

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE
INDIAS, 2014 Y 2015

GUSTAVO RAFAEL MARTÍNEZ ESPELETA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA, PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C

2016

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE CARTAGENA DE
INDIAS, 2014 Y 2015

GUSTAVO RAFAEL MARTÍNEZ ESPELETA

Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

DIRECTORA:

DSc. MARIA ELENA HUERTAS BOLAÑOS

Ingeniera Ambiental

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA, PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C

2016

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias, D. T y C (12, 14, 2016)

Dedicatoria

A la vida y la naturaleza, bello regalo de Dios a los mortales.

A mi mamá y papá, por su inquebrantable determinación y esfuerzo.

A mi abuela por quererme tanto.

A mi tío por enseñarme el valor en la naturaleza.

A Katina por su apoyo en momentos difíciles.

A mi hermana y a Bruno que los quiero.

Agradecimientos

Agradezco a María Elena Huertas Bolaños, directora de tesis, por su tiempo y paciencia para con este proceso y muchos otros.

Al SVCA de Cartagena de Indias por el suministro de la información sin el cual no hubiera sido posible la construcción de este documento.

A mi compañera Yorelis del Carmen Marrugo Mejía por el tiempo de tutoría con el lenguaje R e interfaz gráfica R-Studio.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE ILUSTACIONES	9
LISTA DE ECUACIONES.....	12
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN.....	3
1. MARCO TEÓRICO	5
1.1 Meteorología	5
1.2 Contaminantes criterio	8
1.3 Gestión de la calidad del aire	10
1.4 Estadística	17
2. ESTADO DEL ARTE.....	18
2.1 Aspectos geográficos del área de estudio.....	21
2.1.1 Factores determinantes de la calidad del aire y contaminación atmosférica	22
3. OBJETIVOS	24
3.1 Objetivos generales.....	24
3.2 Objetivos específicos.....	24
4. DISEÑO METODOLÓGICO	25
4.1 Metodología de depuración de información	28
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
5.1 Meteorología	30
5.1.1 Disponibilidad de la información	30
5.1.2 Datos procesados	34
5.1.3.1 Datos validados, 2014	40
5.1.3.2 Datos validados, 2015	47
5.2 Concentración de contaminantes criterio (PM ₁₀ , PM _{2.5} y O ₃), 2014 y 2015	53
5.2.1 Disponibilidad de la información	53
5.2.2 Datos validados de concentración de los contaminantes	59
5.3 Índice de la Calidad del Aire - ICA.....	63

5.4 Análisis de correlación de variables.....	64
6. CONCLUSIONES.....	67
7. RECOMENDACIONES.....	71
8. BIBLIOGRAFÍA.....	72
9. ANEXOS.....	75
9.1.1.1 Diagramas de caja: meteorología procesada, 2014.....	75
9.1.1.2 Diagramas de caja: meteorología validada, 2014	85
9.1.2.1 Diagramas de caja: meteorología validada, 2015	95
9.2.1 Diagramas de caja: concentraciones 2014	105
9.2.2 Diagramas de caja: concentraciones 2015	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 – Escala Beaufort. (IDEAM, 2016)	7
Tabla 2 – Niveles máximos permitidos para contaminantes criterio	9
Tabla 3 – Puntos de corte ICA. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010	12
Tabla 4 – Disponibilidad de equipos de medición en las estaciones de monitoreo, 2014 y 2015.	27
Tabla 5 – Descripción de las estaciones del SVCA, según los parámetros evaluados y tecnologías implementadas. (EPA, 2015)	27
Tabla 6 – Estaciones cercanas	33
Tabla 7 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la velocidad del viento – 2014	76
Tabla 8 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la presión atmosférica – 2014.....	78
Tabla 9 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la humedad relativa – 2014	80
Tabla 10 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la temperatura – 2014	82
Tabla 11 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la radiación solar – 2014	84
Tabla 12 – Estadística descriptiva de los datos validados de velocidad del viento – 2014	86
Tabla 13 – Estadística descriptiva de los datos validados de presión atmosférica – 2014	88
Tabla 14 – Estadística descriptiva de los datos validados de humedad relativa – 2014	90
Tabla 15 – Estadística descriptiva de los datos validados de temperatura – 2014	92
Tabla 16 – Estadística descriptiva de los datos validados de la radiación solar – 2014	94
Tabla 17 – Estadística descriptiva de los datos validados de la velocidad del viento – 2015	96
Tabla 18 – Estadística descriptiva de los datos validados de la presión atmosférica – 2015.....	98
Tabla 19 – Estadística descriptiva de los datos validados de la humedad relativa – 2015	100
Tabla 20 – Estadística descriptiva de los datos validados de la temperatura – 2015	102
Tabla 21 – Estadística descriptiva de los datos validados de la radiación solar – 2015	104
Tabla 22 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de ozono – 2014.....	105
Tabla 23 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM _{2.5} – 2014	106
Tabla 24 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM ₁₀ – 2014.....	108
Tabla 25 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de ozono – 2015.....	109
Tabla 26 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM _{2.5} – 2015.....	110
Tabla 27 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM ₁₀ – 2015.....	111

LISTA DE ILUSTACIONES

Ilustración 1 – Proceso general de operación de un SVCA híbrido. MAVDT	15
Ilustración 2 - Comportamiento histórico de PM ₁₀ para cada estación de la RM CAB. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.....	20
Ilustración 3 – Distribución político administrativa del área de estudio. Secretaria de Planeación Distrital de Cartagena de Indias.....	21
Ilustración 4 – Localización de estaciones meteorológicas. (EPA, 2015)	26
Ilustración 5 – Disponibilidad de los datos meteorológicos durante el 2014 y 2015.....	31
Ilustración 6 – Porcentaje de datos que pueden completados a partir de otras estaciones. 2014 y 2015	32
Ilustración 7 – Rosas de vientos en las estaciones de monitoreo de Cartagena de Indias, 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Policía – Olaya.	34
Ilustración 8 – Precipitación mensual 2014	35
Ilustración 9 – Presión atmosférica 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya	36
Ilustración 10 – Humedad relativa 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya.....	37
Ilustración 11 – Temperatura 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya	38
Ilustración 12 – Radiación solar 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya	39
Ilustración 13 - Rosas de vientos en las estaciones de monitoreo de Cartagena de Indias, 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Policía – Olaya, e) Zona Franca.....	40
Ilustración 14 – Precipitación mensual 2014, validados SVCA.....	41
Ilustración 15 – Presión atmosférica 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	42
Ilustración 16 – Humedad relativa 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	43
Ilustración 17 – Temperatura 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca	44
Ilustración 18 – Radiación solar 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	45
Ilustración 19 – Precipitación mensual 2015, validados SVCA.....	47
Ilustración 20 – Presión atmosférica 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	48
Ilustración 21 – Humedad relativa 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	49
Ilustración 22 – Temperatura 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca	50
Ilustración 23 – Radiación solar 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	51
Ilustración 24 - Comparación de media mensual datos procesados y validados (SVCA) de variables meteorológicas.....	52
Ilustración 25 – Disponibilidad de los datos de concentración de los contaminantes durante el 2014 y 2015. a) O ₃ . b) PM ₁₀ y c) PM _{2.5}	54
Ilustración 26 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM _{2.5} . 2014.....	55

Ilustración 27 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM ₁₀ . 2014.....	56
Ilustración 28 – Disponibilidad de datos de concentración por estación O ₃ . 2014.....	56
Ilustración 29 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM _{2.5} . 2015.....	57
Ilustración 30 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM ₁₀ . 2014.....	58
Ilustración 31 – Disponibilidad de datos de concentración por estación O ₃ . 2015.....	58
Ilustración 32 – Concentración horaria de O ₃ versus norma de calidad de aire. 2014 y 2015.....	59
Ilustración 33 – Concentración PM ₁₀ versus la norma calidad del aire 24 horas. 2014 y 2015.....	60
Ilustración 34 – Concentración diaria PM _{2,5} versus la norma de calidad del aire. 2014 y 2015.....	61
Ilustración 35 – Concentración [µg/m ³] para contaminantes criterio vs niveles máximos permisibles (NMP), 2014 y 2015.....	62
Ilustración 36 – ICA 2014 y 2015. a) O ₃ . b) PM ₁₀ y c) PM _{2.5}	63
Ilustración 37 – Correlación de variables meteorológicas y concentraciones: a) ozono 2014, B) ozono 2015, C) PM _{2.5} 2014, d) PM _{2.5} 2015, e) PM ₁₀ 2014, f) PM ₁₀ 2015.....	66
Ilustración 38 – Diagrama de caja (boxplot) de la velocidad del viento [m/s], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya.....	75
Ilustración 39 – Diagrama de caja (boxplot) de la presión atmosférica [mbar], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya.....	77
Ilustración 40 – Diagrama de caja (boxplot) de la humedad relativa [%] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya.....	79
Ilustración 41 – Diagrama de caja (boxplot) de la temperatura [°C] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya.....	81
Ilustración 42 – Diagrama de caja (boxplot) de la radiación solar [w/m ²], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya.....	83
Ilustración 43 – Diagrama de caja (boxplot) de la velocidad del viento [m/s], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	85
Ilustración 44 – Diagrama de caja (boxplot) de la presión atmosférica [mbar], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	87
Ilustración 45 – Diagrama de caja (boxplot) de la humedad relativa [%] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	89
Ilustración 46 – Diagrama de caja (boxplot) de la temperatura [°C] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	91
Ilustración 47 – Diagrama de caja (boxplot) de la radiación solar [w/m ²] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	93
Ilustración 48 – Diagrama de caja (boxplot) de la velocidad del viento [m/s], 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	95
Ilustración 49 – Diagrama de caja (boxplot) de la presión atmosférica [mbar], 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	97
Ilustración 50 – Diagrama de caja (boxplot) de la humedad relativa [%] 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	99
Ilustración 51 – Diagrama de caja (boxplot) de la temperatura [°C] 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	101
Ilustración 52 – Diagrama de caja (boxplot) de la radiación solar [w/m ²], 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	103

Ilustración 52 – Diagrama de caja (boxplot) del ozono [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) EPA y c) Zona Franca.....	105
Ilustración 54 – Diagrama de caja (boxplot) de $\text{PM}_{2.5}$ 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Cardique y c) Zona Franca.....	106
Ilustración 55 – Diagrama de caja (boxplot) de PM_{10} 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca.....	107
Ilustración 56 – Diagrama de caja (boxplot) del ozono [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) EPA y c) Zona Franca.....	109
Ilustración 57 – Diagrama de caja (boxplot) de $\text{PM}_{2.5}$ 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Cardique y c) Zona Franca.....	110
Ilustración 58 – Diagrama de caja (boxplot) de PM_{10} 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Olaya y d) Zona Franca.....	111

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 – Ecuación para cálculo del ICA.....	12
Ecuación 2 – Conversión de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ppm	13
Ecuación 3 – Porcentaje de captura de datos	30

INTRODUCCIÓN

“El monitoreo de la calidad del aire es realizado en el país por las diferentes autoridades ambientales con el fin de determinar el estado de la calidad del mismo dentro de sus jurisdicciones para implementar los programas necesarios que conlleven a mejorar las condiciones de este recurso; por otra parte este monitoreo también lo realizan empresas privadas que están obligadas dada su actividad industrial, de acuerdo a la normatividad nacional vigente que los obliga.” (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012).

Los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire - SVCA implementados en todo el país se encargan de monitorear a partir de estaciones los distintos contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas, permitiendo así observar la influencia de estas últimas en la dispersión de los contaminantes, analizar la tendencia en el comportamiento de contaminantes criterio y hacer seguimiento al estado de la calidad del aire en Colombia (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012).

La información de la calidad del aire del distrito de Cartagena de Indias se recolecta a través de las estaciones vinculadas al Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA). El monitoreo de la calidad del aire se realiza a través de estaciones meteorológicas y de medidores de concentración de contaminantes como material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales (PM_{10}), material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales ($PM_{2.5}$) y ozono (O_3).

Por medio de métodos estadísticos el presente trabajo realizará un diagnóstico de la calidad del aire de la ciudad de Cartagena de Indias para los años 2014 y 2015, tiempo desde el cual el SVCA se encuentra operando.

El análisis de la información se basa en el método estadístico descriptivo e inferencial, en el cual se incluye un análisis de correlación de variables meteorológicas y de concentración de contaminantes así como la comparación entre los de los datos procesados y validados por el sistema durante el 2014 y 2015.

El estado de la calidad del aire en el distrito de Cartagena de Indias para los años 2014 y 2015 se revisó en términos de cantidad y calidad. Respecto a la cantidad en el presente documento se evidencia falta de integridad temporal de los datos obtenidos por el sistema. Mientras que en cuanto a la calidad de los datos, luego de los análisis realizados se puede diferenciar que la información obtenida en el 2014

(los datos validados por el SVCA) presentaron intervalos de confianza más amplios para cada variable meteorológica respecto a su par de dato procesado, salvo la temperatura. Sin embargo, para las tres bases de datos analizadas las medias son congruentes entre si y también al histórico de la ciudad.

El porcentaje de datos que exceden la norma ambiental colombiana vigente en la mayoría de los reportes no supera el 10%, y solo para el caso de la concentración de PM_{2.5} se registran datos que exceden la norma diaria y anual, significando una calidad del aire moderada para la ciudad.

JUSTIFICACIÓN

La contaminación del aire está directamente relacionada con la salud y bienestar del público en general y es una de las causas de mortalidad prematura, debido a enfermedades cardiopulmonares, infecciones respiratorias agudas y cánceres (OMS, 2011), además que se proyecta como una de las mayores causas ambientales de mortalidad prematura por encima de aguas insalubres y falta de saneamiento para el 2050 (OCDE, 2012). Existe evidencia estadística que relaciona los contaminantes en el aire y la función pulmonar (Zeng, y otros, 2016). Del mismo modo, los incrementos y proyecciones de los niveles de contaminación confirman la necesidad crítica de medidas integradas, exhaustivas y a largo plazo orientadas al mejoramiento de la calidad del aire, la protección de la salud, el bienestar público y minimizar los riesgos asociados con el cambio climático. Por esta razón es esencial monitorear, revisar, analizar y comunicar la calidad del aire (Clean Air Institute, 2013).

Una herramienta que permite la revisión, el análisis y la comunicación del estado de la calidad del aire es el diagnóstico de la calidad del aire. El diagnóstico de la calidad del aire permite identificar la situación actual del sistema y sus componentes, así como las áreas de atención que permitan evaluar la red, realizar control y aseguramiento de la calidad, apoyo al desempeño de los equipos de medición y mejoras en la confiabilidad de los datos generados (Climático, 2012).

Esta tendencia a realizar seguimiento, revisión, análisis y evaluación a los sistemas de vigilancia, redes de monitoreo y en general todo lo correspondiente al recurso aire se debe a que con un número cada vez mayor de seres humanos que viven en centros urbanos existe la necesidad de examinar la contaminación del aire en las ciudades, sus efectos en el clima local y global. (Bablanov, Molina, & Gauss, 2015). A pesar de eso hay casos en donde el desarrollo urbano e industrial puede darse simultáneamente con una mejora en la calidad del aire (Parrish, Singh, Molina, & Madronich, 2011).

Otro fenómeno asociado y que determina la realización de los diagnósticos de la calidad del aire en ciudades es la deficiente gestión para mejorar la calidad del aire. Y que a su vez retrasa el progreso hacia el alcance de los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas, expresado además en la resolución 66/288 adoptada el 11 de septiembre de 2012 por la Asamblea General de las Naciones Unidas en la que se incluye la calidad del aire saludable como acción hacia un medio ambiente seguro y saludable para todo (Clean Air Institute, 2013).

Es por ello que a nivel de América Latina el Clean Air Institute (CAI) en conjunto con la Iniciativa de Aire Limpio para América Latina, advierte la deficiente información consistente y disponible sobre concentraciones ambientales en algunas ciudades y naciones de la región (Clean Air Institute, 2013).

En el distrito de Cartagena de Indias la incorporación de las estaciones meteorológicas y de monitoreo de la calidad del aire al SVCA se realizó recientemente. Lo anterior ha derivado en la falta de disponibilidad de datos, carencia en análisis de la información de la calidad del aire y una precaria gestión del sistema. Es por ello que el presente trabajo de grado pretende desarrollar el diagnóstico de la calidad del aire y con esto contribuir al SVCA con la revisión, evaluación y análisis de la gestión del recurso aire en Cartagena de Indias durante los años 2014 y 2015.

Lo anterior tiene como finalidad dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es el estado de la calidad del aire en el distrito de Cartagena de Indias para los años 2014 y 2015? Y ¿cómo inciden las condiciones meteorológicas en las concentraciones de los contaminantes monitoreados?

1. MARCO TEÓRICO

En esta sección se revisan elementos teóricos y conceptuales asociados al recurso aire. Para su presentación, los conceptos han sido agrupados en las siguientes categorías:

- Meteorología.
- Contaminantes criterio.
- Gestión de la calidad del aire.
- Estadística.

1.1 Meteorología

Aire. “Es el fluido que forma la atmosfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2006)

Atmósfera. Capa gaseosa que rodea la tierra.

Humedad relativa. “Valor del cociente entre la presión parcial del vapor de agua y la presión del vapor a una temperatura dada.” (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012)

“Es entendida como la calidad de agua de vapor que existe en el aire, este depende de la temperatura y es más elevada en las masas de aire caliente que en las de aire frio.” (EPA, 2015)

Precipitación. “Volumen de agua caída, por metro cuadrado de superficie, en el lugar de observación.” (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012)

Presión atmosférica. “Esta presión es igual al peso de una columna vertical de aire de sección transversal unitaria, que actúa por arriba de la superficie de la Tierra, extendiéndose hasta los límites exteriores de la atmósfera.” (IDEAM & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C Prevención y Atención, 2016)

Radiación. “Energía que se propaga en forma de ondas o partículas. Los tipos de radiación más comunes son el calor, la luz, las ondas radioeléctricas y las microondas.” (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012)

Temperatura. “Magnitud proporcional a la energía cinética media de las moléculas de aire.” (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012)

“La temperatura está relacionada con la energía calorífica de los rayos solares, determina la formación de las nubes, afecta los valores de humedad e influye en la presión atmosférica. “ (EPA, 2015)

Velocidad del viento. Distancia recorrida por el viento en una unidad de tiempo. (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012).

Viento. “El viento es aire en movimiento producido por las diferencias de presión atmosférica sobre todo a diferentes temperaturas. La variación de la presión atmosférica y de la temperatura se debe a la distribución desigual del calentamiento solar y a las propiedades térmicas de la superficie. “ (EPA, 2015)

La escala de Beaufort se presenta en la Tabla 1. Esta fue ideada por el Almirante Beaufort en el siglo XIX y asocia las magnitudes de la velocidad a efectos en el ambiente. (IDEAM, 2016)

Tabla 1 – Escala Beaufort. (IDEAM, 2016)

Escala	Nombre	kt	m/s	km/h	m.p.h	Características para la estimación de la velocidad en la tierra
0	Calma	1	0 – 0.2	1	1	Calma, el humo se eleva verticalmente.
1	Ventolina	1 – 3	0.3 – 1.5	1 – 5	1 – 3	La dirección del viento se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas.
2	Brisa muy débil	4 – 6	1.6 – 3.3	6 – 11	4 – 7	El viento se percibe en el rostro; las hojas agitan; la veleta se mueve.
3	Brisa débil	7 – 11	3.4 – 5.4	12 – 19	8 – 12	Hojas y ramitas agitadas constantemente, el viento despliega banderolas.
4	Brisa moderada	11 – 15	5.5 – 7.9	20 – 26	13 – 18	El viento levanta polvo y hojitas de papel, ramitas agitadas.
5	Brisa fresca	17 – 21	8.0 – 10.7	29 – 38	19 – 24	Los arbustos con hoja se balancean, se forman olitas con cresta en las aguas interiores (estanques).
6	Viento fresco	22 – 27	10.8 – 13.8	39 – 49	25 – 31	Las grandes ramas se agitan, los hilos telegráficos silban, el uso del paraguas se hace difícil.
7	Viento fuerte	22 – 27	13.9 – 17.1	50 – 61	32 – 38	Los arboles enteros se agitan, la marcha en contra del viento es penosa.
8	Viento duro	34 – 40	17.2 – 20.7	62 – 74	39 – 46	El viento rompe las ramas, es imposible la marcha contra el viento.
9	Viento muy duro	41 – 47	20.8 – 24.4	75 – 88	47 -54	El viento ocasiona ligeros daños en las viviendas (arranca cañerías, chimeneas, tejados).
10	Temporal	48 – 55	24.5 – 28.4	89 – 102	55 – 63	Raro en los continentes, árboles arrancados, importantes daños en las viviendas.
11	Borrasca	56 – 63	28.5 – 32.6	103 – 117	64 – 72	Observado muy raramente, acompañado de extensos destrozos
12	Huracán	≥ 64	≥ 32.7	≥ 118	≥ 73	Estragos graves y extensos

1.2 Contaminantes criterio

Contaminantes. Fenómenos o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de combinación de éstas. (Ministerio de Ambiente V. y., 1995)

Contaminante criterio. “Son aquellos contaminantes que se consideran para definir la calidad del aire. Se les denomina contaminantes criterio en función de que permiten establecer un criterio que sirve de base para definir una norma sobre su concentración. Otro motivo por el que se les denomina contaminantes criterio es porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos criterio de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer para los contaminantes niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Actualmente, el término contaminante criterio ha sido adoptado en muchos países (Sbarato, 2007).” (UNAD, 2016).

Son contaminantes criterio:

- Dióxido de azufre (SO₂)
- Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})
- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Ozono (O₃)

Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión. Es el nivel legal máximo permitido para contaminantes criterio. Estos se pueden apreciar en la Tabla 2. (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Tabla 2 – Niveles máximos permitidos para contaminantes criterio

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM₁₀	50	Anual
	100	4 horas
PM_{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO₂	80	Anual
	250	24 horas
NO₂	100	Anual
	150	24 horas
O₃	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). "Es una mezcla de partículas sólidas y líquidas minúsculas, que se encuentran en el aire que respiramos. Del material particulado, las partículas "finas" o más pequeñas (aquellas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros o PM_{2.5}) son especialmente dañinas, puesto que pueden penetrar profundamente en los pulmones, donde pueden causar inflamación y empeoramiento de condiciones cardíacas o pulmonares; lo que puede ocasionar una muerte prematura. " (Clean Air Institute, 2013)

Ozono (O₃). Gas azul pálido originado en la atmósfera como consecuencia de reacciones fotoquímicas, en presencia de luz solar y a partir de la reacción entre contaminantes precursores como los óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos. (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

1.3 Gestión de la calidad del aire

Consistencia de los datos relacionados con la calidad del aire. “Para evaluar la consistencia de los datos relacionados con la calidad del aire es recomendable elaborar diagramas de caja por contaminante. De esta manera se ha de identificar los valores extremos o valores atípicos y buscar información adicional (metadata) que permita identificar las posibles causas.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Los datos atípicos se encuentran a más de tres distancias intercuartílicas.

Consistencia de los datos relacionados con las variables meteorológicas. Se puede seguir el mismo procedimiento empleado para evaluar la consistencia de los datos relacionados con la calidad del aire para evaluar la consistencia de los datos relacionados a variables meteorológicas. Se revisan datos por fuera de los rangos normales.

Elementos de Aseguramiento de Calidad (AC) de un SVCA. Son aquellos elementos y procedimientos que permiten el desarrollo de los objetivos de la calidad de los datos.

Algunos elementos y procedimientos que se pueden implementar dentro de los documentos de control son:

- Procedimientos de muestreo
- Procedimientos de calibración
- Procedimientos analíticos
- Procedimientos de análisis de datos, validación y reporte
- Procedimientos desempeño y auditoria del sistema
- Mantenimiento preventivo
- Plan de aseguramiento de la calidad
- Proyectos de aseguramiento de la calidad

Posteriormente se debe identificar los Objetivos y Políticas de aseguramiento de la calidad y organización (actividades rutinarias, procedimientos y soporte).

