolar.

2.7.2.4. Fuentes industriales

Las fuentes industriales de contaminación del aire son las más notorias porque en general las emisiones se descargan por una sola chimenea o conducto. Cuando un contaminante industrial específico es la principal sustancia indeseable en una comunidad, su origen se puede hallar con base en el conocimiento de los procesos industriales que se utilizan.

Cualquier operación de combustión a alta temperatura produce óxidos de nitrógeno (NO_x). Entre las fuentes de proceso están las plantas de fabricación de fertilizantes y explosivos.

Los óxidos de azufre (SO_x) principalmente se emiten como SO_2 en la combustión de combustible y carbón en fuentes estacionarias. El azufre del gas natural normalmente se elimina en el pozo para que el gas se pueda utilizar en aplicaciones domésticas. Se emite una cantidad muy pequeña de SO_x en la combustión de gasolina y combustibles diésel. La refinación de minerales sulfurados genera cantidades muy grandes de SO_2 .

Las refinerías de petróleo también son fuentes importantes de SO_2 . Los óxidos de azufre también reaccionan con el agua atmosférica para formar H_2SO_4 en cuestión de horas. El trióxido de azufre también se combina con óxidos de la atmósfera para formar aerosoles sulfúricos, los cuales pueden llegar a constituir del 5 al 20 % de la materia particulada total en suspensión (MPTS).

Se emite sulfuro de hidrógeno en grandes cantidades en las fábricas de papel, las plantas de limpieza y procesamiento de gas natural, las refinerías de petróleo y ciertas plantas que fabrican fibras sintéticas. El H_2S se oxida en cuestión de horas en la atmósfera para formar SO_2 y H_2O .

Se emite monóxido de carbono en concentraciones altas en la producción de hierro colado y en otros procesos metalúrgicos donde es deseable reducir al mínimo la presencia de oxígeno.

Se desprenden grandes cantidades de compuestos orgánicos volátiles de una multitud de procesos industriales que por lo general tienen relación con las

industrias del petróleo y del gas natural, o con industrias que utilizan sus productos. Estos compuestos pueden hallarse en forma de vapor, líquido o partículas, como en el caso de las operaciones de pavimentación con asfalto.

Las partículas pueden ser líquidas o sólidas. La naturaleza química y física de las partículas es muy importante para valorar la trascendencia de las emisiones. Los óxidos metálicos de la aplicación de pintura por aspersion y de las industrias de recubrimientos, así como el polvo de catalizadores de las refinerías, las fibras de asbesto de las industrias de aislantes, ropa y tubería, y también las emisiones químicas especiales como bario, berilio, boro y arsénico de las industrias de procesamiento o manufactura de metales, e inclusive cadmio, plomo y mercurio de las baterías, todos ellos se designan como partículas peligrosas porque son muy tóxicas o carcinógenas y su tamaño corresponde al intervalo respirable.

Las emisiones de partículas industriales más grandes son la ceniza de la combustión de carbón, petróleo y basura, las partículas de carbón de la combustión y procesamiento de combustibles fósiles e incluso de gas natural, y por último las partículas de cantería y minería y de industrias asociadas a ellas.

2.7.2.5. Fuentes móviles

El CO y los COV (casi todos como hidrocarburos) son productos de una combustión ineficiente, los cuales se eliminarían quemando el combustible hasta CO_2 y H_2O en el motor del vehículo para producir potencia.

La mayor parte de las emisiones de COV proceden del tubo de escape. Estas se controlan empleando reactores catalíticos e inyectando aire en los puertos de escape del motor para quemar los hidrocarburos que se emiten en

esta zona de alta temperatura. Sin embargo, más del 20 % de las emisiones de COV no controladas de los motores de automóvil provienen del respiradero del cárter (escape de gases de los cilindros y aceite lubricante evaporado) y del desfogue del carburador a la atmósfera.

Estas emisiones se controlan utilizando un tubo de desfogue del cárter conectado al conducto de toma de aire del motor (requiere una válvula de control de contaminación) y una unidad de absorción llamada “cánister de carbón” para las pérdidas por evaporación.

La tabla V muestra datos comparativos de emisiones para motores diésel y gasolina, de servicio pesado y bien afinado. Para los modelos de 1984, suponiendo la operación del vehículo caliente a un promedio de 19,6 mi/h (31,4 km/h) en tráfico urbano y con un motor nuevo.

Tabla VI. **Emisiones comparativas de motores de servicio pesados (camiones) g/mi (g/km) con gasolina y con diésel**

Contaminante	Gasolina	Diésel
CO	97.1 (60.6)	8.8 (5.5)
HC	10.5 (6.5)	3.3 (2.1)
NO ₂	4.8 (3.0)	13.9 (8.6)

Fuente: GLYNN, Henry. *Ingeniería Ambiental*. p. 521.

Los motores pequeños de bote y herramientas de jardinería también pueden contribuir de manera sustancial al problema general de la contaminación del aire. La tabla VI muestra los factores de emisión para motores comparables de dos y de cuatro tiempo (por lo general, para los motores de dos tiempos se mezcla aceite con gasolina). El nivel mucho mayor de emisión de hidrocarburos de los motores de dos tiempos en comparación con los de cuatro tiempos es evidente.

Tabla VII. **Emisiones de motores pequeños de servicio con gasolina de dos y cuatro tiempos g/hp-h**

	HC			CO	NO _x	SO _x
	Desfogue de escape	Cárter	Evaporación y recarga de combustible			
Ciclo de dos tiempos	437	Nd	22.5	1384	0.9	0.5
Ciclo de cuatro tiempos	79.2	12.4	9.8	817	0.8	0.4

Fuente: GLYNN, Henry. *Ingeniería Ambiental*. p. 521.

2.7.3. Exposición de la población urbana a niveles de contaminación

Los datos reportados por el Laboratorio de Monitoreo del Aire para la ciudad de Guatemala de la Universidad de San Carlos de Guatemala, sumados a los resultados de la contaminación antropogénica de impacto global indican que, si bien no todos los contaminantes analizados –partículas totales en suspensión (PTS), partículas totales en suspensión en su fracción (PM₁₀), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y lluvia ácida– exceden en todas las mediciones los valores guías sugeridos, los puntos de muestreo que presentan mayor grado de contaminación del aire en la ciudad de Guatemala son los que se localizan en las zonas de alto tránsito vehicular.

Durante la época seca se reportan resultados más elevados para la mayoría de los contaminantes. El contaminante de mayor presencia en las estaciones muestreadas en el 2007 fueron las PM₁₀. Junto a éstas, las PTS también

rebasaron los promedios anuales sugeridos, y representan un riesgo inminente para los habitantes de los alrededores de los puntos de muestreo.

Tabla VIII. **Calidad del aire en la ciudad de Guatemala, según año y contaminante (2000-2007)**

Año	Contaminante ^{1/}	Promedio Anual	Punto de muestro ^{2/}						
			CAB	CSJ	EFPEM	INCAP	INSIVUMEH	MUSAC	USAC
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
2000	CO	1.5	1.90	3.80	2.32	-	0.25	0.24	0.20
	PTS	237.0	290	415	307	266	130	141	110
	PM10	63.0	81	105	65	71	39	47	33
	NO ₂	33.3	38	35	39	48	19	38	16
	O ₃	25.9	21	19	18	44	32	19	28
2001	CO	1.3	1.14	3.21	2.18	1.43	0.30	0.86	0.16
	PTS	190.3	172	281	246	220	124	117	172
	PM10	48.1	49	54	60	59	40	33	42
	NO ₂	34.0	42	38	36	43	20	39	20
	O ₃	16.1	13	16	10	14	23	13	24
2002	CO	1.3	0.53	3.06	1.77	2.49	0.47	0.57	0.26
	PTS	137.4	133	-	-	276	81	92	105
	PM10	41.6	42	-	-	67	35	30	34
	NO ₂	31.4	42	39	38	38	17	25	21
	PTS	229.2	301	-	-	136	209	376	124
2003	PM10	58.8	59	-	-	71	49	61	54
	NO ₂	39.8	60	47	49	36	24	35	28
	PTS	146.4	-	-	-	223	145	114	103
	PM10	51.2	-	-	-	82	31	54	38
	NO ₂	33.6	-	40	45	41	23	30	22
2004	PTS	123.0	-	-	-	213	83	94	102
	PM10	48.5	-	-	-	83	33	30	48
	NO ₂	36.3	-	47	44	41	24	31	31
	PTS	103.8	-	-	-	193	78	87	57
	PM10	63.0	-	-	-	90	45	55	62
2005	NO ₂	32.5	-	43	45	41	21	28	17
	SO ₂	4.0	-	-	-	7	-	2	3
	PTS	85.5	-	-	-	143	110	42	47
	PM10	56.0	-	-	-	80	49	53	42
	NO ₂	29.2	-	37	36	38	19	25	20
2006	SO ₂	29.0	-	-	-	43	-	33	11

Fuente: IARNA. *Clima y Calidad del Aire*. [www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F %20- %20Clima %20y %20calidad %20del %20aire.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F%20-%20Clima%20y%20calidad%20del%20aire.pdf). Consulta: abril 2016.

2.7.3.1. ¿Cómo afecta la contaminación atmosférica la salud de los seres humanos y los ecosistemas?

2.7.3.1.1. Efectos en la salud humana

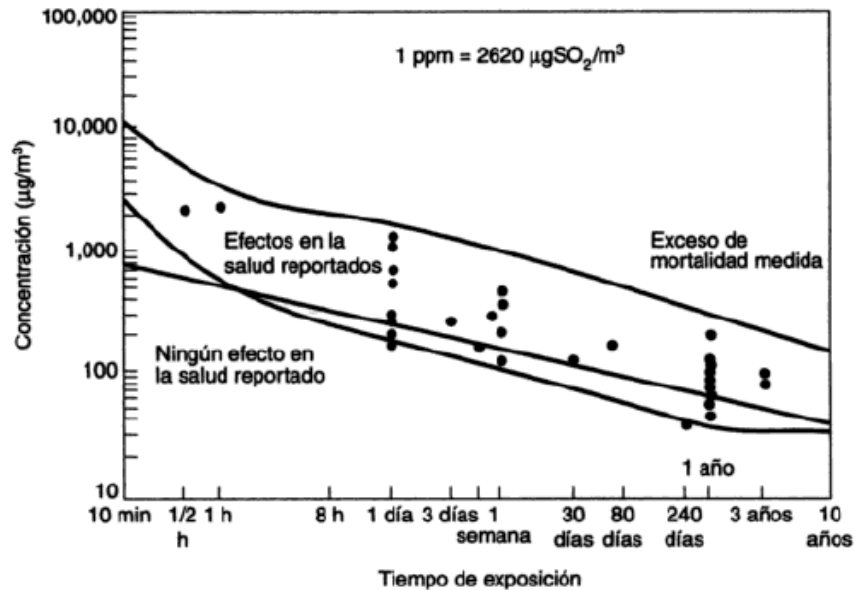
Los efectos en la salud humana eran la consideración dominante en los primeros episodios de la contaminación del aire por razones obvias.

Ciertas partículas son especialmente dañinas porque absorben o adsorben gases que causan una irritación local más intensa. Además, los gases penetran en los huecos más profundos de los pulmones. Tanto las partículas como los gases que entran al cuerpo por el sistema respiratorio pueden afectar el sistema gastrointestinal.

Ciertas sustancias químicas, como el plomo, entran en el torrente sanguíneo ya sea desde el sistema digestivo (por ingestión) o atravesando las membranas pulmonares (el sistema respiratorio), y el tritio que transporta el aire, los plaguicidas o herbicidas sistémicos, y algunas sustancias químicas pueden entrar al torrente sanguíneo por la piel.

Cada contaminante afecta el cuerpo humano de forma diferente. La figura 11 muestra los efectos en los humanos que produce la exposición al dióxido de azufre (SO₂). Los efectos del monóxido de carbono en la salud son detectables con claridad al 4 % de carboxihemoglobina (COHb) en la sangre, y posiblemente hasta al 2,5 % de COHb.

Figura 12. Efectos del SO₂ en la salud



Fuente: GLYNN, Henry. *Ingeniería Ambiental*. p. 500.

- Materia particulada (incluye sólidos y líquidos). Los efectos principales en la salud que son causa de preocupación incluyen los efectos en la respiración y el sistema respiratorio, el agravamiento de afecciones respiratorias y cardiovasculares ya existentes, daños al tejido pulmonar, carcinogénesis y mortalidad prematura.
- Dióxido de azufre (gas incoloro; umbral de sabor 0,3 ppm; umbral de olor 0,5 ppm). Los efectos principales en la salud incluyen efectos en la respiración, afecciones respiratorias, debilitamiento de las defensas pulmonares, agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares ya existentes, y muerte. Entre las personas sensibles están los asmáticos y quienes padecen enfermedades pulmonares crónicas o afecciones cardiovasculares. Los ancianos y los niños son los más afectados.

- Monóxido de carbono (gas incoloro, insípido e inodoro a concentraciones atmosféricas). La amenaza para la salud que representa el monóxido de carbono es mayor para quienes padecen afecciones cardiovasculares porque reduce el aporte de oxígeno a órganos y tejidos. A concentraciones altas el monóxido de carbono menoscaba la percepción visual, la destreza manual y la capacidad mental.
- Óxidos de nitrógeno. El NO es un gas altamente reactivo de color pardo rojizo (el umbral de olor es de alrededor de 0,2 ppm) que desempeña un papel importante en la formación de ozono en la troposfera. El dióxido de nitrógeno (NO₂) irrita los pulmones, causa bronquitis y neumonía, reduce la resistencia a las infecciones respiratorias y desempeña un papel importante en la formación de ozono en la troposfera.
- Ozono. Este gas incoloro (umbral de olor: alrededor de 0,03 ppm) afecta a niños y adultos sanos además de las personas con problemas en el sistema respiratorio. El ozono reduce la función pulmonar, por lo común en asociación con tos, estornudos, dolor en el pecho y congestión pulmonar. Las concentraciones altas de ozono se asocian a menudo con irritación ocular, aunque la causa de esto puede no ser el ozono mismo.
- Plomo. La incorporación de plomo por inhalación o ingestión puede proceder de alimentos, agua, suelos o polvo. La exposición a concentraciones altas puede causar ataques, retardo mental y trastornos del comportamiento. Los fetos, los bebés y los niños son especialmente susceptibles a las dosis bajas, las cuales causan trastornos del sistema nervioso central. La incorporación de plomo puede contribuir a los problemas de hipertensión arterial y afecciones cardíacas.

2.7.3.1.2. Efectos en el ecosistema

Los efectos perjudiciales de la contaminación del aire no se limitan a los que tienen que ver con la salud humana. El daño a los vegetales suele observarse en el fruto o las flores, y en ambos casos reduce de manera significativa el valor del cultivo. El flúor afecta las plantas a concentraciones que tienen órdenes de magnitud bastante inferiores a las que afectan la salud humana.

El flúor tiene un efecto a concentraciones aun menores cuando se incorpora en arbustos, árboles o hierbas que después sirven de alimento al ganado u otros animales. Los animales pueden presentar fluorosis, aunque no se observen señales de daño a las plantas. Los animales actúan como concentradores del flúor, lo cual perjudica la salud del animal y reduce el valor del mismo o su capacidad de supervivencia. Ciertos metales pesados, como mercurio, cadmio y plomo, así como la mayor parte de los radionúclidos, también se concentran en las plantas y los animales, a menudo en órganos específicos.

Las diversas plantas y animales tienen distinta susceptibilidad a los contaminantes. Por ejemplo, el arce de azúcar tolera concentraciones relativamente altas de dióxido de azufre solo, pero lo daña la exposición a SO₂ y O₃ en conjunto. El pino blanco, por otra parte, es muy sensible a cada uno de estos contaminantes por separado.

2.8. Gases de efecto invernadero

Los principales gases de invernadero en orden de contribución son: CO₂, CFC, CH₄, N₂O y O₃. Estos gases absorben la radiación solar entrante de onda corta (longitudes de onda <4μm).

Igualmente tienen la capacidad (cuando están en la atmósfera) de absorber parte de la energía irradiada por la tierra a unas longitudes de onda más largas ($>4\mu\text{m}$). Cada uno de los gases de invernadero posee sus propias bandas de longitudes de onda ideales en las cuales absorbe mejor la energía tanto de radiación solar como terráquea.

Por ejemplo, el CO_2 absorbe radiación térmica al menos en tres bandas, de 2,3 a 3,1, de 4,1 a 4,5 y de 13 a 18 μm . CH_4 absorbe radiación al menos en dos bandas estrechas centradas en 3,2 y 8 μm . El vapor de agua (H_2O) absorbe en bandas centradas en 0,95, 1,1, 0,4, 1,9, 2,7, 6,2 y por encima de 20 μm .

Además, varios de los gases de invernadero absorben radiación en las mismas longitudes de onda. Aunque algunos de los gases anteriormente mencionados absorben radiación tanto por encima como por debajo de 4 μm , el término de gas de invernadero se reserva a aquellos que absorben radiación por encima de 4 μm , es decir, gases que absorben la radiación terráquea de longitud de onda larga.

Por tanto estos gases atrapan buena parte de la energía radiante que emana de la Tierra, calentando así la atmósfera y en consecuencia radiando esta energía de vuelta a la Tierra y hacia el espacio exterior. Estos gases de invernadero tienen el efecto de una manta térmica que rodea al globo, elevando su temperatura.

2.9. Factores que influyen en la calidad del aire

Cualquier análisis sobre la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, debe considerar elementos y factores que influyen en la concentración de

contaminantes, entre los que destacan: el relieve, las condiciones meteorológicas predominantes y el régimen de la precipitación pluvial, entre otros.

La posición geográfica de la ciudad de Guatemala y su entorno (14°30' a 14°45' de latitud Norte y de 90°15' a 90°45' de longitud Oeste), permite el predominio de vientos del Noreste en la capa de aire en contacto con a la superficie terrestre; conforme se asciende en altitud la dirección del viento se va hacia el Este hasta una altitud aproximada de 3000 msnm como nivel de transición en vientos del Oeste en la parte superior de la troposfera. Esto se presenta durante la temporada de lluvias (mayo a octubre) y domina en la temporada fría (de noviembre a febrero), como parte de los sumideros naturales de la contaminación del aire.

La temporada de olas de calor (marzo y abril especialmente) se caracteriza por el enturbiamiento de la atmósfera por hidrometeoros (como la niebla, neblina y bruma) y por lito-meteoros como la calima y el humo; la emisión de contaminantes se incrementa (polvo y humo especialmente) y se produce mayor concentración sobre la ciudad de Guatemala.

En esta época del año se conjugan una serie de factores y elementos climáticos, observables también en un cambio del perfil dominante del viento a componente Sur, desde la capa de aire en contacto con la superficie hasta altitudes medias o superiores de la troposfera en que el viento se torna variable y débil.

La ciudad de Guatemala, se encuentra localizada en lo que geológicamente constituye un graben o zona de hundimiento a una elevación media de 1500 msnm. En las paredes laterales de este hundimiento se encuentran: al Este las montañas de Palencia y San José Pínula con una elevación máxima de

2200 msnm, al Oeste las montañas del cerro Alux con una elevación máxima de 2276 msnm.

Las cabeceras de este hundimiento sirven como bocatomas al flujo del viento: al Norte ningún accidente geográfico importante lo cual favorece la canalización de los vientos Norte y Noreste sobre la superficie, el extremo sur lo conforman la depresión de la cuenca del lago de Amatitlán a una elevación de 1200 msnm, prologándose esta influencia orográfica en el viento con la interconexión al área conocida como el cañón de Palín, entre los volcanes de Pacaya y Fuego; promoviendo la canalización de los vientos Sur y Suroeste sobre la superficie.

En la región de la ciudad de Guatemala, coexisten factores y elementos climáticos que favorecen la dispersión de los contaminantes. Sin embargo, deberá tenerse en cuenta el crecimiento de la ciudad y su impacto en la emisión de contaminantes al expandirse las concentraciones urbanas y residenciales hacia los municipios circunvecinos al municipio de Guatemala y que están convirtiendo a la ciudad en un prototipo de distrito metropolitano legal e infraestructuralmente no planificado.

2.9.1. Precipitación

La precipitación en forma de lluvia, granizo o nieve es una entrada al ciclo hidrológico. La precipitación tiene lugar cuando el aire se eleva, se expande (al enfriarse) y se enfría lo suficiente para que el vapor de agua en el aire alcance el punto de condensación. La atmósfera es rica en núcleos, principalmente partículas de suelo/arcilla, productos residuales de hidrocarburos, sales marinas, entre otros., con unas características de tamaño mayores de aproximadamente 0,1 μm .

Adicionalmente, para que la precipitación tenga lugar, también debe haber:

- Presencia de núcleos de condensación en los que pueda iniciarse la propia condensación. En ausencia de aquellos, el aire puede llegar a sobresaturarse.
- Estas gotas condensadas no deben evaporarse cuando atraviesen aire más seco y deben ser de tamaño suficiente para caer libremente bajo fuerza de gravedad hacia la superficie de la tierra. Si las gotas son muy pequeñas, pueden tener una velocidad de sedimentación o de caída inadecuada para llegar a la tierra.

Las gotas de lluvia aumentan su tamaño bien por coalescencia (líquido a líquido) produciendo la lluvia. Una fase intermedia de agregación de sólido con líquido produce granizo.

La precipitación en forma de lluvia tiene una gran variabilidad espacial desde tormentas locales con actividad eléctrica sobre un área tan pequeña como 5 km² a una tormenta sinóptica que se produce sobre áreas de hasta 250,000 km².

Tabla IX. **Formas de precipitación**

Nombre	Descripción	Tamaño
Llovizna	< 1 mm/h	0.1-0.5 mm
Lluvia	Ligera < 2.5 mm/h Moderada 2.5-7.5 mm/h Fuerte > 7.5 mm/h	> 0.5 mm

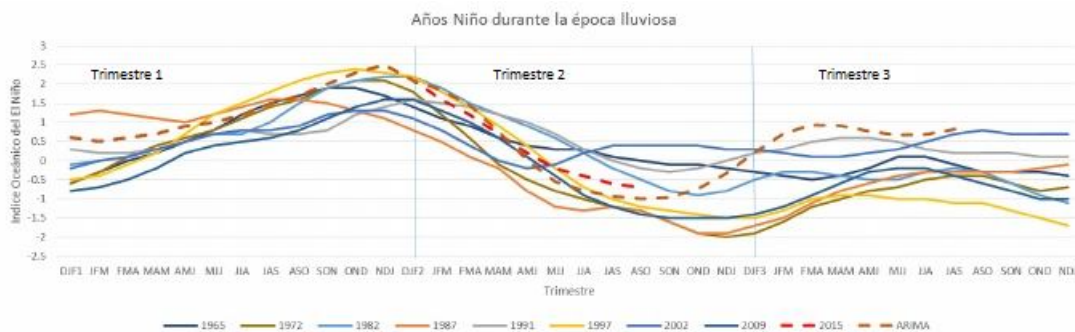
Fuente: KIELY, Gerard. *Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. p. 210.

2.9.2. Fenómeno El Niño en Guatemala

Las condiciones climáticas de Guatemala seguirán bajo la influencia del fenómeno de El Niño, el cual pasó a formar parte de los tres fenómenos más fuertes del registro histórico. La anomalía de temperatura en la región Niño 3,4 es de 2,1 °C, esta condición positiva tiende a permanecer hasta el trimestre de abril, mayo y junio.

En la figura 13, se observa el comportamiento de los fenómenos El Niño que han afectado a Guatemala en los últimos 40 años, el fenómeno El Niño del año 2015 presenta similar comportamiento al año 1997.

Figura 13. Comportamiento del fenómeno El Niño en Guatemala



Fuente: *Boletín Climático No.3-2016*.

[http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin %20climatico %203-2016.pdf](http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin%20climatico%203-2016.pdf). Consulta: mayo 2016.

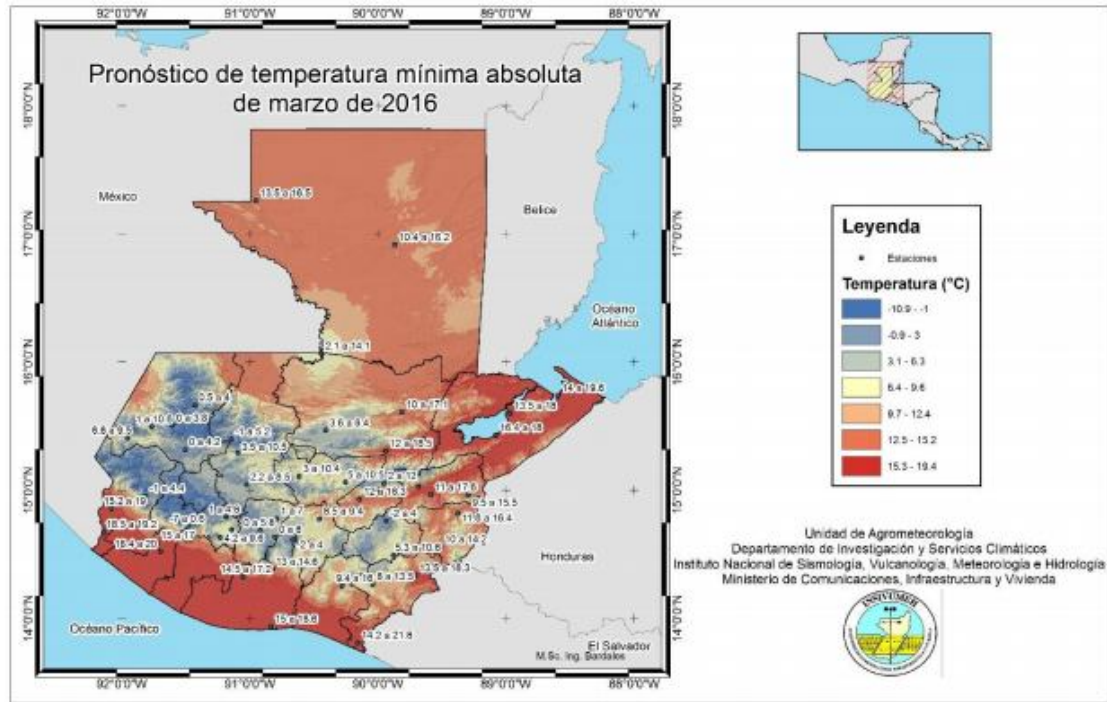
El índice de pronóstico ENSO del Internacional Research Institute for Climate and Society (IRI) muestra una tendencia de descenso, hasta alcanzar condiciones neutras hacia un enfriamiento para el segundo trimestre de la época lluviosa del 2016.

Las condiciones que actualmente prevalecen, repercuten en la reducción de lluvias y en el incremento de la temperatura ambiente a nivel nacional.

Para el mes de marzo del 2016, se esperaban lluvias en las regiones del Norte, Franja Transversal del Norte y Caribe alrededor de los 121 a 175 milímetros, el primer escenario de lluvia es normal, con un segundo escenario arriba de lo normal.

En las regiones de Boca Costa y Sur-occidente se esperaban lluvias aisladas dentro de lo normal, y un segundo escenario arriba de lo normal. Para el resto de la república se esperaba un escenario normal y con la posibilidad de lluvias por arriba de lo normal, esto debido a las altas temperaturas y al ingreso de humedad pueden favorecer al desarrollo de un evento convectivo superando las normales climáticas, también es posible la formación de granizo debido a las condiciones de transición de época fría a cálida.

Figura 15. **Mapa de perspectiva de temperaturas mínimas absolutas para marzo de 2016**

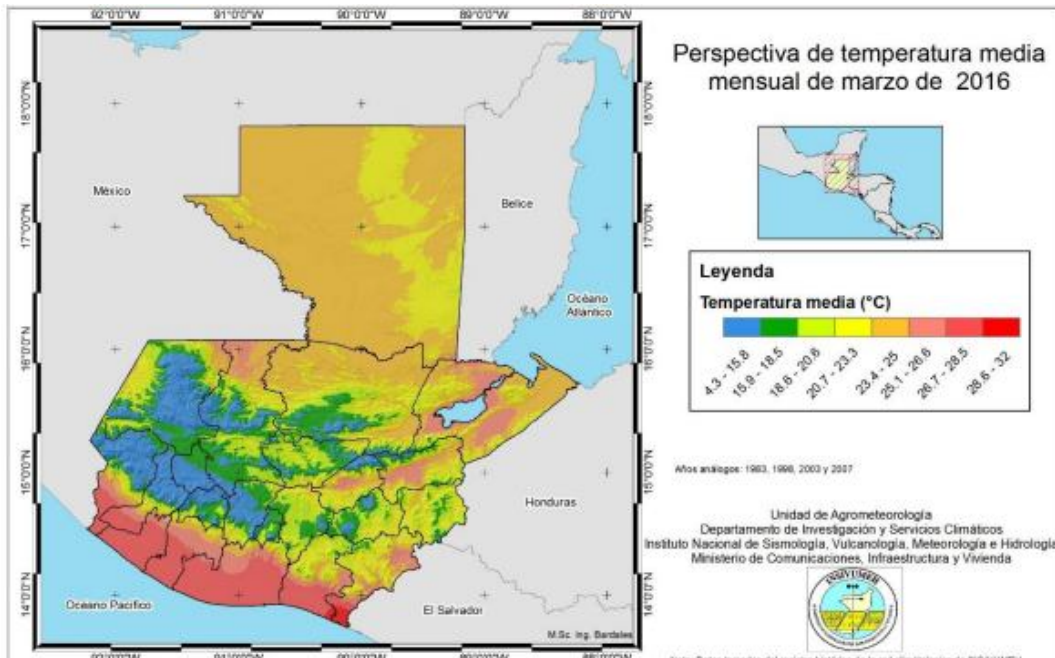


Fuente: *Boletín Climático No.3-2016.*

[http://www.Insivumeh.gov.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin %20climatico %203-2016.pdf](http://www.Insivumeh.gov.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin%20climatico%203-2016.pdf). Consulta: mayo 2016.