“La planeación de la calidad en mediciones de contaminantes es concebida para obtener una calidad de datos aceptables a unos costos razonables” (Ministerio de

Ambiente V. y., 2010). Por ello, debe tenerse en cuenta las siguientes actividades y elementos críticos:

- Toma de la muestra
- Análisis de la muestra
- Procesamiento de datos
- Equipo asociado
- Personal: operadores y analistas

Debe asegurarse entrenamiento continuo y planeado para el personal operativo del SVCA dentro del programa AC. Todo el equipo debe participar en el proceso para garantizar reportes con gran calidad de los datos. Las capacitaciones pueden consistir en una serie de recursos (cursos, talleres, etc.) ofrecidos por diversas instituciones ambientales, académicas entre otras. (Ministerio de Ambiente V. y., 2010).

Estaciones automáticas. “Son aquellas que no requieren análisis posterior de la muestra tomada. Por medio de métodos ópticos o eléctricos se analiza la muestra directamente proporcionando datos en tiempo real, de modo que se puedan tomar acciones inmediatas ante la ocurrencia de un evento de concentraciones altas de algún contaminante.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Estaciones manuales. “Se caracterizan por requerir un laboratorio como apoyo para el análisis de las muestras tomadas. Requieren además, una rutina para la recolección de las muestras, de acuerdo con una periodicidad preestablecida.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Evaluación de la calidad de los datos. “Es la evaluación científica y estadística de los datos obtenidos por las actividades de aseguramiento y control para determinar si los datos de vigilancia son correcto y adecuados en cuanto a calidad y cantidad, así como las condiciones particulares del entorno (precipitación, temperatura, presión, etc.).” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Índice de la Calidad del Aire (ICA). Permite interpretar los niveles de las concentraciones registrados por una estación o red de estaciones de monitoreo de

la calidad del aire en una región. Este ha sido adoptado de la EPA de los Estados Unidos. En nuestro país se miden los siguientes contaminantes (Aburrá Á. M., 2016):

- Monóxido de carbono (CO)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)
- Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})
- Ozono troposférico (O₃)

“El indicador se calcula a partir de las mediciones de concentración de los contaminantes monitoreados en los SVCA, ” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010), para el cual se tiene en cuenta el contaminante, el tiempo de exposición y los puntos de corte tal como se aprecia en la Tabla 3.

Tabla 3 – Puntos de corte ICA. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 2010

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm	PM ₁₀ 24h ppm	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 – 50	Verde	Buena	0.000	-	0	0	0	0	0
			0.059	-	54	12	44	0.035	0.053
51 – 100	Amarillo	Moderada	0.060	-	55	12.1	4.5	0.036	0.054
			0.075	-	154	35.4	9.4	0.075	0.100
101 – 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0.076	0.125	155	35.5	9.5	0.076	0.101
			0.095	0.164	254	55.4	12.4	0.185	0.360
151 – 200	Rojo	Dañina a la salud	0.096	0.165	255	55.5	12.5	0.186	0.361
			0.115	0.204	354	150.4	15.4	0.304	0.649
201 – 300	Purpura	Muy dañina a la salud	0.116	0.205	355	150.5	15.5	0.305	0.650
			0.374	0.404	424	250.4	250.4	0.604	1.249
301 – 400	Marrón	Peligrosa	-	0.405	425	250.5	30.5	0.605	1.250
			-	0.504	504	350.4	40.4	0.804	1.649
401 – 500	Marrón	Peligrosa	-	0.505	505	350.5	40.5	0.805	1.650
			-	0.604	604	500.4	50.4	1.004	2.049

Este se calcula de manera independiente para cada uno de los contaminantes que se monitoreen en la ciudad, y la ecuación utilizada es:

$$I_P = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Ecuación 1 – Ecuación para cálculo del ICA

Donde:

IP = Índice para el contaminante p

CP = Concentración medida para el contaminante p

BP_{Hi} = Punto de corte mayor o igual a C_P

BP_{Lo} = Punto de corte menor o igual a C_P

I_{Hi} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Hi}

I_{Lo} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Lo}

Además, cabe anotar que para el caso del Ozono troposférico, los equipos de monitoreo reportan su concentración en $\frac{\mu g}{m^3}$, por lo que para realizar la conversión a ppm, se sigue la siguiente conversión:

$$Y = \frac{X}{PM \times \left(\frac{10^3}{24.5}\right)}$$

Ecuación 2 – Conversión de $\mu g/m^3$ a ppm

Donde:

X: es la concentración de ozono reportado durante el monitoreo. [$\mu g/m^3$]

Y: es la concentración de ozono en partes por millón [ppm]

PM: Peso molecular del contaminante = Valor que equivale a 48. (Debido a que el peso molecular del oxígeno es 16, el del ozono equivale al triple)

Incertidumbre de la representatividad espacial y temporal. Es el atributo más importante de la calidad de los datos de un SVCA. Este atributo se cuestiona si el dato que se mide representa lo que debería representar. (Ministerio de Ambiente V. y., 2010).

Esta se puede controlar:

- Diseñando el SVCA con un tamaño adecuados y en sitios representativos consistentes.

- Documentando las restricciones topográficas, meteorológicas y en materia de fuentes de emisión.
- Estableciendo periodos de muestreo adecuados.

Incertidumbre de la calibración e incertidumbre de la precisión. Asociada a las etapas de obtención y procesamiento de los datos (Ministerio de Ambiente V. y., 2010).

Integridad temporal. “Se define como la relación entre la cantidad de datos validos obtenidos por un sistema de muestreo comparado y la cantidad ideal que debería obtenerse en condiciones normales de operación. Para equipos manuales, la integridad temporal de muestreo serán 91 datos, debido que el máximo posible de datos son 121. Para equipos automáticos serán 6570 datos horarios en un año.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Procesamiento de la información. “Consiste en la determinación de ciertos factores puntuales que pudieron afectar el muestreo para proceder a su validación y posterior inclusión en la base de datos. Durante esta etapa se realiza el análisis y la consolidación de los datos con el fin de llegar a conclusiones acerca de la calidad del aire correspondiente al dominio del SVCA.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Reporte de la Calidad del Aire. “Es el resultado de la operación del SVCA que se lleva a la comunidad a través de la publicación en página web o de informes físicos impresos.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Revisión de datos. Es un proceso mediante el cual se examinan los datos. Es común emplear metadatos (anotaciones y observaciones diarias) para la revisión de los datos. Esta sirve para rechazar datos erróneos o inválidos, pueden indicar a los operadores fallas o problemas del equipo. (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Algunas consideraciones a tomar en cuenta en este proceso son:

- Características e historia de instrumentos
- Factores de calibración y tendencias
- Datos fuera de intervalo o negativos
- Picos o aumentos repentinos
- Eventos especiales

Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA). “Conjunto de procesos, herramientas, instrumentos y equipos de medición de calidad del aire instalados sistemáticamente para verificar el cumplimiento de uno o varios de los objetivos de vigilancia de calidad del aire previstos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

SVCA híbrido. “Combinan las ventajas de los sistemas manuales y automáticos, pueden optimizar costos y ampliar la cobertura del sistema. Su desventaja radica en que el grado de entrenamiento de los operarios es mayor, así como la de cantidad de personal requerido” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

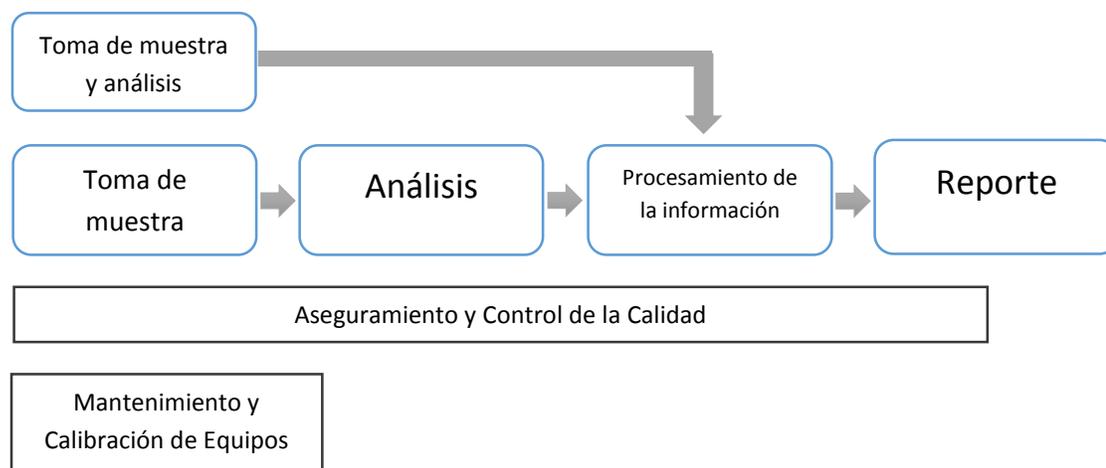


Ilustración 1 – Proceso general de operación de un SVCA híbrido. MAVDT

Tipo de Estaciones de Monitoreo. A nivel nacional en las ciudades colombianas, se diseña e implementan los sistemas de vigilancia de la calidad del aire dependiendo de la población de la zona y estos se pueden clasificar en: SVCA Tipo I – Indicativo, SVCA Tipo II – Básico, SVCA Tipo III – Intermedio, SVCA IV –

Avanzado, SEVCA – Sistemas Especiales De Vigilancia De La Calidad Del Aire, SVCAI – Sistemas De Vigilancia De La Calidad Del Aire Industrial (Ministerio de Ambiente v. y., 2011). Las características de cada uno se aprecian a continuación:

- SVCA TIPO I: Indicativo: Población mayor o igual a 50.000 habitantes y menor a 150.000.
- SVCA TIPO II: Básico: Población mayor o igual a 150.000 habitantes y menor a 500.000.
- SVCA TIPO III: Intermedio: Población mayor o igual a 500.000 habitantes y menor a 1.500.000.
- SVCA TIPO IV: Avanzado: Población concentrada igual o mayor a 1.500.000 habitantes.
- SEVCA: Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire: Cualquier población con problemáticas específicas de calidad del aire (minería, alto nivel de industrialización, etc.).
- SVCAI: Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire Industrial: Aplicado a actividades a las que la autoridad ambiental establezca la obligación de implementar un SVCA. Podrá contar con estaciones indicativas o fijas.

Además, estos se pueden clasificar según su tecnología en: SVCA Manuales, Automáticos, Híbridos. (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

Los SVCA están conformados por equipos que pueden ser: muestreadores o analizadores.

Los muestreadores pueden ser empleados para la recolección de muestras, las cuales serán analizadas en un laboratorio para realizar la cuantificación de la presencia del contaminante deseado. Estos pueden ser manuales o semiautomáticos.

Por otra parte, los analizadores no solo recolectan la muestra sino que internamente determinan la concentración de cada contaminante.

Validación de datos. Debido a que en la operación de un SVCA se pueden generar datos incorrectos, antes que la información sea enviada a la autoridad ambiental esta debe ser almacenada, revisada y validada, mediante un proceso de depuración de datos adecuado.

"En este proceso se filtran, aceptan o marcan datos para su posterior análisis, los datos invalidados deben ser archivados y se deben conservar." (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)

La validación depende del tipo de datos y del propósito en la medición, algunos métodos empleados son:

- Test de total de datos
- Test de límites
- Test de relaciones entre parámetros
- Test de comparación entre sitio

1.4 Estadística

Coefficiente de correlación. "La correlación estadística es medida por lo que se denomina coeficiente de correlación (r). Su valor numérico varía de 1,0 a -1,0. Nos indica la fuerza de la relación" (Estadística, 2016), en términos más simples la correlación entre dos variables es el grado de asociación entre las mismas. (FAO, 2016).

Diagrama de cajas. "Estos gráficos representan un conjunto de datos en un rectángulo (caja) mediante cuartiles y dos segmentos de línea hacia arriba y hacia abajo de la caja, los cuales simbolizan los límites superior e inferior del conjunto de datos. Adicionalmente, este tipo de gráficos muestran valores atípicos (outliers) representados por puntos, estos valores son datos que numéricamente se encuentran distantes del resto de los datos analizados." (IDEAM Instituto de Hidrología, 2012). Una característica relevante de este tipo de gráficos radica en que estos muestran valores atípicos es decir numéricamente distantes de la media de la muestra de los datos analizados.

2. ESTADO DEL ARTE

La metodología seguida en los diagnósticos de la calidad del aire de una zona depende de las condiciones y de la información histórica de las mismas. De manera general en la mayoría de los casos el desarrollo de un diagnóstico de un sistema tiene como objetivo realizar propuestas de mejoramiento del funcionamiento del mismo.

Una práctica común alrededor del mundo es la utilización de redes de monitoreo de la calidad del aire. Esto se debe a que el principal rol de las redes de monitoreo es proveer información acerca de los niveles de contaminación de los contaminantes medidos. Las redes se pueden clasificar en: redes de vigilancia (cubren usualmente áreas grandes y son la base de los sistemas nacionales de monitoreo) y redes de control-alarma (tienen tareas especiales como la estimación de modelos de dispersión y transporte de contaminantes) (Marc, Tobiszewski, Zabiegala, & de la Guardia, 2014). De manera complementaria y subsecuente a las mismas, aparece la implementación y cambio tecnológico además del ajuste normativo para la reducción de los niveles de contaminantes (Lamsal, y otros, 2015).

Los lugares para el monitoreo de la calidad del aire tienen distintas características (topográficas, climáticas, distancia a fuentes de emisión, etc.); y cuyo criterio está sujeto a los institutos de cada país (Joly & Peuch, 2012). A nivel mundial encontramos numerosas ciudades que tienen redes de monitoreo. Entre ellas está la Zona Metropolitana del Valle de México que cuenta con 47 estaciones de monitoreo operadas por el sistema de monitoreo atmosférico de Ciudad de México. La ciudad de Beijing (China) que cuenta con 28 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire, localizadas en un área de más de 100 km². La red de monitoreo ambiental de Londres que cuenta con sistemas de monitoreo de contaminantes criterio y variables meteorológicas en 30 de las áreas suburbanas más importantes de la ciudad. El Estado de California en Estados Unidos que cuenta con más de 250 estaciones automáticas (Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007).

De esta misma manera encontramos en que varias ciudades se han realizado diagnósticos de la calidad del aire. Entre ellas encontramos el diagnóstico de la calidad del aire de la ciudad de Cuenca en Ecuador en el cual se clasificó y ordenó la siguiente información: descripción de la red, parámetros ambientales medidos, números y localización de sitios de muestreo, equipos de muestreo y tiempo de toma de muestra (Ecuador, 2001).

El diagnóstico de la calidad del aire realizado sobre el Sistema de Medición de la Calidad del Aire (SMCA) de México, donde se compiló información, se realizó el inventario de las estaciones, se evaluaron los niveles de desarrollo de SMCA y se integraron las fichas técnicas de los mismos (Climático, 2012). Al evaluar el sistema se permite determinar el desempeño del mismo en el tiempo de operación y ejercer control del mismo a fin de alcanzar representatividad y cobertura.

Uno de los requerimientos para captar información representativa y consistente yace en el número de estaciones para el monitoreo y su distribución espacial; estos lineamientos se pueden encontrar en los protocolos de cada país o regulaciones supranacionales como en el caso europeo, en el cual los lineamientos en calidad del aire para la Unión Europea los define Directiva 2008&50/EC (González Ferradás, Doval Miñarro, Morales Terrés, & Marzal Martínez, 2010). A manera comparativa podemos apreciar que dentro de la norma europea se establece que la recogida mínima de datos es de 90% (Parlamento Europeo y del Consejo, 2008) porcentaje de disponibilidad superior al 75% empleado bajo los lineamientos del IDEAM (Aburrá Á. M., 2013).

Los análisis del estado de la calidad del aire en el territorio nacional permiten apreciar cuando las concentraciones atmosféricas de distintos contaminantes superan los valores establecidos por la reglamentación ambiental y conocer los parámetros meteorológicos más influyentes en los niveles de contaminación. De esta manera, en el diagnóstico de la calidad del aire de la ciudad de Bogotá, a través de los Índices Porcentuales de Excedencia (IPE) se evidencia que entre los contaminantes monitoreados es el material particulado el contaminante del aire con mayor porcentaje de excedencia a la norma (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2008); además de establecer que la velocidad del viento fue el parámetro meteorológico de mayor influencia por encima de la precipitación en los niveles de concentración por material particulado (Gaitán, Cancino, & Behrentz, 2007). Por ello se tomaron medidas para disminuir la descontaminación asociada a material particulado. Los resultados de este proceso se resumen en la Ilustración 2 en la que se aprecia que de manera general y para la mayoría de estaciones existe la tendencia de reducción progresiva en la concentración de PM₁₀ (Secretaría Distrital de Ambiente, 2013)

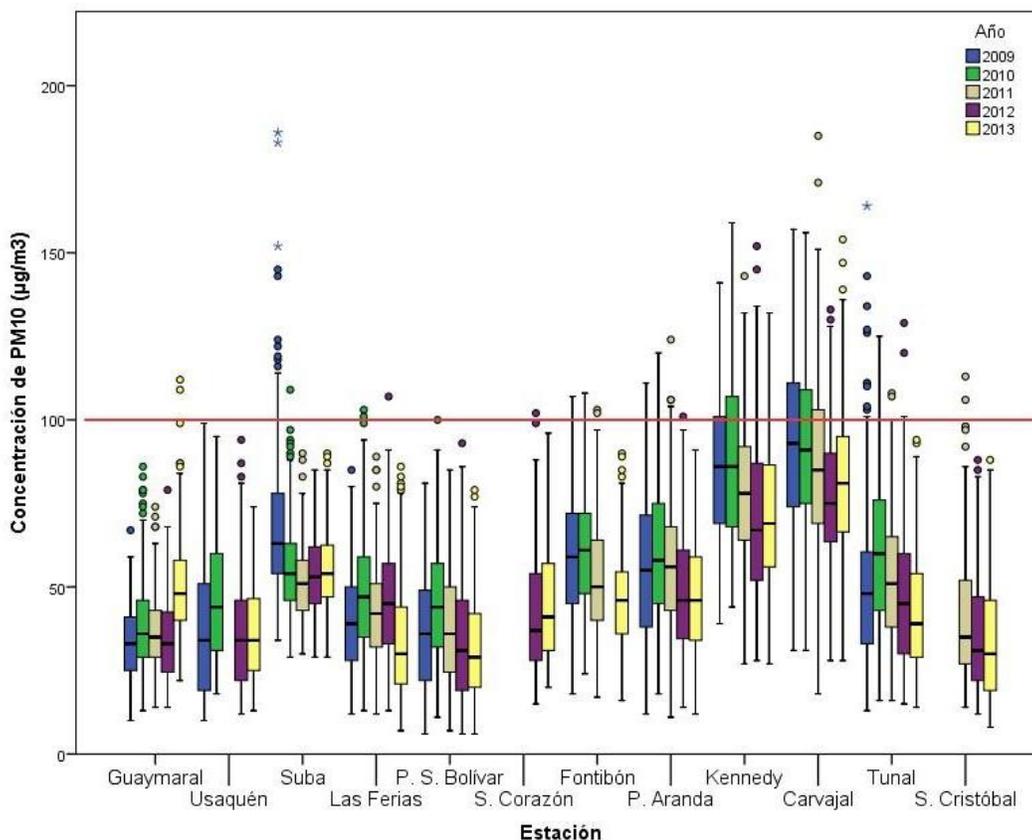


Ilustración 2 - Comportamiento histórico de PM₁₀ para cada estación de la RMCAB. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C

De manera análoga, en la ciudad de Medellín el mismo año, el monitoreo realizado por la RedAire (Red de Vigilancia de la Calidad del Aire) establece que la concentración de material particulado excede los límites máximos permisibles por la norma colombiana reportando valores dentro del rango entre 101-200 partes por millón y cuyo ICA obtuvo una calificación "*No saludable para grupos sensibles*".

Con referencia a otros contaminantes, la concentración de los mismos entre los años 2007 al 2009 no supera la norma colombiana. (Medellín, 2009). De forma similar a Bogotá, luego del análisis de la información obtenida durante el monitoreo histórico se adoptó un Plan de Descontaminación y control de los niveles de PM_{2.5} (Aburrá Á. M., 2009).

El Establecimiento Público Ambiental de Cartagena gestionó el montaje y ejecución del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) desde el 2013; cuya cobertura involucra áreas de contaminación atmosférica significativa de la ciudad. (EPA, 2015)

2.1 Aspectos geográficos del área de estudio

El Distrito de Cartagena de Indias está localizado al norte de Colombia, cuyas coordenadas son 10° 26' de latitud norte y 75° 33' de longitud oeste.

Posee una extensión de 609.1 Km², de los cuales 54 Km² equivalentes al 8.86%, corresponden al área urbanizada y los restantes 551.1 Km², que representan el 91.14%, conforman el área rural. (C, 2016)

“El territorio Distrital está compuesto por una serie de islas, penínsulas y cuerpos interiores de agua, que conforman el área insular y un área continental. Estas condiciones y la presencia de los cuerpos de agua, hacen de Cartagena una ciudad con características morfológicas especiales y un hermoso paisaje natural pero al mismo tiempo lo constituyen en un sistema de gran fragilidad ambiental.” (Hernández Rodríguez, Leottau Serrano, & Gaviria León, 2008)

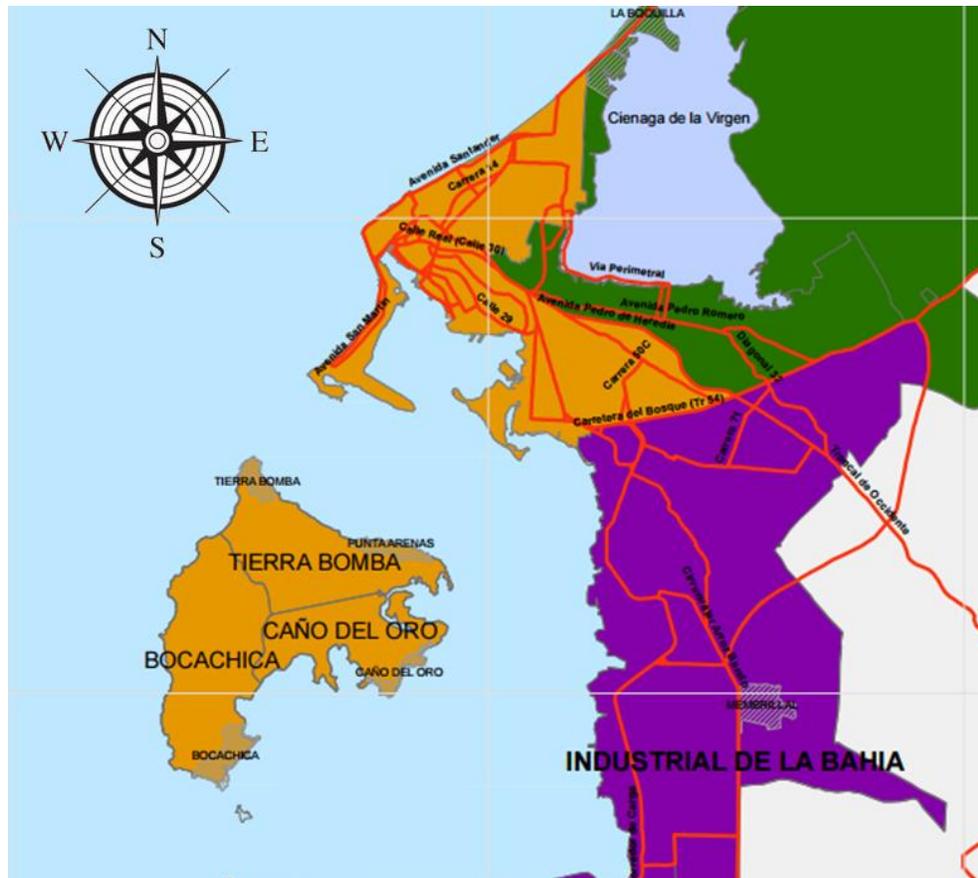


Ilustración 3 – Distribución político administrativa del área de estudio. Secretaria de Planeación Distrital de Cartagena de Indias.

2.1.1 Factores determinantes de la calidad del aire y contaminación atmosférica

Condiciones meteorológicas. Las variables meteorológicas de un territorio son clave para el estudio de la contaminación atmosférica y calidad del aire. “Las condiciones meteorológicas tienen importancia fundamental en los sucesos de contaminación atmosférica, puesto que las sustancias emitidas por procesos industriales de transporte o simplemente ambientales, son llevadas y dispersadas por ellas.” (EPA, 2015)

“La velocidad del viento afecta en gran medida la concentración de contaminantes en un área, mientras mayor sea la velocidad del viento mayor será la dilución y dispersión de los contaminantes.” (EPA, 2015)

“La dispersión de contaminantes depende de la cantidad de turbulencia en la atmosfera cercana que puede ser generada por el movimiento horizontal del viento y vertical de la atmosfera. El movimiento vertical de la atmosfera afecta el transporte y dispersión de los contaminantes del aire, debido a los cambios de temperatura que se presentan durante el día se genera un movimiento que crea condiciones inestables y dispersa los contaminantes.” (EPA, 2015)

“Las precipitaciones en la zona de estudio son debidas principalmente a tres factores que tiene que ver con su posición sobre la costa, con el régimen de vientos alisios y la influencia del Cinturón de Convergencia Intertropical. “ (EPA, 2015)

Usos del suelo. “En el Plan de Ordenamiento Territorial, están permitidas las actividades Comercial, Industrial, Residencial, Turístico, Portuario e Institucional. Las actividades potencialmente contaminantes son la Comercial, Industrial y Portuaria, ya que en ellos se pueden desarrollar actividades con probabilidad de emitir contaminantes a la atmósfera.” (Hernández Rodríguez, Leottau Serrano, & Gaviria León, 2008)

Estabilidad Atmosférica. “La estabilidad atmosférica está relacionada con la variación vertical de temperaturas en la atmósfera, que es en última, la que determina el grado de dispersión vertical de un contaminante en un lugar

determinado de la atmósfera. En este sentido una atmósfera neutralmente estable favorece la dispersión de contaminantes en forma ascendente, pero no tanto como una atmósfera inestable en donde los movimientos verticales son mayores y favorecen la dispersión de contaminantes porque hay mayor turbulencia en sentido ascendente. Lo contrario ocurre con una atmósfera estable en donde los movimientos verticales son descendentes y favorece la acumulación de contaminantes en las partes bajas de la atmósfera, cerca de la superficie terrestre.” (Hernández Rodríguez, Leottau Serrano, & Gaviria León, 2008)

“Estas condiciones están directamente relacionadas con las concentraciones de contaminantes en el aire ambiental (CEPIS, 2005).” (UNAD, 2016)

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos generales

- Diagnosticar la calidad del aire de la Ciudad de Cartagena durante el periodo 2014 y 2015, procesando los datos reportados por las estaciones pertenecientes al SVCA.

3.2 Objetivos específicos

- Analizar estadísticamente la información meteorológica y de concentración de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃.
- Comparar la concentración de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ con los niveles máximos permisibles establecidos en la norma ambiental colombiana vigente.
- Generar el análisis de correlación entre las variables meteorológicas y la concentración de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃, durante los años 2014 y 2015.
- Determinar el Índice de Calidad del Aire.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

El enfoque metodológico se fundamenta en la aplicación del método estadístico descriptivo e inferencial.

El presente trabajo se desarrolló en tres (3) etapas, dos (2) asignadas a la revisión de información meteorológica y de concentraciones y una (1) para los análisis pertinentes entre ellos el cálculo del índice de la calidad del aire y el análisis de correlación de variables.

Previo al inicio de este trabajo, el SVCA de Cartagena de Indias ha suministrado las siguientes bases de datos:

- Datos meteorológicos crudos (obtenidos directamente de los equipos) del año 2014
- Datos meteorológicos validados por el SVCA de los años 2014 y 2015
- Datos de concentraciones validadas por el SVCA de los años 2014 y 2015

En la primera etapa, se revisó la información meteorológica de la siguiente manera: procesando los datos crudos obtenidos (*a los que llamaremos en adelante datos procesados*) del 2014 como también de los datos validados por la autoridad ambiental de las estaciones meteorológicas para el 2014 y 2015.

Los datos procesados son aquellos datos que son obtenidos directamente del equipo sin ningún tipo de procesamiento o modificación de los archivos. Mientras que los datos validados son aquellos que el SVCA de la ciudad reporta y tiene en su base de datos (es decir aquellos que ya han sido procesados y sometidos a un proceso de validación).

Cada variable meteorológica y los datos relacionados con la calidad del aire cuentan con diagramas de caja (*boxplot*). Estos se generaron con el objetivo de evaluar la consistencia de los datos y de identificar los valores extremos o valores atípicos.

Es importante resaltar que *el Protocolo* establece métodos sugeridos tanto para revisar como validar la información en un SVCA dentro de los cuales se sugiere el aprovechamiento de boxplot.

Esto con el fin de asegurar que las mediciones reportadas sean adecuadas respecto al programa global de aseguramiento de la calidad. “El procedimiento de validación es un procedimiento pos muestreo que no solo consiste en chequear los cálculos sino también detectando concentraciones cuestionables.” (Ministerio de Ambiente V. y., 2010)



Ilustración 4 – Localización de estaciones meteorológicas. (EPA, 2015)

Teniendo en cuenta que actualmente la ciudad cuenta con cinco (5) estaciones meteorológicas localizadas en los puntos que se aprecian en la Ilustración 4 se estableció la disponibilidad anual de datos por estación.

En la segunda etapa, se revisó y procesó la información de concentraciones de los datos validados por la autoridad ambiental para el 2014 y 2015.

Este proceso incluye la identificación de los datos atípicos mediante diagramas de caja y la comparación de medición de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y O_3 con la Resolución 610/10 (Ministerio de Ambiente V. y., 2010) para los distintos periodos de exposición, de

acuerdo al tipo de contaminante (cada 24 horas para el PM₁₀ y PM_{2.5} y cada 1 hora para el O₃).

Los datos de la concentración de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ se obtienen de los diferentes equipos de medición localizados en la ciudad como se aprecia en la Tabla 4.

Tabla 4 – Disponibilidad de equipos de medición en las estaciones de monitoreo, 2014 y 2015.

Contaminante monitoreado	Automático		Semiautomático	
	2014	2015	2014	2015
PM ₁₀	2	2	3	2
PM _{2.5}	2	2	1	1
O ₃	3	3	-	-

El SVCA cuenta con tres (3) medidores semiautomáticos para PM₁₀ y uno (1) para PM_{2.5}, tres (3) analizadores automáticos de ozono, dos (2) equipos automáticos PM₁₀ y dos (2) equipos automáticos para PM_{2.5} (EPA, 2015). Los parámetros evaluados en cada una de las estaciones y su localización se aprecian en la Tabla 5.

Tabla 5 – Descripción de las estaciones del SVCA, según los parámetros evaluados y tecnologías implementadas. (EPA, 2015)

Estación	Ubicación	Ubicación		Contaminante monitoreado		
		Latitud	Longitud	PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃
GT1	BOCANA*	10.453079°	-75.507676°	X		
GT2	BASE NAVAL**	10.413972°	-75.549739°	X	X	X
GT3	CARDIQUE*	10.391569°	-75.525155°	X	X	
GT4	ZONA FRANCA**	10.326460°	-75.489407°	X	X	X
EM1	POLICIA*	10.405512°	-75.485459°	X		
EM2	EPA**	10.413876°	-75.540082°			X

*Equipos automáticos; ** Equipos semiautomáticos

En la tercera etapa se realizó el análisis de datos, comparación de resultados y recomendaciones. Para esto se desarrolló el análisis de la disponibilidad de los datos meteorológicos y de concentración de contaminantes, la correlación de variables meteorológicas y de concentración para el 2014 y 2015, el cálculo del

índice de la calidad del aire, prueba de hipótesis de las medias de las variables meteorológicas y una serie de recomendaciones dirigidas a la autoridad ambiental.

4.1 Metodología de depuración de información

La metodología empleada para depurar la información meteorológica en este trabajo ha tenido en cuenta lo expuesto en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

El procedimiento seguido para la revisión de los datos meteorológicos fue el siguiente:

1. Introducción de los datos crudos obtenidos de las estaciones (sin procesar) del equipo a una hoja de cálculo.
2. Determinación de la disponibilidad porcentual de datos por cada estación.
3. Validación de los datos de acuerdo a los métodos desarrollados en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Ministerio de Ambiente V. y., 2010).

La revisión de los datos se realizó a través del análisis de *diagramas de caja (boxplot)* y que cabe anotar que aunque no se tuviera acceso a metadata (anotaciones o información adicional) a fin de presentar de manera significativa los datos del SVCA se rechazaron los datos atípicos determinados en los boxplot. Esto se debe a que debe existir coherencia entre los límites máximos y mínimos estadísticamente basados en los históricos y lo registrado por las estaciones. Los diagramas de caja (*boxplot*) se encuentran consignados en el apartado de *Anexos*.

4. Cálculo de la media de los datos cada hora debido a que la información meteorológica tiene una resolución temporal de cada 5 minutos.
5. Manejo estadístico de datos, creación de gráficos por variable meteorológica (para la presentación de estos se eliminaron los valores atípicos) y rosa de vientos para las variables de velocidad y dirección del viento por medio del software estadístico **R** y el paquete **openair**.

De manera análoga al manejo de los datos meteorológicos, y en concordancia con el *Protocolo anteriormente citado*, la metodología empleada para el procesamiento de la información en contaminantes fue la siguiente:

1. Establecer la disponibilidad porcentual de datos por cada estación. Verificación de estaciones con disponibilidad igual o mayor al 75% de datos validados (Ministerio de Ambiente V. y., 2010) . Se indicó cuales estaciones dentro del SVCA cumplen con esta condición para realizar el manejo estadístico de los datos. Las estaciones cuyo porcentaje de pérdida de información es igual o superior al 25% también se muestran en el presente documento con fines informativos.
2. Revisión de factor de corrección en el cálculo de la concentración.
3. Re-validación de los datos de acuerdo a los métodos desarrollados en el Protocolo (Ministerio de Ambiente V. y., 2010).

De manera similar a los datos meteorológicos, la revisión de los datos se realizó a través del análisis de *diagramas de caja (boxplot)* y que cabe anotar que aunque no se tuviera acceso a metadatos (anotaciones o información adicional) a fin de presentar de manera significativa los datos del SVCA se rechazaron los datos atípicos. Esto se debe a que debe existir coherencia entre los límites máximos y mínimos estadísticamente basados en los históricos y lo registrado por las estaciones. Los diagramas de caja (*boxplot*) se encuentran consignados en el apartado de *Anexos*.

4. Creación de gráficos de concentración en función del tiempo, comparados con los niveles máximos permisibles expresados en la **Resolución 610 de 2010** – Norma de Calidad del Aire y porcentaje de aquellos que superan el límite legal.
5. Cálculo del Índice de la Calidad del Aire – **ICA** para los contaminantes criterios analizados.

Posterior a estos procedimientos realizó el análisis de correlación lineal entre variables meteorológicas y contaminantes criterio.

Es importante anotar que el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire desarrollado por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial indica en el Capítulo 9, en el apartado de Análisis de la Información Generada por los SVCA, que en caso que el porcentaje de información perdida iguala o supera al 25% no podrán realizarse los cálculos de los valores para el periodo de tiempo a evaluar y que los datos no validos no podrán ser ingresados en las hojas de cálculo para el tratamiento de la información.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados y el análisis de los mismos, en el siguiente orden:

- Meteorología.
- Concentración de contaminantes criterio.

5.1 Meteorología

5.1.1 Disponibilidad de la información

Se contó con datos meteorológicos de las estaciones meteorológicas vinculadas al SVCA durante el 2014 y 2015.

El análisis del porcentaje de la captura de datos se determinó mediante la Ecuación 3.

$$Cap_{datos}(\%) = \frac{d}{N} * 100$$

ECUACIÓN 3 – PORCENTAJE DE CAPTURA DE DATOS

Donde:

$Cap_{datos}(\%)$: Valor numérico que indica el desempeño del equipo, en relación a la cantidad de datos entregados a la central de información.

d : Número total de datos reportados por el equipo durante el periodo de tiempo definido.

N: Número de datos que debieron haber sido reportados en el proceso de tiempo definido.

La disponibilidad de estos datos puede apreciarse en Ilustración 5.

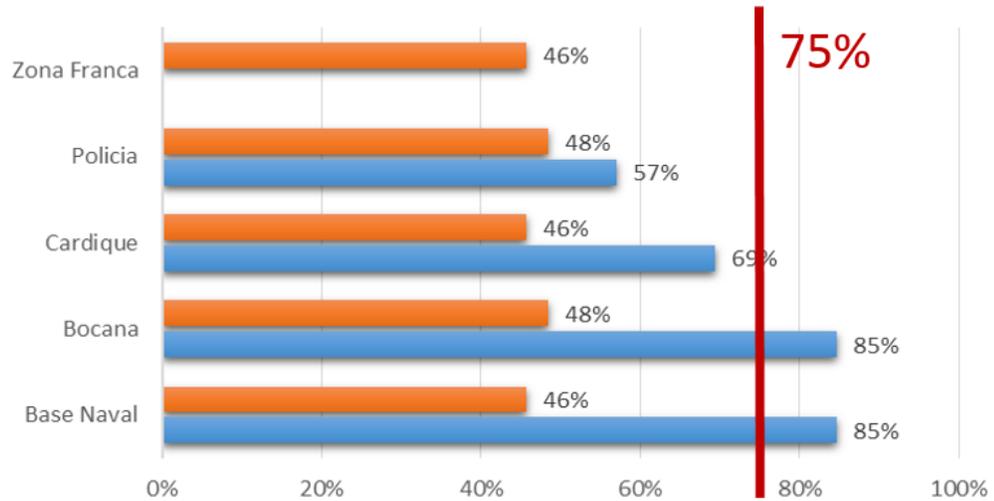


Ilustración 5 – Disponibilidad de los datos meteorológicos durante el 2014 y 2015

Solo dos (2) estaciones (Base Naval y Bocana) durante el año 2014 contaron con información igual o mayor al 75% quiere decir que en la mayor parte de las estaciones no hay integridad temporal de muestreo de datos meteorológicos anuales. Cabe decir que para el año 2015 no se recibieron la totalidad de los meses en datos meteorológicos.

Los datos obtenidos en algunas estaciones no cumplieron con la integridad temporal, es decir que la información registrada permite concluir acerca del comportamiento de las variables meteorológicas pero con un grado mayor de incertidumbre.

Durante el año 2014, las estaciones meteorológicas ubicadas en la Base Naval y Bocana contaron con una disponibilidad anual de datos superior al 75%, los datos faltantes fueron complementados de las estaciones ubicadas en Cardique y de la Policía – Olaya. No obstante, las estaciones meteorológicas ubicadas en Cardique – Olaya tienen una disponibilidad anual de datos inferior al 75%.

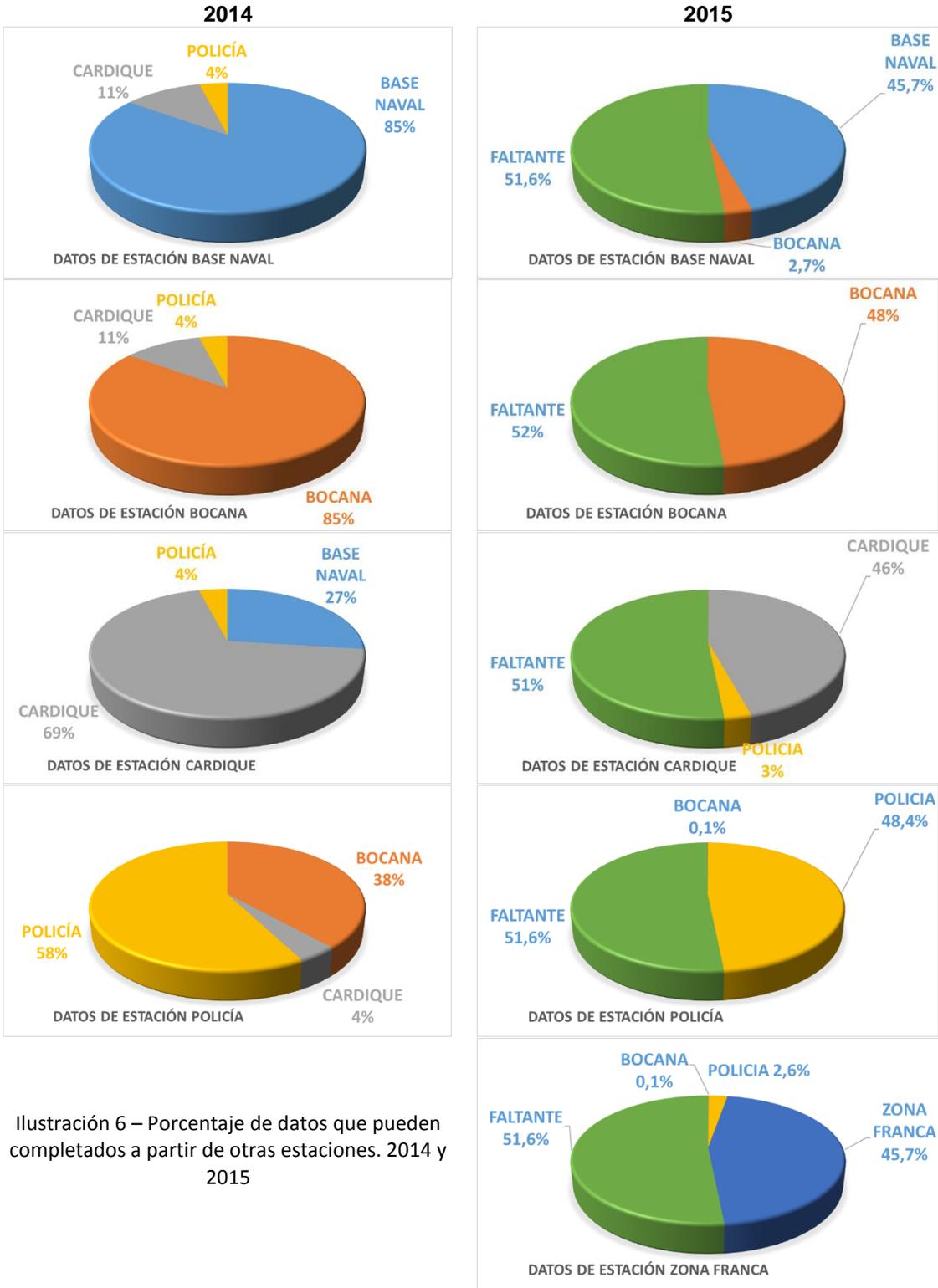


Ilustración 6 – Porcentaje de datos que pueden completados a partir de otras estaciones. 2014 y 2015

La disponibilidad porcentual de datos por cada estación y el porcentaje de datos que pueden ser completados de otras estaciones es presentada en la Ilustración 6.

El resumen de las estaciones cercanas en caso de completar información se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6 – Estaciones cercanas

Estaciones Cercanas	
Bocana	Policía, Olaya
Base Naval	Cardique
Cardique	Policía, Olaya
Zona Franca	Cardique

5.1.2 Datos procesados

Una vez procesados los datos en las hojas de cálculo y siguiendo la metodología explicada de depuración y revisión se presenta de tal manera que pueda ilustrar un panorama sobre la situación actual de la ciudad en su recurso aire teniendo en cuenta la disponibilidad de datos del SVCA.

A continuación se presentan los resultados del procesamiento de los datos meteorológicos para el año 2014. Este incluye velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, temperatura y radiación solar.

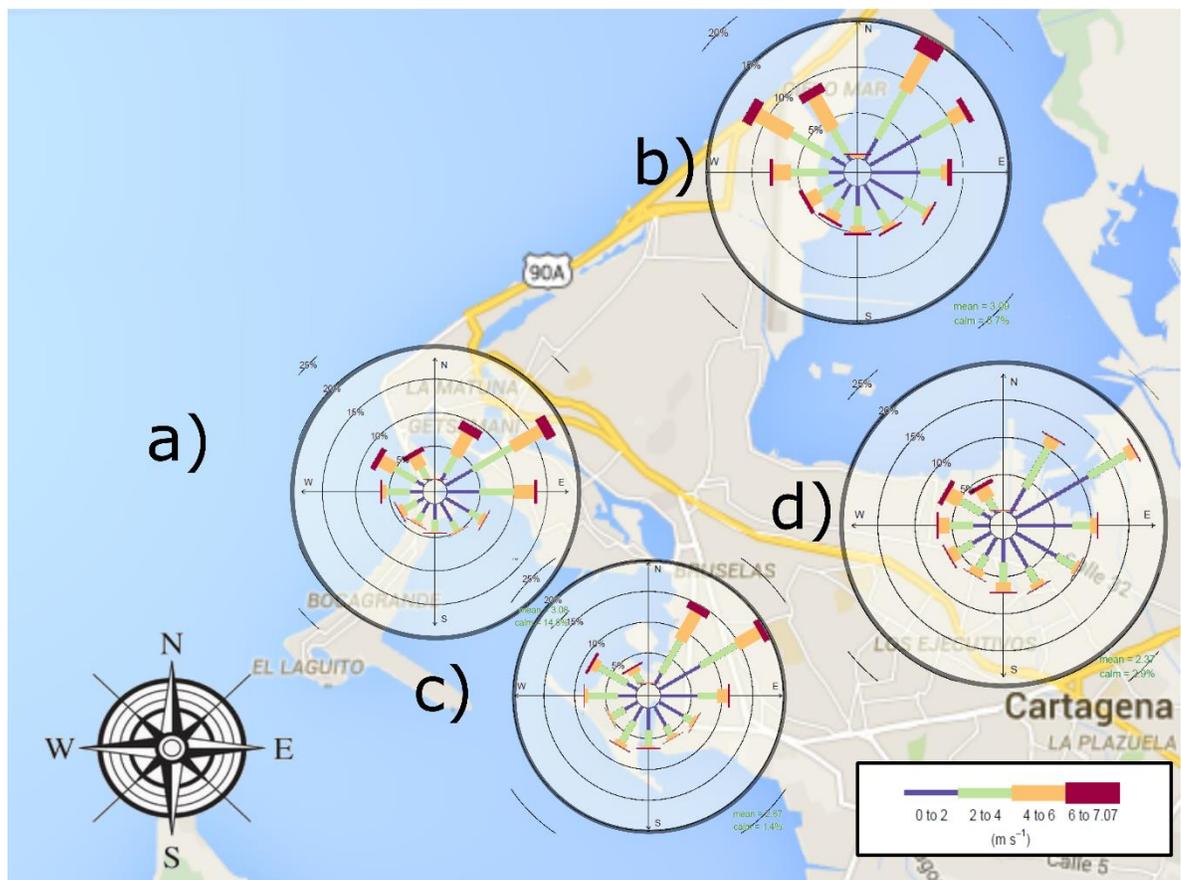


Ilustración 7 – Rosas de vientos en las estaciones de monitoreo de Cartagena de Indias, 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Policía – Olaya.

Como puede apreciarse en la Ilustración 7, los vientos predominantes en la ciudad provienen del noreste y la velocidad del viento mayormente oscila entre 2 a 4 $\frac{m}{s}$. En la escala Beaufort (IDEAM, 2016), este rango de velocidades se clasifica como una brisa muy débil a una brisa débil. Cuyas características visibles pueden ser hojas que se agitan y ramitas agitadas constantemente. También el despliegue de banderolas.