La temperatura mínima, media y máxima para marzo 2016 se encontraron por arriba de lo normal, aproximadamente 0,4 a 2,4 °C. Esto hace que aumente la evapotranspiración potencial.

Figura 16. Mapa de perspectiva de temperatura media para marzo de 2016



Fuente: *Boletín Climático No.3-2016.*

[http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin %20climatico %203-2016.pdf](http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin%20climatico%203-2016.pdf). Consulta: mayo 2016.

Las tasas de evapotranspiración potencial mensual estarán por arriba de lo normal provocando que la reserva de humedad de los suelos se agote rápidamente en función de sus características de textura y profundidad efectiva del suelo.

2.10. ¿Qué es canícula?

La canícula son temporadas calurosas, de hecho las más calurosas del año en el hemisferio norte y sur. No precisamente significa ausencia de lluvias sino una disminución. Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (Insivumeh), la canícula en la república significa reducción en lluvias dentro de la época de lluvias, comúnmente entre 10 a 20 días en los cuales la lluvia es reducida significativamente o incluso sin lluvias. Durante esta época los vientos secos impiden el paso de la humedad y por ello aparece un calor seco más perceptible.

2.10.1. Canícula en Guatemala en los años 2014 y 2015

Estadísticamente la canícula se ha presentado del 10 al 20 de julio, fenómeno que influye en la disminución o ausencia de lluvias en las regiones de meseta central, occidente, oriente y sur oriente del país. Sin embargo, se previó que estas serían interrumpidas por algunos eventos de lluvia debido al paso de ondas del este y persistencia del enfriamiento de las temperaturas del océano Pacífico frente a Guatemala.

Para los meses de julio y agosto del 2014 no se descartó la gestación del fenómeno El Niño. Este fenómeno se caracteriza en Guatemala con la disminución de los regímenes normales de lluvia y el aumento de la temperatura en las regiones de Nor-Oriente y parte de la Meseta Central (zona semiárida del país).

El fenómeno alcanzó su mayor anomalía hacia el final del 2014 o inicio del 2015. De acuerdo a la salida de los modelos se esperó que este fenómeno se presentara de débil a moderado. Así mismo, no se descartó la temprana finalización de la época lluviosa en estas regiones.

Registros del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA) señalaron que en el año 2014 la canícula duró 40 días. Los efectos causados por ese fenómeno impactaron en el sector agrícola, el cual tuvo grandes pérdidas, debido a la falta de agua para las siembras. Chiquimula fue muy afectada con pérdidas de hasta el 64 por ciento de la siembra de maíz.

De acuerdo con el informe de daños del año 2014 publicado por el Concejo Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (Consan), los resultados preliminares dieron cuenta de pérdidas parciales en 68,298 hectáreas y pérdidas totales en 26,229 hectáreas para un total de 168,278 familias afectadas. Las pérdidas reportadas incluyen 1, 890,559 quintales de maíz y 661,695 quintales de frijol totalizando alrededor de 450,5 millones de quetzales. Estas pérdidas significaron el 80 % y 63 % de la producción de maíz y frijol de infra y subsistencia.

Se llegó a estimar que la cantidad de familias afectadas fueron de 236,034 con pérdidas parciales o totales de sus cosechas. Además, un total de 126,501 niños y niñas menores de 5 años estuvieron en alto nivel de vulnerabilidad a la desnutrición aguda.

Los servicios básicos por parte de la población afectada, especialmente en lo relativo al acceso al agua para consumo humano, se indicó que el 23 % de las familias no contaban con este servicio, y los posibles impactos implicaban el incremento en las enfermedades transmitidas por agua.

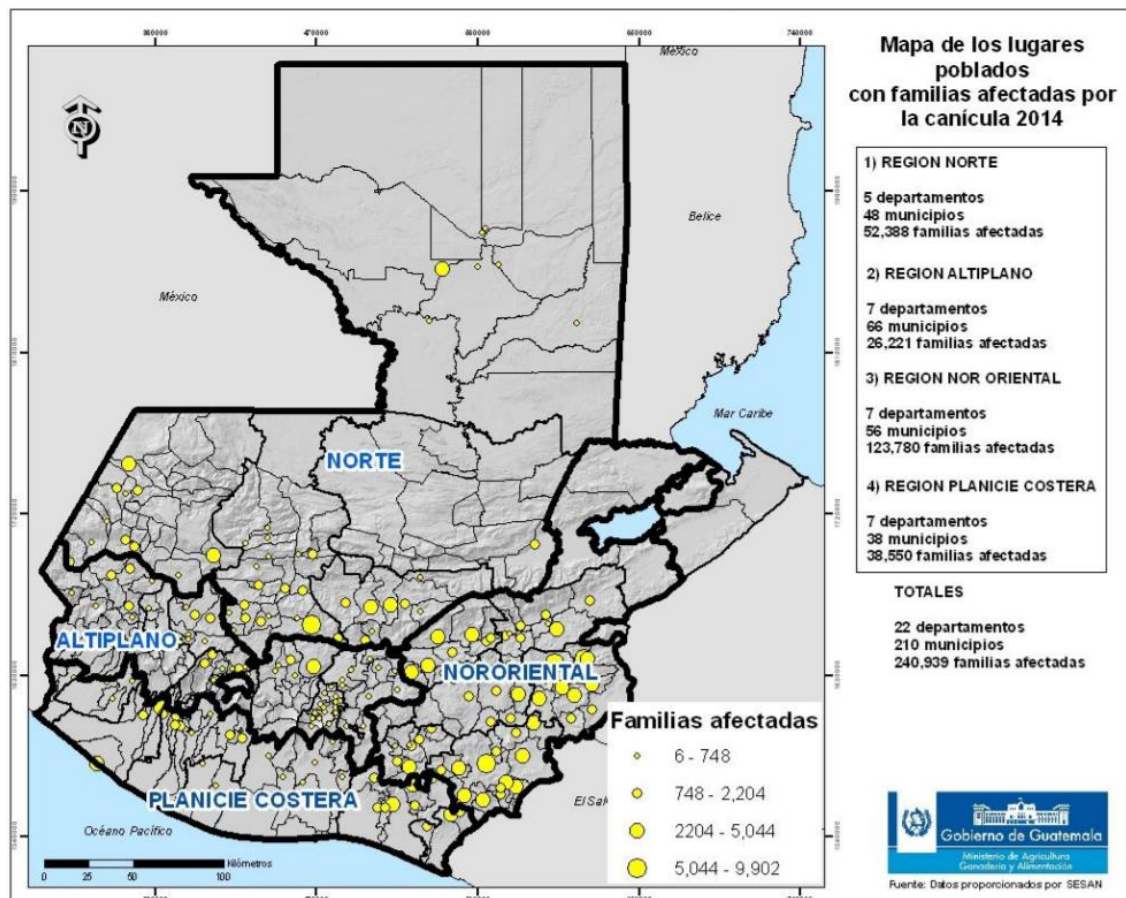
De acuerdo al reporte oficial del Ministerio de Salud al 23 de agosto de 2014 la situación de desnutrición aguda, se presentaba como:

- 10,814 casos reportados, 70 % de los cuales fueron casos moderados.
- Del total de casos severos (3,301), el 8 % cursó con cuadro clínico de marasmo, kwashiorkor o kwashiorkor-marasmático.
- El 19,5 % de los casos requirieron hospitalización por presentar complicaciones.
- 38 % de los casos se presentaron en menores de 1 año.
- El 75 % del total de los casos tenían menos de 2 años de edad.

El Gobierno Central, a través de la Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional (Sesan) y el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), presentó el compilado de los resultados de la evaluación de daños y pérdidas a nivel de cada uno de los departamentos afectados por la canícula prolongada.

Se totalizaron 249,212 familias afectadas en los 22 departamentos del país con la priorización de las áreas más afectadas y vulnerables. Y se estimó la afección por pérdida de cosechas de granos y baja en las reservas de alimentos en 1,5 millones de personas.

Figura 17. **Mapa de los lugares poblados con familias afectadas por la canícula de 2014**



Fuente: Oficina de la Coordinadora Residente. *Reporte de Situación No.01 Guatemala: Sequía por Canícula Prolongada 2014*. <http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Reporte%20de%20Situacion%20No%2002.pdf>. Consulta: agosto 2017.

Para el 2015, el Insivumeh pronosticó que los efectos de la canícula podían ser muy similares o peores que los experimentados en 2014, con pérdidas significativas en los cultivos de granos básicos, para los pequeños productores que no contaban con sistemas de riego o mini riego.

La canícula normalmente se presenta por un período no mayor de 15 días durante la última semana de junio. Sin embargo, para el año 2015 la canícula se presentó con anticipación y según el Insivumeh, a principios de agosto la canícula no había concluido y se estimó que terminaría del 5 al 15 de agosto.

La mayoría de los líderes comunitarios consideraron que más de la mitad de los habitantes que habían sido afectados por la reducción de lluvias y un 87 % consideraban que la cosecha sería peor que la del 2014, la cual fue afectada por una canícula prolongada. El 93 % de los líderes estimó que la reducción de la cosecha de maíz y frijol iba a estar entre el 50 % y 100 %.

La perspectiva de recuperación era principalmente a largo plazo. El 45 % consideró que llevaría más de un año, un 38 % consideraron que no se recuperaría y solamente un 9 % considero que se recuperarían en la cosecha de segunda del 2015.

La principal amenaza que se presentó fue la sequía y la aparición de plagas. Y las consecuencias principales de estos eventos fueron las pérdidas de sus cultivos y de animales.

Durante la canícula del 2015 el 28 % de las comunidades reportaron de 15 a 30 días sin lluvia, el 52 % de 31 a 60 días sin lluvia y el 20 % entre 60 y 90 días sin lluvia. El 90 % de las comunidades considera que la canícula fue más fuerte que la del año 2014 y el 83 % consideró que durante el 2015 las lluvias no se establecieron formalmente.

Hechos similares se observaron en el 2013, cuando bajó el caudal de ríos en varios departamentos, como Zacapa, Quetzaltenango y Alta Verapaz. Algunos ríos se secaron debido a las altas temperaturas.

Tabla X. **Consecuencias provocadas por canícula según DIPLAN-MAGA**

Daños	2014	2015
Número de familias afectadas	168,278	175,387
Hectáreas dañadas	94,528	119,645
Pérdidas de producción de maíz en quintales	1.890,559	1.794,675

Fuente: GÁNDARA, Natiana. *Sequía aumenta el número de familias afectadas.*
<http://www.prensalibre.com/economia/sequia-del-2015-causo-mas-impacto>. Consulta: abril 2016.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

3.1.1. Variables dependientes

- Índice de concentración de partículas totales suspendidas
- Índice de concentración de partículas menores a 10 micras
- Índice de concentración de partículas menores a 2,5 micras
- Índice de concentración de dióxido de nitrógeno
- Índice de concentración de sedimentación ácida
- Índice de concentración de ozono
- Índice de concentración de monóxido de carbono
- Índice de concentración de dióxido de azufre

3.1.2. Variables independientes

- Temperatura
- Radiación solar
- Precipitación
- Evapotranspiración

3.2. Delimitación de campo de estudio

La delimitación del campo de estudio de esta investigación se encontró dentro de la Ingeniería Ambiental, ya que el enfoque fue determinar el efecto que la canícula prolongada tiene sobre los contaminantes atmosféricos en la ciudad de Guatemala.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Carlos Javier Chicojay Morales
- Asesor: Ing. Agr. Carlos Vinicio Godínez Miranda
- Personal de los puntos de monitoreo de calidad del aire

3.4. Recursos materiales disponibles

- Información proporcionada por las redes de monitoreo de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Cámara digital
- Computadora HP Pavilion Gaming Notebook

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Debido a que la investigación buscó analizar la correlación entre el incremento de la temperatura, el decremento de la precipitación y el aumento de la tasa de la evapotranspiración potencial con los índices de concentración de los contaminantes atmosféricos mediante análisis estadístico, se utilizó una técnica cuantitativa.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Especificaciones de los datos recolectados: los datos obtenidos de los puntos de control fueron mensuales tomados durante diecisiete años de acuerdo a su disponibilidad en las seis estaciones de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

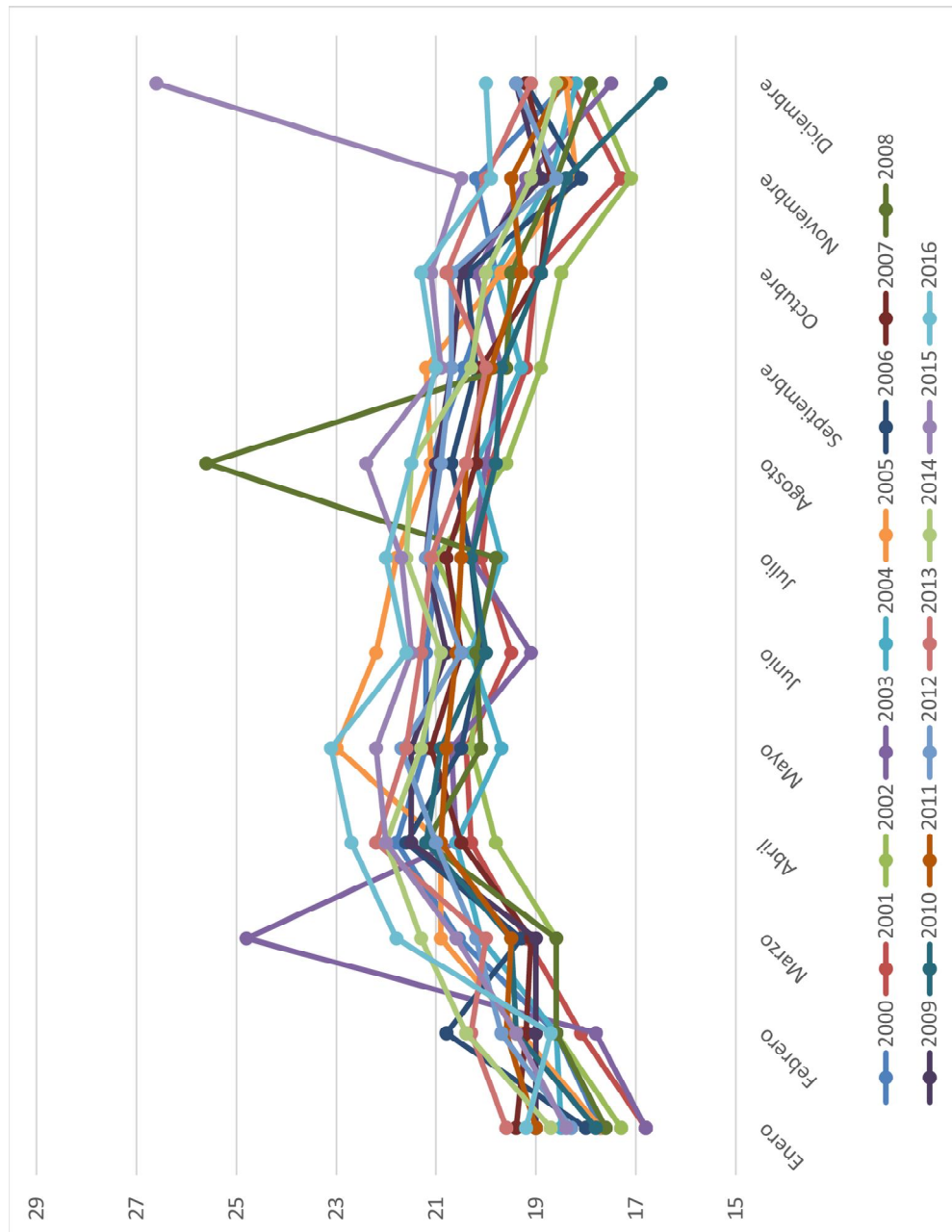
3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Tabla XI. **Datos mensuales de temperatura promedio en grados centígrados, estación Insivumeh de 2000 a 2016**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	17,7	18,6	20,55	21,8	21,2	21,2	20,95	21,1	20,45	19,8	20,2	18,4
2001	16,8	18,1	19,2	20,3	20,4	19,5	20,1	19,9	19,2	19	17,3	18,3
2002	17,3	18,6	18,6	19,8	20,3	20,1	21	19,6	18,9	18,5	17,1	17,9
2003	16,8	17,8	24,8	20,6	20,7	19,1	20,3	20	19,7	20,2	19,2	17,5
2004	18,5	18,6	20,1	20,6	19,7	20,3	19,7	20,2	19,3	19,8	18,7	18,2
2005	17,7	19,3	20,9	20,9	23	22,2	21,8	21,1	21,2	19,7	18,2	18,4
2006	18	20,8	19,3	21,6	20,5	20,1	20,3	20,7	20,2	20,4	18,1	19,2
2007	19,4	19,2	19,1	20,5	21,1	20,5	20,8	20,2	20,1	18,9	18,7	19,2
2008	17,6	18,6	18,6	21,2	20,1	20,2	19,8	25,6	19,6	19,5	18,6	17,9
2009	19	19	19	21,5	21,5	20,8	21,2	21	20,7	20,5	18,9	19,4
2010	17,8	19,4	19,5	21,2	20,9	20	20,3	19,8	19,7	18,9	18,4	16,5
2011	19	19,6	19,5	20,9	20,8	20,6	20,5	20,4	19,9	19,3	19,5	18,5
2012	18,3	19,7	20,2	21	21,7	20,5	21,2	20,9	20,7	20,7	18,6	19,4
2013	19,6	20,3	20	22,2	21,6	21,3	21,1	20,4	20	20,8	20	19,1
2014	18,7	20,4	21,3	22	21,3	20,9	21,6	21,5	20,3	20	19,1	18,6
2015	18,4	19,4	20,6	22	22,2	21,5	21,7	22,4	20,9	21,1	20,5	26,6
2016	19,2	18,7	21,8	22,7	23,1	21,6	22	21,5	21	21,3	19,9	20

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 18. Datos de temperatura promedio en grados centígrados de 2000 a 2016



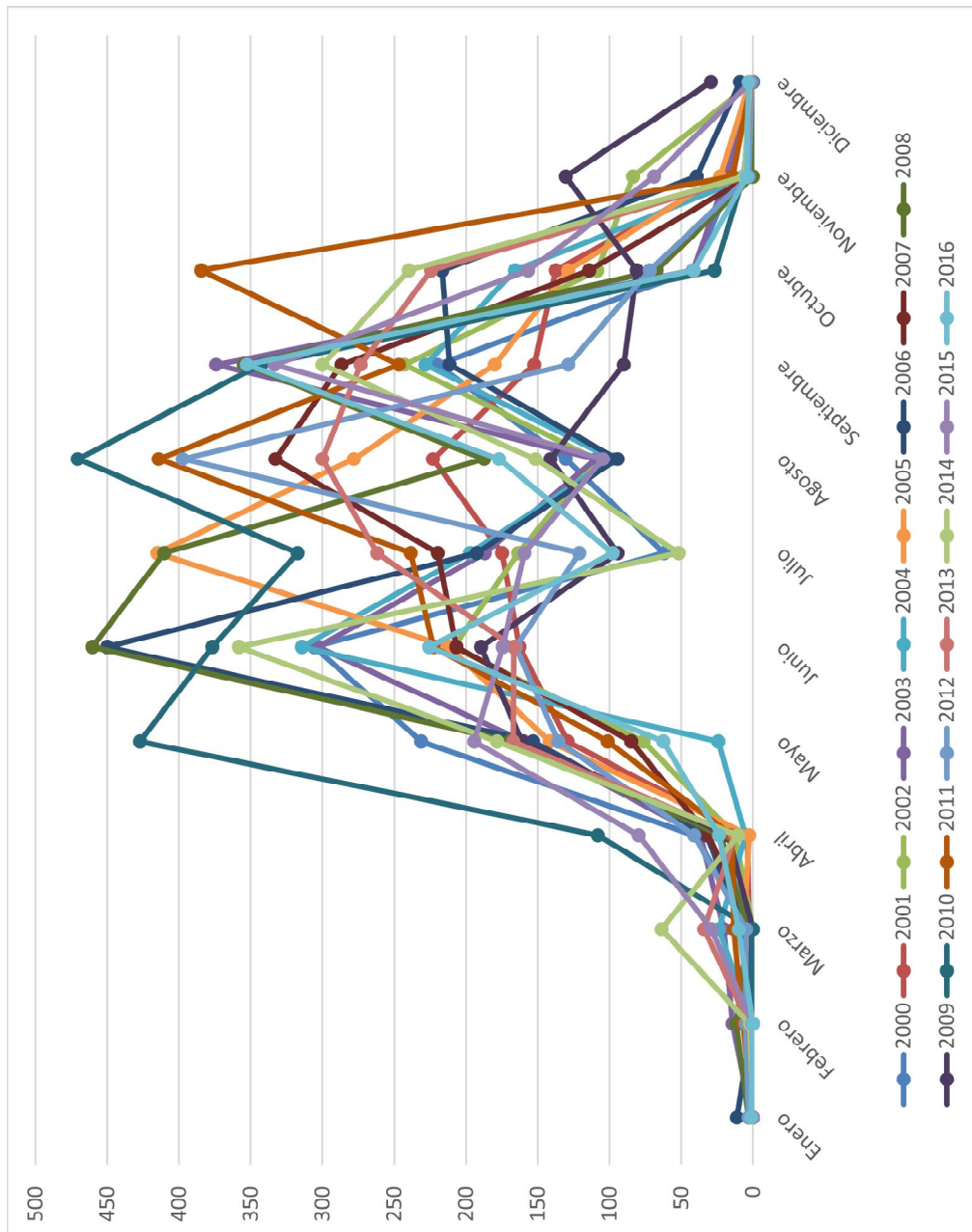
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XII. **Datos mensuales de precipitación promedio en milímetros, estación Insivumeh de 2000 a 2016**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	0,4	0	0,2	40,9	231,4	306	62,1	130,4	220,2	41,5	14,5	1,6
2001	1,1	4,8	2,6	4,1	129,5	162,8	175,1	223,3	152,7	137,6	19,6	1,3
2002	0	6,6	0	12,7	76,4	208,4	163,7	109,3	242,9	108,6	83,6	0,2
2003	0,9	14,4	20,3	36,8	159,9	303,1	186,8	109,4	374,2	42,1	18,6	2
2004	0,2	0,5	23,9	5,2	24,3	314,5	197,2	97,6	228,2	165,9	2,9	0,2
2005	2	0	6,7	2,6	141,9	211,8	415,1	278,3	180,2	128,7	23	2,5
2006	11,3	0,4	6,3	32,6	153,5	449,8	192,6	94,3	211,7	216,9	39,2	9,1
2007	1,4	0	0,9	31,2	84,8	206,7	219,6	333	287	114,4	2,1	1,5
2008	3,3	11,9	3,4	22,4	169,6	460,3	410,6	187,3	354,8	67,4	0	0
2009	0	4	0	17,3	161	189,6	94,4	141,5	90,2	81,2	130,5	29,5
2010	0	1,3	0	108,2	427,4	376,9	317,4	470,8	342,9	26,8	6,4	0
2011	0	7,2	13,4	15	101,5	222,6	238,6	414,2	246,8	384,5	14,2	1,5
2012	3,2	5,3	5,1	40,9	135,8	165,5	121,1	397,5	128,9	71,9	3,2	1,1
2013	0,2	2,6	34,2	12,7	167,1	166,9	262,1	300,2	273,7	224,3	4,9	2
2014	0	2,1	63,7	10,6	178,4	358,3	52	151,5	300,4	239,8	6,3	2,3
2015	0,3	0,4	28,9	79,6	194,4	174,3	159,3	104,7	333,4	156,9	69,1	1,8
2016	1,4	0	10	23,7	62,4	225,8	97,7	177,2	352,7	41,3	4,3	3

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 19. Datos de precipitación promedio en milímetros de 2000 a 2016



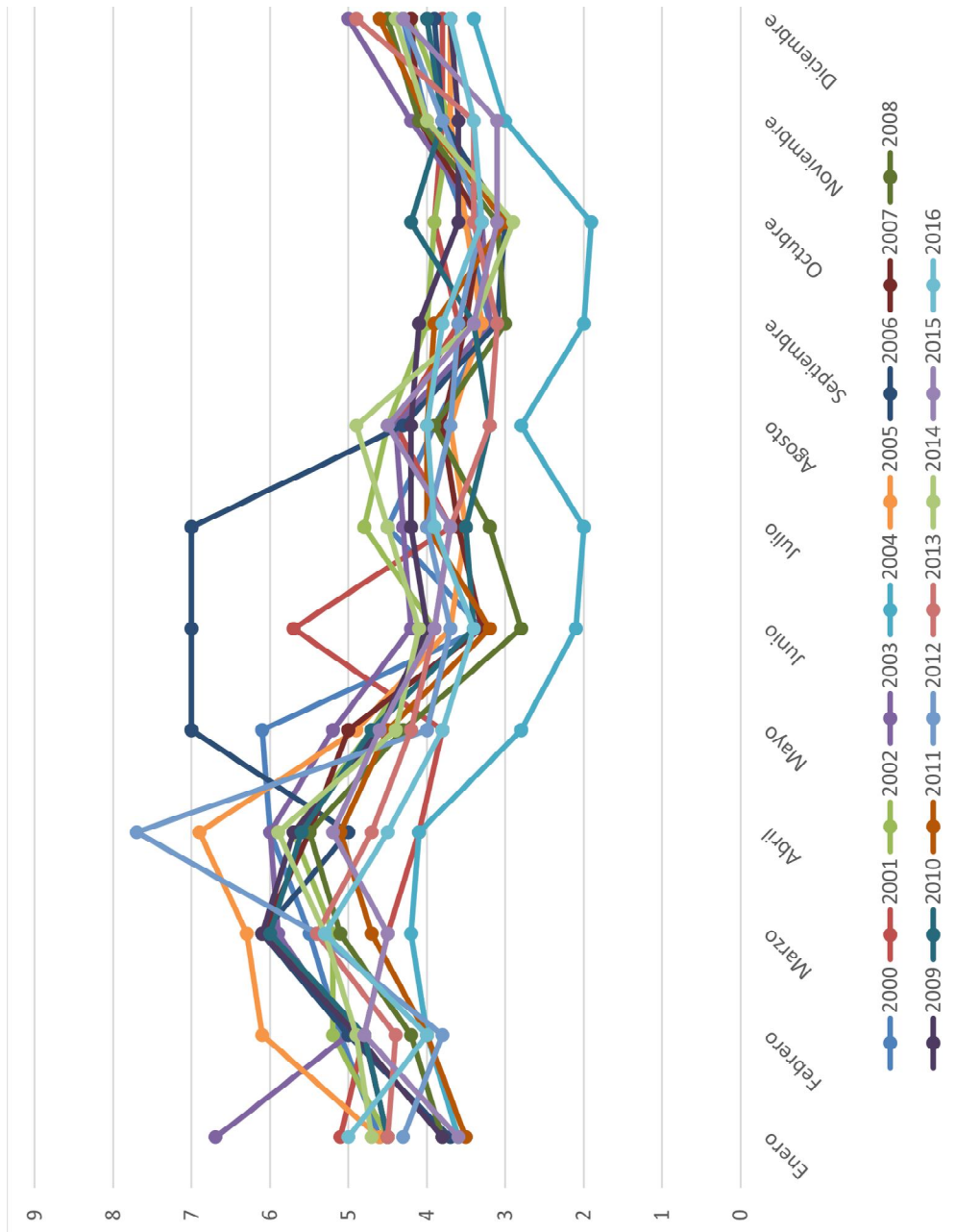
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XIII. **Datos mensuales de evapotranspiración potencial en milímetros, estación Insivumeh de 2000 a 2016**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	4,6	5,1	5,5	6	6,1	3,3	4,5	3,9	3,2	3,5	4	4,3
2001	5,1	4,8	4,5	4,1	3,8	5,7	3,7	4,4	3,6	3,9	3,8	3,8
2002	4,5	5,2	5,2	5,7	4,7	3,9	4,8	4,5	4	3,9	3,7	4,2
2003	6,7	5	5,9	6	5,2	4,2	4,3	4,4	3,2	3,3	4,2	5
2004	3,6	4	4,2	4,1	2,8	2,1	2	2,8	2	1,9	3	3,4
2005	4,6	6,1	6,3	6,9	4,9	3,7	3,5	3,7	3,3	3,5	3,7	3,7
2006	3,7	5	6,1	5	7	7	7	4,3	3,1	3	3,8	3,9
2007	4,5	4,8	6,1	5,5	5	3,3	3,6	3,8	3,5	3,3	4,1	4,2
2008	3,8	4,2	5,1	5,5	4,3	2,8	3,2	3,9	3	3,1	4,1	4,5
2009	3,8	4,9	6,1	5,7	4,6	4	4,2	4,2	4,1	3,6	3,6	3,7
2010	4,5	4,8	6	5,6	4,7	3,4	3,5	3,2	3,4	4,2	3,8	4
2011	3,5	4	4,7	5,1	4,5	3,2	4	4	3,9	3	4	4,6
2012	4,3	3,8	5,4	7,7	4	3,7	4	3,7	3,6	3,3	3,8	4,3
2013	4,5	4,4	5,4	4,7	4,2	3,9	3,7	3,2	3,1	3,4	3,4	4,9
2014	4,7	4,9	5,3	5,9	4,4	4,1	4,5	4,9	3,4	2,9	4	4,4
2015	3,6	4,8	4,5	5,2	4,6	3,9	3,7	4,5	3,4	3,1	3,1	4,3
2016	5	4	5,3	4,5	3,8	3,4	3,9	4	3,8	3,3	3,4	3,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 20. Datos de evapotranspiración potencial en milímetros de 2000 a 2016