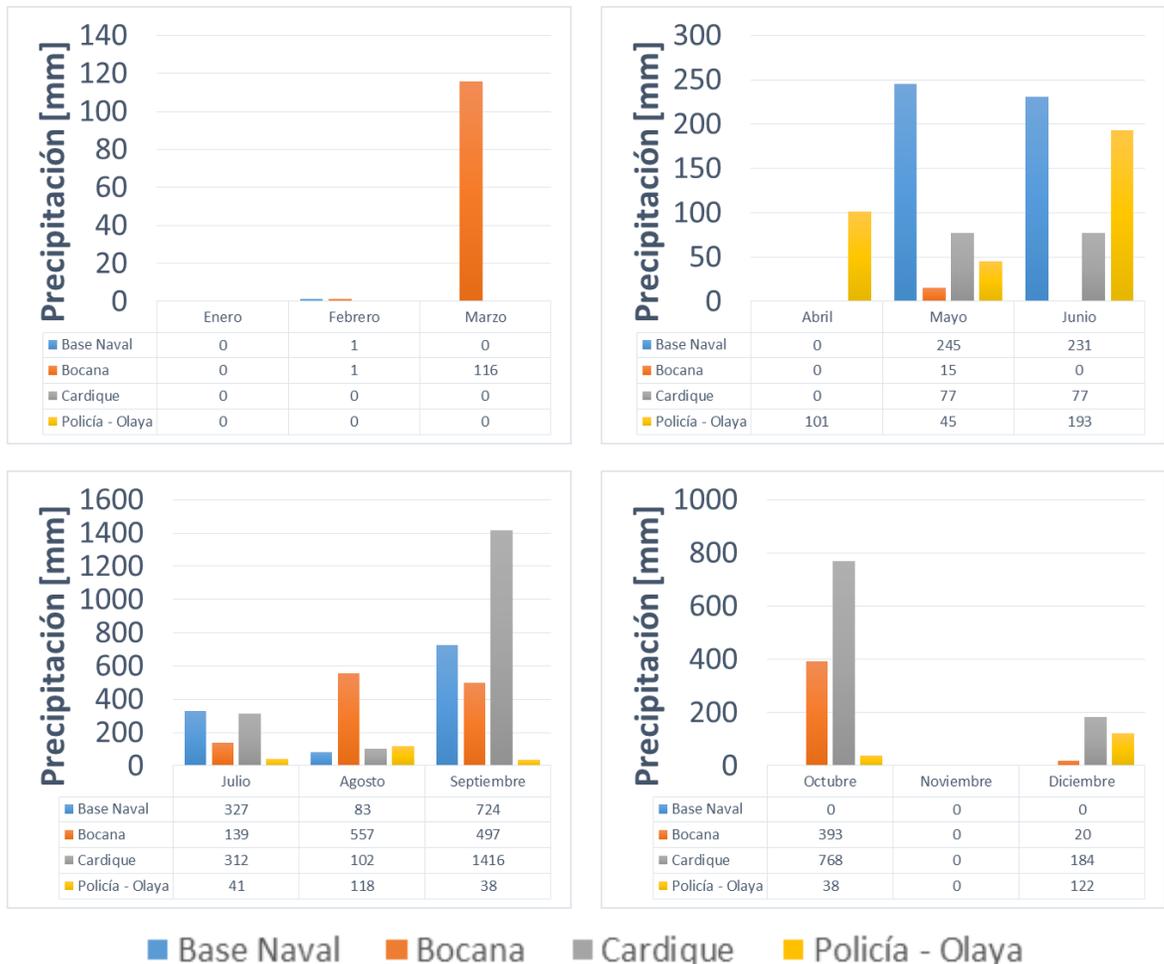


Ilustración 8 – Precipitación mensual 2014

Se puede apreciar en la Ilustración 8, que los periodos de precipitación máximos se dan en el tercer y cuarto trimestre del año con presencia de algunas lluvias aisladas en el segundo trimestre. No se cuenta con información sobre las precipitaciones de noviembre. Los meses con mayores precipitaciones fueron septiembre, octubre y noviembre. Mientras que la precipitación anual por estación fue: Base Naval

(1611,44 ± 140,10 mm), Bocana (1737,85 ± 134,55 mm), Cardique (2935,71 ± 272,99 mm) y Policía-Olaya (696,77 ± 39,51 mm).

La máxima precipitación mensual fue registrada en la estación ubicada en Cardique (1436,5 mm), seguido de octubre (902.92 mm) y noviembre (772.02 mm). Esta tendencia en los meses de lluvia se mantiene en las demás de estaciones.

A continuación se presentan gráficos de caja para presentar todas las variables meteorológicas. Estos representan en los extremos los datos máximos y mínimos reportados por las estaciones en los meses correspondientes, el centro de la caja representa la media de la variable meteorológica evaluada y los bordes de la caja corresponden al límite superior e inferior calculado con un intervalo de confianza del 95%. Entre mayor sea el grosor de la caja indica una mayor variabilidad de los datos.

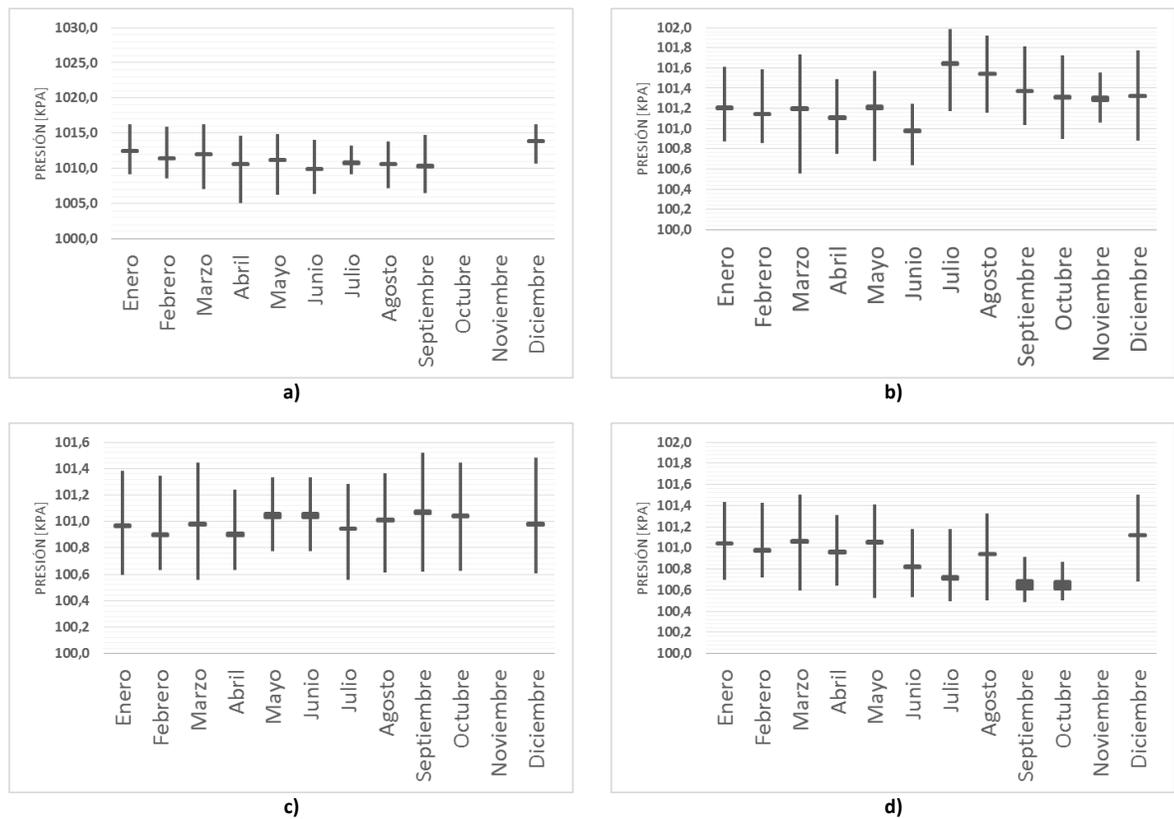


Ilustración 9 – Presión atmosférica 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

La presión atmosférica (Ilustración 9) no presentó variaciones significativas entre los valores registrados en cada una de las estaciones, para la estación ubicada en la Base Naval la media anual fue de 101,1 ± 0,76 kPa. Mientras que en la ubicada en la Bocana fue de 101,28 ± 0,11 kPa. La media anual en Cardique fue de 100,99 ± 0,04 kPa. Y en la estación ubicada en Olaya, el Media fue de 100,91 ± 0,11 kPa.

La presión atmosférica media en todas las estaciones fue de $101,06 \pm 0,21$ kPa.

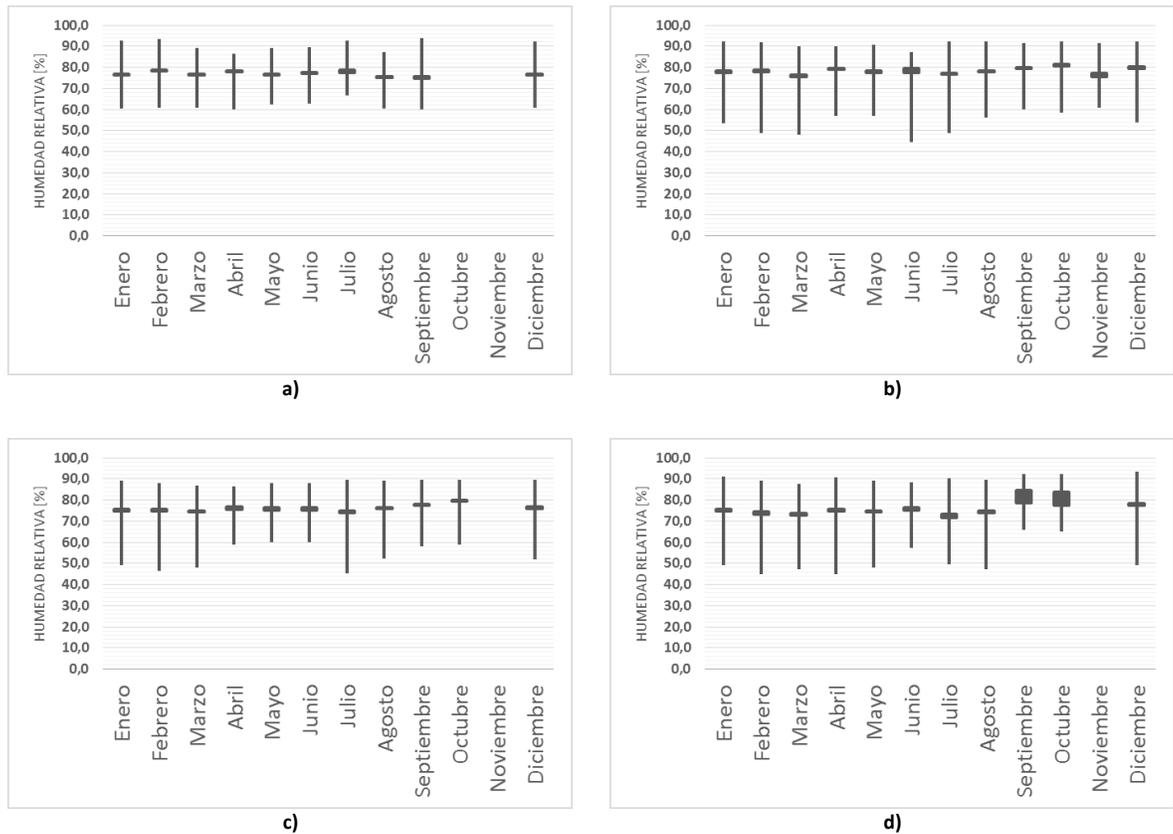
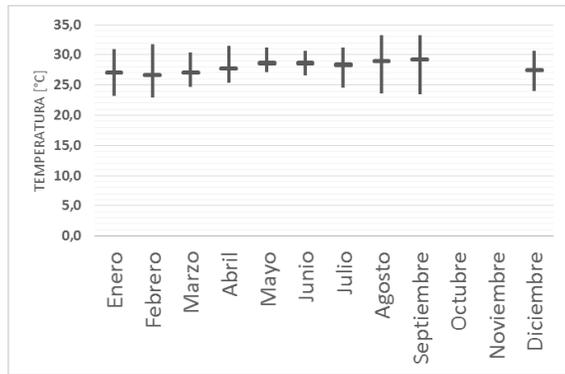


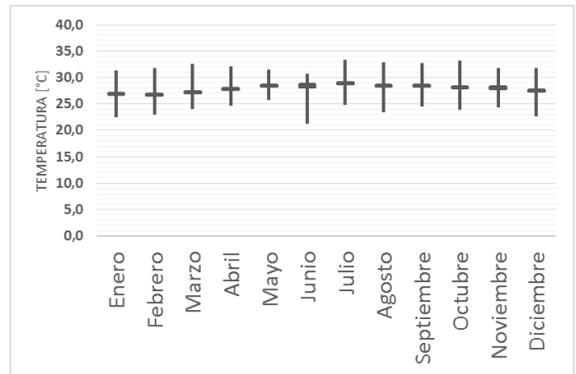
Ilustración 10 – Humedad relativa 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

La humedad relativa (Ilustración 10) media anual durante el 2014 fue de $76,78 \pm 1,73$ %. De manera general, la humedad no es menor al 40%.

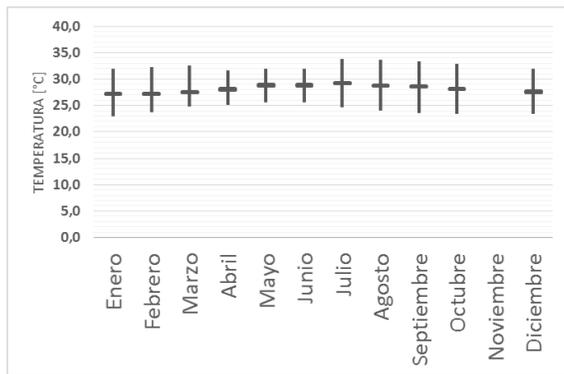
El máximo valor de humedad relativa se registró en la estación ubicada en la Base Naval (93,7%).



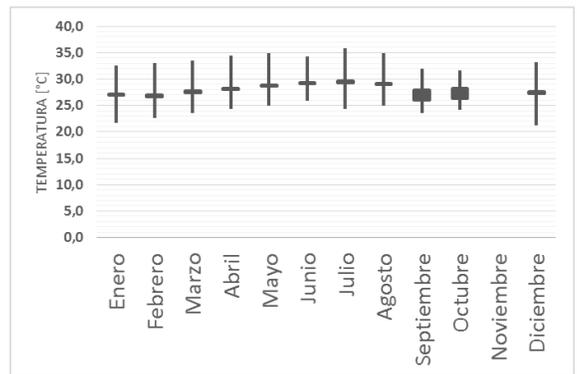
a)



b)



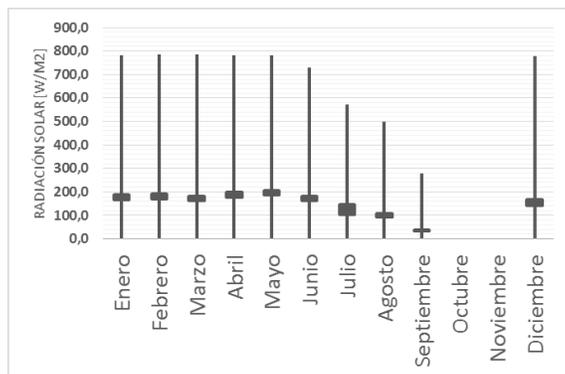
c)



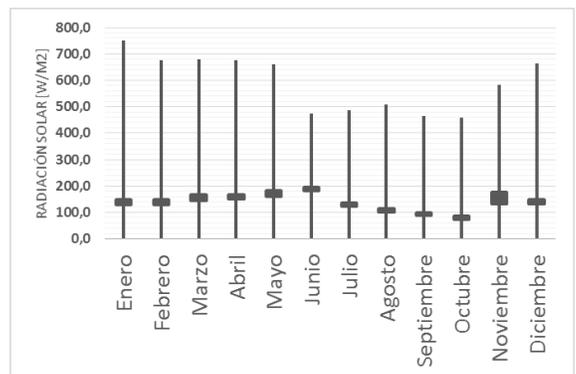
d)

Ilustración 11 – Temperatura 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

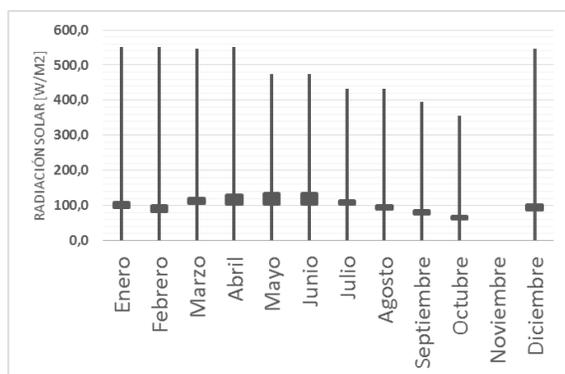
La temperatura (Ilustración 11) media anual fue $28,02 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. La temperatura máxima fue de $35,8^{\circ}\text{C}$ y la mínima de $26,8^{\circ}\text{C}$.



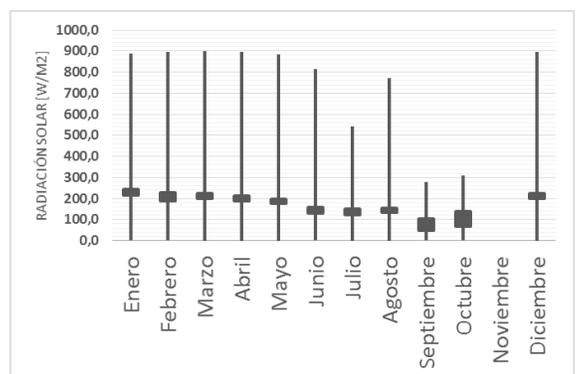
a)



b)



c)



d)

Ilustración 12 – Radiación solar 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

La radiación solar (Ilustración 12) media anual fue de $139,86 \pm 43,75 \frac{W}{m^2}$, con su valor máximo anual de $898,0 \frac{W}{m^2}$ para todas las estaciones meteorológicas. Además, presenta una tendencia a disminuir en los meses de agosto, septiembre y octubre.

La más alta radiación solar en Cartagena se presenta en el primer semestre del año y coincide que los meses de mayor precipitación son aquellos en los cuales la radiación solar es menor, fenómeno esperado dada la presencia de nubosidad.

5.1.3.1 Datos validados, 2014

A continuación se presentan los resultados del procesamiento de los datos meteorológicos validados por el SVCA para el año 2014. Este incluye velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, temperatura y radiación solar.

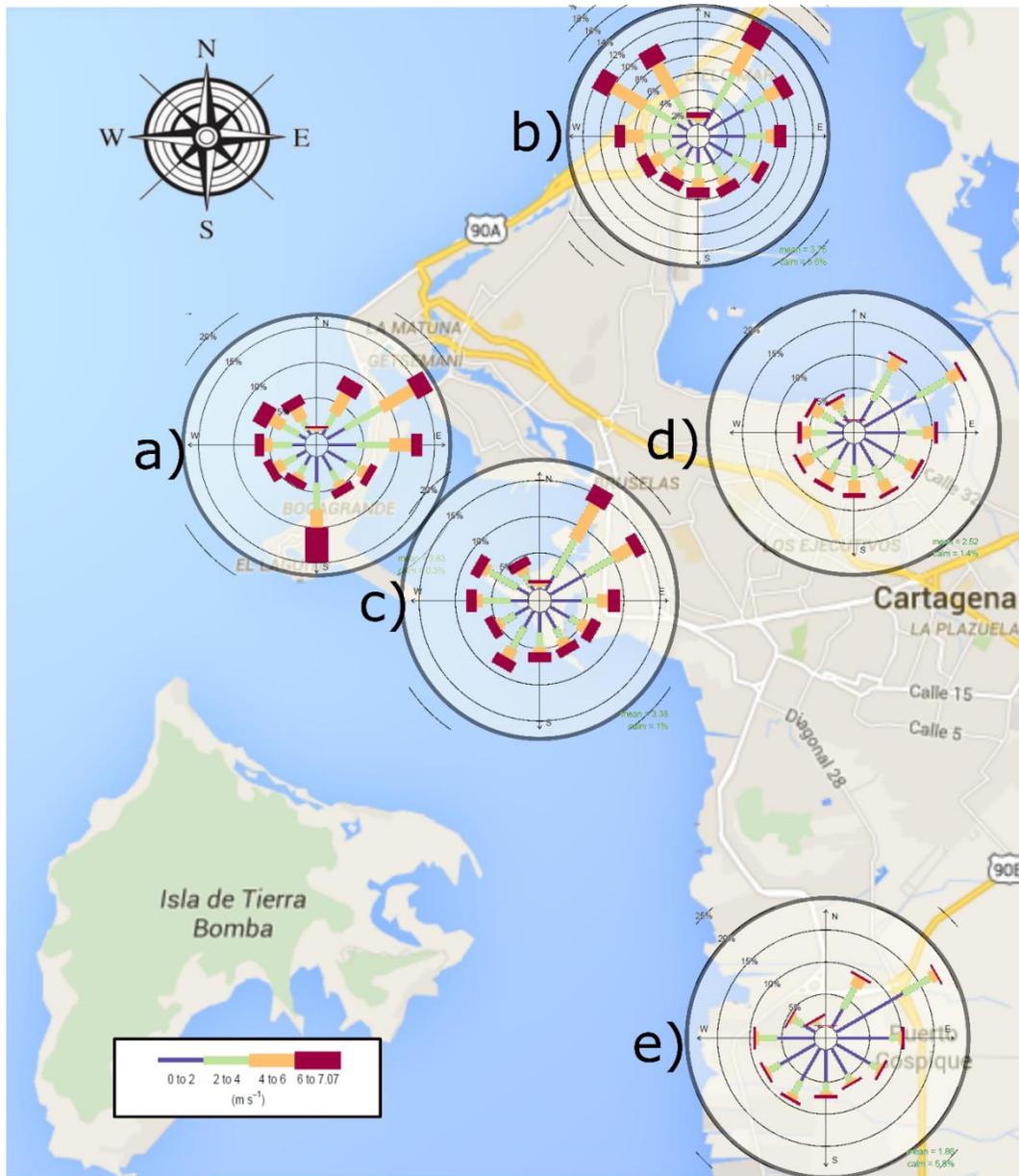


Ilustración 13 - Rosas de vientos en las estaciones de monitoreo de Cartagena de Indias, 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Policia – Olaya, e) Zona Franca.

La Ilustración 13 presenta las rosas de vientos de los datos validados, estos en su mayoría representan a los vientos predominantes provenientes del noreste, sin embargo a diferencia de los resultados de las rosas de vientos de datos procesados directamente, también muestran vientos provenientes de otras direcciones, y en el caso de la estación ubicada en la Base Naval, hay también participación de vientos provenientes del sur. La velocidad del viento mayormente oscila entre 2 a 4 $\frac{m}{s}$ y las velocidades de viento más bajas se registraron en la estación ubicada en la Zona Franca.

En la escala Beaufort, está clasificada entre brisa muy débil a una brisa débil. Cuyas características visibles pueden ser hojas que se agitan y ramitas agitadas constantemente. También el despliegue de banderolas.