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XIV. **Datos mensuales de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto, estación Insivumeh de 2000 a 2016**

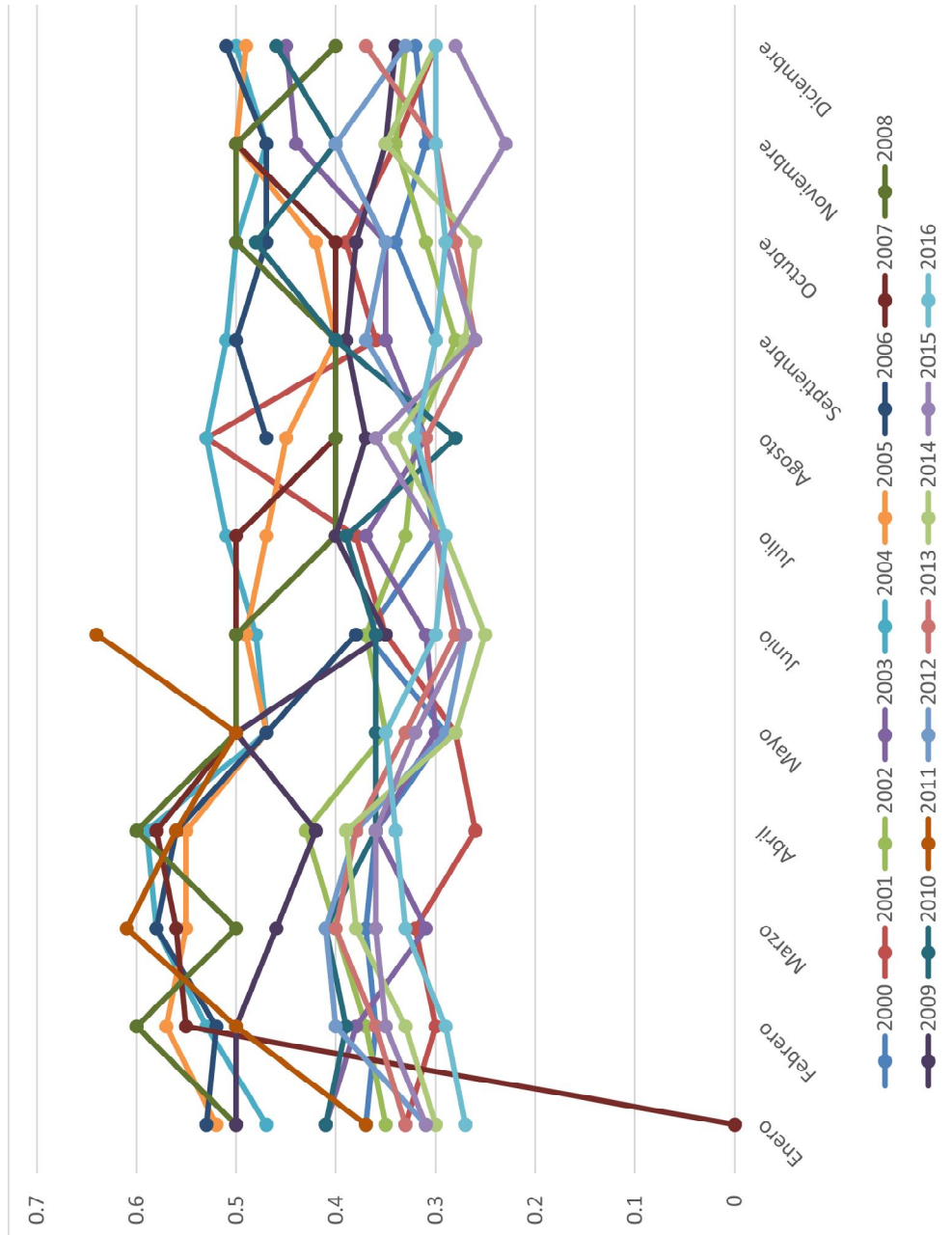
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	0,37	0,36	0,37	0,36	0,29	0,37	0,3	0,32	0,3	0,34	0,31	0,32
2001	0,33	0,3	0,32	0,26	0,28	0,35	0,38	0,53	0,36	0,39	0,34	0,3
2002	0,35	0,37	0,4	0,43	0,35	0,37	0,33	0,32	0,28	0,31	0,34	0,33
2003	0,41	0,38	0,31	0,36	0,3	0,31	0,37	0,31	0,35	0,35	0,44	0,45
2004	0,47	0,53	0,58	0,59	0,47	0,48	0,51	0,53	0,51	0,5	0,47	0,5
2005	0,52	0,57	0,55	0,55	0,47	0,49	0,47	0,45	0,4	0,42	0,5	0,49
2006	0,53	0,52	0,58	0,56	0,47	0,38	SD	0,47	0,5	0,47	0,47	0,51
2007	SD	0,55	0,56	0,58	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4
2008	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4
2009	0,5	0,5	0,46	0,42	0,5	0,35	0,4	0,37	0,39	0,38	0,35	0,34
2010	0,41	0,39	0,41	0,36	0,36	0,36	0,39	0,28	0,4	0,48	0,4	0,46
2011	0,37	0,5	0,61	0,56	0,5	0,64	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2012	0,31	0,4	0,41	0,38	0,29	0,27	0,3	0,31	0,37	0,35	0,4	0,33
2013	0,33	0,36	0,4	0,38	0,33	0,28	0,3	0,31	0,26	0,28	0,3	0,37
2014	0,3	0,33	0,38	0,39	0,28	0,25	0,29	0,34	0,27	0,26	0,35	0,3
2015	0,31	0,35	0,36	0,36	0,32	0,27	0,3	0,36	0,26	0,29	0,23	0,28
2016	0,27	0,29	0,33	0,34	0,35	0,3	0,29	0,32	0,3	0,29	0,3	0,3

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 21. Datos de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto de 2000 a 2016



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XV. **Concentración de partículas menores de 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

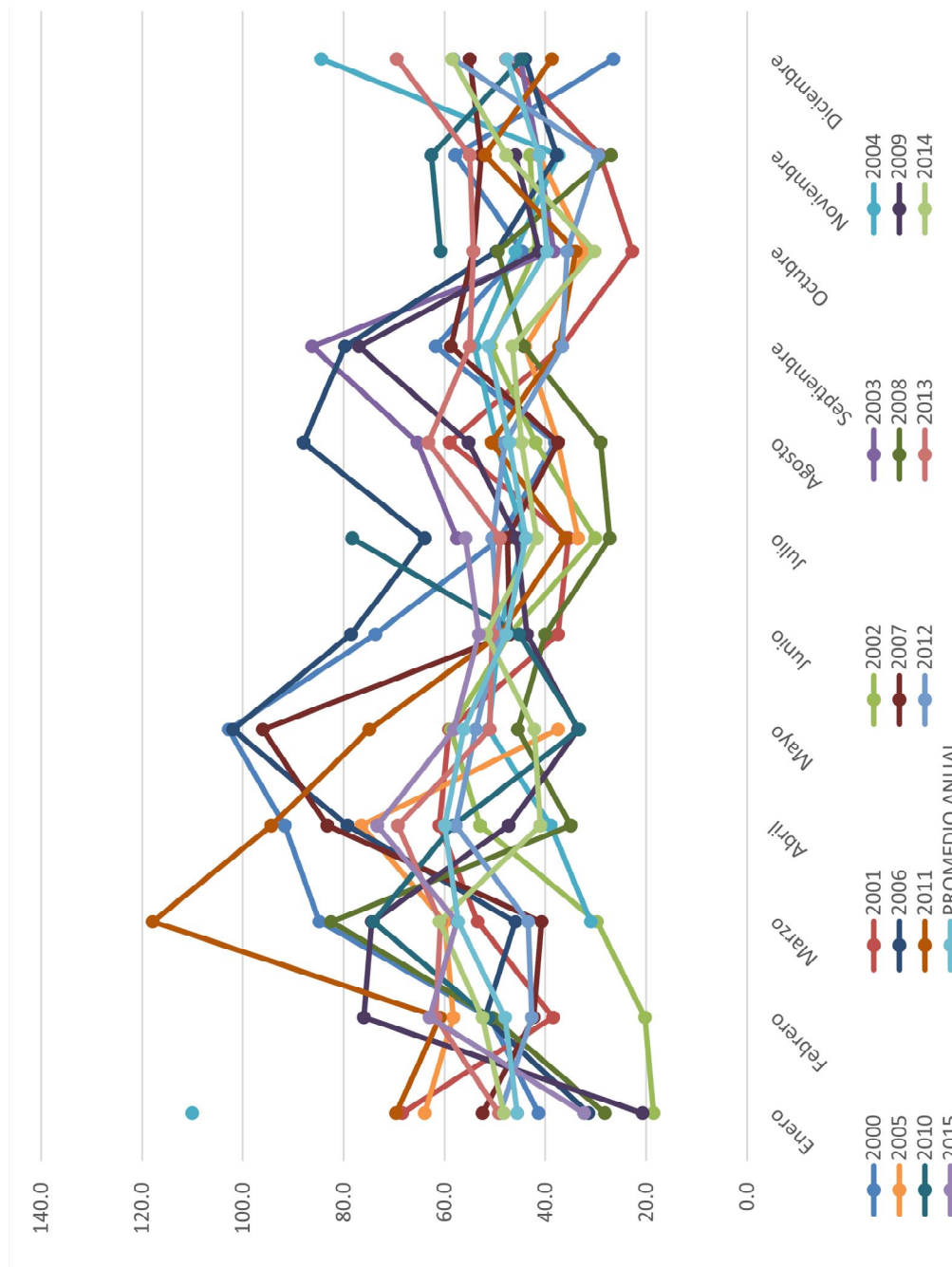
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	41,4	51,0	84,9	91,7	102,9	73,7	49,0	38,2	61,7	44,6	57,9	26,5
2001	68,4	38,5	53,4	61,0	59,1	37,5	35,5	59,0	36,8	22,8	29,2	47,8
2002	18,5	20,3	29,8	53,0	58,8	47,2	30,2	42,0	50,8	42,0	43,0	NM
2003	NM	NM	NM	NM	NM	NM	57,6	65,3	86,3	38,3	41,3	45,0
2004	110,0	NM	31,0	39,0	51,3	49,3	44,3	49,7	54,0	46,0	37,3	84,5
2005	64,0	58,3	60,0	76,5	37,5	NM	33,5	37,5	44,0	32,0	41,3	NM
2006	31,5	52,0	46,0	79,3	102,0	78,5	64,0	88,0	79,8	49,8	37,8	44,0
2007	52,5	42,3	40,8	83,3	96,0	47,0	47,5	37,5	58,8	54,3	52,8	55,0
2008	28,3	50,5	82,5	35,0	45,5	40,0	27,3	29,0	44,3	49,5	27,0	NM
2009	20,8	76,0	74,5	47,3	33,5	43,7	45,8	55,3	77,0	41,3	46,0	NM
2010	SD	51,3	74,3	58,3	33,3	45,3	78,3	NM	NM	60,8	62,6	44,7
2011	69,6	60,9	117,9	94,4	74,9	49,0	36,0	50,6	37,3	34,0	52,0	38,7
2012	49,0	42,8	43,4	57,8	53,8	49,3	50,5	48,0	36,6	35,8	29,5	58,3
2013	49,3	61,8	60,8	69,3	51,0	50,5	49,0	63,3	55,0	54,3	55,0	69,5
2014	48,3	52,5	61,0	41,0	42,3	51,8	41,8	44,8	46,5	30,3	47,8	58,5
2015	32,3	63,0	57,6	73,4	58,2	53,2	55,9	NM	NM	NM	NM	NM
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 22. Datos de concentración de partículas menores de 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XVI. **Concentración de partículas menores de 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016**

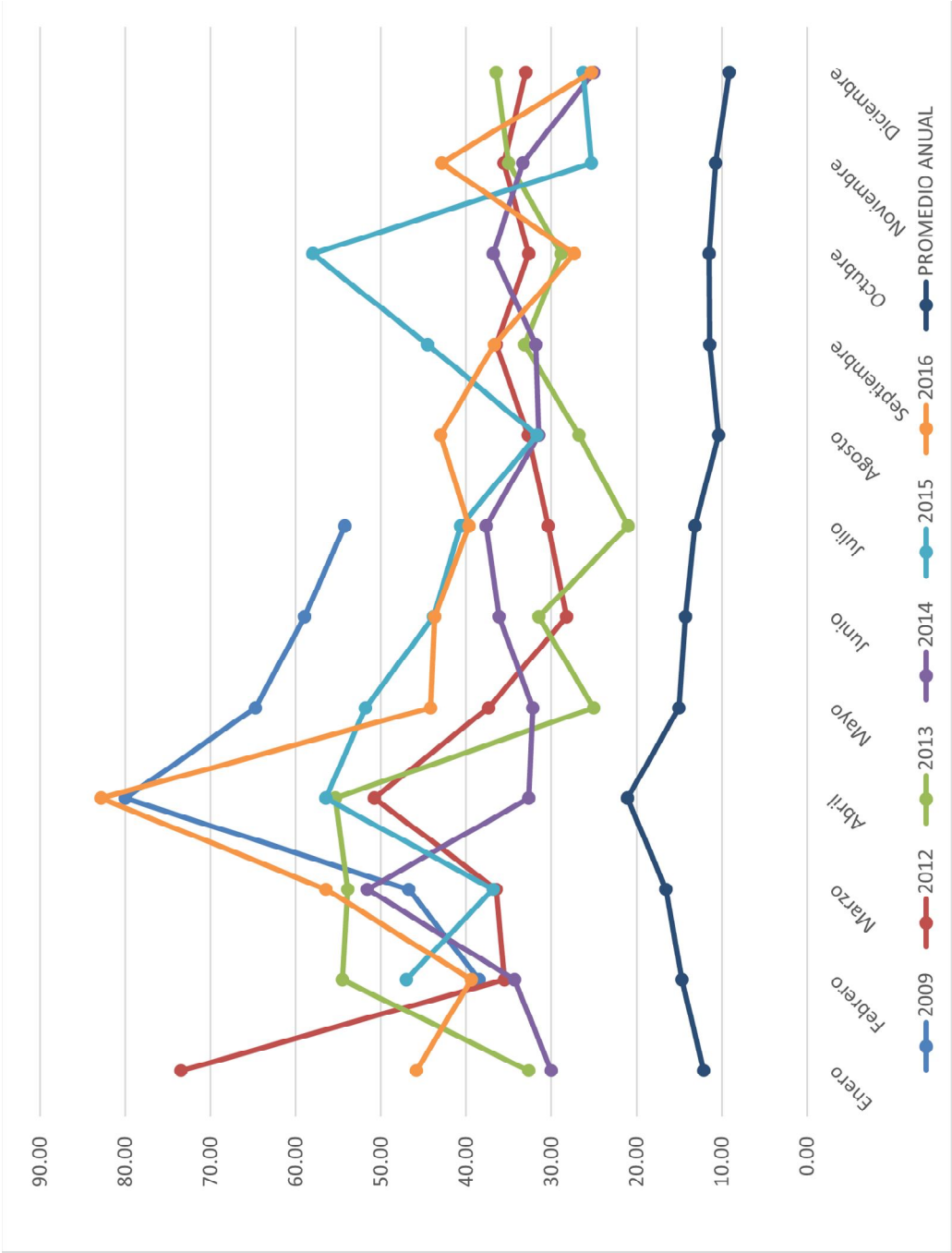
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2001	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2002	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2003	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2004	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2005	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2006	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2007	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2008	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2009	NM	38,5	46,8	80,0	64,8	59,0	54,3	NM	NM	NM	NM	NM
2010	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2011	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2012	73,5	35,5	36,5	50,8	37,4	28,3	30,4	32,8	36,5	32,7	35,6	33,0
2013	32,7	54,5	53,9	55,4	25,0	31,5	21,0	26,8	33,1	28,9	35,0	36,5
2014	30,0	34,3	51,6	32,7	32,2	36,2	37,7	31,5	31,8	36,8	33,3	25,0
2015	NM	47,0	36,8	56,5	51,8	43,8	40,7	31,7	44,5	58,0	25,3	26,3
2016	45,8	39,4	56,5	82,8	44,2	43,7	39,7	43,0	36,7	27,3	42,8	25,3

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 23. **Datos de concentración de partículas menores de 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XVII. **Concentración de dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

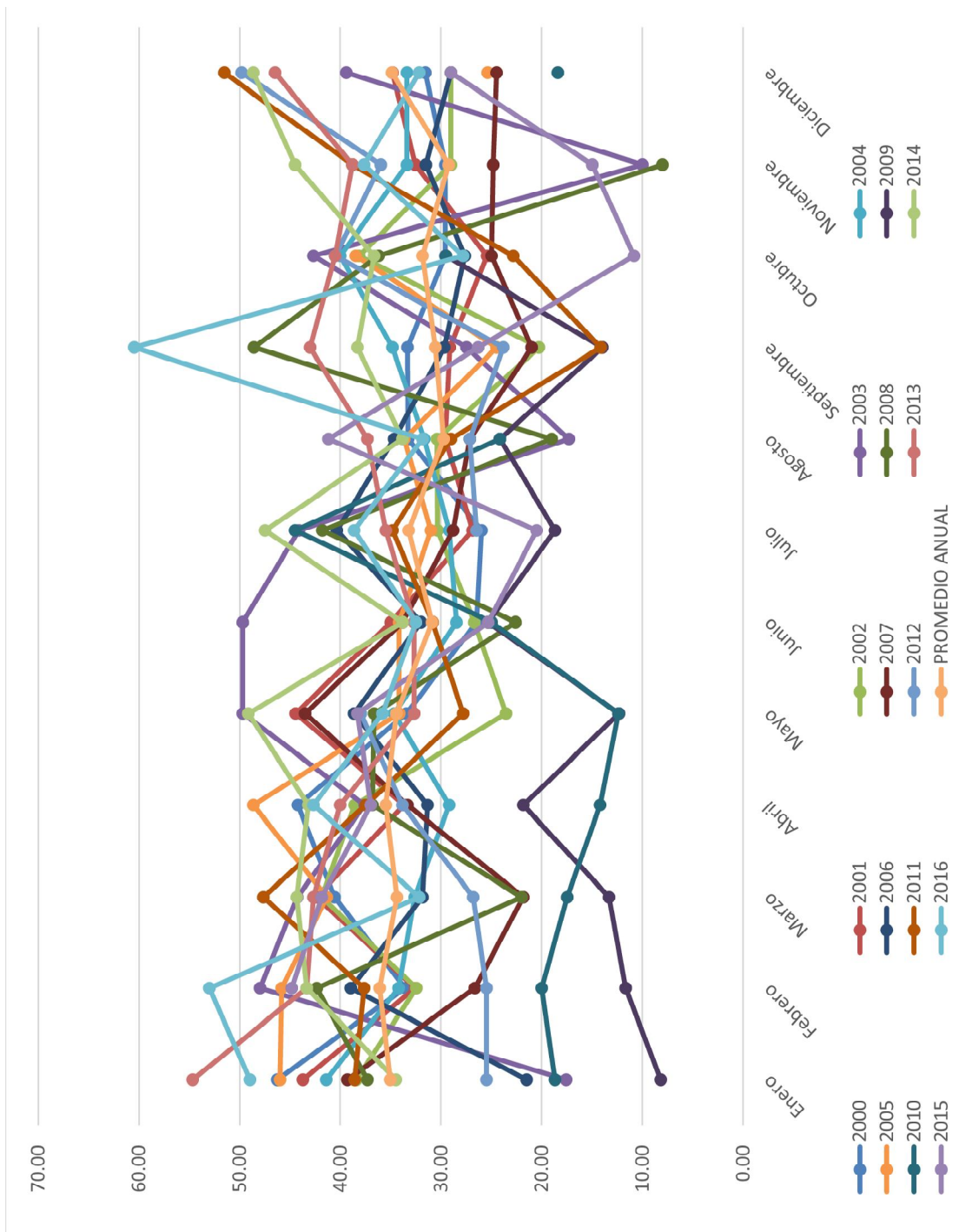
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	46,3	33,6	40,6	44,3	33,4	26,5	26,0	33,3	33,3	29,6	29,6	31,6
2001	43,7	32,6	42,4	33,7	44,4	35,0	26,9	29,6	29,1	25,4	32,6	34,8
2002	38,4	32,4	41,9	38,6	23,6	26,7	30,3	30,4	20,3	38,1	29,0	29,0
2003	17,6	48,0	44,3	37,6	49,7	49,7	44,1	17,3	27,5	42,7	10,0	39,4
2004	41,4	34,2	32,6	29,2	34,7	28,5	29,2	31,7	34,8	40,0	33,4	33,4
2005	46,0	45,8	41,3	48,7	34,2	34,2	31,0	33,7	24,5	38,5	NM	25,4
2006	21,5	39,0	31,8	31,3	38,7	32,0	40,3	34,7	29,7	27,7	31,5	29,0
2007	39,3	26,7	21,8	33,3	43,5	33,8	28,8	27,2	21,0	25,0	24,8	24,5
2008	37,3	42,3	22,0	36,8	36,7	22,6	41,8	19,0	48,6	36,2	8,0	NM
2009	8,2	11,7	13,3	21,8	12,3	25,3	18,7	24,2	14,0	29,5	NM	NM
2010	18,7	20,0	17,5	14,2	12,4	25,0	44,5	24,2	NM	29,5	SD	18,4
2011	38,6	37,7	47,7	37,5	27,8	30,8	34,8	29,0	14,2	22,8	38,8	51,5
2012	25,5	25,5	26,8	33,8	38,0	NM	26,5	27,2	23,8	40,5	36,0	49,8
2013	54,7	43,3	42,7	40,0	32,7	32,7	35,5	37,3	43,0	40,5	38,8	46,5
2014	34,5	43,3	44,3	43,2	49,2	33,8	47,5	33,8	38,3	36,7	44,5	48,7
2015	NM	44,8	41,8	37,0	38,3	25,3	20,5	41,2	26,3	10,8	15,0	29,0
2016	49,0	53,0	32,2	42,7	35,8	32,5	38,7	31,8	60,5	27,8	37,7	32,2

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 24. **Datos de concentración de dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XVIII. **Concentración de dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016**

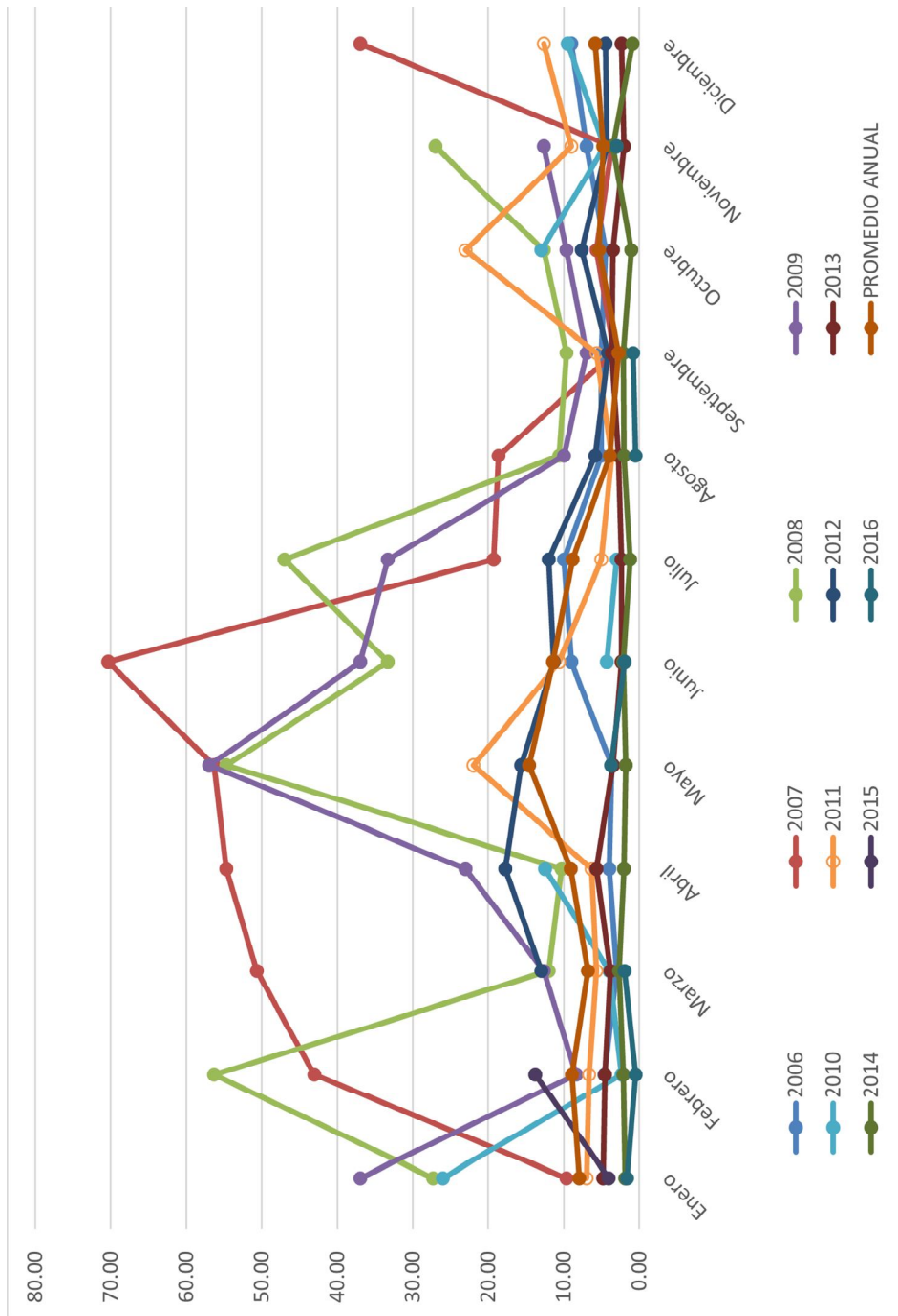
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2001	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2002	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2003	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2004	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2005	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2006	NM	4,7	3,0	4,0	3,7	9,0	10,0	5,0	5,0	4,5	7,0	9,0
2007	9,7	43,0	50,7	54,7	56,3	70,3	19,3	18,7	3,3	5,7	3,7	37,0
2008	27,3	56,3	12,0	10,3	54,7	33,3	47,0	10,7	9,7	12,7	27,0	NM
2009	37,0	8,3	12,7	23,0	57,0	37,0	33,3	10,0	7,0	9,7	12,7	NM
2010	26,0	2,3	4,0	12,5	SD	4,3	3,0	NM	NM	13,0	4,7	9,5
2011	7,0	6,7	5,7	6,3	22,0	10,7	5,0	3,7	5,7	23,0	9,0	12,7
2012	SD	SD	13,0	17,8	15,7	11,3	12,0	5,8	4,2	7,7	4,3	4,5
2013	4,8	4,5	3,8	5,7	3,5	2,3	2,3	2,8	3,7	3,5	2,1	2,4
2014	1,9	2,2	2,7	2,1	1,8	2,1	1,2	2,0	2,1	1,0	3,5	0,9
2015	4,1	13,8	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
2016	1,6	0,5	2,0	NM	3,8	2,0	NM	0,5	0,8	NM	3,0	NM

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 25. **Datos de concentración de dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XIX. **Concentración de sedimentación ácida en unidades de pH de 2000 a 2014**

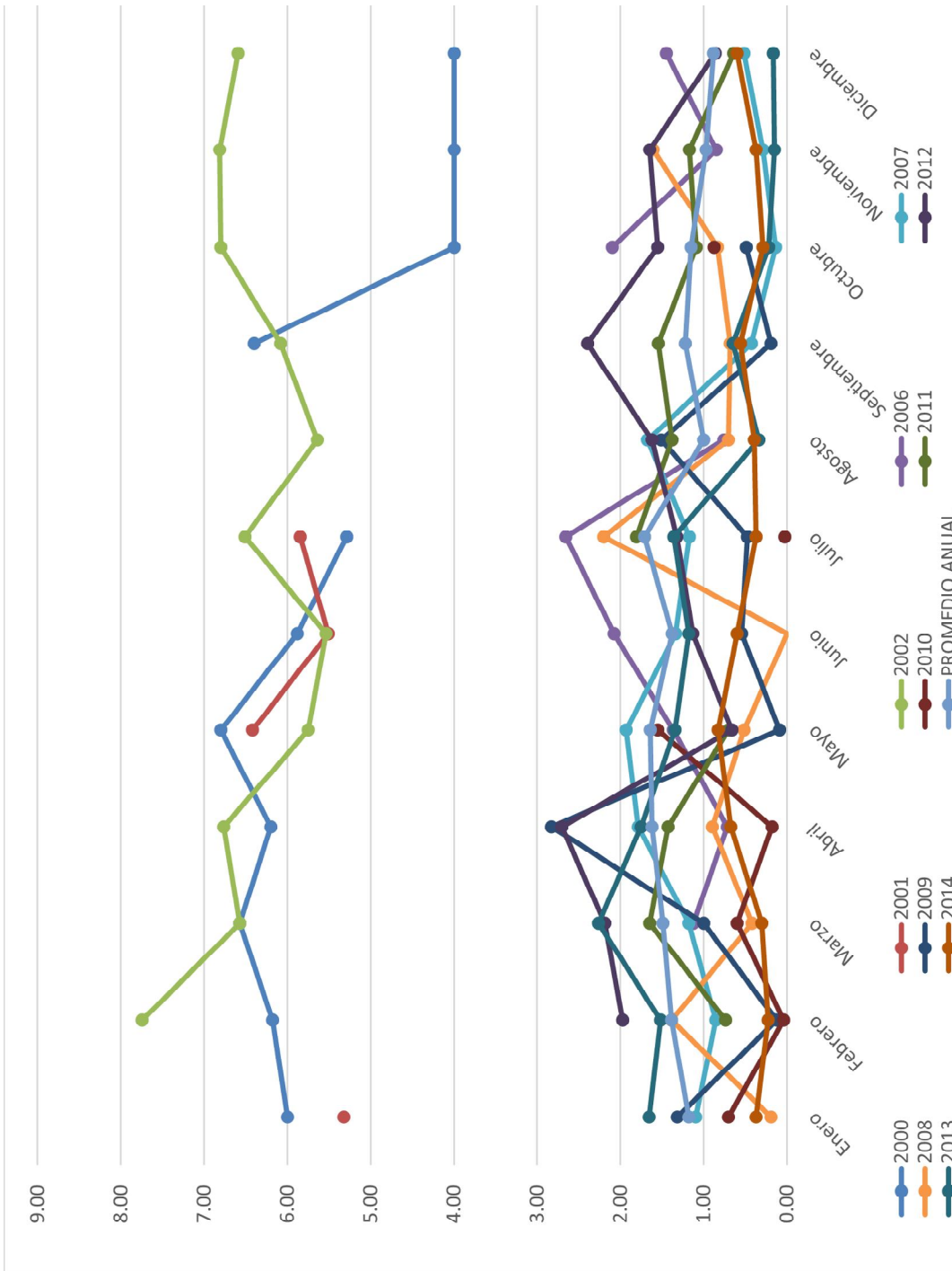
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	6,0	6,2	6,6	6,2	6,8	5,9	5,3	NM	6,4	4,0	4,0	4,0
2001	5,3	NM	NM	NM	6,4	5,5	5,9	NM	NM	NM	NM	NM
2002	NM	7,7	6,6	6,8	5,8	5,5	6,5	5,6	6,1	6,8	6,8	6,6
2003	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2004	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2005	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2006	NM	NM	1,1	0,7	1,4	2,1	2,7	0,8	-0,7	2,1	0,9	1,5
2007	1,1	0,9	1,2	1,8	1,9	1,3	1,2	1,7	0,4	0,1	0,3	0,5
2008	0,2	1,4	0,4	0,9	0,5	0,0	2,2	0,7	0,7	0,8	1,6	NM
2009	1,3	0,1	1,0	2,8	0,1	0,5	0,5	1,5	0,2	0,5	0,0	NM
2010	0,7	0,0	0,6	0,2	1,6	-0,2	0,0	NM	NM	0,9	-1,4	-2,5
2011	-0,1	0,7	1,7	1,4	0,7	-0,1	1,8	1,4	1,5	1,1	1,2	0,6
2012	NM	2,0	2,2	2,7	0,7	1,1	1,3	1,6	2,4	1,6	1,7	0,9
2013	1,7	1,5	2,3	1,8	1,3	1,2	1,4	0,3	0,6	0,2	0,2	0,2
2014	0,4	0,2	0,3	0,7	0,8	0,6	0,4	0,4	0,6	0,3	0,4	0,6
2015	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 26. Datos de concentración de sedimentación ácida en unidades de pH de 2000 a 2014



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XX. **Concentración de monóxido de carbono en partes por millón de 2000 a 2016**

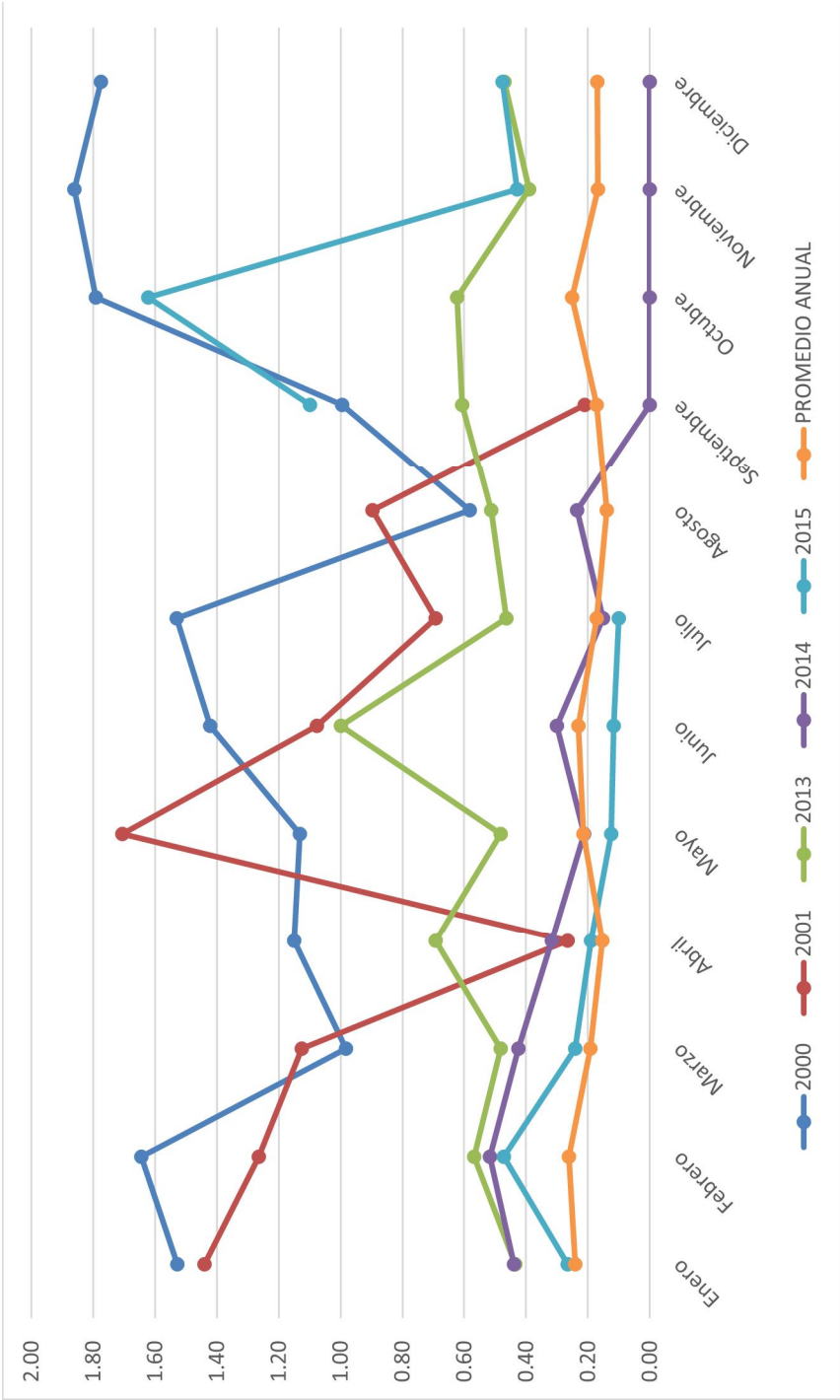
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	1,53	1,64	0,98	1,15	1,13	1,42	1,53	0,58	0,99	1,79	1,86	1,78
2001	1,44	1,27	1,13	0,27	1,71	1,08	0,69	0,90	0,21	NM	NM	NM
2002	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2003	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2004	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2005	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2006	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2007	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2008	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2009	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2010	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2011	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2012	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2013	0,44	0,57	0,48	0,69	0,48	1,00	0,47	0,51	0,61	0,62	0,39	0,47
2014	0,44	0,52	0,43	0,32	0,21	0,30	0,15	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
2015	0,27	0,47	0,24	0,19	0,13	0,12	0,10	NM	1,10	1,62	0,43	0,48
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 27. **Datos de concentración de monóxido de carbono en partes por millón de 2000 a 2015**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXI. **Concentración de ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

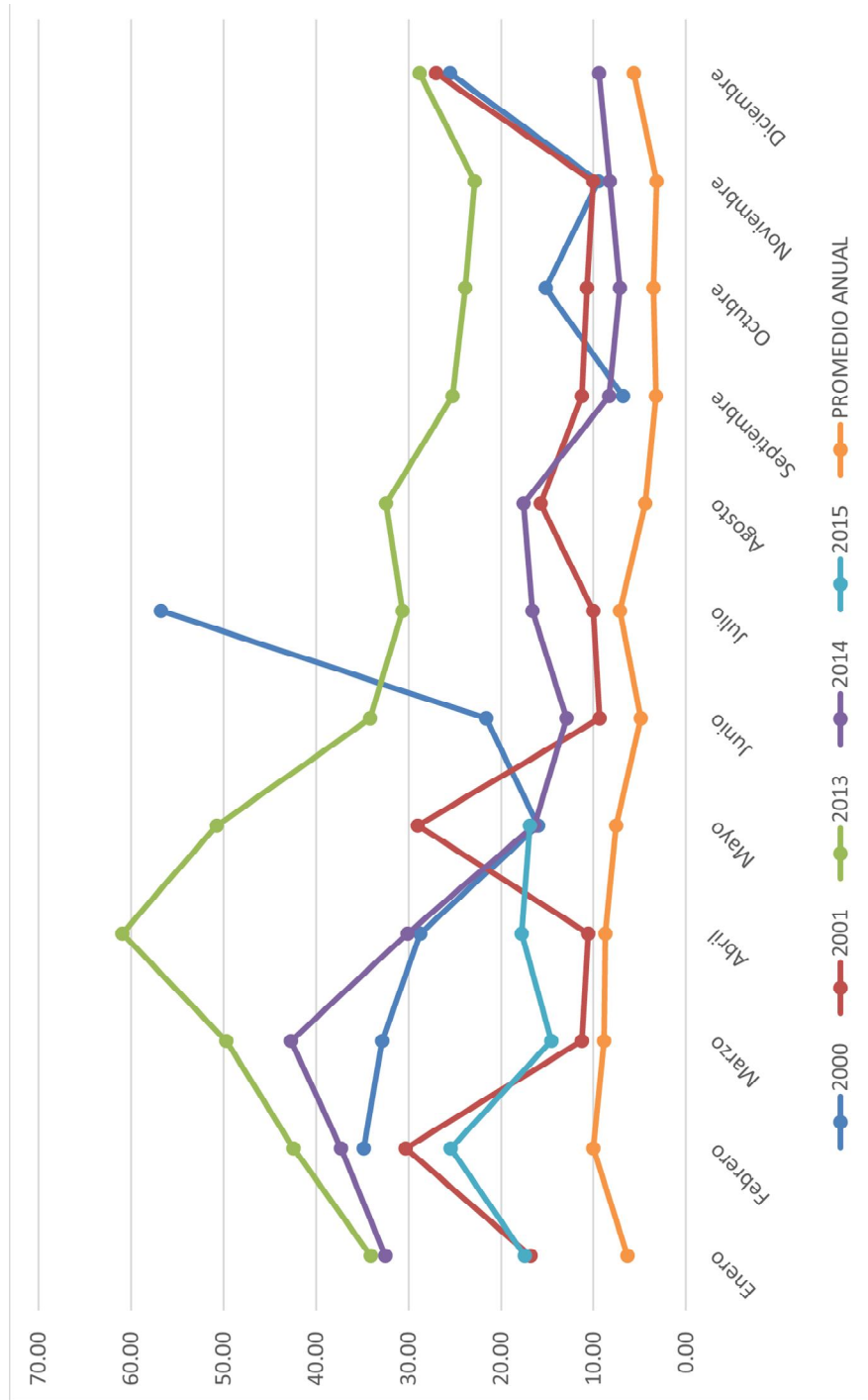
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	NM	34,9	32,9	28,8	16,0	21,6	56,8	NM	6,8	15,2	9,5	25,5
2001	16,8	30,3	11,3	10,6	29,0	9,3	10,0	15,7	11,3	10,7	10,0	27,0
2002	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2003	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2004	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2005	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2006	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2007	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2008	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2009	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2010	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2011	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2012	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2013	34,1	42,5	49,7	60,9	50,7	34,1	30,6	32,4	25,3	23,9	22,8	28,8
2014	32,5	37,3	42,7	30,1	16,4	12,9	16,6	17,6	8,3	7,1	8,3	9,4
2015	17,5	25,5	14,6	17,8	16,9	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 28. **Datos de concentración de ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2015**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXII. **Concentración de partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

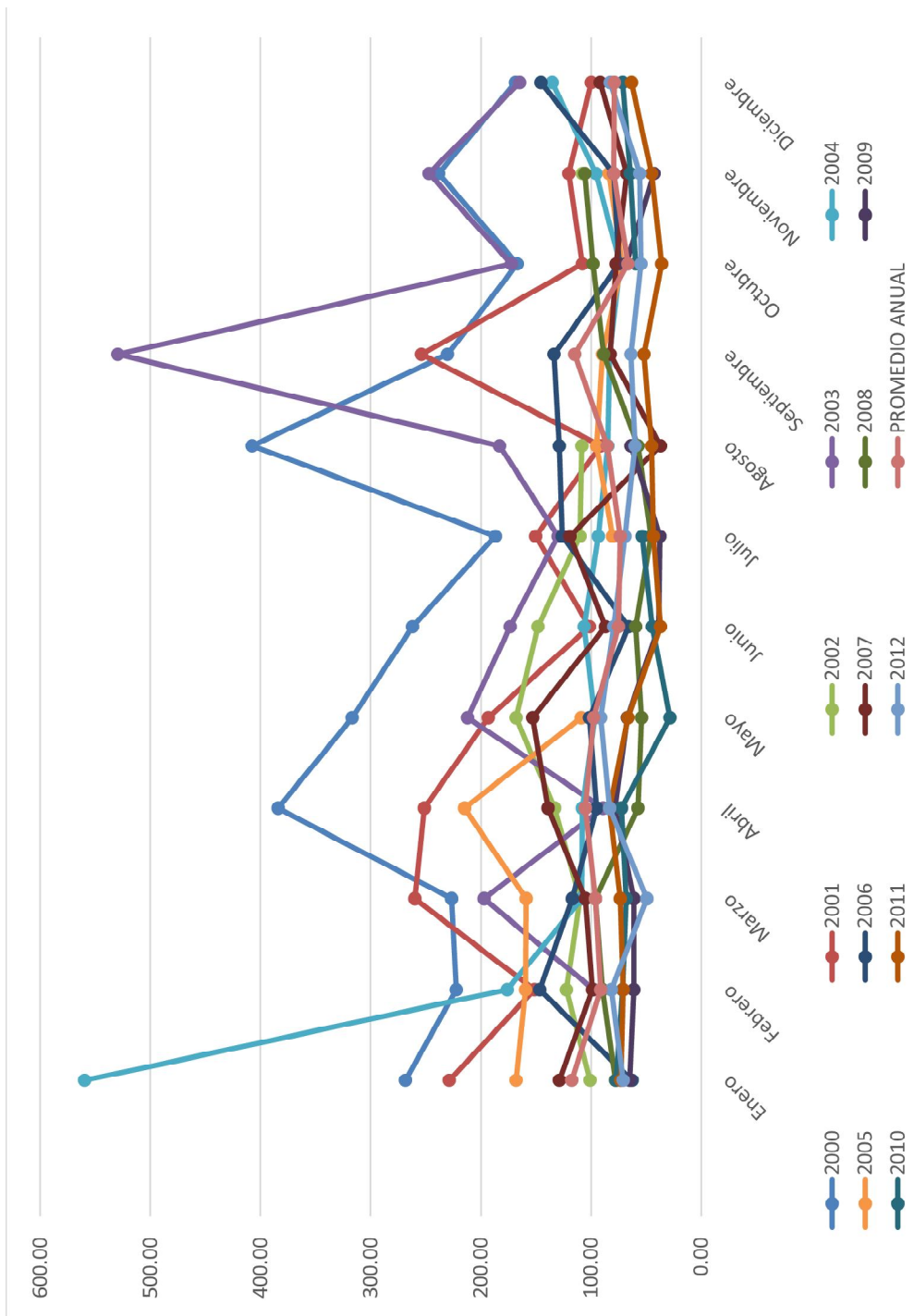
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2000	269	222	227	384	317	262	187	408	230	167	239	169
2001	229	151	260	251	193	101	150	91	254	108	120	100
2002	101	122	110	133	168	148	110	108	NM	NM	108	NM
2003	NM	97	197	89	212	174	130	183	530	172	247	165
2004	560	176	109	108	97	106	93	85	83	74	96	135
2005	168	159	159	215	109	NM	80	95	90	72	84	NM
2006	63	147	117	95	101	66	126	129	134	75	79	146
2007	129	99	105	139	153	87	119	37	83	77	67	92
2008	78	90	96	57	54	60	46	57	88	98	106	NM
2009	65	61	61	78	67	38	37	64	NM	68	43	NM
2010	77	72	68	72	28	45	54	NM	NM	59	65	71
2011	73	71	74	83	67	37	43	45	52	36	45	63
2012	71	81	49	83	91	80	69	60	64	55	56	83
2013	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2014	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2015	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD
2016	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD

SD: Sin Datos.

NM: No Muestreado.

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 29. **Datos de concentración de partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2012**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

3.8. Análisis estadístico

Se realizará la correlación entre las variables cuantitativas:

- Relación temperatura-contaminante
 - Temperatura-PTS
 - Temperatura- PM₁₀
 - Temperatura-PM_{2.5}
 - Temperatura-NO₂
 - Temperatura-sedimentación ácida
 - Temperatura-O₃
 - Temperatura-CO
 - Temperatura-SO₂

- Relación precipitación-contaminante
 - Precipitación-PTS
 - Precipitación-PM₁₀
 - Precipitación-PM_{2.5}
 - Precipitación-NO₂
 - Precipitación-sedimentación ácida
 - Precipitación-O₃
 - Precipitación-CO
 - Precipitación-SO₂

- Relación evapotranspiración potencial-contaminante
 - Evapotranspiración potencial-PTS
 - Evapotranspiración potencial-PM₁₀
 - Evapotranspiración potencial-PM_{2.5}
 - Evapotranspiración potencial-NO₂
 - Evapotranspiración potencial-sedimentación ácida
 - Evapotranspiración potencial-O₃
 - Evapotranspiración potencial-CO
 - Evapotranspiración potencial-SO₂

- Relación radiación solar-contaminante
 - Radiación solar-PTS
 - Radiación solar-PM₁₀
 - Radiación solar -PM_{2.5}
 - Radiación solar-NO₂
 - Radiación solar-sedimentación ácida
 - Radiación solar-O₃
 - Radiación solar-CO
 - Radiación solar-SO₂

Se utilizará la correlación de Pearson que se define como:

El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución e, igualmente, de fácil interpretación. Digamos, en primera instancia, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1.

Esto es, si tenemos dos variables X e Y, y definimos el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables como r_{xy} entonces:

$$0 \leq r_{xy} \leq 1$$

Si se contempla el signo el coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y $+1$. No obstante ha de indicarse que la magnitud de la relación viene especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de $+1$ como de -1 . En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa.

Decimos que la correlación entre dos variables X e Y es perfecta positiva cuando exactamente en la medida que aumenta una de ellas aumenta la otra. Esto sucede cuando la relación entre ambas variables es funcionalmente exacta.

Para obtener la correlación de Pearson se debe realizar:

- El promedio de cada variable

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \qquad \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N}$$

- Desviación típica de cada variable

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum X^2}{N} - \bar{X}^2} \qquad S_Y = \sqrt{\frac{\sum Y^2}{N} - \bar{Y}^2}$$

- Covarianza de cada variable

$$Z_x = \frac{X - \bar{X}}{S_x} \qquad Z_y = \frac{Y - \bar{Y}}{S_Y}$$

- Correlación de Pearson

$$r_p = \frac{\sum Z_x Z_y}{N}$$

3.8.1. Interpretación del coeficiente de correlación

Como se ha indicado el coeficiente de correlación de Pearson es un índice cuyos valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 mayor será la correlación, y menor cuanto más cerca de cero.

La interpretación del coeficiente de correlación en términos de proporción de variabilidad compartida o explicada, se ofrece una idea más adecuada de la magnitud de la relación. Nos referimos al coeficiente de determinación. Dicho coeficiente se define como el cuadrado del coeficiente de correlación; esto es, dada dos variables X e Y, hace referencia a r^2_{xy} y se entiende como una proporción de varianza compartida entre ambas variables.

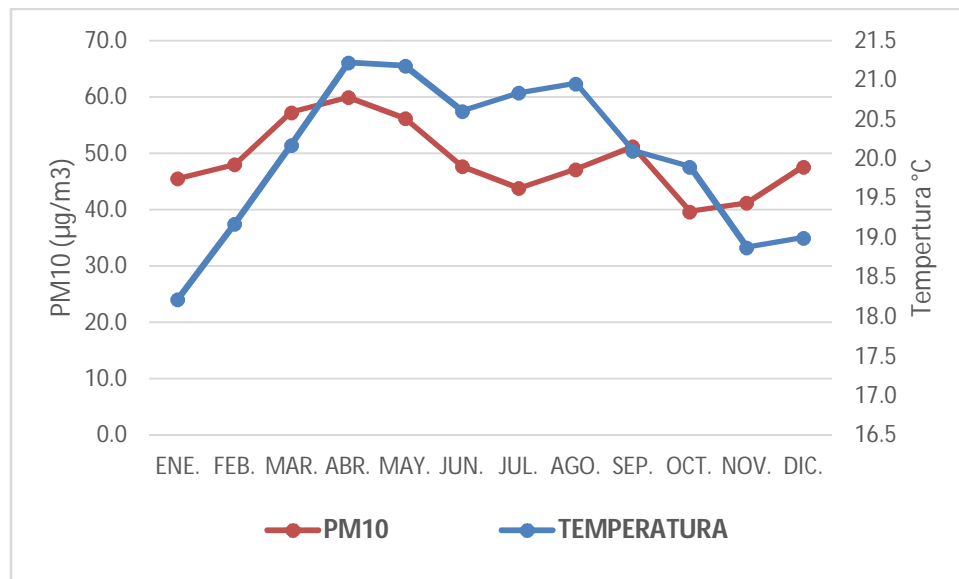
4. RESULTADOS

Tabla XXIII. Promedio de temperatura en grados centígrados *versus* promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
PM ₁₀	45,6	48,1	57,4	60,0	56,2	47,7	43,9	47,2	51,2	39,7	41,3	47,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 30. Promedio de temperatura *versus* promedio de PM₁₀



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXIV. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y PM₁₀ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,6496	42,20 %
2001	0,0989	0,98 %
2002	0,4749	22,56 %
2003	-0,0771	0,59 %
2004	-0,3246	10,54 %
2005	-0,1384	1,92 %
2006	0,7194	51,75 %
2007	0,4885	23,87 %
2008	-0,0430	0,18 %
2009	0,0080	0,01 %
2010	0,1315	1,73 %
2011	0,1722	2,96 %
2012	0,2978	8,87 %
2013	-0,1206	1,45 %
2014	-0,2339	5,47 %
2015	-0,2587	6,69 %
2016	-	-
PROMEDIO	0,4981	24,81 %

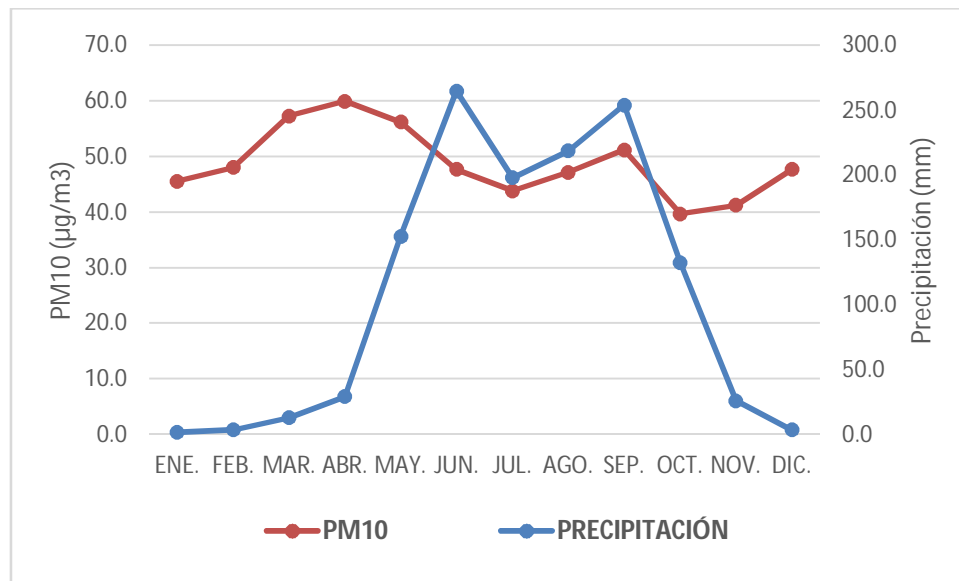
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXV. **Promedio de precipitación en milímetros versus promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
PM₁₀	45,6	48,1	57,4	60,0	56,2	47,7	43,9	47,2	51,2	39,7	41,3	47,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 31. **Promedio de precipitación versus promedio de PM₁₀**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXVI. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y PM₁₀ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,4035	16,28 %
2001	-0,2379	5,66 %
2002	0,5249	27,55 %
2003	0,3976	15,81 %
2004	-0,0410	0,17 %
2005	-0,3693	13,64 %
2006	0,4679	21,89 %
2007	-0,1959	3,84 %
2008	-0,0292	0,08 %
2009	-0,0401	0,16 %
2010	-0,3875	15,01 %
2011	-0,5485	30,08 %
2012	0,1049	1,10 %
2013	-0,3722	13,86 %
2014	-0,2822	7,96 %
2015	-0,1703	2,90 %
2016	-	-
PROMEDIO	-0,1169	1,37 %

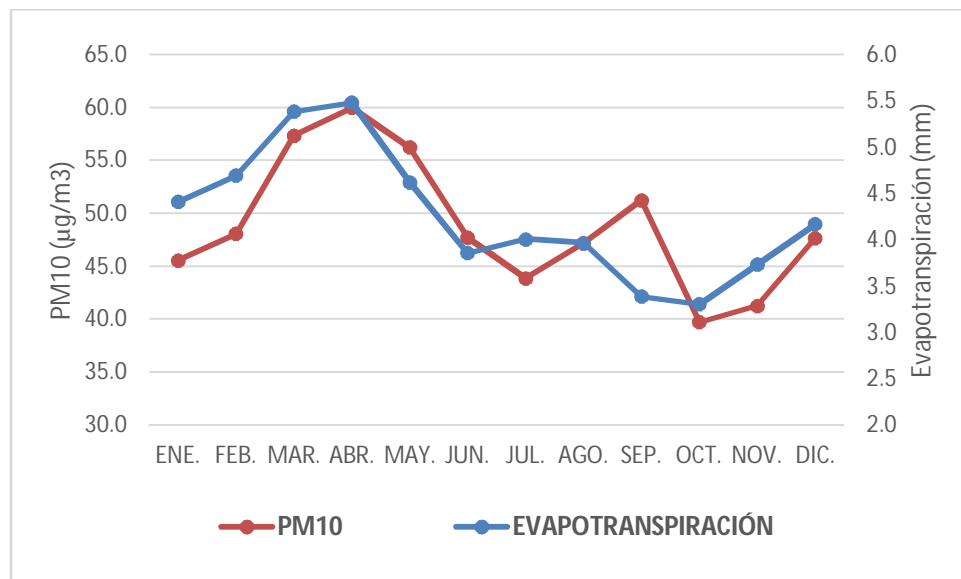
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXVII. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,4	4,7	5,4	5,5	4,6	3,9	4,0	4,0	3,4	3,3	3,7	4,2
PM₁₀	45,6	48,1	57,4	60,0	56,2	47,7	43,9	47,2	51,2	39,7	41,3	47,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 32. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de PM₁₀**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXVIII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y PM₁₀ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,5883	34,61 %
2001	0,2417	5,84 %
2002	-0,0411	0,17 %
2003	-0,7067	49,94 %
2004	-0,1108	1,23 %
2005	0,7031	49,44 %
2006	0,4300	18,49 %
2007	0,2938	8,63 %
2008	0,1195	1,43 %
2009	0,5089	25,90 %
2010	0,3859	14,89 %
2011	0,6012	36,14 %
2012	0,4865	23,67 %
2013	0,4081	16,66 %
2014	0,3934	15,48 %
2015	0,6262	39,21 %
2016	-	-
PROMEDIO	0,7816	61,09 %