Ilustración 14 – Precipitación mensual 2014, validados SVCA

Se puede apreciar en la Ilustración 14, que los periodos de precipitación máximos se dan en el tercer y cuarto trimestre del año con presencia de algunas lluvias aisladas en el segundo trimestre con excepción de los datos entregados de la estación de la Zona Franca, que presenta precipitaciones importantes en abril. Los meses con mayores precipitaciones fueron septiembre, octubre y noviembre. Mientras que la precipitación anual por estación fue: Base Naval (1620,65 ± 140,92 mm), Bocana (1757,97 ± 135,23 mm), Cardique (2884,58 ± 278,55 mm), Policía-Olaya (656,92 ± 40,24 mm) y Zona Franca (4517,24 ± 774,19 mm)

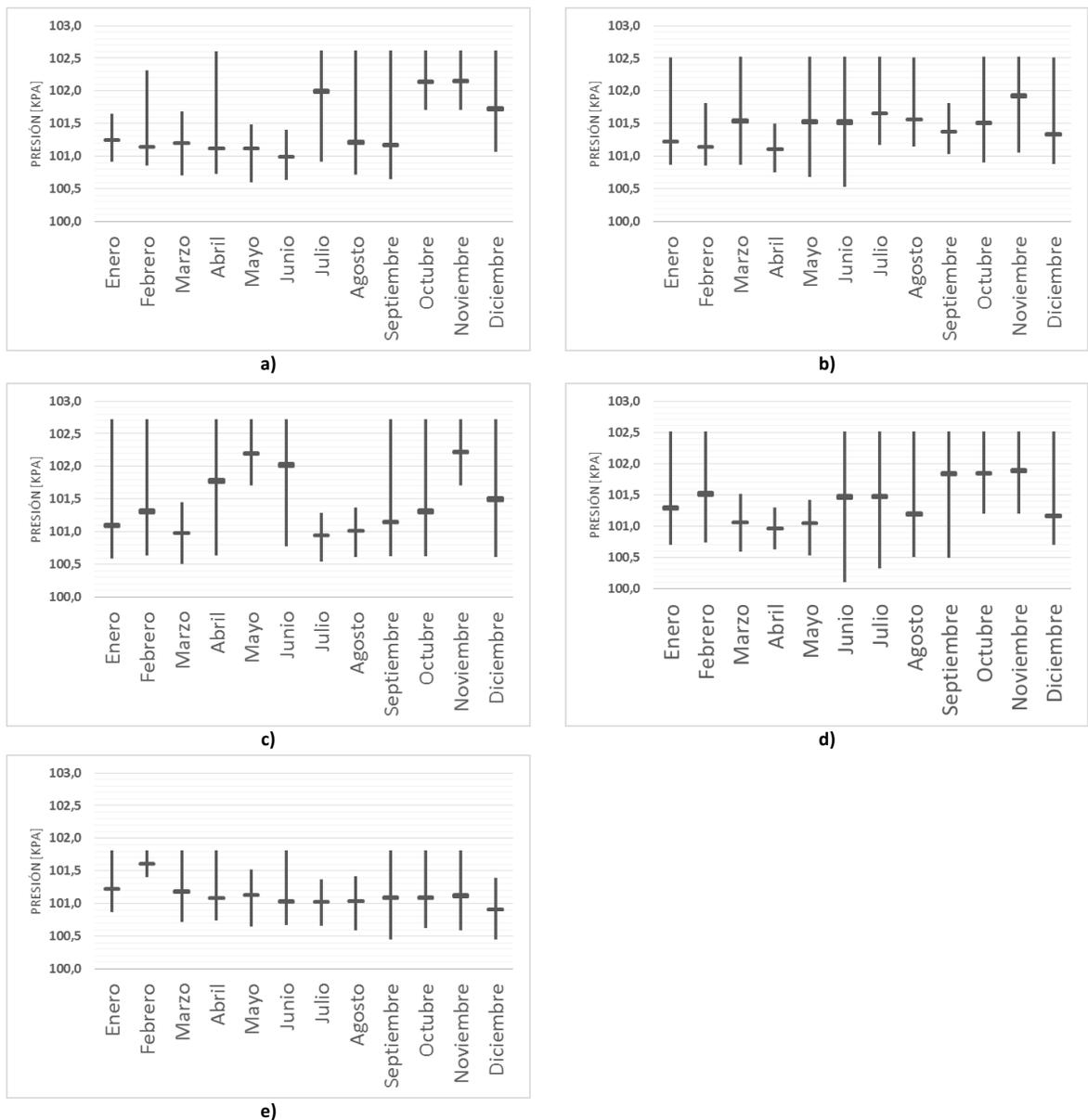


Ilustración 15 – Presión atmosférica 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

La presión atmosférica (Ilustración 15) presento variaciones pequeñas entre los valores registrados en cada una de las estaciones y mensualmente. En la estación ubicada en la Base Naval la media anual fue de $101,43 \pm 0,28$ kPa. Mientras que en la ubicada en la Bocana fue $101,45 \pm 0,15$ kPa. La media anual en Cardique fue $100,45 \pm 0,30$ kPa. En la estación ubicada en Olaya la media fue $101,40 \pm 0,21$ kPa. Y en la estación ubicada en la Zona Franca, el promedio fue $101,10 \pm 0,11$ kPa. El promedio de la presión atmosférica en todas las estaciones fue $101,17 \pm 0,53$ kPa.

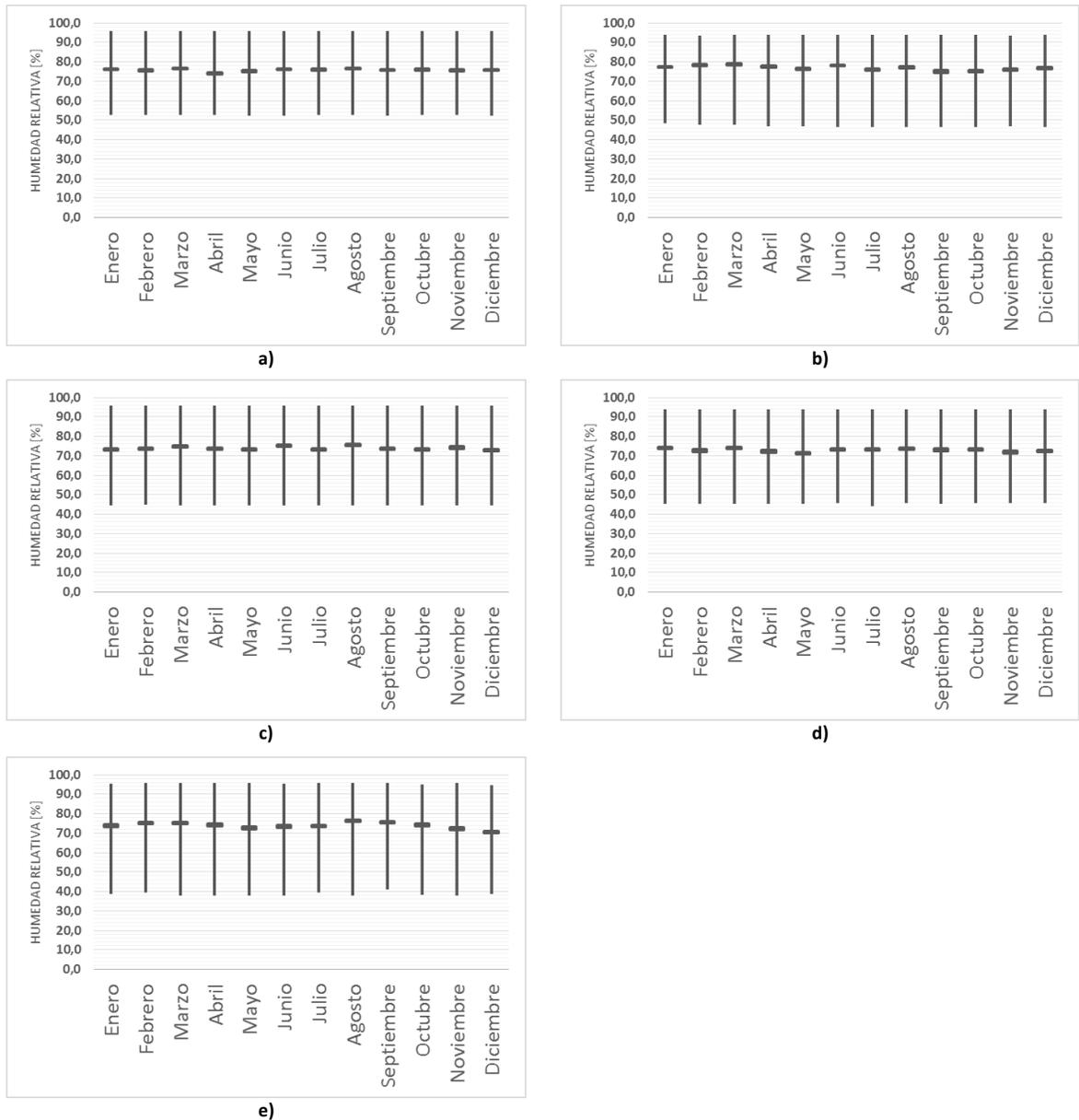


Ilustración 16 – Humedad relativa 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

La humedad relativa (Ilustración 16) media anual durante el 2014 fue $74,66 \pm 1,98$ %. De manera general, la humedad no es menor al 40%, salvo en la estación ubicada en la Zona Franca en la que los valores mínimos se acercan a 37% excluyendo los datos atípicos. El máximo valor de humedad relativa se registró en la estación ubicada en la Base Naval (96,0%).

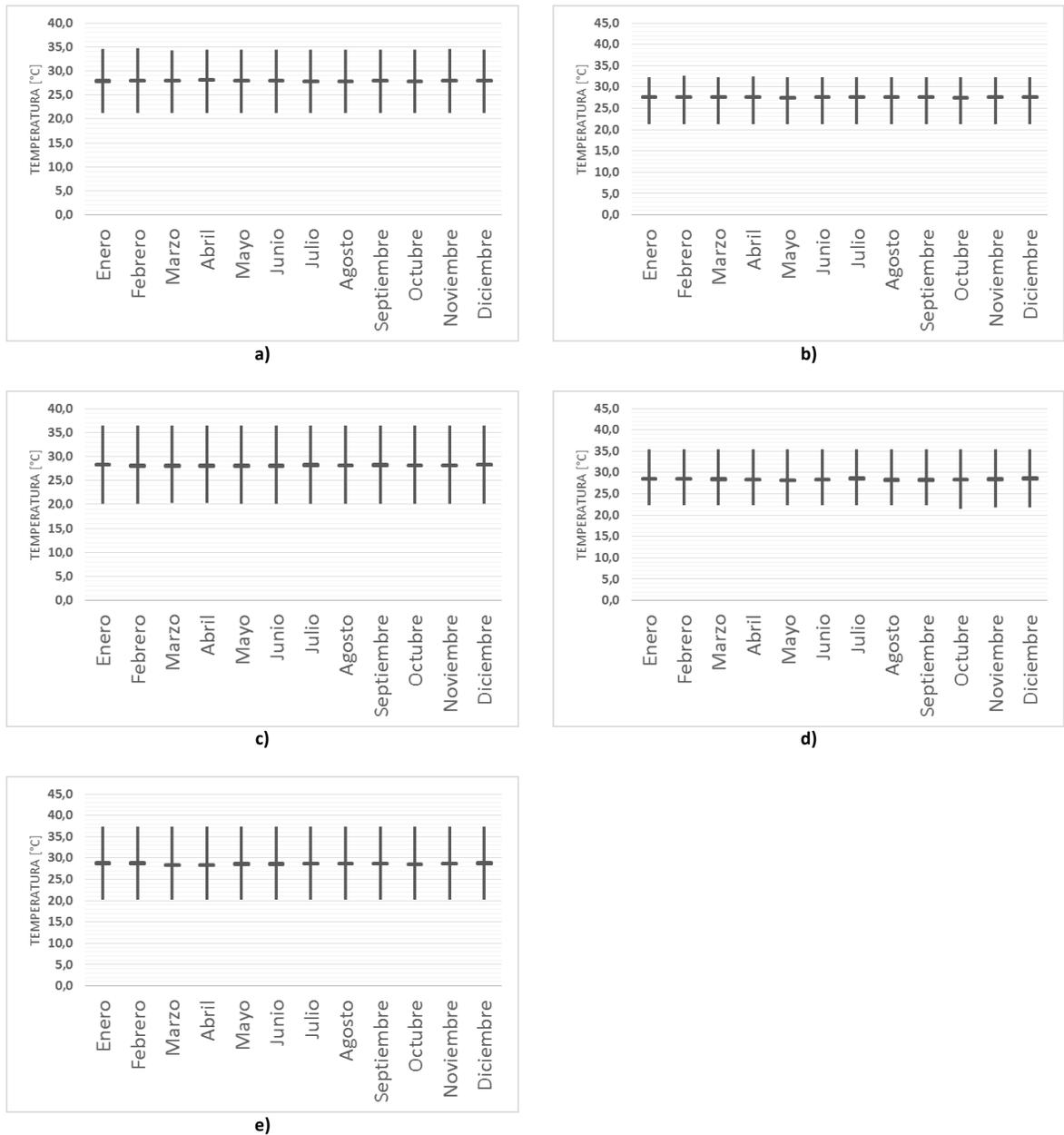


Ilustración 17 – Temperatura 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

La temperatura (Ilustración 17) media anual fue $28,13 \pm 0,49$ °C para todas las estaciones meteorológicas. La temperatura máxima fue 37,4 °C y mínima de 20,2 °C.

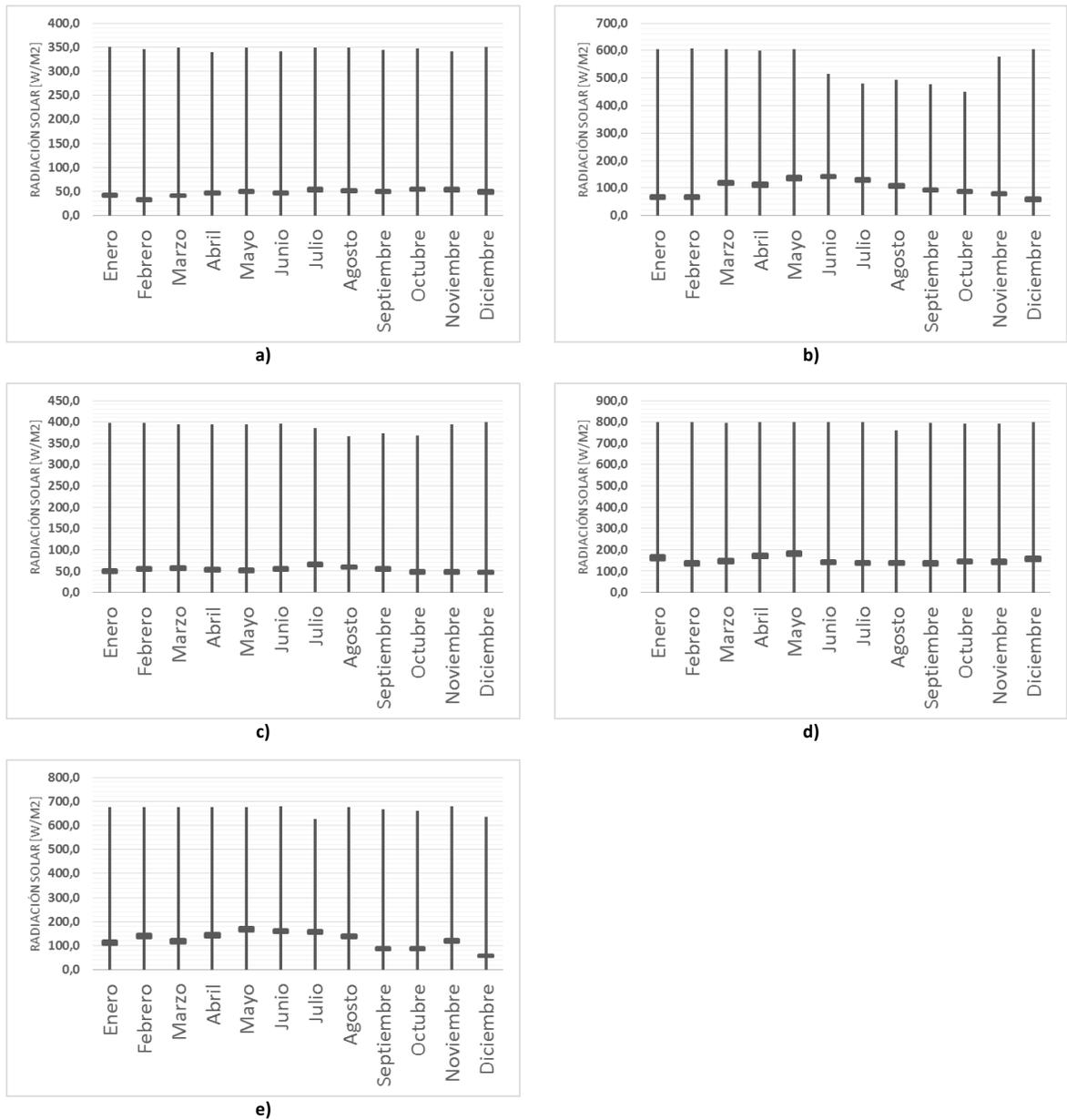


Ilustración 18 – Radiación solar 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

La radiación solar (Ilustración 18) media anual fue $94,94 \pm 54,92 \frac{W}{m^2}$, con su valor máximo anual de $800,5 \frac{W}{m^2}$ para todas las estaciones meteorológicas (valor que es un resultado de imprecisiones en el monitoreo). Además, presenta una tendencia a disminuir en los meses de agosto, septiembre y octubre. La más alta radiación solar en Cartagena se presenta en el primer trimestre del año. En los meses de mayor precipitación son aquellos en los cuales la radiación solar es menor.

5.1.3.2 Datos validados, 2015

Para este periodo la información validada cubre parte del año, no su totalidad. Esto se debe a que al inicio del desarrollo del presente trabajo el SVCA de la ciudad no contaba con el consolidado total de los datos, solamente hasta el mes de julio.

De igual manera se presentan los resultados del procesamiento de los datos meteorológicos validados por el SVCA para el año 2015. Este incluye presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, temperatura y radiación solar.

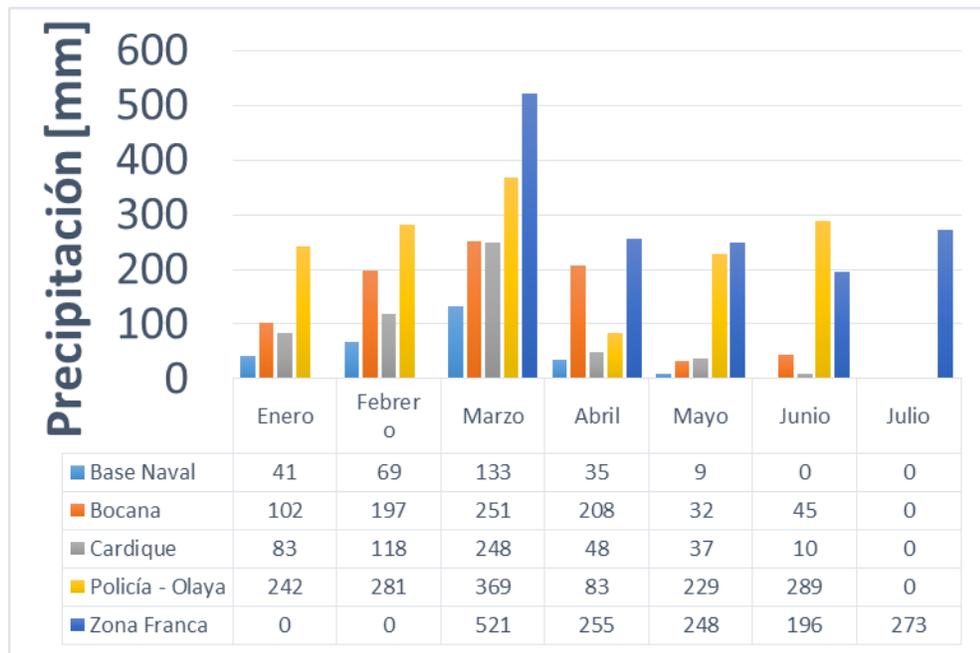
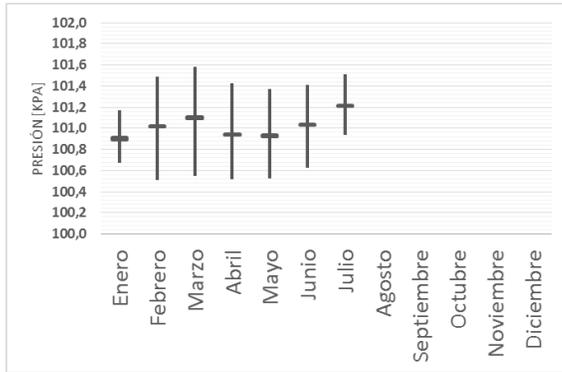
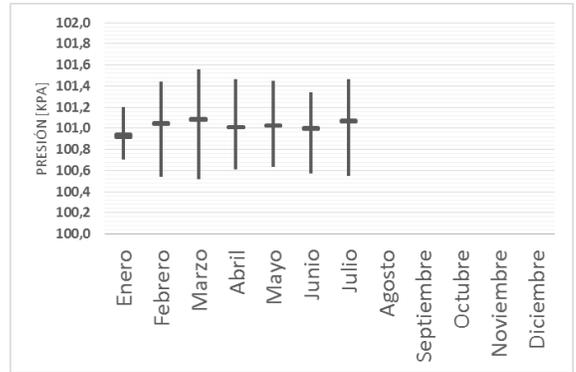


Ilustración 19 – Precipitación mensual 2015, validados SVCA

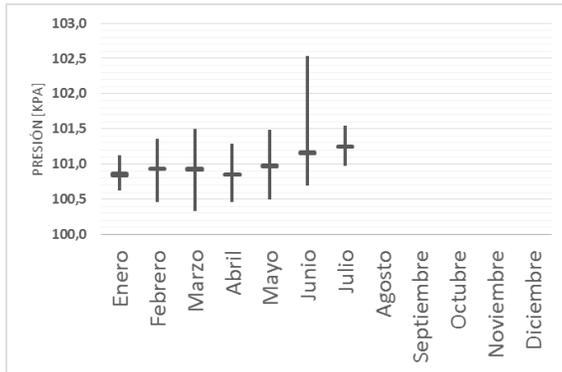
Se puede apreciar en la Ilustración 19 que los periodos de precipitación máximos se dan en marzo y en abril. No se cuenta con información sobre las precipitaciones en la mayoría de estaciones durante julio, ni en el resto del año en todas las estaciones. Las estaciones con mayor precipitación son: Policía-Olaya ($1492,00 \pm 91,99$ mm) y Zona Franca ($1492,00 \pm 262,70$ mm).



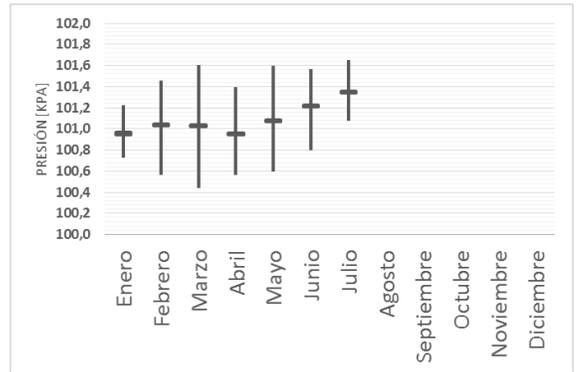
a)



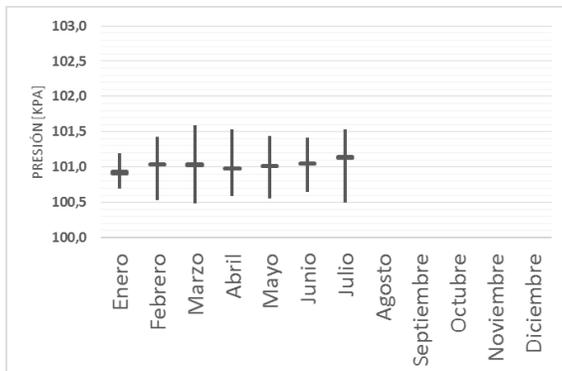
b)



c)



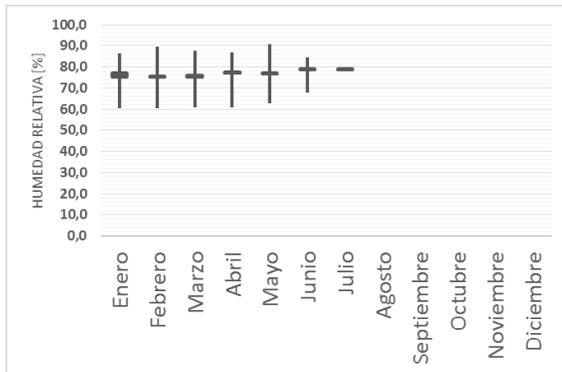
d)



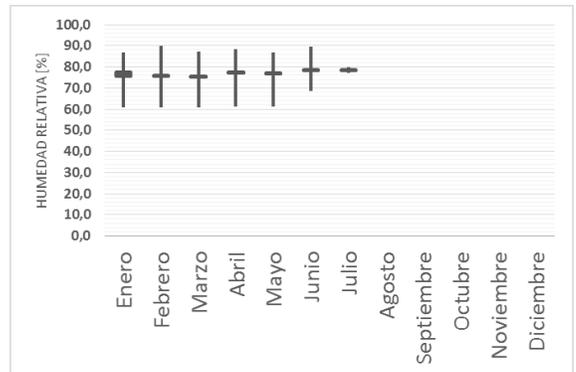
e)

Ilustración 20 – Presión atmosférica 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

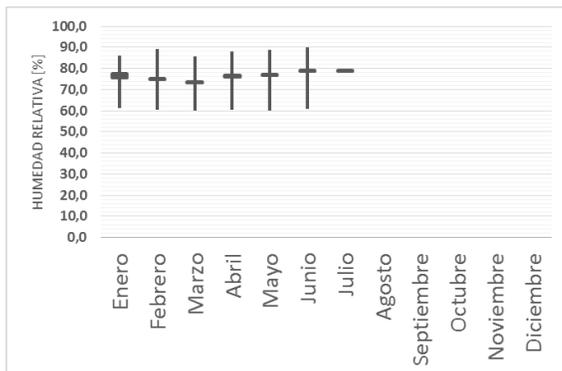
La presión atmosférica (Ilustración 20) no presenta variaciones significativas entre los valores registrados en cada una de las estaciones. La presión atmosférica media en todas las estaciones fue $101,03 \pm 0,04$ kPa.