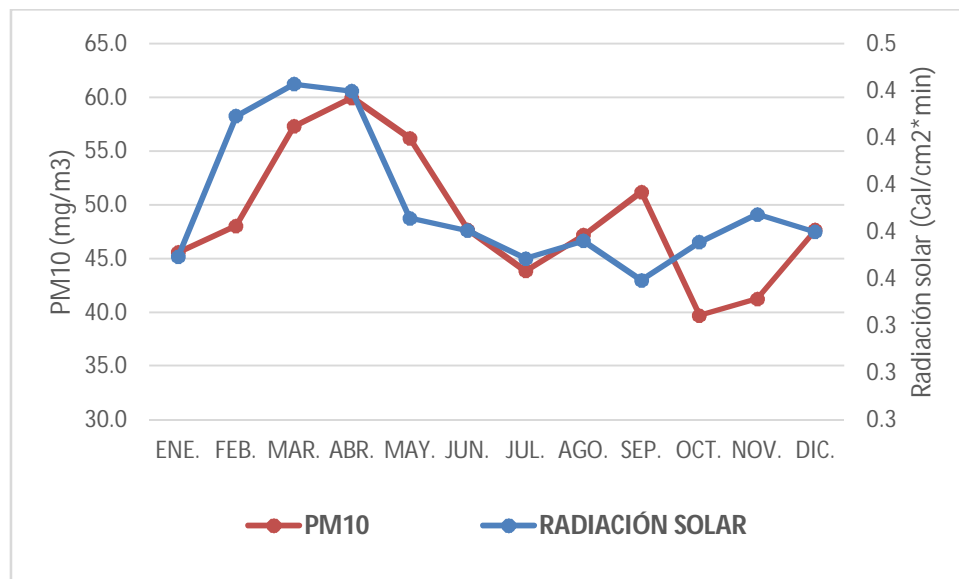
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXIX. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto versus promedio partículas menores a 10 micras en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
PM₁₀	45,6	48,1	57,4	60,0	56,2	47,7	43,9	47,2	51,2	39,7	41,3	47,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 33. **Promedio de radiación solar versus promedio de PM₁₀**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXX. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y PM₁₀ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,0594	0,35 %
2001	-0,1349	1,82 %
2002	0,0359	0,13 %
2003	0,1614	2,61 %
2004	-0,4535	20,56 %
2005	0,4528	20,51 %
2006	-0,1340	1,80 %
2007	0,1339	1,79 %
2008	0,3968	15,75 %
2009	0,2090	4,37 %
2010	0,3604	12,99 %
2011	0,7453	55,55 %
2012	-0,4998	24,98 %
2013	0,6432	41,38 %
2014	0,3003	9,02 %
2015	0,5442	29,61 %
2016	-	-
PROMEDIO	0,6157	37,91 %

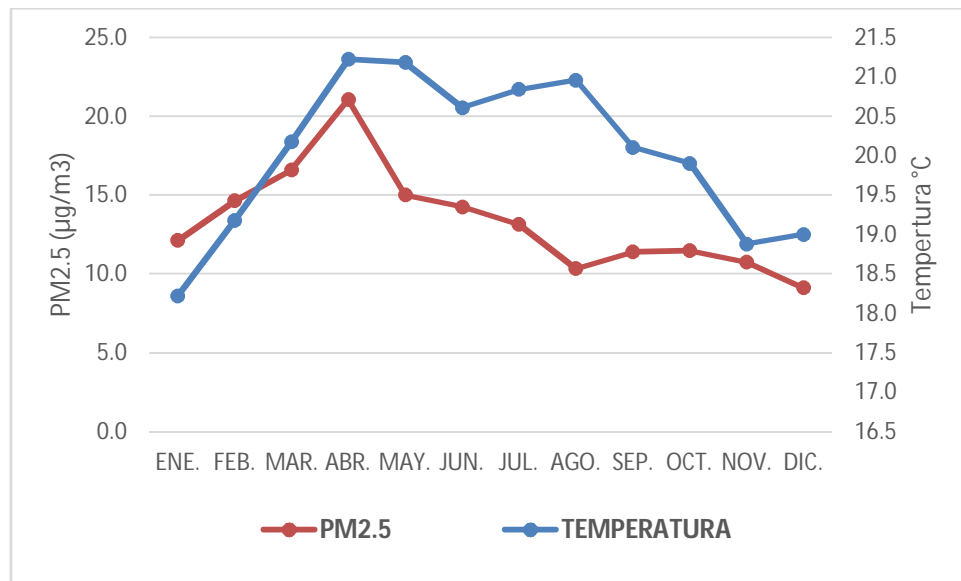
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXI. **Promedio de temperatura en grados centígrados versus promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
PM _{2,5}	12,1	14,7	16,6	21,1	15,0	14,3	13,2	10,4	11,4	11,5	10,8	9,1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 34. **Promedio de temperatura versus promedio de PM_{2,5}**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y PM_{2,5} entre los años 2009 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2009	0,4710	22,18 %
2012	-0,4730	22,38 %
2013	-0,0125	0,02 %
2014	0,4560	20,79 %
2015	0,1545	2,39 %
2016	0,4247	18,04 %
PROMEDIO	0,4910	24,10 %

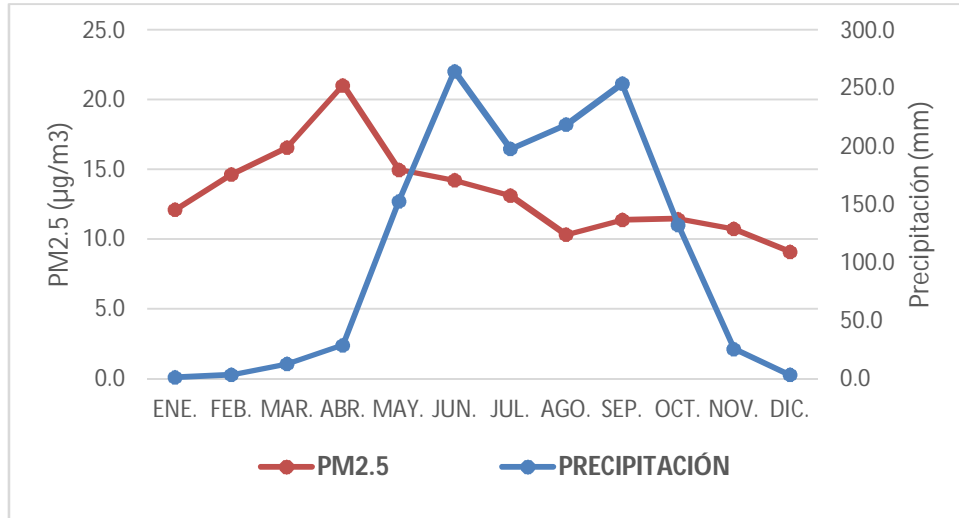
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXIII. **Promedio de precipitación en milímetros versus promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
PM_{2,5}	12,1	14,7	16,6	21,1	15,0	14,3	13,2	10,4	11,4	11,5	10,8	9,1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 35. Promedio de precipitación versus promedio de PM_{2,5}



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXIV. Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y PM_{2,5} entre los años 2009 a 2016

AÑO	Coeficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2009	0,0601	0,36 %
2012	-0,3401	11,57 %
2013	-0,6866	47,15 %
2014	0,0877	0,77 %
2015	0,4823	23,26 %
2016	-0,1583	2,51 %
PROMEDIO	-0,1911	3,65 %

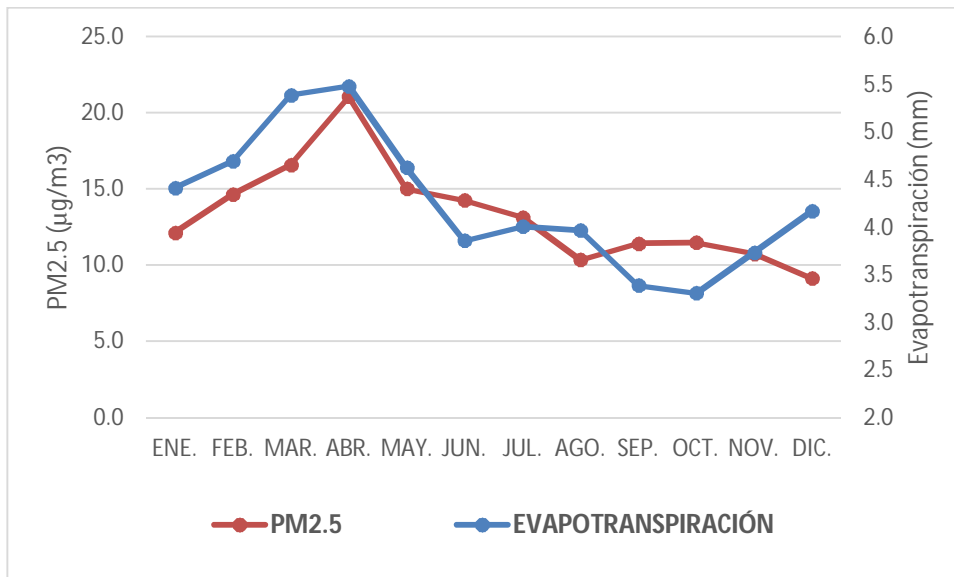
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXV. Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros *versus* promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,4	4,7	5,4	5,5	4,6	3,9	4,0	4,0	3,4	3,3	3,7	4,2
PM_{2,5}	12,1	14,7	16,6	21,1	15,0	14,3	13,2	10,4	11,4	11,5	10,8	9,1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 36. Promedio de evapotranspiración potencial *versus* promedio de PM_{2,5}



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVI. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y PM_{2,5} entre los años 2009 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2009	0,6729	45,28 %
2012	0,3835	14,70 %
2013	0,6471	41,88 %
2014	0,1629	2,65 %
2015	0,2720	7,40 %
2016	0,5657	32,00 %
PROMEDIO	0,7895	62,34 %

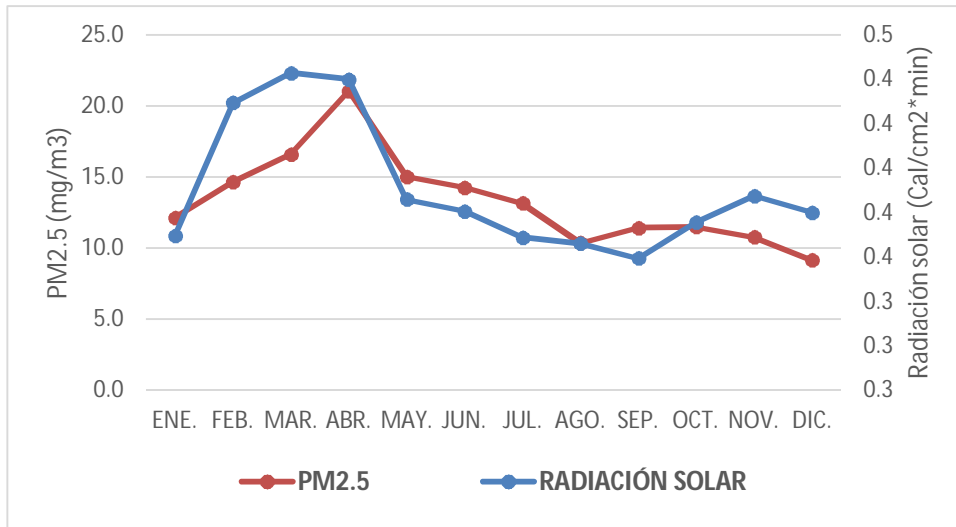
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVII. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto versus promedio partículas menores a 2,5 micras en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2009 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
PM_{2,5}	12,1	14,7	16,6	21,1	15,0	14,3	13,2	10,4	11,4	11,5	10,8	9,1

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 37. Promedio de radiación solar versus promedio de PM_{2,5}



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXVIII. Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y PM_{2,5} entre los años 2009 a 2016

AÑO	Coeficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2009	0,3377	11,41 %
2012	0,0231	0,05 %
2013	0,7309	53,42 %
2014	0,2934	8,61 %
2015	0,18577	3 %
2016	0,5575	31,08 %
PROMEDIO	0,7781	60,54 %

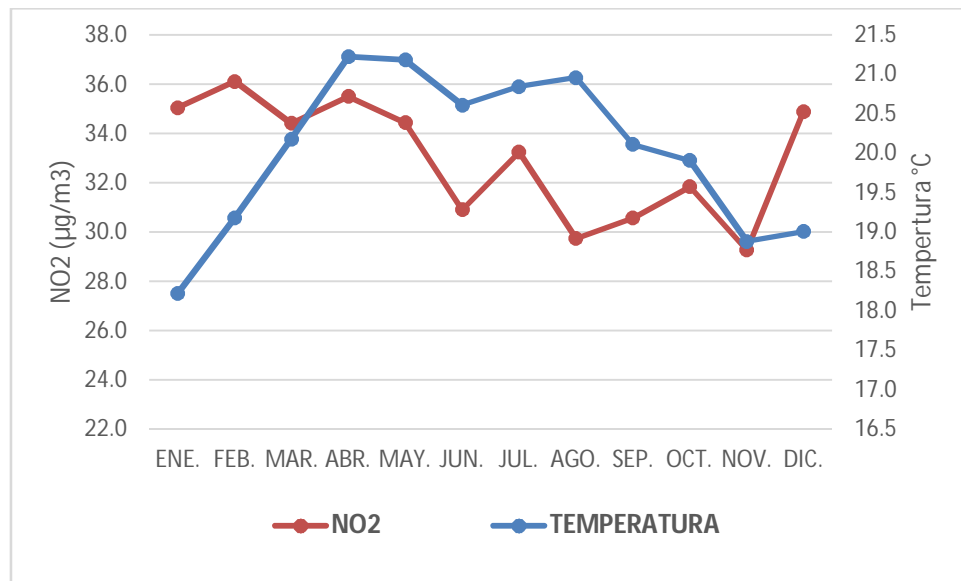
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XXXIX. Promedio de temperatura en grados centígrados *versus* promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
NO ₂	35,0	36,1	34,4	35,5	34,4	30,9	33,2	29,7	30,6	31,8	29,3	34,9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 38. Promedio de temperatura *versus* promedio de NO₂



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XL. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y NO₂ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,2173	4,72 %
2001	-0,1797	3,23 %
2002	-0,2717	7,38 %
2003	0,2799	7,83 %
2004	-0,5075	25,75 %
2005	0,1759	3,09 %
2006	0,5454	29,74 %
2007	0,5607	31,44 %
2008	0,0031	0,00 %
2009	0,6556	42,98 %
2010	0,1145	1,31 %
2011	-0,4247	18,04 %
2012	-0,0834	0,70 %
2013	-0,6909	47,74 %
2014	0,0593	0,35 %
2015	0,2823	7,97 %
2016	-0,3982	15,86 %
PROMEDIO	-0,1210	1,46 %

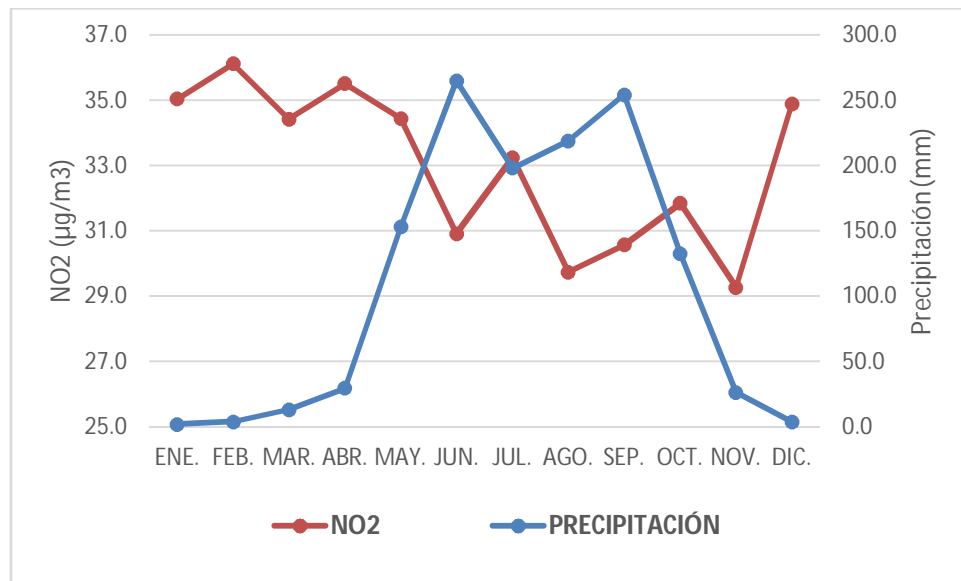
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLI. **Promedio de precipitación en milímetros versus promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
NO ₂	35,0	36,1	34,4	35,5	34,4	30,9	33,2	29,7	30,6	31,8	29,3	34,9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 39. **Promedio de precipitación versus promedio de NO₂**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y NO₂ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,3859	14,89 %
2001	-0,4720	22,28 %
2002	-0,6601	43,57 %
2003	0,1687	2,85 %
2004	-0,2742	7,52 %
2005	-0,1300	1,69 %
2006	0,1122	1,26 %
2007	-0,1305	1,70 %
2008	0,3153	9,94 %
2009	0,2912	8,48 %
2010	0,1436	2,06 %
2011	-0,7096	50,36 %
2012	-0,3090	9,55 %
2013	-0,5193	26,96 %
2014	-0,4974	24,74 %
2015	-0,0434	0,19 %
2016	0,2978	8,87 %
PROMEDIO	-0,6217	38,65 %

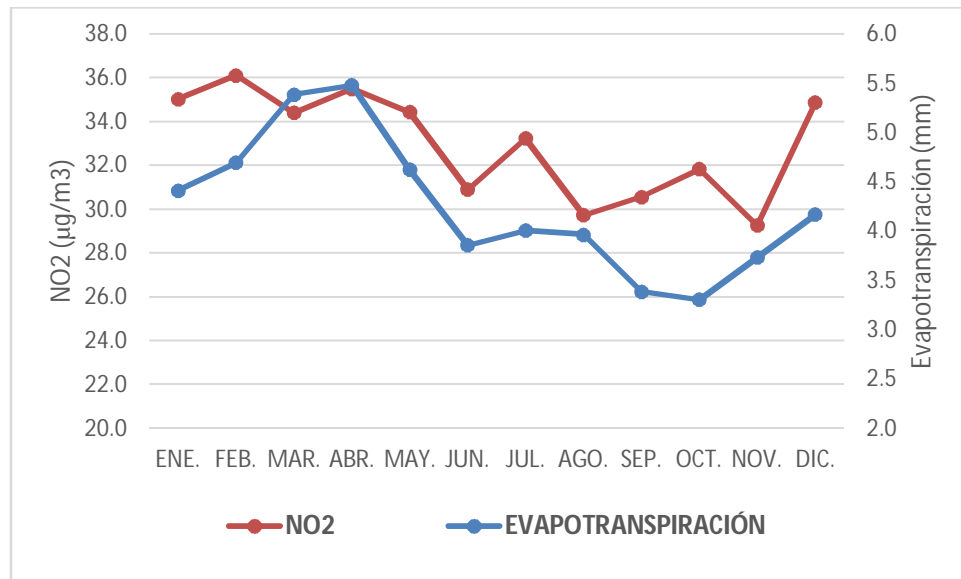
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLIII. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,4	4,7	5,4	5,5	4,6	3,9	4,0	4,0	3,4	3,3	3,7	4,2
NO₂	35,0	36,1	34,4	35,5	34,4	30,9	33,2	29,7	30,6	31,8	29,3	34,9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 40. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de NO₂**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLIV. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y NO₂ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,5517	30,44 %
2001	0,3503	12,27 %
2002	0,4819	23,22 %
2003	-0,0070	0,00 %
2004	0,0022	0,00 %
2005	0,6138	37,68 %
2006	0,6582	43,32 %
2007	0,1624	2,64 %
2008	-0,2670	7,13 %
2009	0,1467	2,15 %
2010	-0,1416	2,00 %
2011	0,4901	24,02 %
2012	0,1315	1,73 %
2013	0,3662	13,41 %
2014	0,2370	5,61 %
2015	0,8160	66,58 %
2016	0,2012	4,05 %
PROMEDIO	0,7330	53,72 %

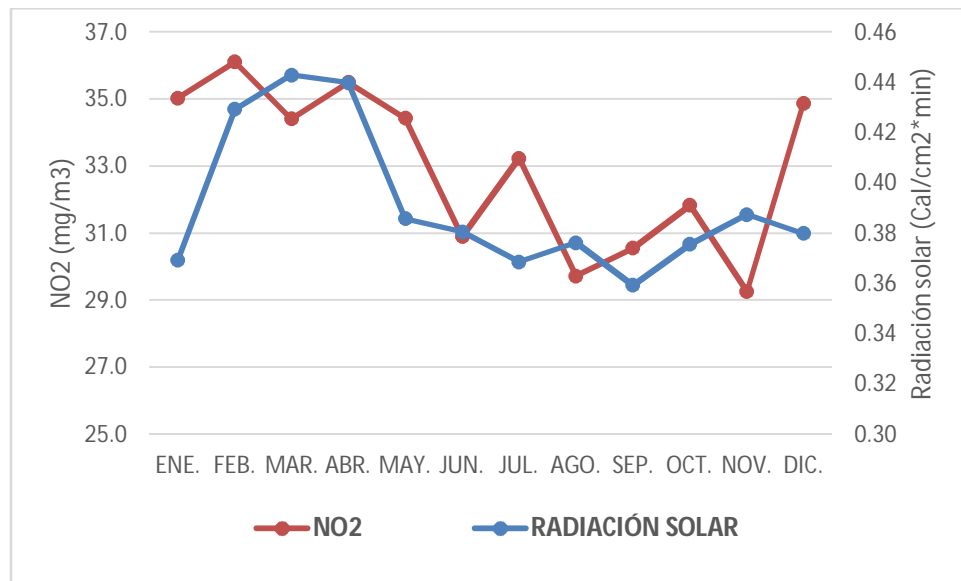
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLV. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto versus promedio dióxido de nitrógeno en microgramos sobre metro cúbico de 2000 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,37	0,43	0,44	0,44	0,39	0,38	0,37	0,38	0,36	0,38	0,39	0,38
NO₂	35,0	36,1	34,4	35,5	34,4	30,9	33,2	29,7	30,6	31,8	29,3	34,9

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 41. **Promedio de radiación solar versus promedio de NO₂**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLVI. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y NO₂ de 2000 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,5010	25,10 %
2001	-0,5073	25,73 %
2002	0,5663	32,07 %
2003	-0,4243	18,00 %
2004	-0,3974	15,80 %
2005	0,3836	14,72 %
2006	-0,4941	24,41 %
2007	-0,2897	8,39 %
2008	0,2410	5,81 %
2009	-0,1023	1,05 %
2010	0,0126	0,02 %
2011	0,2452	6,01 %
2012	0,2838	8,06 %
2013	0,3128	9,78 %
2014	0,2503	6,27 %
2015	0,6221	38,70 %
2016	-0,2812	7,91 %
PROMEDIO	0,5404	29,21 %

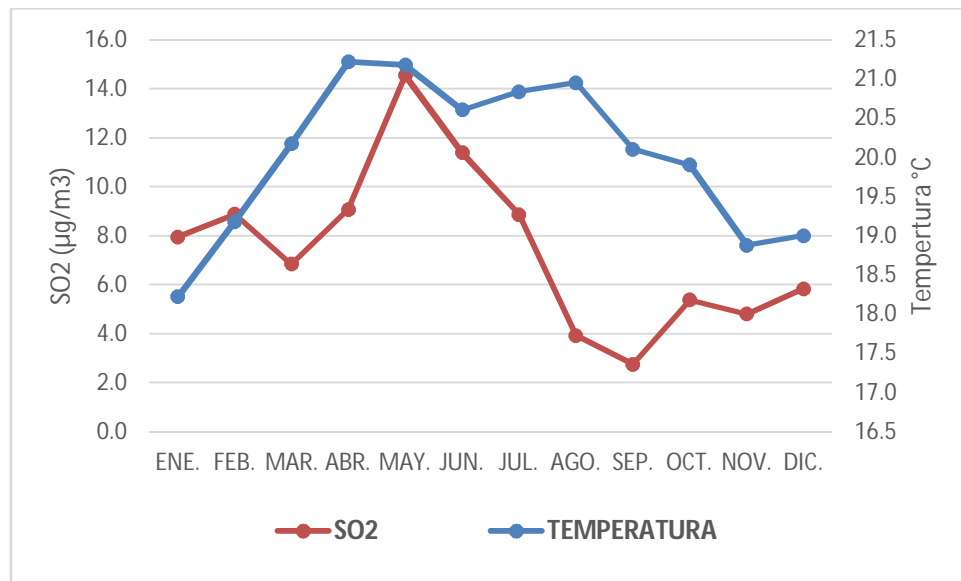
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLVII. Promedio de temperatura en grados centígrados *versus* promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
SO ₂	8,0	8,9	6,8	9,1	14,6	11,4	8,9	3,9	2,8	5,4	4,8	5,8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 42. Promedio de temperatura *versus* promedio de SO₂



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLVIII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y SO₂ entre los años 2006 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2006	0,1133	1,28 %
2007	0,4175	17,43 %
2008	-0,1505	2,27 %
2009	0,4348	18,91 %
2010	-0,4478	20,06 %
2011	-0,0798	0,64 %
2012	0,7196	51,78 %
2013	0,2558	6,54 %
2014	0,0127	0,02 %
2015	-0,4569	20,87 %
2016	0,1373	1,88 %
PROMEDIO	0,3465	12,01 %

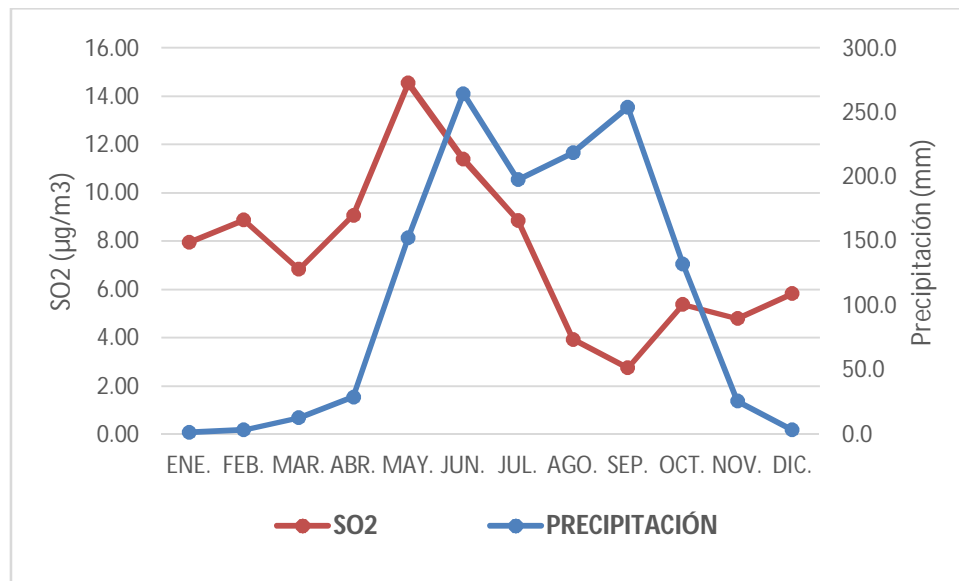
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XLIX. Promedio de precipitación en milímetros *versus* promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
SO ₂	8,0	8,9	6,8	9,1	14,6	11,4	8,9	3,9	2,8	5,4	4,8	5,8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 43. Promedio de precipitación *versus* promedio de SO₂



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla L. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y SO₂ entre los años 2006 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2006	0,4438	19,70 %
2007	-0,2036	4,15 %
2008	0,2392	5,72 %
2009	0,3873	15,00 %
2010	-0,5773	33,32 %
2011	0,1536	2,36 %
2012	0,1371	1,88 %
2013	-0,3679	13,54 %
2014	-0,1338	1,79 %
2015	-0,4335	18,79 %
2016	-0,0508	0,26 %
PROMEDIO	0,0131	0,02 %