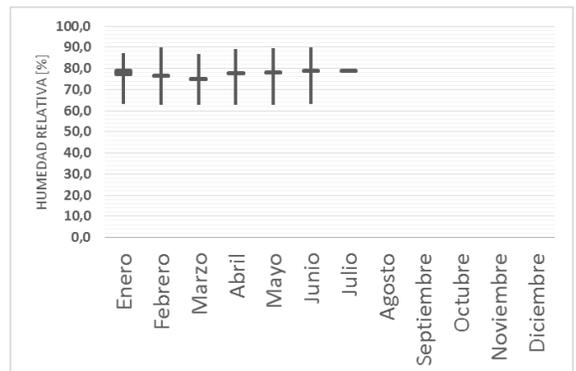
a)



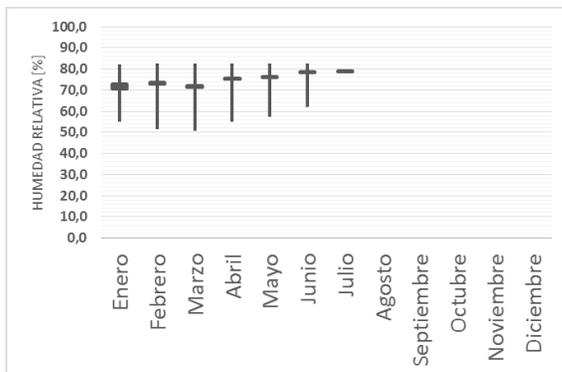
b)



c)



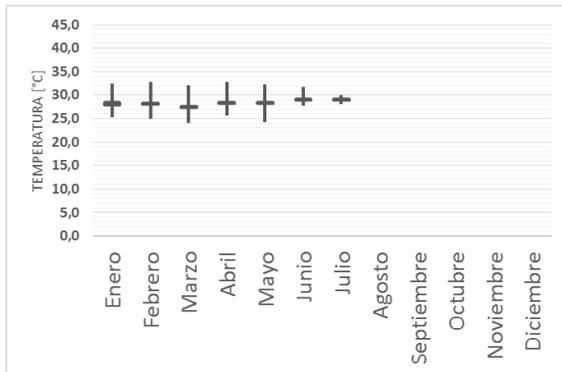
d)



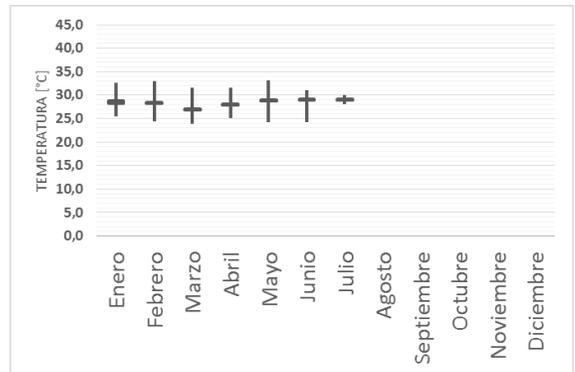
e)

Ilustración 21 – Humedad relativa 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

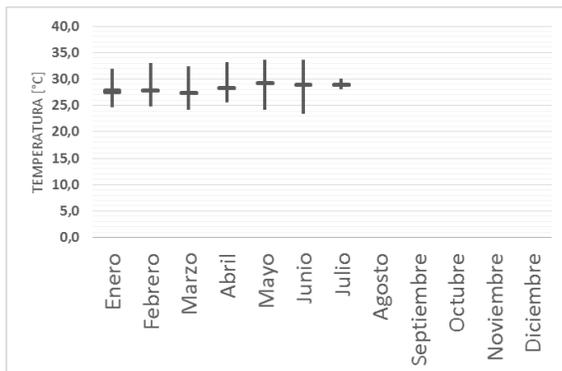
La humedad relativa (Ilustración 21) media durante el 2015 fue de $76,89 \pm 1,31$ %. De manera general, la humedad no es menor al 50%. El máximo valor de humedad relativa se registró en la estación ubicada en la Bocana (90,9%).



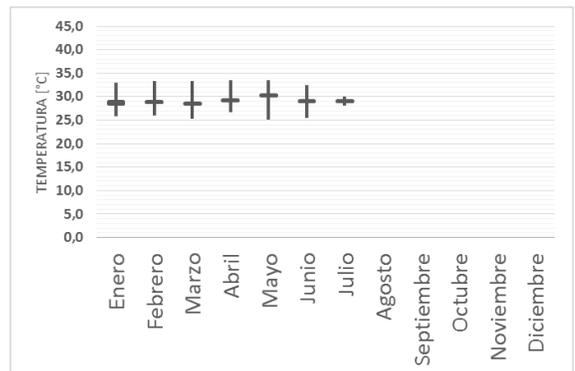
a)



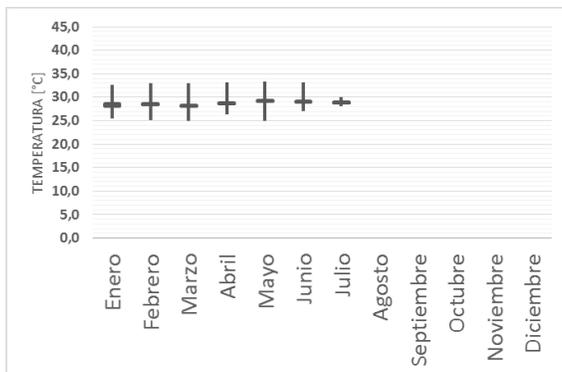
b)



c)



d)

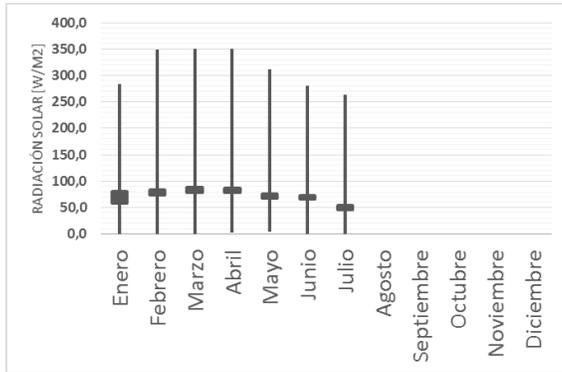


e)

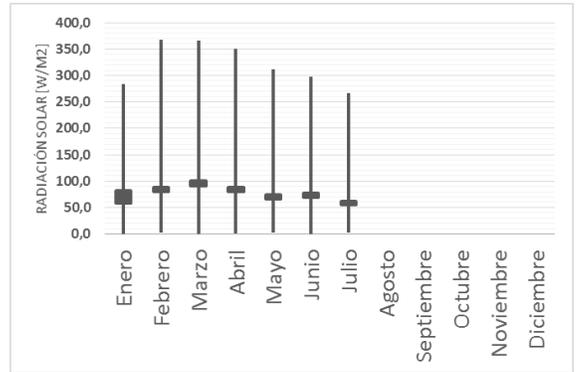
Ilustración 22 – Temperatura 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

La temperatura (Ilustración 22) media anual fue $28,55 \pm 0,45$ °C para todas las estaciones meteorológicas.

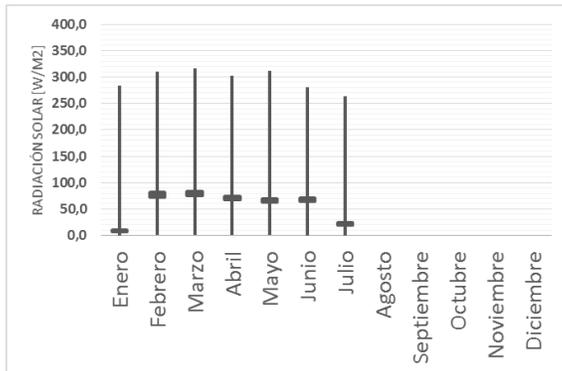
La temperatura máxima fue de 33,7 °C y la mínima de 23,4 °C.



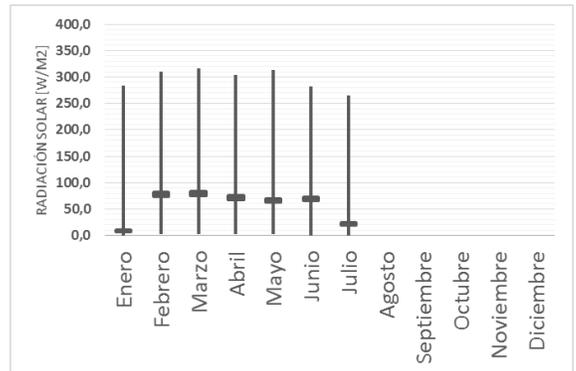
a)



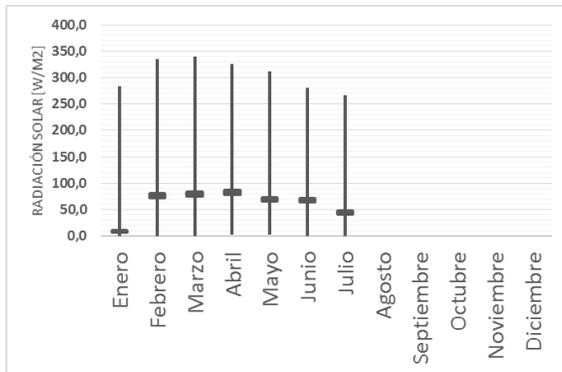
b)



c)



d)



e)

Ilustración 23 – Radiación solar 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

La radiación solar (Ilustración 23) media anual fue $65,13 \pm 13,21 \frac{W}{m^2}$, con su valor máximo anual de $367,4 \frac{W}{m^2}$ para todas las estaciones.

En la Ilustración 24 se presenta la media de las variables meteorológicas monitoreadas en la ciudad de Cartagena con un intervalo de confianza de 95%. Se aprecia que los datos validados por el SVCA comparados con los datos procesados, presentaron mayores variaciones en los intervalos, lo cual indica un mayor nivel de incertidumbre de los mismos, salvo la humedad relativa y la temperatura cuya información validada por el SVCA y la procesada fue similar para el 2014. Estadísticamente se puede apreciar que para todas las variables meteorológicas se puede inferir que la media es igual en el año 2014 y 2015 dado que los intervalos de confianza se traslapan.

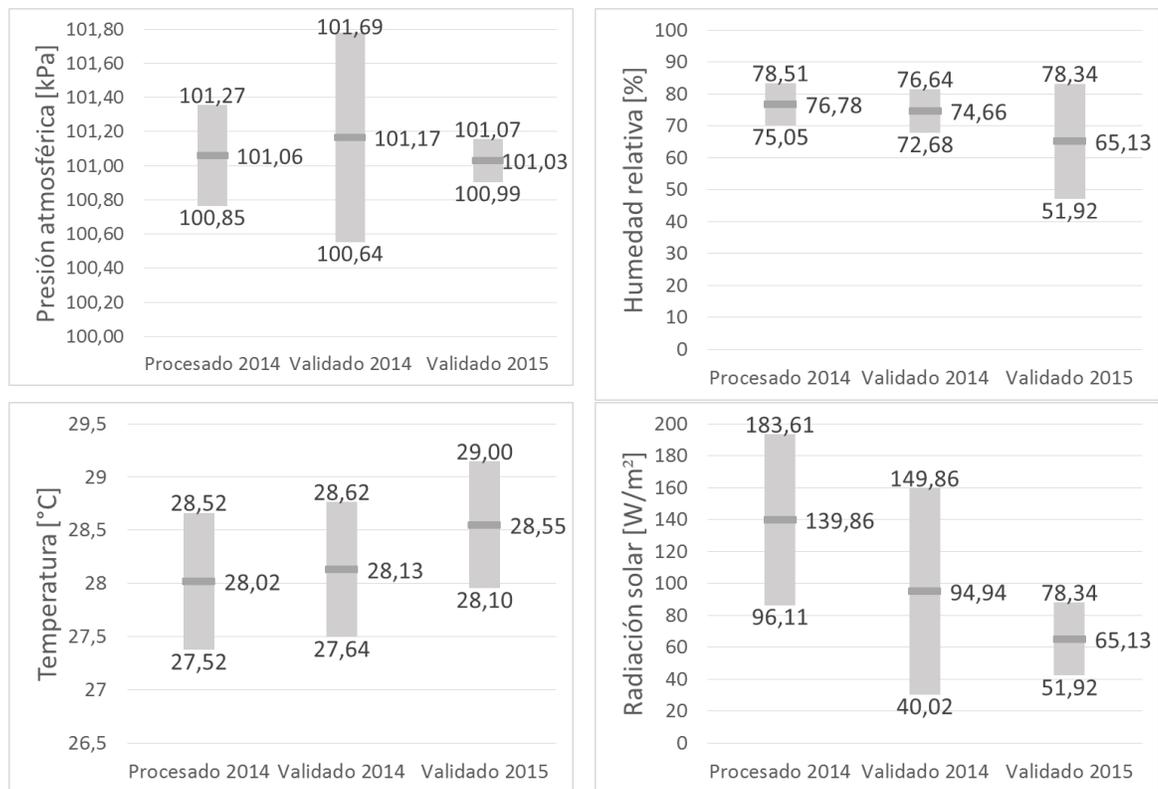


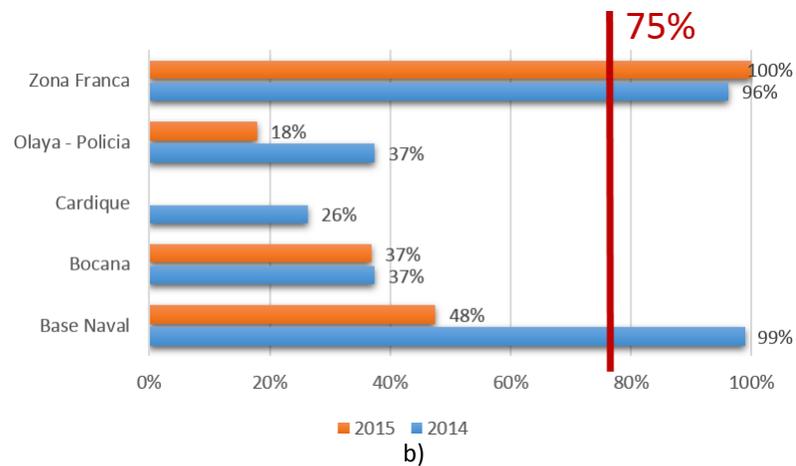
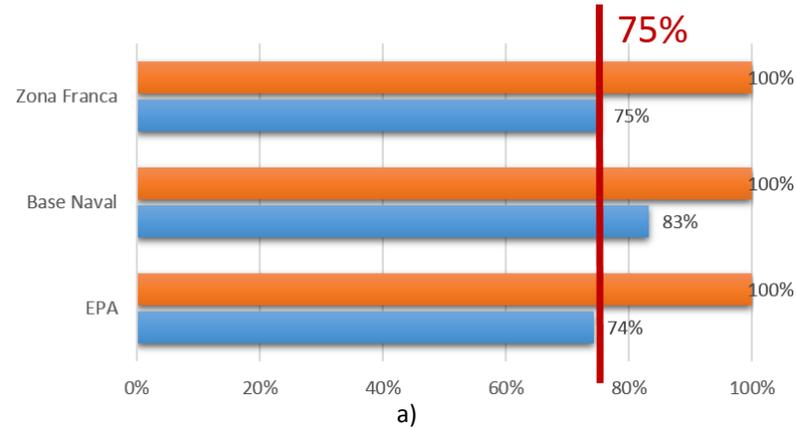
Ilustración 24 - Comparación de media mensual datos procesados y validados (SVCA) de variables meteorológicas.

5.2 Concentración de contaminantes criterio (PM₁₀, PM_{2.5} y O₃), 2014 y 2015

5.2.1 Disponibilidad de la información

A continuación se presenta la disponibilidad porcentual de datos por cada estación respecto a la concentración para el año 2014.

La disponibilidad de estos datos anuales puede apreciarse en Ilustración 25.



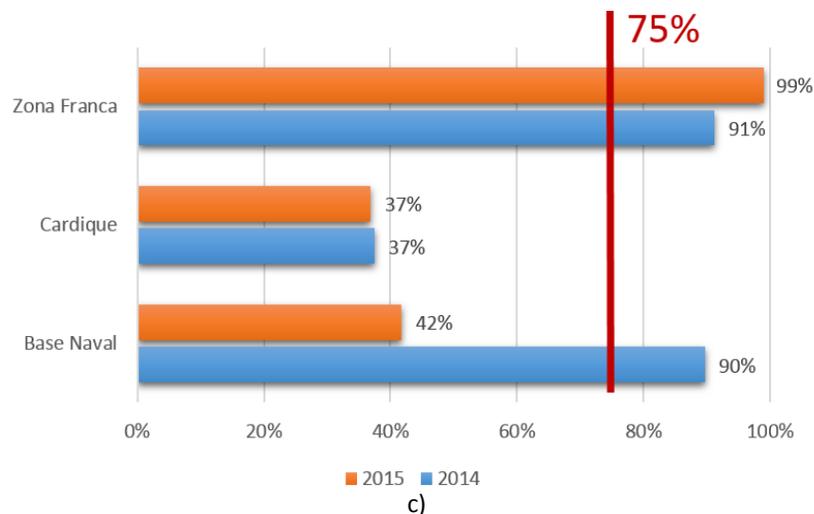


Ilustración 25 – Disponibilidad de los datos de concentración de los contaminantes durante el 2014 y 2015.
 a) O₃. b) PM₁₀ y c) PM_{2.5}

Para el O₃ todas las estaciones cumplen la integridad temporal de los datos durante el 2014 y solamente las estaciones ubicadas en la Zona Franca y Base Naval para el 2015.

Para PM₁₀ y PM_{2.5} solo cumple la integridad temporal de los datos la estación ubicada en la Zona Franca en ambos años y la ubicada en la Base Naval durante el 2014.

A continuación se presenta la disponibilidad mensual de los datos de concentración de los contaminantes monitoreados.

La Ilustración 26 presenta la disponibilidad de datos de concentración de PM_{2.5} y la línea horizontal roja representa el porcentaje de datos mínimos (75%) para cumplir con la integridad temporal requerida.

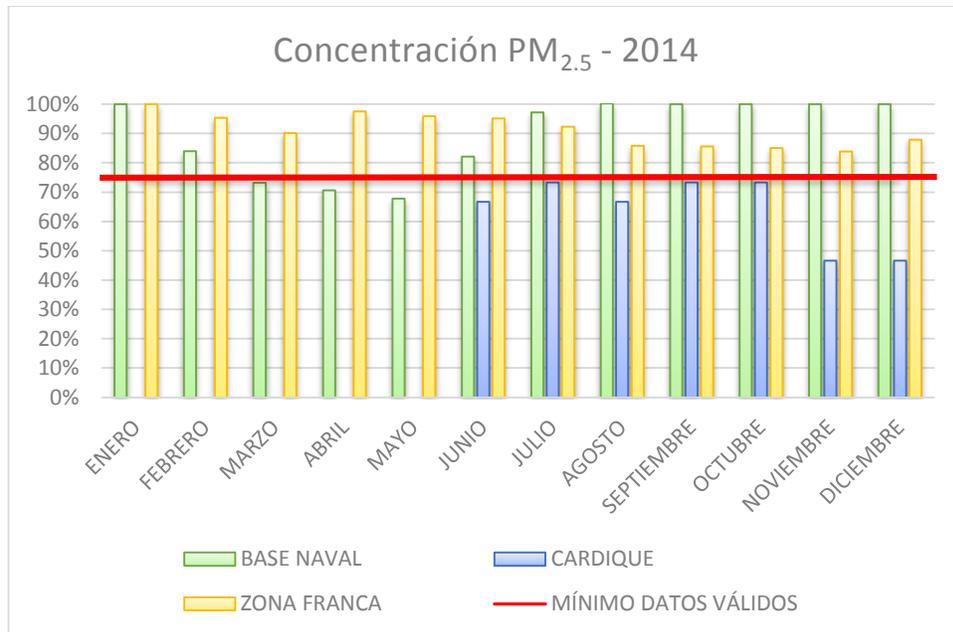


Ilustración 26 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM_{2.5}. 2014

De manera análoga se presenta en la Ilustración 27 y en la Ilustración 28 la disponibilidad de la información de concentración para PM₁₀ y O₃ durante el 2014 respectivamente.

En la estación ubicada en la Zona Franca se presentó un porcentaje total de 91% de los datos disponibles, el mes de menor disponibilidad de datos es el de noviembre con 84%. De la misma manera la estación ubicada en la Base Naval tiene una disponibilidad total de 90% sin embargo, en los meses de marzo, abril y mayo, presenta 73, 71 y 68% respectivamente. Mientras que el caso más crítico fue el de la estación ubicada en Cardique con un porcentaje de 37% de disponibilidad de datos anuales y durante los meses de enero a mayo con ningún dato reportado.

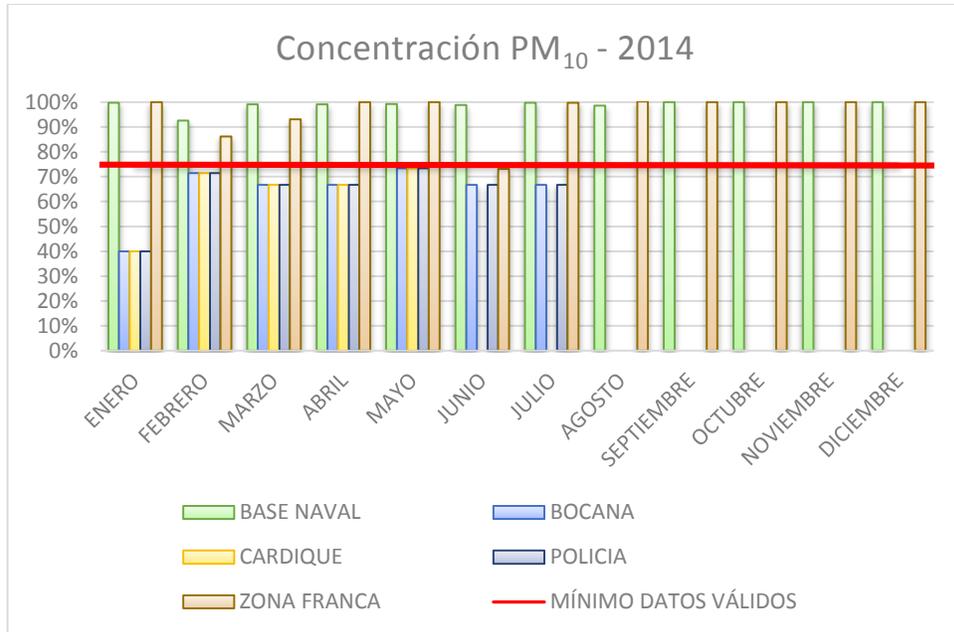


Ilustración 27 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM₁₀. 2014

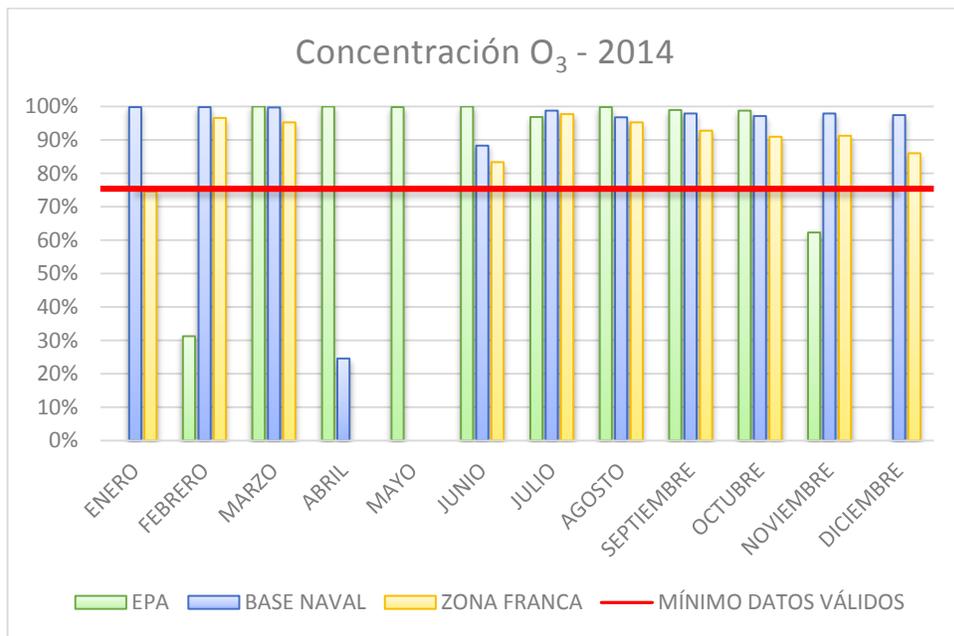


Ilustración 28 – Disponibilidad de datos de concentración por estación O₃. 2014

La disponibilidad de información respecto a la concentración de O₃ fue la siguiente: Base Naval (83%), Zona Franca (75%) y EPA (74%). Sin embargo, hay eventos irregulares que afectan la integridad de la disponibilidad de datos. La estación ubicada en el EPA no cuenta con información reportada en enero y diciembre,

mientras que la ubicada en la Base Naval no cuenta con información en mayo y la ubicada en la Zona Franca en abril y mayo.

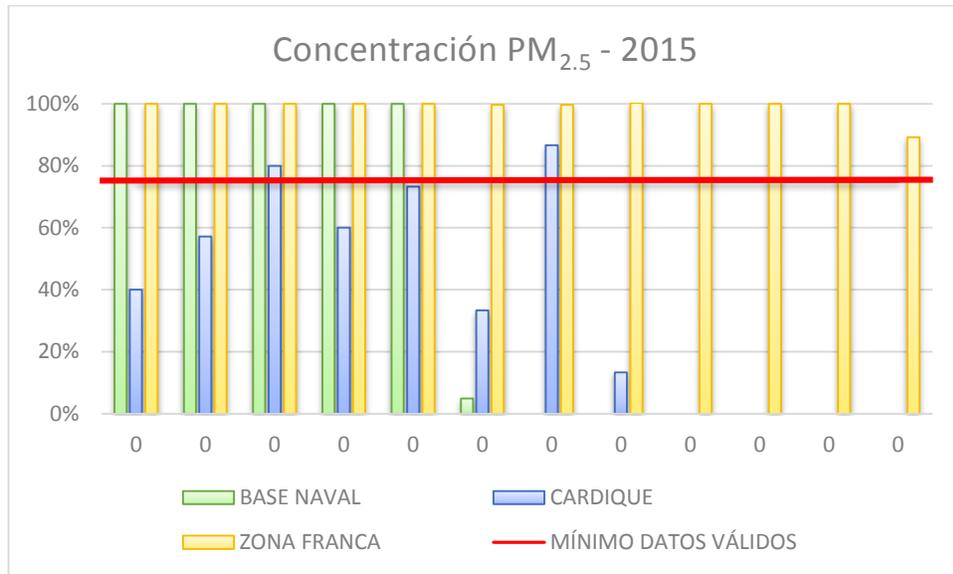


Ilustración 29 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM_{2.5}. 2015

Durante el 2015, la disponibilidad de los datos para PM_{2.5} (Ilustración 29) se ve reducida en las estaciones ubicadas en la Base Naval (42%) y Cardique (37%) mientras que la Zona Franca presenta casi la totalidad de los datos de concentración posibles (99%).

Además, de junio hasta diciembre se registró poca o ninguna información para ambas estaciones como se aprecia en la Ilustración 29.

En el 2015, hay una reducción de las estaciones que miden PM₁₀, que pasan de ser 5 a 4. Como se puede apreciar en la Ilustración 30, la estación de mayor disponibilidad de datos de concentración es la de la Zona Franca (100%), para las demás estaciones los porcentajes son menores a 75%, siendo Base Naval (48%), Bocana (37%) y Policía (18%).

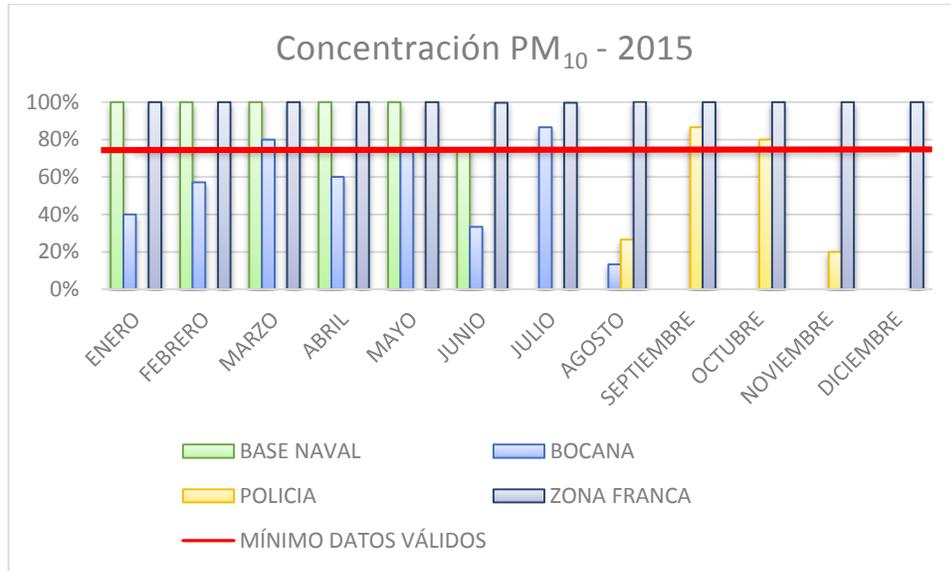


Ilustración 30 – Disponibilidad de datos de concentración por estación PM₁₀. 2014

La estación de la Base Naval no cuenta con datos de julio a diciembre mientras que la estación ubicada en la Policia de enero a julio, además de diciembre. En la Ilustración 31 se aprecia que las tres estaciones cuentan con una disponibilidad total (100%) de los datos de concentración de ozono durante el 2015.

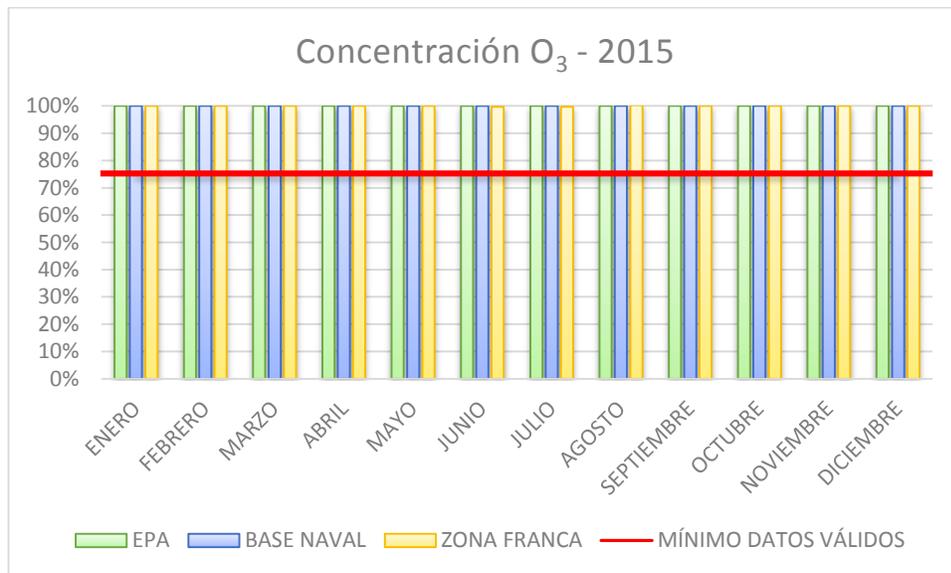


Ilustración 31 – Disponibilidad de datos de concentración por estación O₃. 2015

5.2.2 Datos validados de concentración de los contaminantes

En una estación automática, se debe registrar 8760 datos, que corresponden a un dato reportado cada hora durante todo un año. En la Ilustración 32 se presenta la concentración de O₃ durante el 2014 y 2015, comparación con la norma horaria de calidad del aire, Decreto 610 de 2010 (Ministerio de Ambiente V. y., 2010); y el porcentaje de datos que exceden dicha norma.

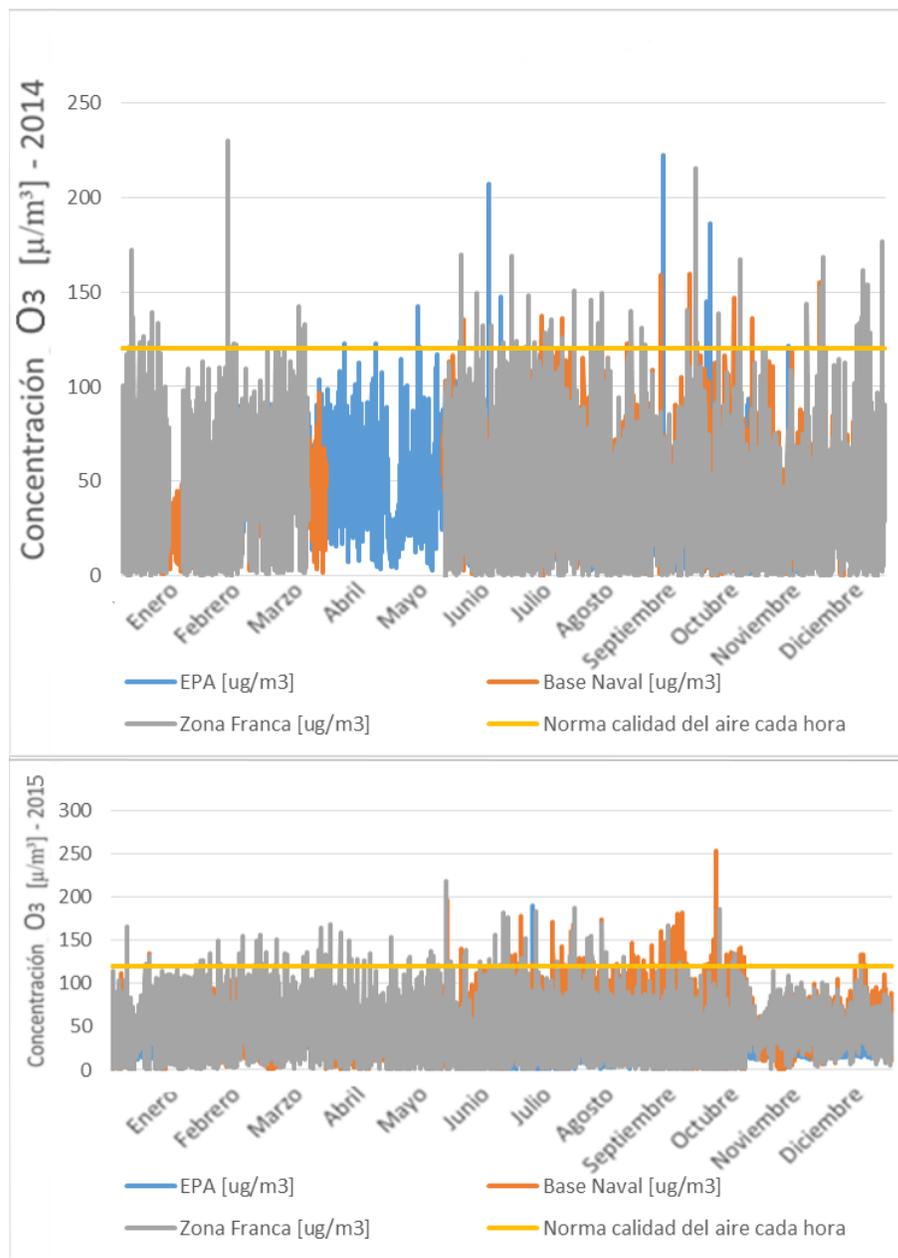


Ilustración 32 – Concentración horaria de O₃ versus norma de calidad de aire. 2014 y 2015

Teniendo en cuenta el porcentaje de disponibilidad para O₃ durante el 2014, el porcentaje de horas anuales que exceden la norma en el EPA, la Base Naval y en la Zona Franca es 0,3% (23 horas), 0,3% (22 horas) y 1,1% (95 horas) respectivamente. Mientras que para el año 2015, el porcentaje de horas anuales que exceden la norma en el EPA, la Base Naval y en la Zona Franca es 0,1% (8 horas), 1,3% (118 horas) y 1,3% (115 horas) respectivamente.

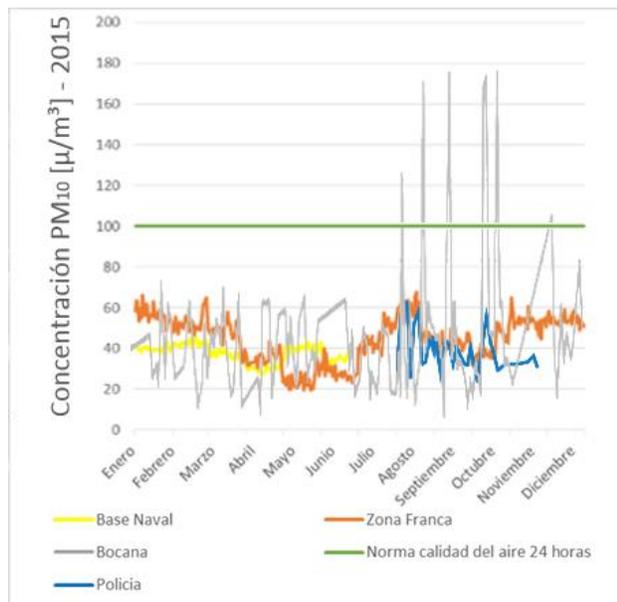
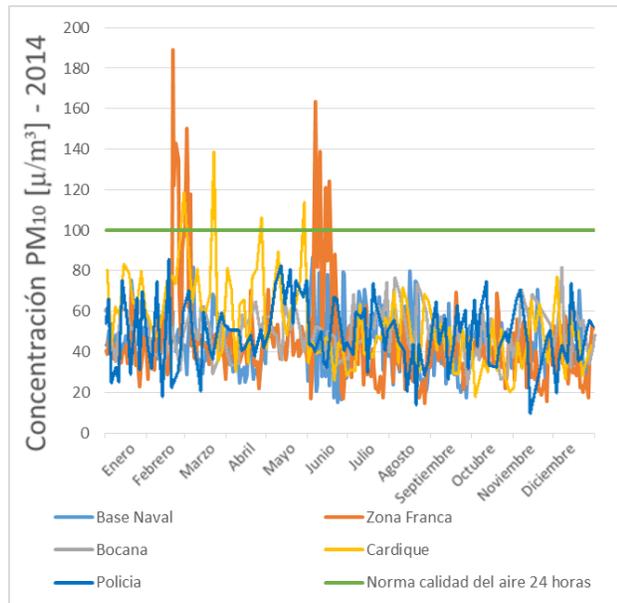


Ilustración 33 – Concentración PM₁₀ versus la norma calidad del aire 24 horas. 2014 y 2015

Dado el porcentaje de disponibilidad para PM_{10} (Ilustración 33) durante el 2014, el porcentaje de horas anuales que exceden la norma en la Base Naval y en la Bocana es 1,6% (118 horas) y 0,1% (8 horas) respectivamente.

Mientras que, durante el 2015, solo en la estación ubicada en la Bocana se excede la norma con un 7% de los datos.

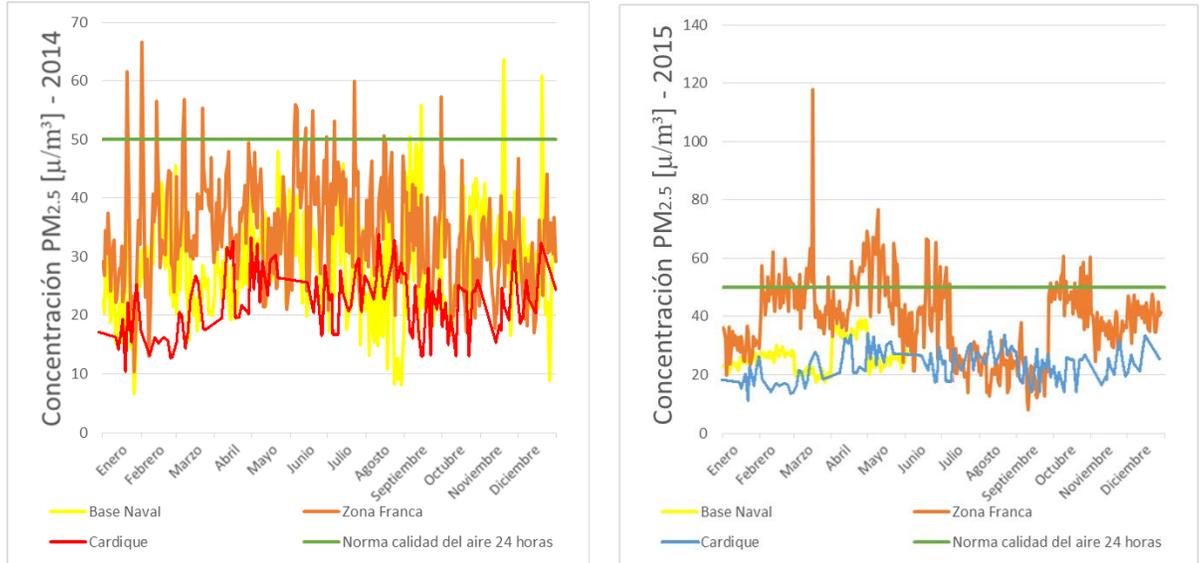


Ilustración 34 – Concentración diaria $PM_{2,5}$ versus la norma de calidad del aire. 2014 y 2015

Teniendo en cuenta el porcentaje de disponibilidad para $PM_{2,5}$ (Ilustración 34) durante el 2014, el porcentaje de horas anuales que exceden la norma en la Base Naval y en la Zona Franca es 1,6% (144 horas) y 4,4% (384 horas) respectivamente, en la estación ubicada en Cardique no se excede la norma.

Durante el 2015, el porcentaje de horas anuales que exceden la norma en la Zona Franca es 19% (1680 horas), en la estación ubicada en la Base Naval y Cardique no se excede la norma.

El contaminante criterio con mayor porcentaje de datos que exceden la norma es el $PM_{2,5}$, tal como podemos observar en la Ilustración 35. En la cual se permite apreciar que las estaciones ubicadas en la Zona Franca y en la Base Naval superan el nivel máximo permisible durante tiempo de exposición anual, y de manera cercana a la norma la concentración en la estación ubicada en Cardique.

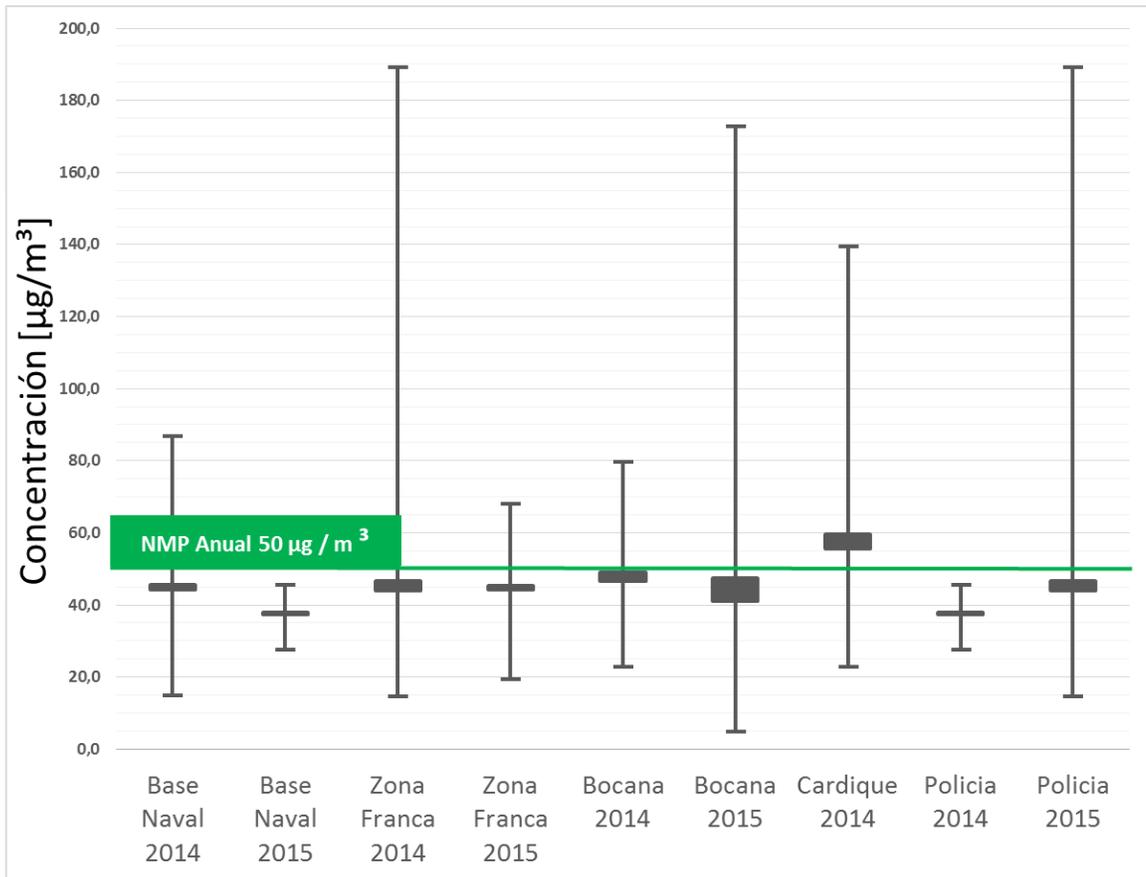
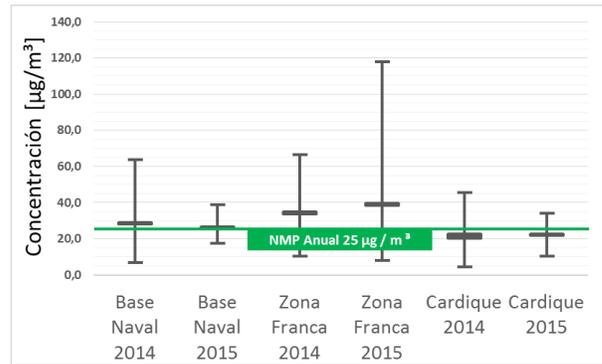
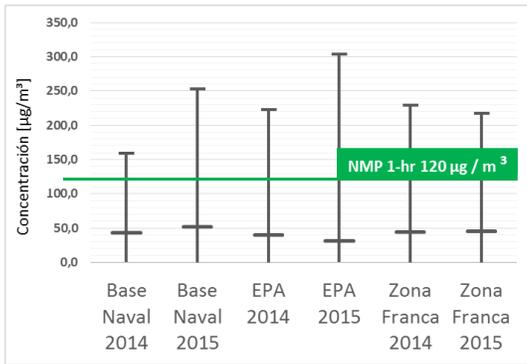


Ilustración 35 – Concentración [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] para contaminantes criterio vs niveles máximos permisibles (NMP), 2014 y 2015.

Superior izquierda: ozono (1 – hr); superior derecha: $\text{PM}_{2.5}$ (anual) e inferior: PM_{10} (anual)

5.3 Índice de la Calidad del Aire - ICA

El reporte gráfico que presentan los resultados del análisis del ICA para el 2014 y 2015 se presenta en la Ilustración 36.



Ilustración 36 – ICA 2014 y 2015. a) O₃. b) PM₁₀ y c) PM_{2.5}

La clasificación dada por el Índice de la Calidad del Aire (Ilustración 36) para el ozono es buena, mientras que para el PM₁₀ mayoritariamente es buena y en menor proporción moderada. Para el PM_{2.5} la calidad del aire es moderada y en ocasiones dañina a la salud para grupo sensibles.