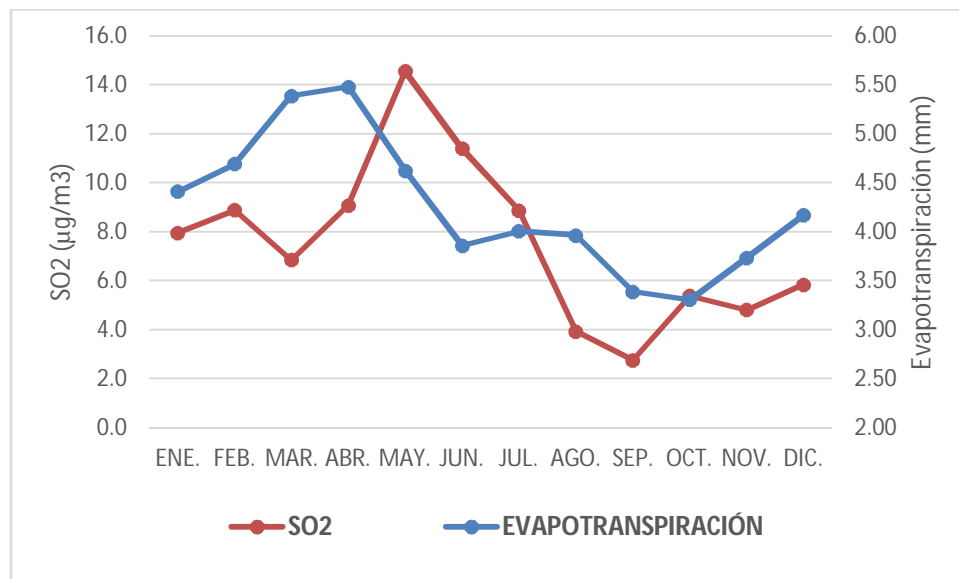
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LI. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,41	4,69	5,39	5,48	4,62	3,86	4,01	3,96	3,39	3,31	3,74	4,17
SO₂	8,0	8,9	6,8	9,1	14,6	11,4	8,9	3,9	2,8	5,4	4,8	5,8

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 44. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de SO₂**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y SO₂ entre los años 2006 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2006	0,2958	8,75 %
2007	0,4706	22,15 %
2008	-0,1899	3,61 %
2009	0,0498	0,25 %
2010	0,2657	7,06 %
2011	-0,2503	6,27 %
2012	0,5619	31,58 %
2013	0,4154	17,26 %
2014	0,2227	4,96 %
2015	0,2717	7,38 %
2016	0,0159	0,03 %
PROMEDIO	0,4414	19,49 %

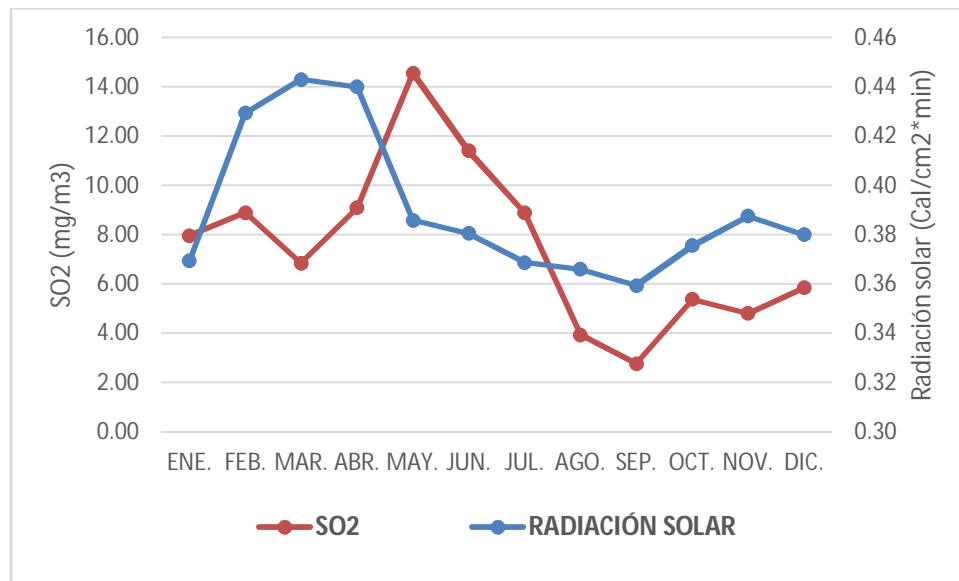
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LIII. Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto *versus* promedio dióxido de azufre en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2006 a 2016

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,37	0,43	0,44	0,44	0,39	0,38	0,37	0,37	0,36	0,38	0,39	0,38
SO₂	7,96	8,89	6,84	9,09	14,56	11,40	8,88	3,94	2,76	5,38	4,81	5,84

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 45. Promedio de radiación solar *versus* promedio de SO₂



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LIV. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y SO₂ entre los años 2006 a 2016**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2006	-0,6436	41,42 %
2007	0,5044	25,44 %
2008	0,3277	10,74 %
2009	0,4446	19,77 %
2010	0,4305	18,54 %
2011	-0,0169	0,03 %
2012	-0,1660	2,76 %
2013	0,4539	20,60 %
2014	0,5261	27,68 %
2015	0,3062	9,38 %
2016	0,3318	11,01 %
PROMEDIO	0,2572	6,62 %

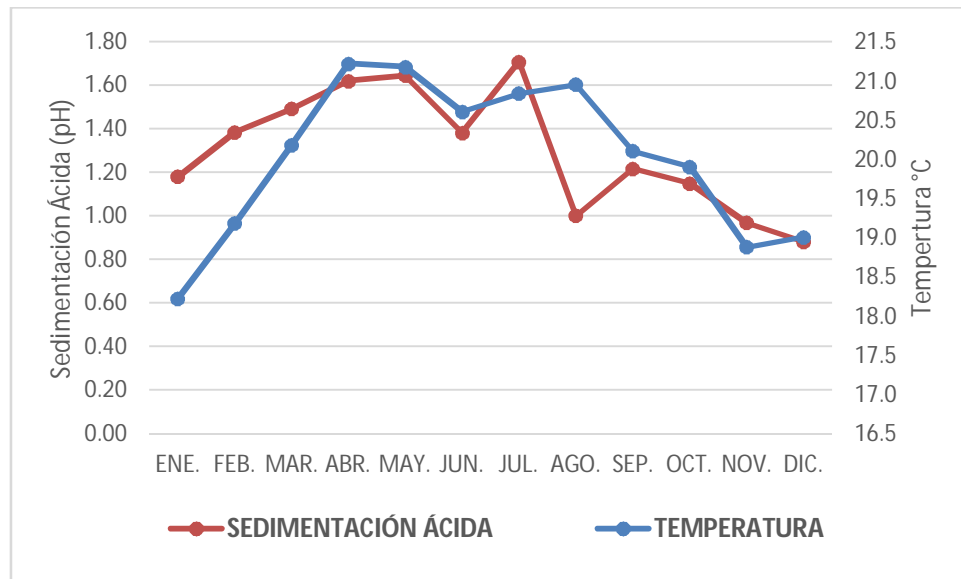
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LV. **Promedio de temperatura en grados centígrados versus promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
pH	1,18	1,39	1,49	1,62	1,65	1,38	1,71	1,00	1,22	1,15	0,97	0,88

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 46. **Promedio de temperatura versus promedio de sedimentación ácida**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LVI. **Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014**

AÑO	Coeficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,0340	0,12 %
2001	0,1711	2,93 %
2002	0,2764	7,64 %
2006	0,1160	1,34 %
2007	0,7505	56,33 %
2008	0,0541	0,29 %
2009	0,3113	9,69 %
2010	0,6325	40,00 %
2011	0,2310	5,34 %
2012	0,3245	10,53 %
2013	0,3211	10,31 %
2014	0,2069	4,28 %
PROMEDIO	0,6107	37,29 %

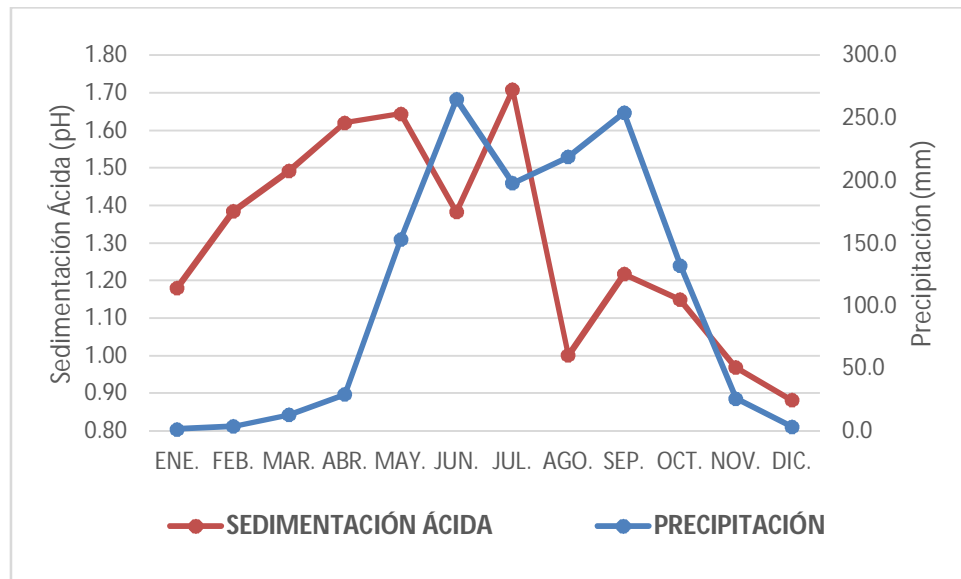
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LVII. **Promedio de precipitación en milímetros versus promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
pH	1,18	1,39	1,49	1,62	1,65	1,38	1,71	1,00	1,22	1,15	0,97	0,88

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 47. **Promedio de precipitación versus promedio de sedimentación ácida**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LVIII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,1042	1,09 %
2001	0,2995	8,97 %
2002	0,1219	1,49 %
2006	0,4528	20,50 %
2007	0,1551	2,40 %
2008	0,1017	1,03 %
2009	-0,3022	9,13 %
2010	0,2916	8,50 %
2011	0,2415	5,83 %
2012	0,0175	0,03 %
2013	-0,3204	10,26 %
2014	0,2814	7,92 %
PROMEDIO	0,1458	2,13 %

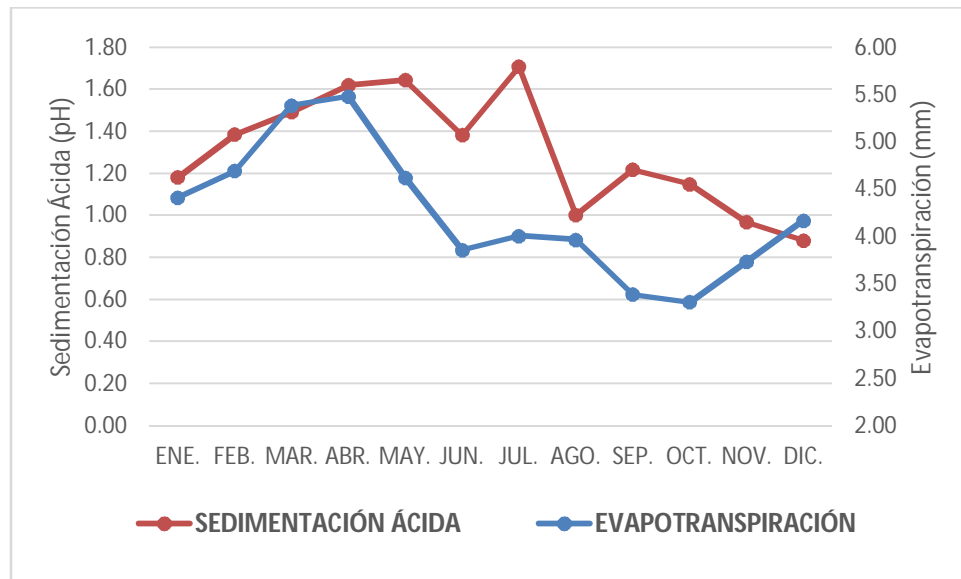
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LIX. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,41	4,69	5,39	5,48	4,62	3,86	4,01	3,96	3,39	3,31	3,74	4,17
pH	1,18	1,39	1,49	1,62	1,65	1,38	1,71	1,00	1,22	1,15	0,97	0,88

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 48. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de sedimentación ácida**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LX. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,4231	17,90 %
2001	0,2937	8,63 %
2002	0,1201	1,44 %
2006	0,5221	27,26 %
2007	0,4364	19,05 %
2008	-0,0825	0,68 %
2009	0,5078	25,78 %
2010	0,3376	11,40 %
2011	0,4310	18,57 %
2012	0,4269	18,23 %
2013	0,6550	42,91 %
2014	0,0882	0,78 %
PROMEDIO	0,5267	27,74 %

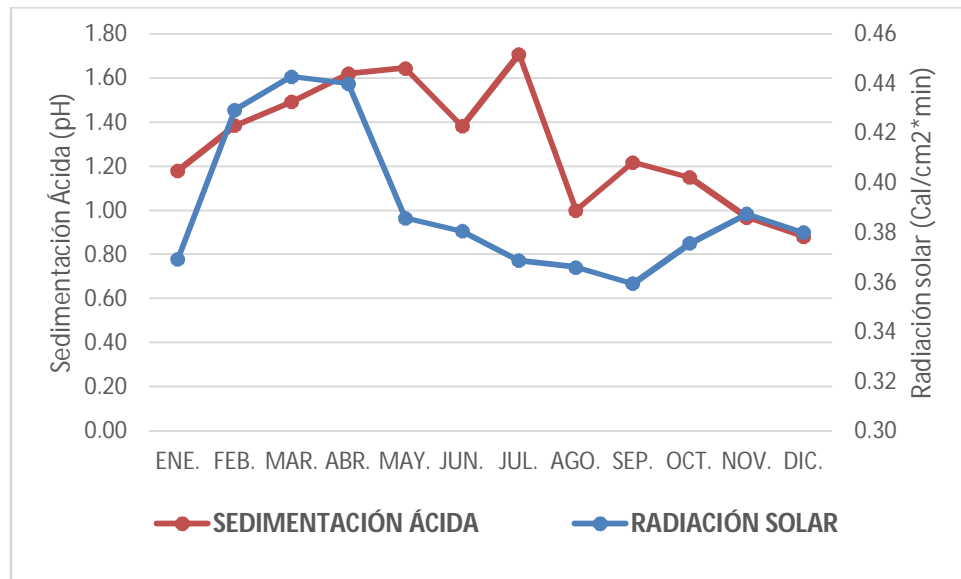
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXI. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto *versus* promedio sedimentación ácida en unidades de pH entre los años 2000 a 2014**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,43	0,44	0,44	0,39	0,38	0,37	0,37	0,36	0,38	0,39	0,38	0,43
pH	1,39	1,49	1,62	1,65	1,38	1,71	1,00	1,22	1,15	0,97	0,88	1,39

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 49. **Promedio de radiación solar *versus* promedio de sedimentación ácida**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y sedimentación ácida entre los años 2000 a 2014**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,2328	5,42 %
2001	-0,1202	1,45 %
2002	0,0651	0,42 %
2006	-0,6284	39,49 %
2007	0,1638	2,68 %
2008	0,0502	0,25 %
2009	0,1242	1,54 %
2010	-0,2194	4,81 %
2011	-0,3761	14,15 %
2012	0,6951	48,32 %
2013	0,5511	30,37 %
2014	-0,1931	3,73 %
PROMEDIO	0,4167	17,37 %

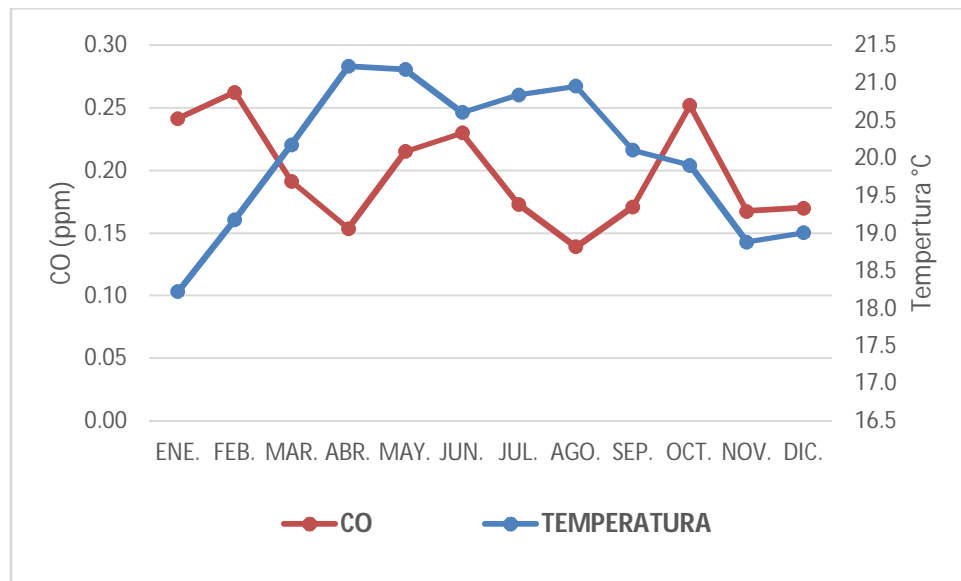
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXIII. Promedio de temperatura en grados centígrados *versus* promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
CO	0,24	0,26	0,19	0,15	0,22	0,23	0,17	0,14	0,17	0,25	0,17	0,17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 50. Promedio de temperatura *versus* promedio de CO



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXIV. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y CO entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,5493	30,17 %
2001	0,0923	0,85 %
2013	0,4975	24,75 %
2014	0,3014	9,08 %
2015	-0,0803	0,65 %
PROMEDIO	-0,3709	13,76 %

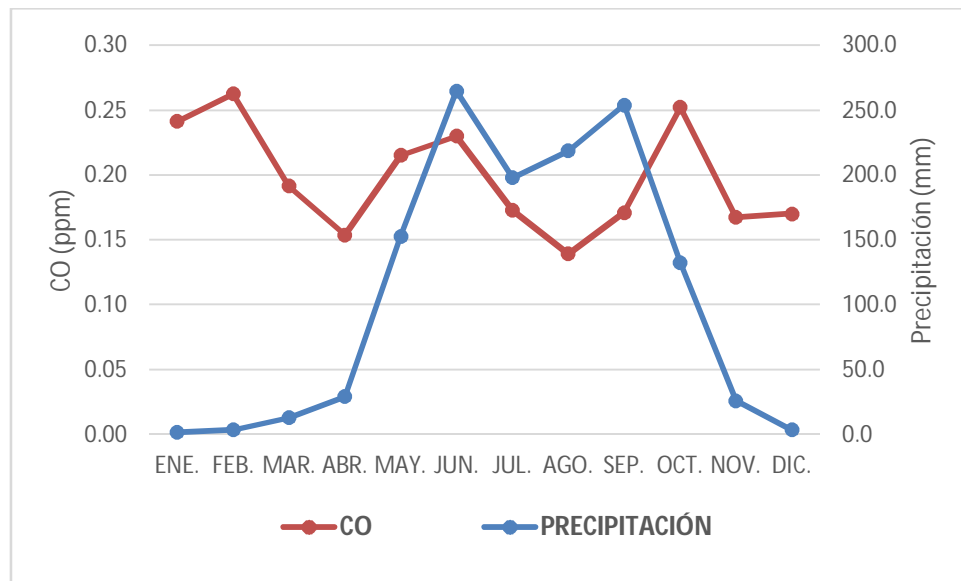
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXV. **Promedio de precipitación en milímetros versus promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
CO	0,24	0,26	0,19	0,15	0,22	0,23	0,17	0,14	0,17	0,25	0,17	0,17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 51. **Promedio de precipitación versus promedio de CO**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXVI. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y CO entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,4127	17,03 %
2001	0,0482	0,23 %
2013	0,2048	4,19 %
2014	-0,2804	7,86 %
2015	0,3371	11,36 %
PROMEDIO	-0,1538	2,37 %

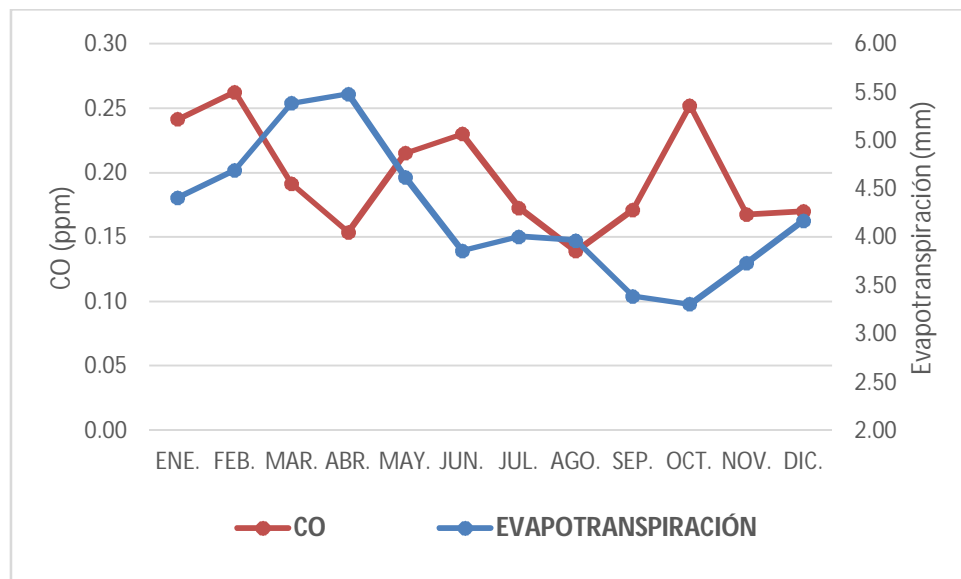
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXVII. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,41	4,69	5,39	5,48	4,62	3,86	4,01	3,96	3,39	3,31	3,74	4,17
CO	0,24	0,26	0,19	0,15	0,22	0,23	0,17	0,14	0,17	0,25	0,17	0,17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 52. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de CO**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXVIII. **Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y CO entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coeficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,1760	3,10 %
2001	0,5517	30,44 %
2013	-0,0956	0,91 %
2014	0,6939	48,15 %
2015	-0,5578	31,12 %
PROMEDIO	-0,0606	0,37 %

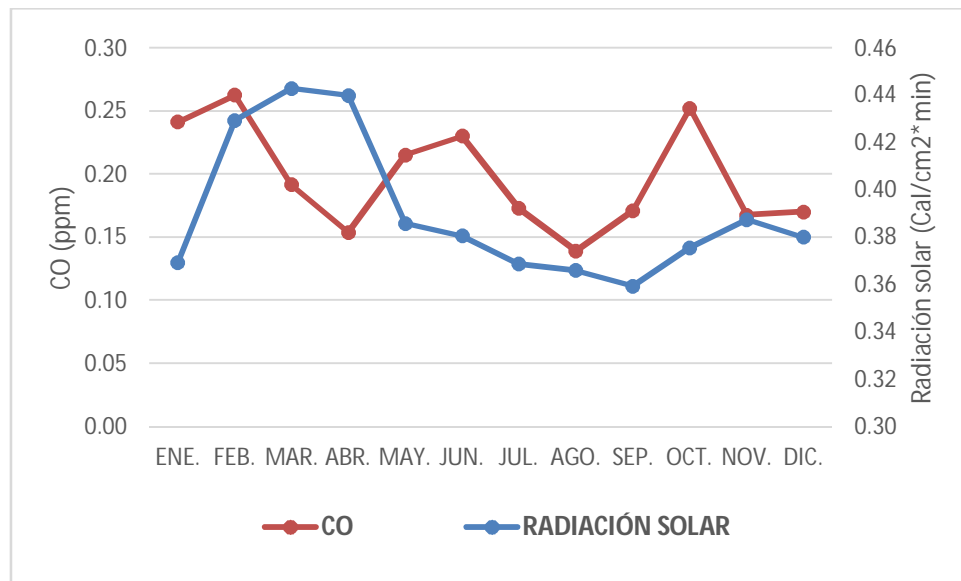
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXIX. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto versus promedio monóxido de carbono en partes por millón entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,37	0,43	0,44	0,44	0,39	0,38	0,37	0,37	0,36	0,38	0,39	0,38
CO	0,24	0,26	0,19	0,15	0,22	0,23	0,17	0,14	0,17	0,25	0,17	0,17

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 53. **Promedio de radiación solar versus promedio de CO**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXX. **Coeficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y CO entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coeficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,0659	0,43 %
2001	-0,0872	0,76 %
2013	-0,2700	7,29 %
2014	0,3798	14,43 %
2015	-0,3817	14,57 %
PROMEDIO	0,0801	0,64 %

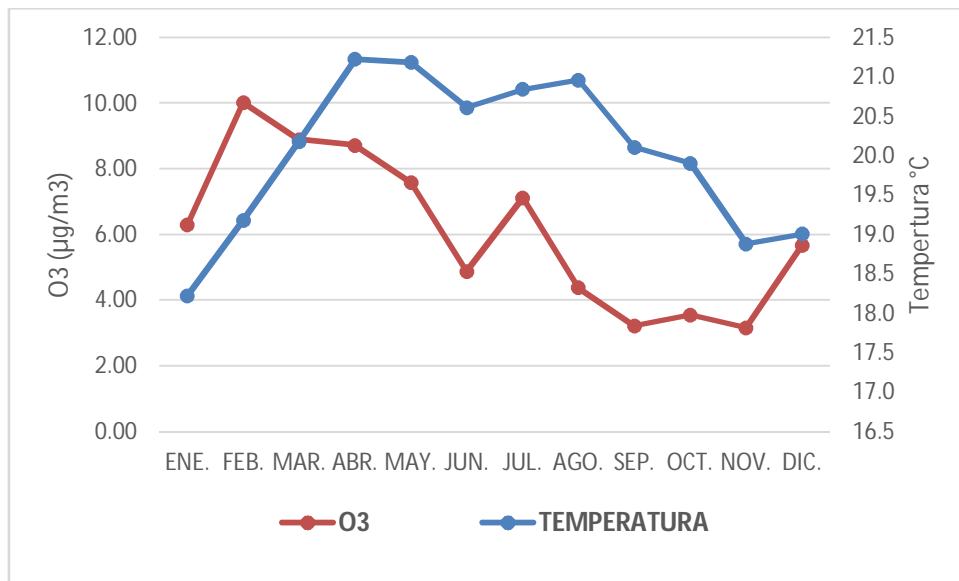
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXI. **Promedio de temperatura en grados centígrados versus promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
O ₃	6,30	10,02	8,89	8,71	7,59	4,88	7,12	4,38	3,23	3,56	3,16	5,67

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 54. **Promedio de temperatura versus promedio de O₃**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y O₃ entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,1757	3,09 %
2001	-0,1264	1,60 %
2013	0,5581	31,15 %
2014	0,2655	7,05 %
2015	-0,4388	19,25 %
PROMEDIO	0,1536	2,36 %

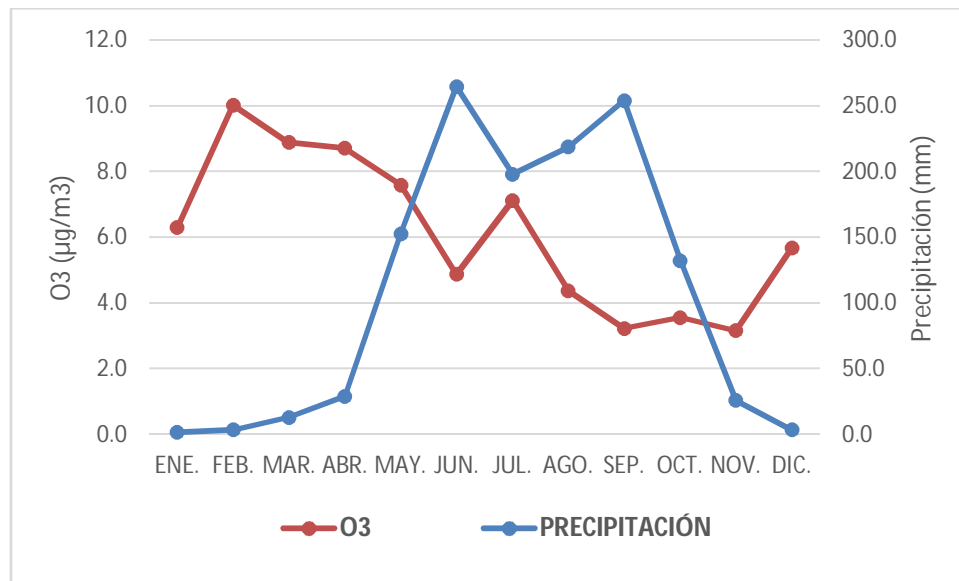
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXIII. **Promedio de precipitación en milímetros *versus* promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
O ₃	6,3	10,0	8,9	8,7	7,6	4,9	7,1	4,4	3,2	3,6	3,2	5,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 55. **Promedio de precipitación *versus* promedio de O₃**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXIV. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y O₃ entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	-0,2222	4,94 %
2001	-0,2684	7,20 %
2013	-0,3516	12,36 %
2014	-0,4954	24,54 %
2015	-0,4501	20,26 %
PROMEDIO	-0,4794	22,98 %

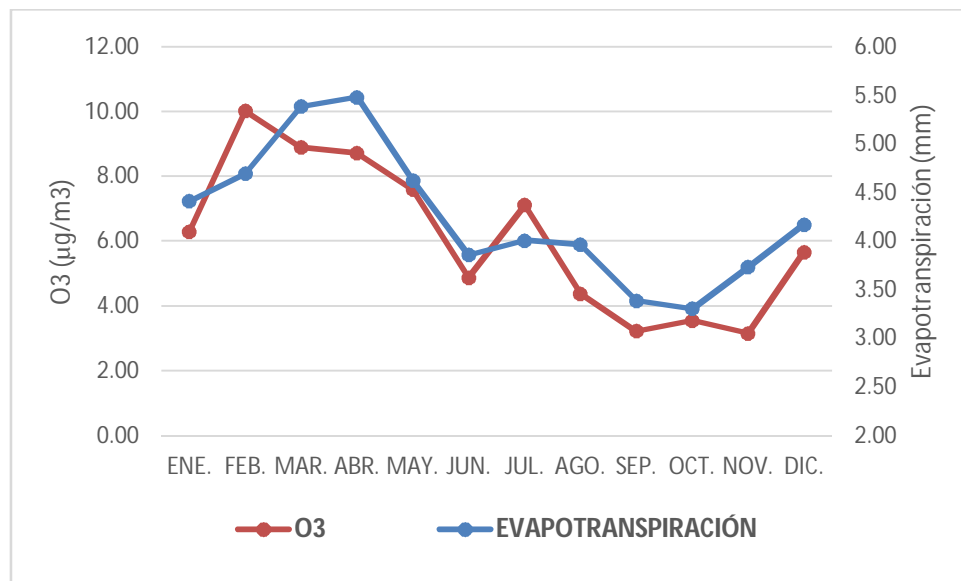
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXV. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,41	4,69	5,39	5,48	4,62	3,86	4,01	3,96	3,39	3,31	3,74	4,17
O₃	6,30	10,02	8,89	8,71	7,59	4,88	7,12	4,38	3,23	3,56	3,16	5,67

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 56. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de O₃**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXVI. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y O₃ entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,3478	12,09 %
2001	-0,0242	0,06 %
2013	0,6562	43,06 %
2014	0,7642	58,40 %
2015	0,6285	39,51 %
PROMEDIO	0,8743	76,45 %

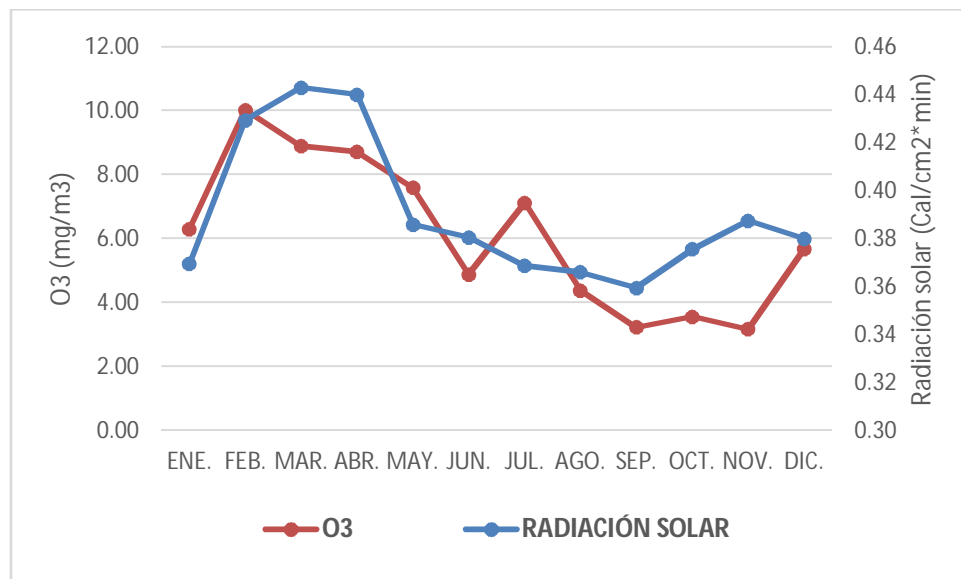
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXVII. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto versus promedio ozono troposférico en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2015**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,37	0,43	0,44	0,44	0,39	0,38	0,37	0,37	0,36	0,38	0,39	0,38
O₃	6,30	10,02	8,89	8,71	7,59	4,88	7,12	4,38	3,23	3,56	3,16	5,67

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 57. **Promedio de radiación solar versus promedio de O₃**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXVIII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y O₃ entre los años 2000 a 2015**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,0386	0,15 %
2001	-0,3210	10,30 %
2013	0,7138	50,95 %
2014	0,6173	38,10 %
2015	0,6433	41,39 %
PROMEDIO	0,7663	58,72 %

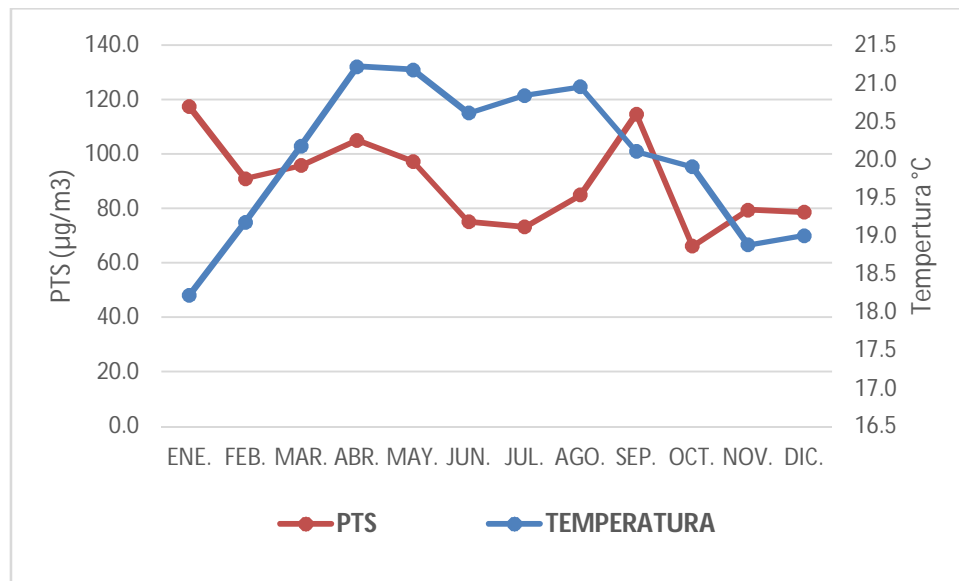
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXIX. **Promedio de temperatura en grados centígrados versus promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temp	18,2	19,2	20,2	21,2	21,2	20,6	20,8	21,0	20,1	19,9	18,9	19,0
PTS	117,5	91,1	95,9	105,2	97,5	75,2	73,3	85,1	114,8	66,3	79,6	78,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 58. **Promedio de temperatura versus promedio de PTS**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXX. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre temperatura y PTS entre los años 2000 a 2012**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,5025	25,25 %
2001	0,0802	0,64 %
2002	0,4224	17,84 %
2003	0,2397	5,75 %
2004	-0,4714	22,22 %
2005	-0,0847	0,72 %
2006	0,3317	11,00 %
2007	0,4220	17,81 %
2008	-0,1377	1,90 %
2009	0,1177	1,39 %
2010	-0,3750	14,06 %
2011	-0,0741	0,55 %
2012	0,2142	4,59 %
PROMEDIO	-0,1171	1,37 %

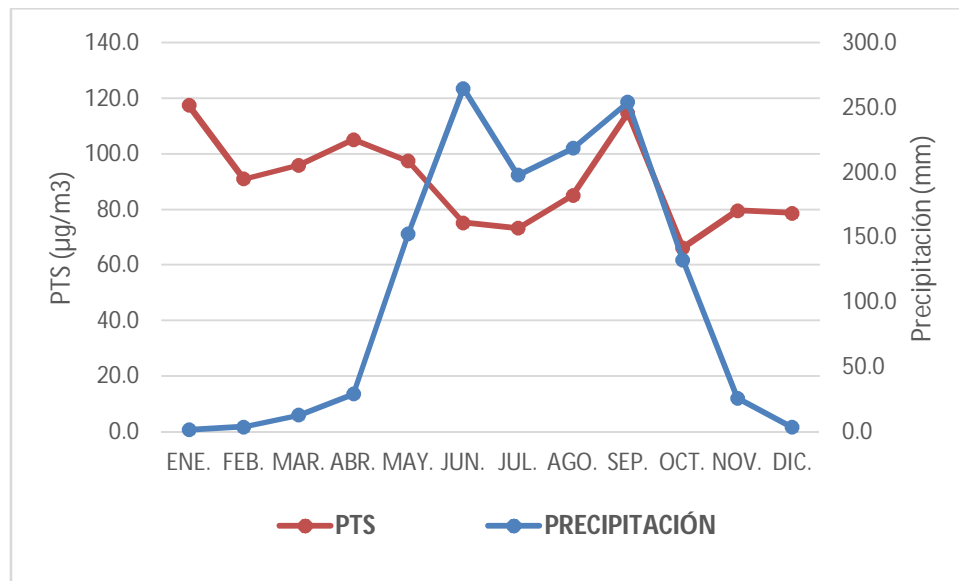
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXI. **Promedio de precipitación en milímetros *versus* promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP	1,5	3,6	12,9	29,2	152,9	264,9	198,0	218,9	254,2	132,3	26,0	3,5
PTS	117,5	91,1	95,9	105,2	97,5	75,2	73,3	85,1	114,8	66,3	79,6	78,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 59. **Promedio de precipitación *versus* promedio de PTS**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXII. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre precipitación y PTS entre los años 2000 a 2012**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,2838	8,05 %
2001	-0,3647	13,30 %
2002	-0,1521	2,31 %
2003	0,6678	44,59 %
2004	-0,3365	11,32 %
2005	-0,3953	15,62 %
2006	-0,3448	11,89 %
2007	-0,4501	20,26 %
2008	-0,1743	3,04 %
2009	-0,1200	1,44 %
2010	-0,8488	72,05 %
2011	-0,7623	58,11 %
2012	-0,0599	0,36 %
PROMEDIO	-0,1942	3,77 %

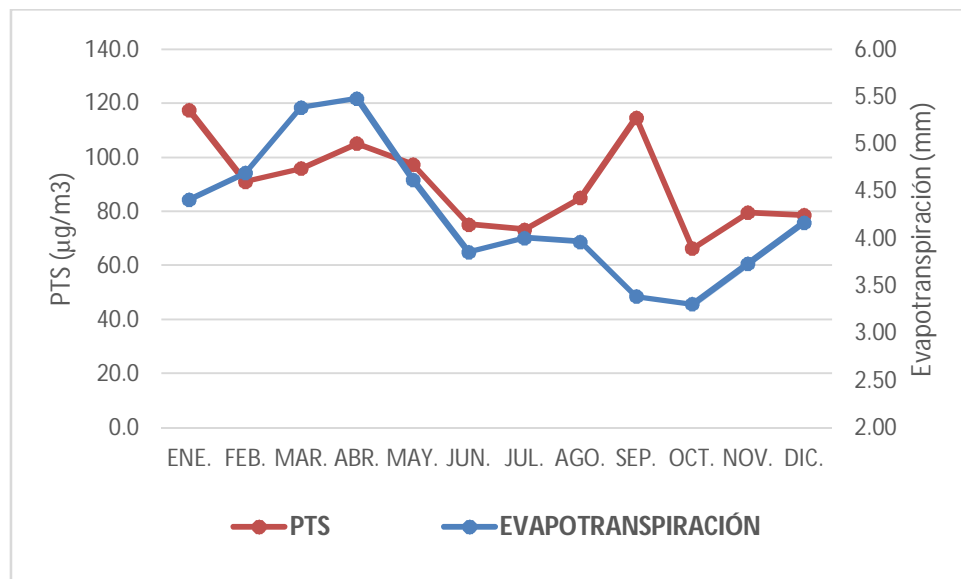
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXIII. **Promedio de evapotranspiración potencial en milímetros versus promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
EVAP	4,41	4,69	5,39	5,48	4,62	3,86	4,01	3,96	3,39	3,31	3,74	4,17
PTS	117,5	91,1	95,9	105,2	97,5	75,2	73,3	85,1	114,8	66,3	79,6	78,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 60. **Promedio de evapotranspiración potencial versus promedio de PTS**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXIV. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y PTS entre los años 2000 a 2012**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,3416	11,67 %
2001	-0,0834	0,70 %
2002	0,4629	21,43 %
2003	-0,6706	44,97 %
2004	0,3445	11,87 %
2005	0,7991	63,86 %
2006	0,0043	0,00 %
2007	0,5397	29,12 %
2008	-0,1278	1,63 %
2009	0,4346	18,89 %
2010	0,5745	33,00 %
2011	0,7131	50,85 %
2012	0,2085	4,35 %
PROMEDIO	0,4064	16,52 %

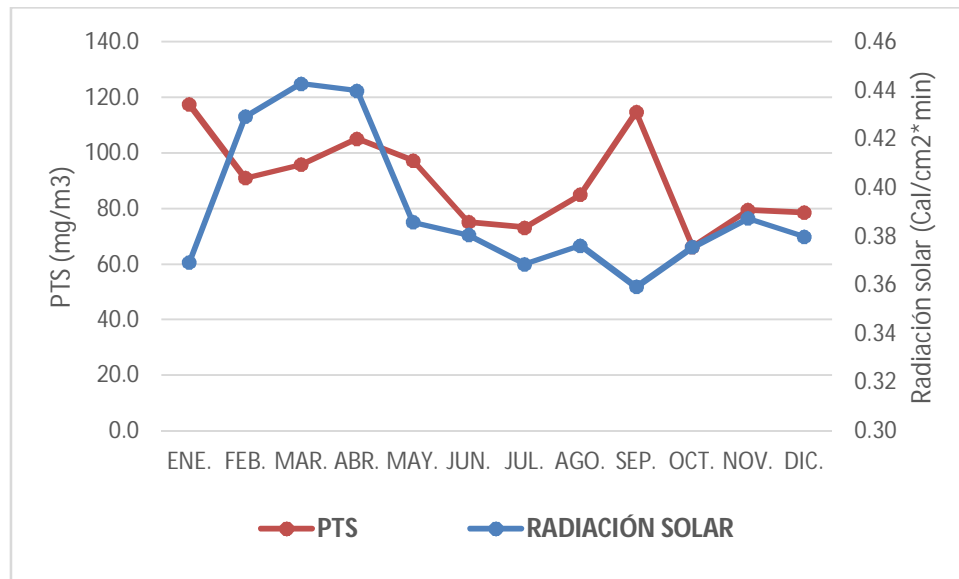
Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXV. **Promedio de radiación solar en calorías sobre centímetro cuadrado por minuto *versus* promedio partículas totales en suspensión en microgramos sobre metro cúbico entre los años 2000 a 2012**

Var	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
RADIA	0,37	0,43	0,44	0,44	0,39	0,38	0,37	0,38	0,36	0,38	0,39	0,38
PTS	118	91,1	95,9	105	97,5	75,2	73,3	85,1	115	66,3	79,6	78,7

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Figura 61. **Promedio de radiación solar *versus* promedio de PTS**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXVI. **Coefficiente de correlación y proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y PTS entre los años 2000 a 2012**

AÑO	Coefficiente de Correlación	Proporción de variabilidad compartida
2000	0,0605	0,37 %
2001	-0,4771	22,76 %
2002	0,6447	41,56 %
2003	-0,1848	3,41 %
2004	-0,2816	7,93 %
2005	0,5465	29,87 %
2006	-0,0721	0,52 %
2007	-0,0116	0,01 %
2008	0,4017	16,13 %
2009	0,5356	28,68 %
2010	0,5508	30,33 %
2011	0,5590	31,25 %
2012	-0,4219	17,80 %
PROMEDIO	0,1520	2,31 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXVII. **Resumen coeficiente de correlación entre temperatura y contaminante atmosférico de 2000 a 2016**

	PTS	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	pH	O₃	CO	SO₂
2000	0,5025	0,6496	-	-0,2173	-0,0340	0,1757	-0,5493	-
2001	0,0802	0,0989	-	-0,1797	0,1711	-0,1264	0,0923	-
2002	0,4224	0,4749	-	-0,2717	0,2764	-	-	-
2003	0,2397	-0,0771	-	0,2799	-	-	-	-
2004	-0,4714	-0,3246	-	-0,5075	-	-	-	-
2005	-0,0847	-0,1384	-	0,1759	-	-	-	-
2006	0,3317	0,7194	-	0,5454	0,1160	-	-	0,1133
2007	0,4220	0,4885	-	0,5607	0,7505	-	-	0,4175
2008	-0,1377	-0,0430	-	0,0031	0,0541	-	-	-0,1505
2009	0,1177	0,0080	0,4710	0,6556	0,3113	-	-	0,4348
2010	-0,3750	0,1315	-	0,1145	0,6325	-	-	-0,4478
2011	-0,0741	0,1722	-	-0,4247	0,2310	-	-	-0,0798
2012	0,2142	0,2978	-0,4730	-0,0834	0,3245	-	-	0,7196
2013	-	-0,1206	-0,0125	-0,6909	0,3211	0,5581	0,4975	0,2558
2014	-	-0,2339	0,4560	0,0593	0,2069	0,2655	0,3014	0,0127
2015	-	-0,2587	0,1545	0,2823	-	-0,4388	-0,0803	-0,4569
2016	-	-	0,4247	-0,3982	-	-	-	0,1373

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXVIII. **Resumen proporción de variabilidad compartida entre temperatura y contaminante atmosférico de 2000 a 2016**

	PTS	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	pH	O₃	CO	SO₂
2000	25,25 %	42,20 %	-	4,72 %	0,12 %	3,09 %	30,17 %	-
2001	0,64 %	0,98 %	-	3,23 %	2,93 %	1,60 %	0,85 %	-
2002	17,84 %	22,56 %	-	7,38 %	7,64 %	-	-	-
2003	5,75 %	0,59 %	-	7,83 %	-	-	-	-
2004	22,22 %	10,54 %	-	25,75 %	-	-	-	-
2005	0,72 %	1,92 %	-	3,09 %	-	-	-	-
2006	11,00 %	51,75 %	-	29,74 %	1,34 %	-	-	1,28 %
2007	17,81 %	23,87 %	-	31,44 %	56,33 %	-	-	17,43 %
2008	1,90 %	0,18 %	-	0,00 %	0,29 %	-	-	2,27 %
2009	1,39 %	0,01 %	22,18 %	42,98 %	9,69 %	-	-	18,91 %
2010	14,06 %	1,73 %	-	1,31 %	40,00 %	-	-	20,06 %
2011	0,55 %	2,96 %	-	18,04 %	5,34 %	-	-	0,64 %
2012	4,59 %	8,87 %	22,38 %	0,70 %	10,53 %	-	-	51,78 %
2013	-	1,45 %	0,02 %	47,74 %	10,31 %	31,15 %	24,75 %	6,54 %
2014	-	5,47 %	20,79 %	0,35 %	4,28 %	7,05 %	9,08 %	0,02 %
2015	-	6,69 %	2,39 %	7,97 %	-	19,25 %	0,65 %	20,87 %
2016	-	-	18,04 %	15,86 %	-	-	-	1,88 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla LXXXIX. Resumen coeficiente de correlación entre precipitación y contaminante atmosférico de 2000 a 2016

	PTS	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO ₂	pH	O ₃	CO	SO ₂
2000	0,2838	0,4035	-	-0,3859	0,1042	-0,2222	-0,4127	-
2001	-0,3647	-0,2379	-	-0,4720	0,2995	-0,2684	0,0482	-
2002	-0,1521	0,5249	-	-0,6601	0,1219	-	-	-
2003	0,6678	0,3976	-	0,1687	-	-	-	-
2004	-0,3365	-0,0410	-	-0,2742	-	-	-	-
2005	-0,3953	-0,3693	-	-0,1300	-	-	-	-
2006	-0,3448	0,4679	-	0,1122	0,4528	-	-	0,4438
2007	-0,4501	-0,1959	-	-0,1305	0,1551	-	-	-0,2036
2008	-0,1743	-0,0292	-	0,3153	0,1017	-	-	0,2392
2009	-0,1200	-0,0401	0,0601	0,2912	-0,3022	-	-	0,3873
2010	-0,8488	-0,3875	-	0,1436	0,2916	-	-	-0,5773
2011	-0,7623	-0,5485	-	-0,7096	0,2415	-	-	0,1536
2012	-0,0599	0,1049	-0,3401	-0,3090	0,0175	-	-	0,1371
2013	-	-0,3722	-0,6866	-0,5193	-0,3204	-0,3516	0,2048	-0,3679
2014	-	-0,2822	0,09	-0,4974	0,2814	-0,4954	-0,2804	-0,1338
2015	-	-0,1703	0,4823	-0,0434	-	-0,4501	0,3371	-0,4335
2016	-	-	-0,1583	0,2978	-	-	-	-0,0508

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XC. **Resumen proporción de variabilidad compartida entre precipitación y contaminante atmosférico de 2000 a 2016**

	PTS	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	pH	O₃	CO	SO₂
2000	8,05 %	16,28 %	-	14,89 %	1,09 %	4,94 %	17,03 %	-
2001	13,30 %	5,66 %	-	22,28 %	8,97 %	7,20 %	0,23 %	-
2002	2,31 %	27,55 %	-	43,57 %	1,49 %	-	-	-
2003	44,59 %	15,81 %	-	2,85 %	-	-	-	-
2004	11,32 %	0,17 %	-	7,52 %	-	-	-	-
2005	15,62 %	13,64 %	-	1,69 %	-	-	-	-
2006	11,89 %	21,89 %	-	1,26 %	20,50 %	-	-	19,70 %
2007	20,26 %	3,84 %	-	1,70 %	2,40 %	-	-	4,15 %
2008	3,04 %	0,08 %	-	9,94 %	1,03 %	-	-	5,72 %
2009	1,44 %	0,16 %	0,36 %	8,48 %	9,13 %	-	-	15,00 %
2010	72,05 %	15,01 %	-	2,06 %	8,50 %	-	-	33,32 %
2011	58,11 %	30,08 %	-	50,36 %	5,83 %	-	-	2,36 %
2012	0,36 %	1,10 %	11,57 %	9,55 %	0,03 %	-	-	1,88 %
2013	-	13,86 %	47,15 %	26,96 %	10,26 %	12,36 %	4,19 %	13,54 %
2014	-	7,96 %	0,77 %	24,74 %	7,92 %	24,54 %	7,86 %	1,79 %
2015	-	2,90 %	23,26 %	0,19 %	-	20,26 %	11,36 %	18,79 %
2016	-	-	2,51 %	8,87 %	-	-	-	0,26 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XCI. Resumen coeficiente de correlación entre evapotranspiración potencial y contaminante atmosférico de 2000 a 2016

	PTS	PM ₁₀	PM _{2,5}	NO ₂	pH	O ₃	CO	SO ₂
2000	0,3416	0,5883	-	0,5517	0,4231	0,3478	-0,176	-
2001	-0,0834	0,2417	-	0,3503	0,2937	-0,0242	0,5517	-
2002	0,4629	-0,0411	-	0,4819	0,1201	-	-	-
2003	-0,6706	-0,7067	-	-0,007	-	-	-	-
2004	0,3445	-0,1108	-	0,0022	-	-	-	-
2005	0,7991	0,7031	-	0,6138	-	-	-	-
2006	0,0043	0,43	-	0,6582	0,5221	-	-	0,2958
2007	0,5397	0,2938	-	0,1624	0,4364	-	-	0,4706
2008	-0,1278	0,1195	-	-0,267	-0,0825	-	-	-0,1899
2009	0,4346	0,5089	0,6729	0,1467	0,5078	-	-	0,0498
2010	0,5745	0,3859	-	-0,1416	0,3376	-	-	0,2657
2011	0,7131	0,6012	-	0,4901	0,431	-	-	-0,2503
2012	0,2085	0,4865	0,3835	0,1315	0,4269	-	-	0,5619
2013	-	0,4081	0,6471	0,3662	0,655	0,6562	-0,0956	0,4154
2014	-	0,3934	0,1629	0,237	0,0882	0,7642	0,6939	0,2227
2015	-	0,6262	0,272	0,816	-	0,6285	-0,5578	0,2717
2016	-	-	0,5657	0,2012	-	-	-	0,0159

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XCII. **Resumen proporción de variabilidad compartida entre evapotranspiración potencial y contaminante atmosférico de 2000 a 2016**

	PTS	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	pH	O₃	CO	SO₂
2000	11,67 %	34,61 %	-	30,44 %	17,90 %	12,09 %	3,10 %	-
2001	0,70 %	5,84 %	-	12,27 %	8,63 %	0,06 %	30,44 %	-
2002	21,43 %	0,17 %	-	23,22 %	1,44 %	-	-	-
2003	44,97 %	49,94 %	-	0,00 %	-	-	-	-
2004	11,87 %	1,23 %	-	0,00 %	-	-	-	-
2005	63,86 %	49,44 %	-	37,68 %	-	-	-	-
2006	0,00 %	18,49 %	-	43,32 %	27,26 %	-	-	8,75 %
2007	29,12 %	8,63 %	-	2,64 %	19,05 %	-	-	22,15 %
2008	1,63 %	1,43 %	-	7,13 %	0,68 %	-	-	3,61 %
2009	18,89 %	25,90 %	45,28 %	2,15 %	25,78 %	-	-	0,25 %
2010	33,00 %	14,89 %	-	2,00 %	11,40 %	-	-	7,06 %
2011	50,85 %	36,14 %	-	24,02 %	18,57 %	-	-	6,27 %
2012	4,35 %	23,67 %	14,70 %	1,73 %	18,23 %	-	-	31,58 %
2013	-	16,66 %	41,88 %	13,41 %	42,91 %	43,06 %	0,91 %	17,26 %
2014	-	15,48 %	2,65 %	5,61 %	0,78 %	58,40 %	48,15 %	4,96 %
2015	-	39,21 %	7,40 %	66,58 %	-	39,51 %	31,12 %	7,38 %
2016	-	-	32,00 %	4,05 %	-	-	-	0,03 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XCIII. **Resumen coeficiente de correlación entre radiación solar y contaminante atmosférico de 2000 a 2016**

	PTS	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	pH	O₃	CO	SO₂
2000	0,0605	0,0594	-	0,501	0,2328	0,0386	0,0659	-
2001	-0,4771	-0,1349	-	-0,5073	-0,1202	-0,321	-0,0872	-
2002	0,6447	0,0359	-	0,5663	0,0651	-	-	-
2003	-0,1848	0,1614	-	-0,4243	-	-	-	-
2004	-0,2816	-0,4535	-	-0,3974	-	-	-	-
2005	0,5465	0,4528	-	0,3836	-	-	-	-
2006	-0,0721	-0,134	-	-0,4941	-0,6284	-	-	-0,6436
2007	-0,0116	0,1339	-	-0,2897	0,1638	-	-	0,5044
2008	0,4017	0,3968	-	0,241	0,0502	-	-	0,3277
2009	0,5356	0,209	0,3377	-0,1023	0,1242	-	-	0,4446
2010	0,5508	0,3604	-	0,0126	-0,2194	-	-	0,4305
2011	0,559	0,7453	-	0,2452	-0,3761	-	-	-0,0169
2012	-0,4219	-0,4998	0,0231	0,2838	0,6951	-	-	-0,166
2013	-	0,6432	0,7309	0,3128	0,5511	0,7138	-0,27	0,4539
2014	-	0,3003	0,2934	0,2503	-0,1931	0,6173	0,3798	0,5261
2015	-	0,5442	0,1858	0,6221	-	0,6433	-0,3817	0,3062
2016	-	-	0,5575	-0,2812	-	-	-	0,3318

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Tabla XCIV. **Resumen proporción de variabilidad compartida entre radiación solar y contaminante atmosférico de 2000 a 2016**

	PTS	PM₁₀	PM_{2,5}	NO₂	pH	O₃	CO	SO₂
2000	0,37 %	0,35 %	-	25,10 %	5,42 %	0,15 %	0,43 %	-
2001	22,76 %	1,82 %	-	25,73 %	1,45 %	10,30 %	0,76 %	-
2002	41,56 %	0,13 %	-	32,07 %	0,42 %	-	-	-
2003	3,41 %	2,61 %	-	18,00 %	-	-	-	-
2004	7,93 %	20,56 %	-	15,80 %	-	-	-	-
2005	29,87 %	20,51 %	-	14,72 %	-	-	-	-
2006	0,52 %	1,80 %	-	24,41 %	39,49 %	-	-	41,42 %
2007	0,01 %	1,79 %	-	8,39 %	2,68 %	-	-	25,44 %
2008	16,13 %	15,75 %	-	5,81 %	0,25 %	-	-	10,74 %
2009	28,68 %	4,37 %	11,41 %	1,05 %	1,54 %	-	-	19,77 %
2010	30,33 %	12,99 %	-	0,02 %	4,81 %	-	-	18,54 %
2011	31,25 %	55,55 %	-	6,01 %	14,15 %	-	-	0,03 %
2012	17,80 %	24,98 %	0,05 %	8,06 %	48,32 %	-	-	2,76 %
2013	-	41,38 %	53,42 %	9,78 %	30,37 %	50,95 %	7,29 %	20,60 %
2014	-	9,02 %	8,61 %	6,27 %	3,73 %	38,10 %	14,43 %	27,68 %
2015	-	29,61 %	3 %	38,70 %	-	41,39 %	14,57 %	9,38 %
2016	-	-	31,08 %	7,91 %	-	-	-	11,01 %

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como se observa en la figura 2, a inicios del mes de junio del año 2014 se tenían buenas expectativas respecto a los índices de precipitación. No obstante se dio el fenómeno de canícula prolongada, lo cual provocó un abatimiento en la curva de precipitación, siendo éste uno de los principales efectos de dicho fenómeno, esto a su vez provocó un incremento en la temperatura y por consiguiente un incremento en la evapotranspiración y la radiación solar (figuras 1, 3 y 4); y de manera similar en 2015 se dio el fenómeno de canícula prolongada, pero en este caso la cantidad de lluvia tuvo un descenso sostenido durante meses por lo que la cantidad de lluvia fue mayor que en el 2014.

Sin embargo, la presencia de más precipitación en el 2015 se debe a los efectos colaterales de la canícula del 2014, ya que los decrementos fueron más drásticos y en 2015 los decrementos de precipitación iniciaron desde mayo, inicios del invierno en Guatemala. Siendo casos contrarios a los años predecesores donde no se presentó el fenómeno de la canícula prolongada.

De las estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en la ciudad de Guatemala se obtuvieron las concentraciones de cada contaminante atmosférico los cuales son: partículas totales en suspensión, partículas menores a 10 micras, partículas menores a 2,5 micras, dióxido de nitrógeno, sedimentación ácida, ozono troposférico, monóxido de carbono y dióxido de azufre; estos datos se comparan con las variables climáticas de temperatura, precipitación, evapotranspiración potencial y radiación solar con el fin de conocer si existe una correlación y un porcentaje de variabilidad compartida entre cada contaminante con cada variable climática, esto se obtiene mediante el modelo matemático de correlación de Pearson descrito en la sección 3.8.

Respecto a las partículas menores a 10 micras en la tabla LXXXVII se muestra que la correlación obtenida en los años 2014 y 2015, respecto a temperatura, es de -0,2339 y -0,2587, al ser una correlación negativa nos indica que si existe relación entre las dos variables, cuando una de las variables baja la otra aumenta. Pero en la tabla LXXXVIII se observa que el porcentaje de variabilidad compartida de estos años es de 5,47 % para el 2014 y 6,69 % para el 2015. Al ser este porcentaje muy bajo no puede asumirse una variabilidad compartida significativa, no obstante se puede observar que en el 2015 la variabilidad y la correlación fueron mayores al 2014, lo cual denota el efecto acumulativo de la canícula del 2014 hacia la canícula del 2015.

En la tabla LXXXIX se observa que la correlación entre la precipitación y las partículas menores a 10 micras tienen el mismo comportamiento observando en la correlación anterior, siendo negativas, pero se denota que en el 2013 (año que no se presentó el fenómeno de la canícula) la correlación fue mayor con un valor de -0,3722 que en el 2014 (que si se tuvo canícula) con un valor de -0,2822, y fue aún menor en el 2015 (canícula más intensa) con un valor de -0,1703. Esto quiere decir que entre más precipitación se presente menor será la concentración de las partículas menores a 10 micras.

De lo anterior se puede corroborar al ver la tabla XC que el porcentaje de variabilidad compartida en 2013 fue de 13,86 % y disminuyó a 2,90 % en 2015, dándole al 2013 una relación más directa que los años en que se presentó la canícula.

En el caso de la evapotranspiración potencial con las partículas menores a 10 micras, tabla XCI y XCII, los coeficientes de correlación y los porcentajes de variabilidad compartida no parecen reflejar que exista una influencia entre ambas variables ya que los porcentajes se encuentran de 15 a 16 % de variabilidad

compartida en 2013 y 2014, teniendo la diferencia que en el segundo año se tuvo canícula. La excepción en el 2015 es que la correlación es de 0,6262 y la variabilidad compartida 39,21 %; de igual forma no refleja que haya una relación directa entre variables ya que en años predecesores que no tuvieron canícula, tienen variabilidad compartida similar como el caso del 2011.

En el caso de las partículas menores a 2,5 micras comparada con precipitación, tabla LXXXIX, en el 2013 se tiene una correlación negativa bastante significativa de -0,6866 lo cual indica que al aumentar la variable de precipitación la concentración de partículas menores a 2,5 micras disminuye, en cambio en el 2014 que hubo canícula el coeficiente de correlación fue cercano a cero con un valor de 0,0877, lo cual indica que no hubo efecto alguno de la variable de precipitación sobre las partículas menores a 2,5 micras y en 2015 la correlación aumento y fue positiva, de igual forma que en el 2014, con un valor de 0,4823; al ser estos dos años de canícula podemos decir que al presentarse este fenómeno las variables aumentan en conjunto y en 2015 fue mayor este debido a un posible efecto acumulativo debido a la canícula del 2014 ya que en el 2015 la precipitación fue mayor. Y si observamos en 2016 la correlación vuelve a ser negativa con -0,1583 por lo que solo en canícula estas dos variables tienen dependencia una de la otra.

En relación al NO₂ con la variable de temperatura en el 2014 y 2015 no hubo una correlación significativa, pero en 2013 se tuvo una correlación negativa significativa de -0,6909 y un porcentaje de variabilidad compartida de 47,74 %, según tabla LXXXVII y LXXXVIII, lo cual nos indica que mientras descienda la temperatura la concentración del dióxido de nitrógeno aumenta. Pero, a pesar de que en 2014 y 2015 no son significativas se puede volver a observar el mismo comportamiento que en la correlación anterior, donde estos dos años con canícula se tienen correlaciones positivas; siendo de igual forma la del 2015

mayor que la del 2014. Por lo que podemos decir que la canícula influye entre estas dos variables de forma en que una podría desarrollar dependencia de la otra.

Con las variables de precipitación y dióxido de nitrógeno, de acuerdo a la tabla LXXXIX y XC, se tiene que en el 2013, año en que no se tuvo canícula, la correlación negativa es de -0,5193 y porcentaje de variabilidad compartida de 26,96 %; y esta fue disminuyendo en 2014 a -0,4974 con una variabilidad de 24,74 % y en 2015 a -0,0434 con 0,19 % de variabilidad (años con canícula), lo que nos indica que mientras descienda la precipitación la concentración de NO₂ aumentará; esta relación se pudo observar de igual forma entre las partículas menores a 10 micras con la precipitación.

En cuanto a las variables de evapotranspiración potencial y NO₂, de acuerdo a la tabla XCI y XCII, no se tiene ninguna correlación ni proporción de variabilidad compartida significativa en 2014 pero si en 2015 las cuales tienen valores de 0,8160 y 66,58 %, esto de acuerdo al comportamiento que se ha visto con las correlaciones anteriores no solo puede deberse a la canícula de 2015, si no que se puede indicar de forma más clara que en el 2015 se tuvo un efecto acumulativo de la canícula 2014, haciendo que esta haya tenido una mayor influencia sobre las variables analizadas.

De igual manera, según la tabla XCIII la correlación entre la variable de radiación solar con el contaminante de dióxido de nitrógeno nuevamente es significativa en 2015 con un valor de 0,6221 y un porcentaje de variabilidad compartida de 38,70 % según la tabla XCIV, mostrando así una dependencia entre ambas variables (si aumenta la radiación solar, aumenta la concentración de NO₂).

En cuanto al contaminante SO₂, de acuerdo a la tabla LXXXVII y LXXXVIII en 2015 se tiene la proporción de variabilidad compartida y la correlación negativa, respecto a la variable de temperatura, más alta de todo el histórico con valores de -0,4569 y 20,87 %, por lo que al aumentar la temperatura la concentración del dióxido de azufre disminuye; en cuanto al 2014 la correlación es próxima a cero con un valor de 0,0127 lo cual no es significativo, pero si se observan años predecesores se denota que la correlación positiva es mayor, es decir en 2012 la correlación fue de 0,7196 y en 2013 de 0,2558. Por lo que en años de canícula la relación entre estas dos variables pasa a ser inversamente proporcional y en 2015 la correlación negativa fue la más alta de todo el histórico a causa de los efectos acumulativos de la canícula del 2014. Y en 2016 se observa que la correlación y la proporción vuelven a ser positivas con valores de 0,1373 y 1,88 %.

También, la correlación entre la variable de precipitación y SO₂ según la tabla LXXXIX la correlación negativa del 2015 fue de -0,4335, solo superada por los años 2006 y 2010, siendo superior a la del 2014 con un valor de -0,1338 y que el 2013 de -0,3679; esto de igual forma nos muestra nuevamente un efecto acumulativo de la canícula del 2014 hacia la del 2015, denotando que al incrementar la precipitación la concentración del dióxido de azufre disminuye; mismo comportamiento que presentaron las correlaciones analizadas anteriormente con la variable de precipitación.

En cuanto a la relación entre la variable de radiación solar y SO₂, se tiene en 2014 un grado de correlación de 0,5261 y una proporción de 27,68 %, según tabla XCIII y XCIV, mientras que en 2015 la correlación no es significativa con valores de 0,3062 y 9,38 %; pero esto puede incidir debido a que el dióxido de azufre al momento de reaccionar con oxígeno en la atmósfera se produce trióxido de azufre el cual reacciona con vapor de agua para formar finalmente ácido

sulfúrico, dicho ácido generado es el que da lugar a la lluvia ácida o sedimentación ácida.

De acuerdo a la tabla XCI en 2013 la sedimentación ácida tuvo una correlación con la evapotranspiración de 0,6550 y una proporción del 42,91 %, de acuerdo a tabla XCII, por lo que al aumentar la evapotranspiración las unidades de pH de la sedimentación ácida aumentan; y en 2014 (año de canícula) se tuvo un descenso en esta correlación con valores de 0,0882 y 0,78 % siendo un correlación cercana a cero, podemos decir que la canícula afecta negativamente a la relación entre estas dos variables. De igual forma la sedimentación ácida con la radiación solar, según la tabla XCIII del año 2013 con una correlación de 0,5511 disminuyo en 2014 a -0,1931.

En 2014, según la tabla XCI se tuvo un grado de correlación entre la variable de evapotranspiración y el monóxido de carbono de 0,6939 y una proporción de variabilidad de 48,15 % de acuerdo a la tabla XCII; de igual forma en 2015 se tuvo un grado de correlación de -0,5578 y 31,12 % de proporción; y al ser ambos años de canícula y tener comportamientos opuestos, no se puede confirmar que el fenómeno de canícula altere la relación entre estas dos variables; además, no se tiene una línea histórica para analizar un comportamiento de las mismas.

Al analizar la variable de precipitación con ozono troposférico, se tiene que en 2014 la correlación negativa fue de -0,4954 y una proporción de 24,54 %, de acuerdo a la tabla LXXXIX y XC, siendo no significativa pero se puede observar que a mayor precipitación menor concentración de O₃, debido a que los precursores de este contaminante necesitan de la luz solar para reaccionar; por lo que la precipitación es un factor que reduce la carga de este contaminante. De igual forma en 2015 se tuvo una correlación de -0,4501 reflejando el comportamiento anteriormente descrito.

Ahora bien, respecto a la variable de evapotranspiración en 2014 se tuvo una correlación bastante considerable de 0,7642 y una variabilidad compartida de 58,4 % de acuerdo a la tabla XCI y XCII; esto implica que ambas variables aumentan conjuntamente debido a que a mayor respiración y emisión de CO₂ se tendrá mayor concentración de O₃.

De igual forma en el caso de la radiación solar, en 2013 se presentó una correlación más alta que en 2014 y 2015, recordando que este año no se presentó el fenómeno de canícula y en los otros dos sí, por lo que de acuerdo a la tabla XCIII en 2013 se tuvo una correlación de 0,7138 y de acuerdo a la tabla XCIV una proporción de 50,95 %, mientras que en 2014 se tuvo una correlación de 0,6173 y una proporción 38,10 % y en 2015 de 0,6433 y 41,39 %.

Entonces, con esto podemos observar que el O₃ es el contaminante con mayor relación directa con las variables climáticas, principalmente con la radiación solar (como se pudo observar en la correlación anterior). Esto es debido a que el ozono es un contaminante secundario el cual se forma a partir de óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre con radiación solar.

En el caso de las partículas totales en suspensión (PTS) no se puede llevar a cabo un análisis del efecto de la canícula del 2014 y 2015 debido a que solo se disponen datos de las concentraciones del 2000 al 2012.

Entonces, de acuerdo a los comportamientos analizados en base a las correlaciones obtenidas entre las distintas variables climáticas y los distintos contaminantes atmosféricos, la canícula tiene un efecto directo en la relación entre distintas variables y contaminantes, de acuerdo a la naturaleza de formación del contaminante. A su vez la canícula puede invertir la correlación natural entre variables (pasando de una correlación positiva a una negativa

durante los años de canícula y volviendo a positiva en los años en que no hay canícula).

Además, se pudo observar que la canícula del 2015 tuvo efectos más drásticos debido a efectos acumulativos de la canícula del 2014, lo cual afectó en mayor proporción al comportamiento anteriormente descrito.

CONCLUSIONES

1. Existe una correlación negativa entre el incremento de la variable de temperatura y el decremento de las concentraciones de partículas menores a 10 micras y dióxido de azufre. Es decir que cuando la temperatura ambiental sube, las concentraciones de PM_{10} y el SO_2 disminuyen, reduciendo los riesgos de exposición a contaminantes en la población de la ciudad de Guatemala.
2. Hay una correlación positiva entre el incremento de la temperatura con el aumento de la concentración de dióxido de nitrógeno. Esto significa que los días con mayor radiación solar y mayor temperatura ambiental, son de mayor riesgo para la salud humana al estar expuesta a concentraciones mayores del contaminante NO_2 .
3. No existe una correlación estadística significativa entre el incremento de la temperatura con el aumento o decremento de las concentraciones de las partículas menores a 2,5 micras, ozono troposférico, monóxido de carbono, partículas totales en suspensión y a las unidades de pH de la sedimentación ácida.
4. Con el descenso de precipitación existe una correlación negativa con las concentraciones de las partículas menores a 10 micras, dióxido de nitrógeno, ozono troposférico y dióxido de azufre, debido a que estas aumentan. Esto significa que días con menor precipitación representan mayor riesgo a la salud humana, por estar expuesta a una mayor cantidad de contaminantes atmosféricos. Se evidencia la importancia de la lluvia y

fenómenos asociados (sistemas de alta presión, nubosidad, descenso de temperatura ambiental) como un importante proceso de descontaminación del aire.

5. Existe una correlación positiva entre el decremento de la precipitación con el decremento de la concentración de las partículas menores a 2,5 micras.
6. No existe una correlación entre el comportamiento de la precipitación y las concentraciones de monóxido de carbono, partículas totales en suspensión y unidades de pH de la sedimentación ácida.
7. El aumento de la tasa de evapotranspiración potencial tiene una correlación positiva con el aumento de las concentraciones de dióxido de nitrógeno y ozono troposférico.
8. No existe una correlación significativa entre el aumento de la tasa de evapotranspiración potencial y las concentraciones de las partículas menores a 10 micras, partículas menores a 2,5 micras, dióxido de azufre, partículas totales en suspensión y unidades de pH de la sedimentación ácida.
9. El aumento de la radiación solar tiene correlación con el aumento de las concentraciones del dióxido de nitrógeno, ozono troposférico y dióxido de azufre. Esto significa que los días con mayor radiación solar, son de mayor riesgo para la salud humana al estar expuesta a concentraciones mayores de los contaminantes NO_2 , SO_2 y O_3 .
10. Con el aumento de la radiación solar existe una correlación negativa con el decremento de las unidades de pH de la sedimentación ácida.

11. No existe correlación estadística significativa entre el aumento de la radiación solar con el comportamiento de las concentraciones de las partículas menores a 10 micras, partículas menores a 2,5 micras, monóxido de carbono y las partículas totales en suspensión.

RECOMENDACIONES

1. Incentivar programas de revegetación para la zona urbana de la ciudad de Guatemala, con el fin de crear microclimas que sean más frescos y húmedos para reducir los índices de concentración de dióxidos de nitrógeno, dióxidos de azufre, ozono troposférico y partículas totales en suspensión y el consumo de energía al momento de usar sistemas de aire acondicionado.
2. Mejorar la calidad del transporte público, así como promover el uso de vehículos eficientes para reducir la emisión de contaminantes y aumentar los estándares de calidad del aire.
3. Promover la reforestación, en los lugares que se permitan; como calles, avenidas, parques y barrancos que rodean la ciudad de Guatemala con el fin de aumentar la resiliencia ante el cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

1. KIELY, Gerard. *Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. 1a ed. España: McGraw-Hill, 1999. 1331 p.
2. CONRED. *Boletín Informativo No. 3959-Periodo de Canícula 2015*. [en línea]. http://conred.gob.gt/www/index.php?option=com_content&view=article&id=5424:boletin-informativo-no3959&catid=37&Itemid=1010. [Consulta: 09 de mayo de 2016].
3. DOMENECH, J. *Coeficiente de correlación lineal de Pearson*, p. 20. [en línea]. <<http://personal.us.es/vararey/adatos2/correlacion.pdf>>. [Consulta: 13 de mayo de 2016].
4. ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. *¿Qué son las PM2.5 y cómo afectan a nuestra salud?* [en línea]. <<http://www.ecologistasenaccion.org/article17842.html>>. [Consulta: 20 de mayo de 2016].
5. ENTREMUNDOS. 2015. *Sequía, Canícula y Cambio Climático en Guatemala*. [en línea]. <<http://www.entremundos.org/revista/medio-ambiente/sequia-canicula-y-cambio-climatico-en-guatemala/>>. [Consulta: 20 de mayo de 2016].

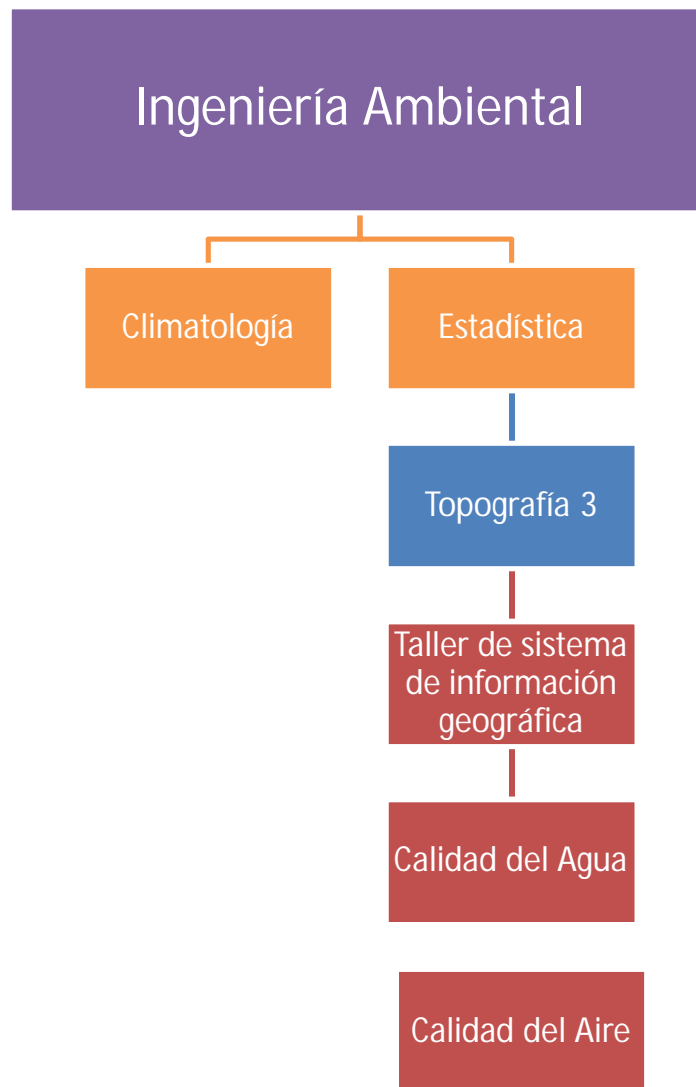
6. GÁNDARA, Natiana. *Sequía aumenta el número de familias afectadas*. *Prensa Libre*. [en línea]. <<http://www.prensalibre.com/economia/sequia-del-2015-causomas-impacto>>. [Consulta: 9 mayo de 2016].
7. GARCÍA DEL POZO, Edgar Antonio. *Determinación de partículas en suspensión en su fracción menor a 2.5 micrómetros (PM2.5) como contaminante criterio en la ciudad capital de Guatemala*, p. 7-23. [en línea]. <http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3773.pdf>. [Consulta: 20 de mayo de 2016].
8. IARNA. *Clima y Calidad del Aire*. [en línea]. <http://www.infoiarina.org.gt/dmdocuments/1_pu_pro_per_04-Perfam_2F%20-%20Clima%20y%20calidad %20del %20aire.pdf>. [Consulta: 9 de mayo de 2016].
9. IARNA. *Perfil Ambiental de Guatemala 2008-2009: las señales ambientales críticas y su relación con el desarrollo*. p. 164-170.
10. INSIVUMEH. *Boletín No. 1al 365 Índice de Calidad del Aire del año 2013*, p. 9. [en línea]. <<http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/documentos.htm>>. [Consulta: 3 de junio de 2017].
11. ————. *Boletín No. 1al 365 Índice de Calidad del Aire del año 2014*, p. 9. [en línea]. <<http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/documentos.htm>>. [Consulta: 5 de junio de 2017].

12. _____ . *Boletín No. 1al 365 Índice de Calidad del Aire del año 2015,* p. 9.]. [en línea] <<http://www.Insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/documentos.htm>>. [Consulta: 7 de junio de 2017]
13. _____ . *Boletín Climático No. 3-2016.* [en línea]. <[http://www.Insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin %20climatico %203-2016.pdf](http://www.Insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico/Boletin%20climatico%203-2016.pdf)>. [Consulta: 10 de mayo de 2016].
14. _____ . *Programa de calidad del aire INSIVUMEH para la República de Guatemala.* [en línea]. <<http://www.Insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/glosario.htm>>. [Consulta: 3 de julio de 2017].
15. Laboratorio de monitoreo del aire, escuela de química, facultad de ciencias químicas y farmacia, universidad de San Carlos de Guatemala. *Informe Anual de la Calidad del Aire 2013.* p. 53. [en línea] <<https://drive.google.com/file/d/0BwslezsEzB1qNWxWb3VCbVBLWTA/view>>. [Consulta: 12 de junio de 2017].
16. _____ . *Informe Anual de la Calidad del Aire 2014.* p. 48. [en línea].<<https://drive.google.com/file/d/0BwslezsEzB1qNzZRU0tGbGhtaTQ/view>>. [Consulta: 12 de junio de 2017].
17. _____ . *Informe Anual de la Calidad del Aire 2015.* p. 34. [en línea].<<https://drive.google.com/file/d/0BwslezsEzB1qWjM5OU9sTUctMkE/view>>. [Consulta: 12 de junio de 2017].

18. LENNETECH. *Calidad del aire*. [en línea]. <<http://www.lenntech.es/faq-calidad-del-aire.htm>>. [Consulta: 10 de mayo de 2016].
19. RAMOS, Gerson. *Canícula comenzaría a fines de este mes*. *Prensa Libre*. [en línea]. <<http://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/canicula-comenzaria-a-fines-de-este-mes>>. [Consulta: 09 de mayo de 2016].
20. XPLORANDO GUATEMALA. *La Canícula en Guatemala*. [en línea]. <<http://www.xplorandoguatemala.com/para-el-turista/la-canicula-en-guatemala>>. [Consulta: 15 de mayo de 2016].

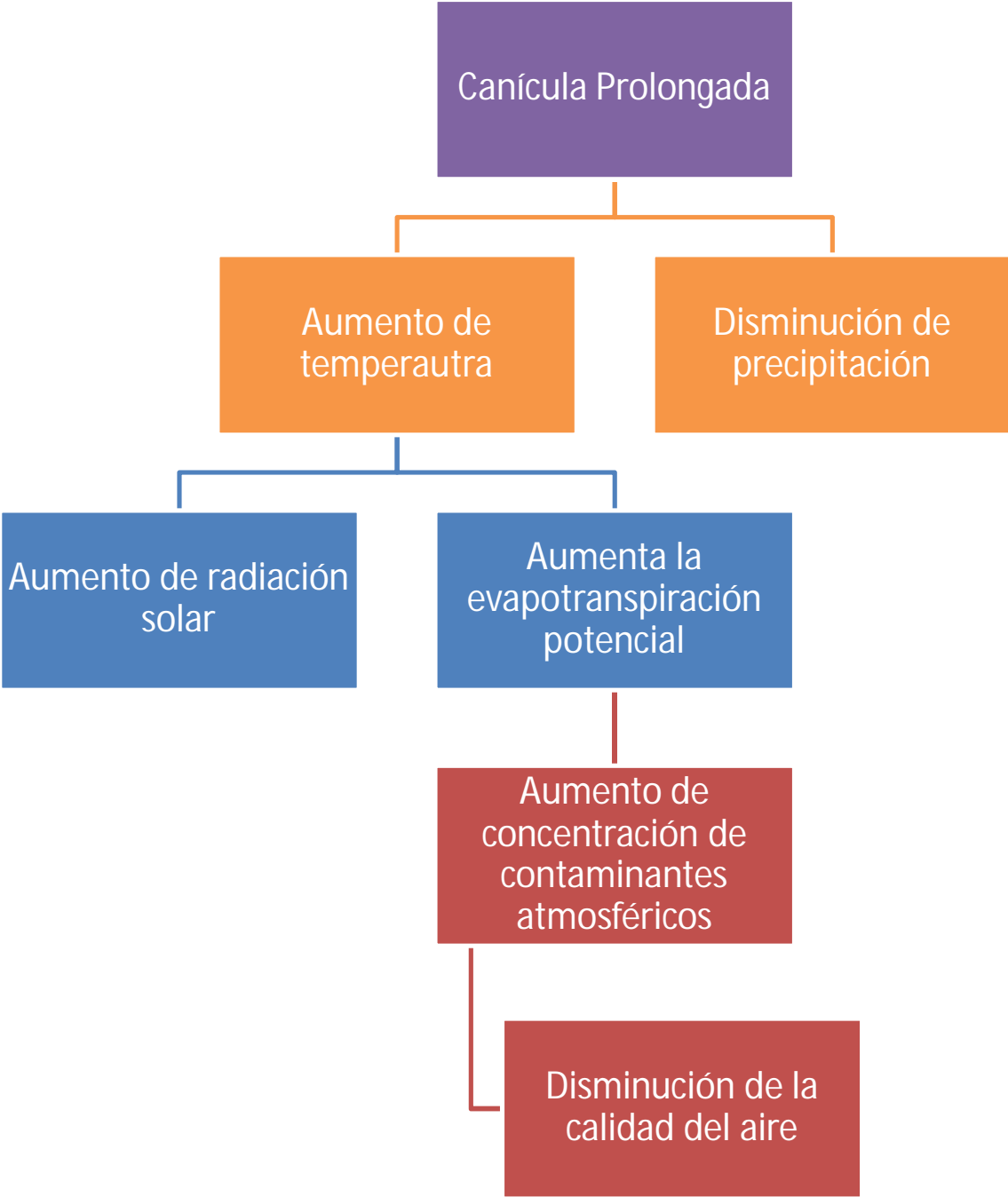
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Árbol de problemas**



Fuente: elaboración propia.

ANEXO

Debido a que la República de Guatemala no cuenta con una legislación ambiental que regule la calidad del aire, por lo que no se tiene definido a nivel nacional las concentraciones límites de cada contaminante. Y mientras no se cuenten con regulaciones nacionales en esta materia, se utilizarán como referencia los límites de calidad del aire establecidos por la legislación de Estados Unidos a través de la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Anexo 1. Límites de calidad del aire establecidos por EPA

Parámetro	Concentración	Período de medición
Dióxido de Azufre, SO ₂	30 ppb	Anual
	140 ppb	24 h
Partículas PM ₁₀	150 ug/m ³	24 h
Partículas PM _{2.5}	65 ug/m ³	24 h
Monóxido de Carbono, CO	9 ppm	8 h
	35 ppm	1 h
Ozono, O ₃	120 ppb	1 h
	80 ppb	8 h
Dióxido de Nitrógeno, NO ₂	53 ppb	Anual
	100 ppb	1 h

Fuente: Insivumeh. *Normas y Regulaciones*.

<http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/regulaciones.htm>

Consulta: julio de 2017