En términos de calidad y teniendo en cuenta el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire, del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de

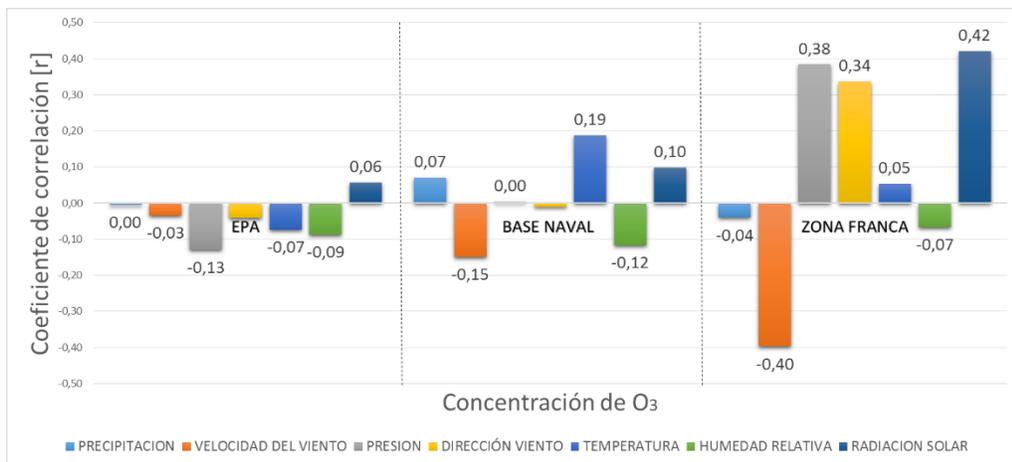
la Calidad del Aire, no hay recomendación asociada al ozono, mientras que las acciones preventivas asociadas a PM₁₀, y más en específico para PM_{2.5} son:

- Para la categoría moderada: Personas extremadamente sensibles con asma y adultos con enfermedad cardio-cerebrovascular como hipertensión arterial, enfermedad isquémica del miocardio o pulmonar como asma, enfisema y bronquitis crónica deben reducir la actividad física fuerte o prolongada
- Para la categoría dañina a la salud para grupos sensibles: Personas con enfermedades cardiacas o respiratorias, mayores de 60 años y niños deben evitar la actividad física fuerte o prolongada

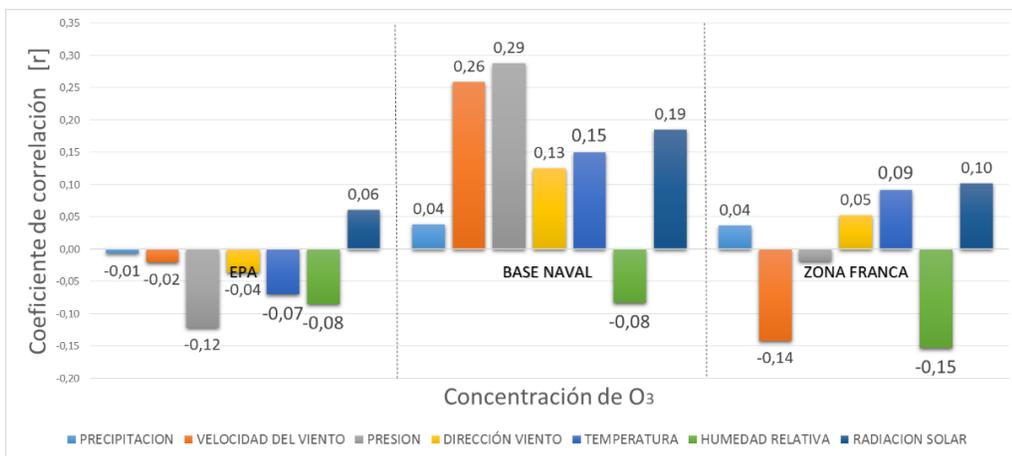
5.4 Análisis de correlación de variables

El análisis de correlación de variables meteorológicas y contaminantes criterio monitoreados (PM₁₀, PM_{2.5} y O₃) puede apreciarse en la Ilustración 37.

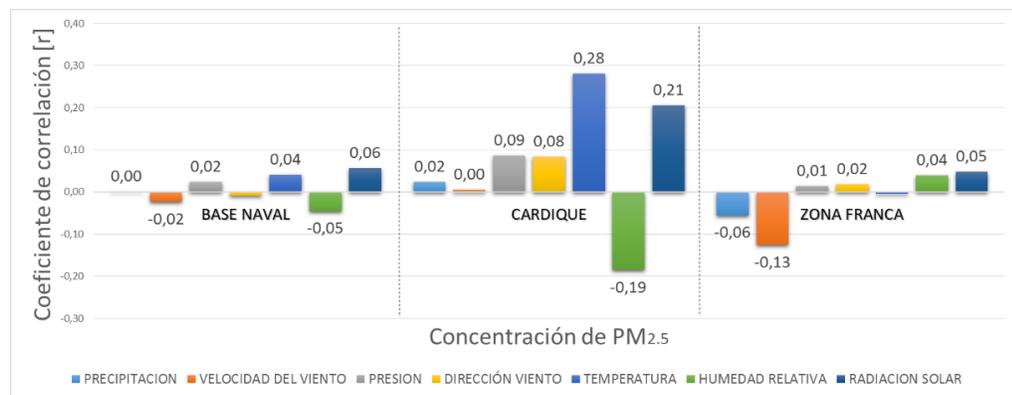
Del cual se puede decir que no hay una correlación lineal evidente entre las variables meteorológicas y las concentraciones de los distintos contaminantes dado que el coeficiente de correlación (r) no tiene valores cercanos a 1 ó -1. El mayor valor del coeficiente de correlación es 0.42 entre radiación solar y concentración de ozono, lo cual indica una baja correlación lineal entre ambas variables, pero es de esperar que corresponda al valor más alto del coeficiente de correlación dado que partiendo de la química atmosférica, se requiere de la presencia de radiación solar para la formación de ozono troposférico. La correlación negativa entre la concentración de ozono y la humedad relativa es común en las ciudades costeras, debido a que altas condiciones de humedad relativa favorecen la reacción entre NO₂ y las partículas de NaCl (Dueñas, Fernández, Cañete, & Carretero, 2002). Recordemos que en Cartagena la humedad relativa promedio esta en un $70,96 \pm 11,42\%$ y alcanza máximos superiores a 90%, esto conduce a una baja concentración de ozono.



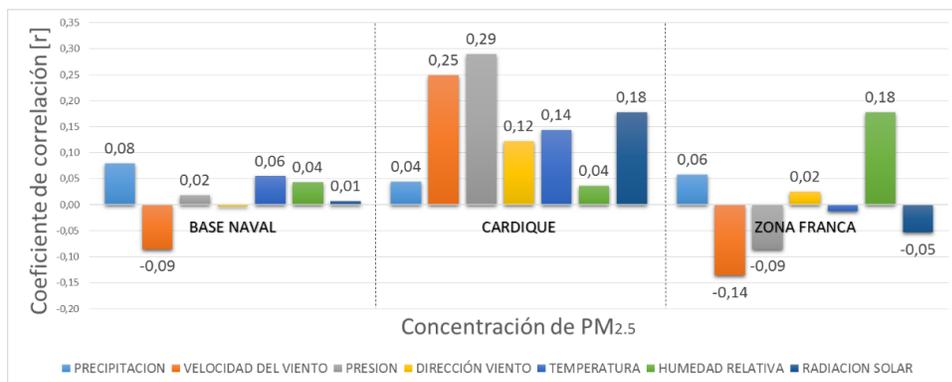
a)



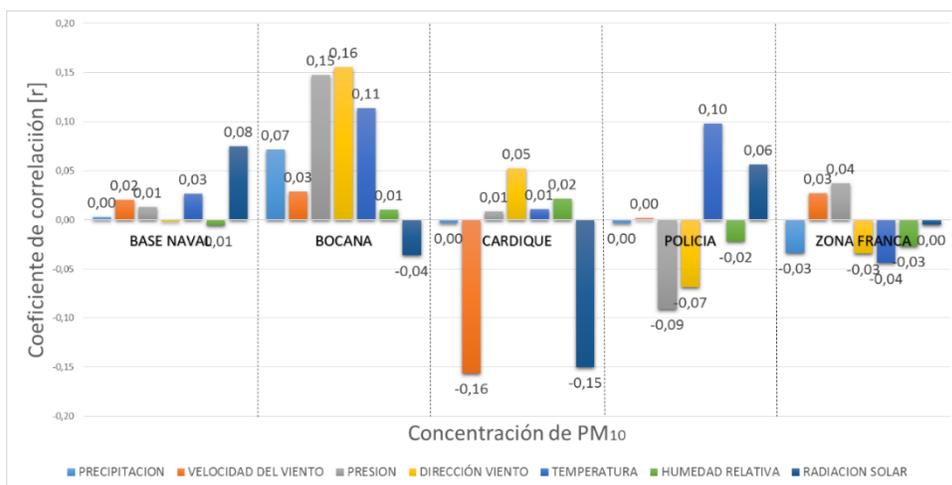
b)



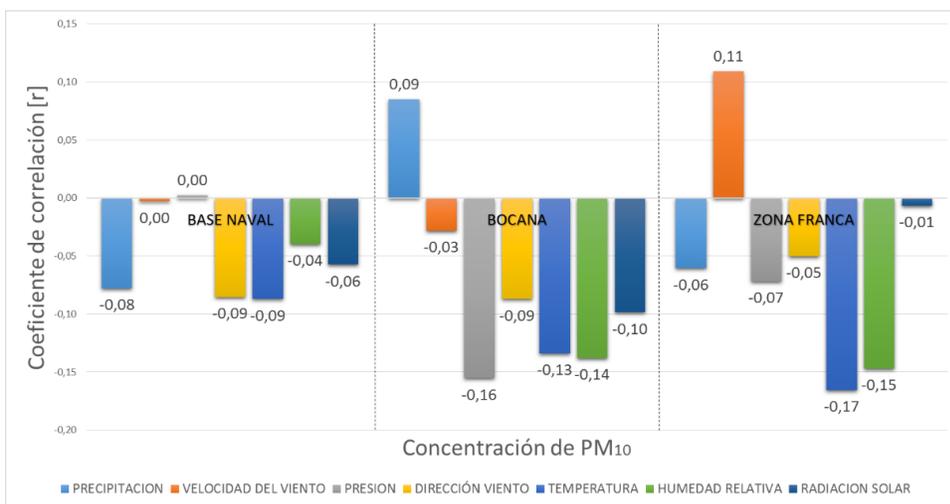
c)



d)



e)



f)

Ilustración 37 – Correlación de variables meteorológicas y concentraciones: a) ozono 2014, B) ozono 2015, C) PM_{2.5} 2014, d) PM_{2.5} 2015, e) PM₁₀ 2014, f) PM₁₀ 2015.

6. CONCLUSIONES

El estado de la calidad del aire en el distrito de Cartagena de Indias para los años 2014 y 2015 se revisó en términos de cantidad y calidad. Respecto a la cantidad en el presente documento se evidencia falta de la integridad temporal de los datos obtenidos por el sistema.

Durante el 2014, operaron cuatro (4) estaciones ubicadas en la Base Naval, Bocana, Cardique y Policía; y en conjunto la disponibilidad de datos meteorológicos fue del 74%.

Por la cantidad de datos reportados solo las estaciones ubicadas en la Base Naval (85%) y Bocana (85%) pueden garantizar un análisis con menor grado de incertidumbre mientras que las restantes estaciones meteorológicas tienen una disponibilidad inferior al 75% de los datos anuales.

Durante el 2015 se incrementó el número de estaciones que operan integradas al SVCA que pasan de ser cuatro (4) a cinco (5), sin embargo ninguna de las cinco (5) estaciones suministró una cantidad igual o mayor al 75% de los datos totales anuales. En este periodo, solo se contó con datos validados por el SVCA (46,8%).

En cuanto a la calidad de los datos, luego de los análisis realizados se puede diferenciar que la información obtenida en el 2014 (los datos validados por el SVCA) presentaron intervalos de confianza más amplios para cada variable meteorológica respecto a su par de dato procesado, salvo la temperatura. Sin embargo, para las tres bases de datos analizadas las medias son congruentes entre si y también al histórico de la ciudad.

La media anual de cada variable meteorológica fueron: precipitación ($1654,27 \pm 773,28$ mm), humedad relativa ($78,43 \pm 0,17\%$), temperatura ($28,76 \pm 0,47^\circ\text{C}$), radiación ($130,98 \pm 103,16 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$), presión atmosférica ($101,17 \pm 0,20$ kPa), velocidad

mayormente oscila entre 2 a 4 $\frac{m}{s}$ y dirección del viento predominante proviene del noreste.

En materia de concentración de contaminantes, la disponibilidad de la información también es insuficiente. De los once (11) equipos de monitoreo que operaron durante el 2014 solo seis (6) tienen una disponibilidad de la información igual o mayor al 75% de los datos anuales, de las cuales las estaciones de la Bocana (PM₁₀), Cardique (PM₁₀), Policía (PM₁₀) y Cardique (PM_{2.5}) presentan menos del 40% de los datos anuales.

Las tres estaciones que miden PM₁₀ anteriormente citadas, no registraron información de agosto a diciembre durante el 2014.

Sin embargo, se resalta la alta disponibilidad de la información en las siguientes estaciones: Base Naval O₃ (83%), Base Naval PM_{2.5} (90%), Zona Franca PM_{2.5} (91%), Base Naval PM₁₀ (99%) y Zona Franca PM₁₀ (96%).

Durante el 2015, el número de equipos de monitoreo se reduce de once a diez, saliendo una de equipo semiautomático que mide PM₁₀ (Cardique). En este año cinco (5) de diez (10) equipos de monitoreo cumplen con la integridad temporal de los datos, resaltando todas las estaciones automáticas de O₃ (100%): Zona Franca PM_{2.5} (99%) y Zona Franca PM₁₀ (100%).

En términos de la calidad de esta información validada por el SVCA existen datos atípicos para los tres contaminantes monitoreados, pero los extremos más altos se aprecian en la medición de ozono. EPA-2015 (1804,62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Zona Franca-2015 (977, 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

En el 2014 y el 2015, en las tres (3) estaciones que monitorean ozono (O₃) menos del 2% de los datos excede los niveles máximos permisibles establecidos en la norma ambiental colombiana vigente norma (horaria) de ozono [120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$].

En el 2014, en las cinco (5) estaciones que monitorean PM₁₀, una cantidad igual o menor al 4% de los datos excede los niveles máximos permisibles establecidos en la norma ambiental colombiana vigente norma (24 horas) de PM₁₀ [100 µg/m³].

Para un tiempo de exposición anual, se excede la norma para el PM₁₀ solamente en la estación ubicada en Cardique durante el 2014. Mientras que en el 2015, solamente una (1) de las cuatro (4) estaciones que operan excede la norma ambiental (cada 24 horas) en 7% (Bocana).

Por otro lado, la concentración de PM_{2.5} para el año 2014 excede la norma ambiental [50 µg/m³] en dos (2) de las tres (3) estaciones que operan: Base Naval (2%) y Zona Franca (4%). Además durante el 2015, la concentración de PM_{2.5} solamente excede la norma ambiental en la estación ubicada en la Zona Franca (19%).

El Índice de la Calidad del Aire (ICA) respecto al O₃ indica una buena calidad del aire en ambos años. Además para el PM₁₀ durante ambos años indica mayoritariamente una buena calidad del aire con eventos aislados donde se presentó una modelada calidad del aire. Durante ambos años para el PM_{2.5} se reporta una calidad del aire modelada y en ocasiones dañina a la salud para grupo sensibles.

Con lo anterior se puede concluir que la calidad del aire en Cartagena es moderada, debido a concentraciones de PM_{2.5} que se encuentran por encima del límite máximo permisible en la normatividad ambiental colombiana.

Por último, se concluye que no existe relación lineal aparente de variables meteorológicas y de concentración (O₃, PM₁₀, PM_{2.5}). Lo cual indica que las concentraciones reportadas de contaminantes no pueden ser asociadas de manera lineal a fenómenos meteorológicos locales. Esto sorprende, debido a que bajo la química atmosférica de contaminantes como el ozono se espera que a mayor radiación solar y por tanto temperatura haya un aumento en las concentraciones de este contaminante. Puede que lo anterior sea debido a que por procesos de advección las concentraciones de ozono se reduzcan en corto plazo. Otra variable importante a considerar en este resultado es la humedad relativa. La correlación

negativa entre la concentración de ozono y la humedad relativa es común en las ciudades costeras, debido a que a altas condiciones de humedad relativa se favorece la reacción entre NO_2 y las partículas de NaCl (Dueñas, Fernández, Cañete, & Carretero, 2002). Recordemos que en Cartagena la humedad relativa promedio esta en un $70,96 \pm 11,42\%$ y alcanza máximos por mayores a 90% esto conduce a una baja concentración de ozono.

7. RECOMENDACIONES

Los datos recolectados por un SVCA deben responder a las necesidades de los usuarios de la información, es decir los objetivos de vigilancia trazados para el SVCA. El diagnóstico ha permitido evidenciar porcentajes de disponibilidad baja de información meteorológica y también de contaminantes. Es por ello y a fin de garantizar la calidad de la que hace mención el Protocolo (Ministerio de Ambiente V. y., 2010), que se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Establecer un programa de Aseguramiento de la Calidad (AC) de acuerdo a lo enunciado en el Capítulo 9 – Programa de Aseguramiento y Control de la Calidad, del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire - Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire.
2. Realizar mantenimientos y control a todos los equipos de monitoreo a fin de mantener un nivel aceptable en la incertidumbre por calibración y de la precisión (manifestado probablemente en los datos atípicos validados por el SVCA), teniendo en cuenta los valores atípicos reportados especialmente en el monitoreo de ozono.
3. Garantizar la integridad temporal (mínimo del 75% de los datos totales del sistema), reducir la incertidumbre temporal de los datos.
4. Tener personal calificado para la operación exclusiva del SVCA de la ciudad, de esta manera garantizar la operación correcta del mismo, además del procesamiento y publicación de la información.
Debido a que el SVCA de Cartagena es de categoría híbrida se recomienda o sugiere que se siga la instrucción del Protocolo de entrenar a los operarios del mismo en mayor grado que a otros tipos de SVCA y a incrementar la cantidad de personal requerido con el objetivo que los datos validados no presenten datos atípicos y facilitar metadatos que permita completar y analizar estos datos, pudiendo así asociarlos a un evento específico y decidir si aceptarlos o rechazarlos dentro de la información a reportar en informes.
5. Dados los resultados de $PM_{2.5}$, se recomienda y en concordancia al Protocolo de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire en la Ciudad de Cartagena (2015) revisar los factores que influyen en la concentración del contaminante y establecer una política de control del mismo, a fin de prevenir, minimizar y controlar los impactos de este en la ciudad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Aburrá, Á. M. (2009). *Metropol*. Obtenido de <http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/plandedescontaminacion.aspx>
- Aburrá, Á. M. (2013). *Informe Final de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá*. Valle de Aburrá, Colombia: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Aburrá, Á. M. (7 de 2016). *Metropol*. Obtenido de <http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/ica.aspx>
- Alcaldía Mayor de Bogotá, D. (2008). *Plan decenal de descontaminación para Bogotá 2010-2020*. Bogotá D.C.: Secretaria de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C.
- Bablanov, A., Molina, L., & Gauss, M. (2015). Megacities, air quality and climate. (Elsevier, Ed.) *Atmospheric Environment*, 235-249.
- C, A. M. (29 de agosto de 2016). *Plan de Ordenamiento Territorial del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias*. Obtenido de http://www.cartagena.gov.co/Cartagena/secplaneacion/Documentos/pages/pot2001/files/DIAGNOSTICO/SINTESIS_DEL_DIAGNOSTICO.pdf
- Clean Air Institute. (2013). *La Calidad del Aire en América Latina. Una Visión Panorámica*. Washington D.C.: The Clean Air Institute.
- Climático, I. N. (2012). *Diagnóstico de la medición de la calidad del aire en México, 60 años monitoreando la calidad del aire*. México, D.F.: Col. Insurgentes Cuicuilco.
- Dueñas, C., Fernández, M. C., Cañete, S., & Carretero, L. E. (2002). Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast. *The Science of the Total Environment*, 97-113.
- Ecuador, A. T. (2001). *Diagnóstico del sistema de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca*. Cuenca, Ecuador: OPS/OMS Ecuador.
- EPA, E. P. (2015). *Protocolo de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de la Ciudad de Cartagena* (Vol. 4). Cartagena de Indias, Colombia: EPA Cartagena.
- Estadística, L. c. (1 de 9 de 2016). *Explorable*. Obtenido de <https://explorable.com/es/la-correlacion-estadistica>
- FAO. (1 de 9 de 2016). *Estadísticas: Regresión y Correlación*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/003/X6845S/X6845S02.htm>
- Gaitán, M., Cancino, J., & Behrentz, E. (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes*, 81-92.

- González Ferradás, E., Doval Miñarro, M., Morales Terrés, I. M., & Marzal Martínez, F. J. (2010). An approach for determining air pollution monitoring sites. *Atmospheric Environment*, 2640e2645.
- Hernández Rodríguez, H., Leottau Serrano, L., & Gaviria León, R. (2008). *Propuesta de gestión pública ambiental de la calidad del aire en el distrito de Cartagena*. Cartagena de Indias D.C y T: Pontificia Universidad Javeriana en Convenio con la Universidad Tecnológica de Bolívar.
- IDEAM. (20 de 9 de 2016). *Marco Conceptual Viento*. Obtenido de http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/ATLAS/documentos/Marco%20Conceptual_%20Viento.pdf
- IDEAM Instituto de Hidrología, M. y. (2012). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia. 2007 - 2010*. Bogotá D.c., Colombia.: Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM.
- IDEAM, & Alcaldía Mayor de Bogotá D.C Prevención y Atención. (9 de septiembre de 2016). *Estudio de la caracterización climática de Bogotá y cuenca alta del río Tunjuelo*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020702/CARACTERIZACIONCLIMATICACORRECCIONFOPAECpublicacionMA.pdf>
- Joly, M., & Peuch, V.-H. (2012). Objective classification of air quality monitoring sites over Europe. *Atmospheric Environment*, 111-123.
- Lamsal, L. N., Duncan, B. N., Yoshida, Y., Krotkov, N. A., Pickering, K. E., Streets, D. G., & Lu, Z. (2015). U.S NO₂ trends (2005-2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). *Atmospheric Environment*, 130-143.
- Marc, M., Tobiszewski, M., Zabiegala, B., & de la Guardia, M. (2014). Current air quality analytics and monitoring: A review. *Analytica Chimica Acta*, xxx-xxx.
- Medellín, A. d. (Septiembre de 2009). *Calidad del Aire en Medellín*. Obtenido de https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/documents/ServiciosLinea/PlaneacionMunicipal/ObservatorioPoliticPublicas/resultadosSeguimiento/docs/medioAmbiente/Publicaciones/boletinCalidadDelAireSep2009_01.pdf
- Ministerio de Ambiente, V. y. (5 de junio de 1995). *Decreto 948 de 1995*. República de Colombia.
- Ministerio de Ambiente, V. y. (4 de abril de 2006). *Decreto 601 de 2006*. República de Colombia.
- Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*. Bogotá D.C: Colombia.
- Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire - Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire*. Bogotá, D. C.
- Ministerio de Ambiente, V. y. (2010). *Resolución 610 de 2010*. República de Colombia.
- Ministerio de Ambiente, v. y. (2011). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Bogotá, Colombia: MinAmb.
- OCDE, O. p. (2012). <http://www.oem.com.mx/eloccidental/notas/n2993381.htm>.

- OMS, O. M. (26 de 11 de 2011). Obtenido de Afrontar el reto mundial de garantizar un aire limpio: http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/air_pollution_20110926/es/
- Parlamento Europeo y del Consejo. (21 de mayo de 2008). Directiva 2008/50/CE. *relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Parrish, D. D., Singh, B. H., Molina, L., & Madronich, S. (2011). Air quality progress in North American megacities: A review. *Atmospheric Environment*, 7015-7025.
- Secretaria Distrital de Ambiente, A. M. (15 de 6 de 2013). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá - RMCAB*. Obtenido de <http://ambientebogota.gov.co/red-de-calidad-del-aire>
- UNAD. (11 de septiembre de 2016). *Lección 19. Estabilidad atmosférica y altura de mezcla*. Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358007/Contenido_en_linea_Caraterizacion/leccin_19_estabilidad_atmosfrica_y_altura_demezcla.html
- UNAD. (31 de 8 de 2016). *Lección 5. Contaminantes primarios y secundarios, criterio y no criterio*. Obtenido de http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358007/Contenido_en_linea_Caraterizacion/leccin_5_contaminantes_primarios_y_secundarios_criterio_y_no_criterio.html
- Zeng, X.-W., Vivian, E., Mohammed, K. A., Jakhar, S., Vaughn, M., Huang, J., . . . Dong, G.-H. (2016). Long-term ambient air pollution and lung function impairment in Chinese children from a high air pollution range area: The Seven Northeastern Cities (SNEC) study. *Atmospheric Environment*, 144-151.

9. ANEXOS

En este apartado está consignado el registro de los diagramas de caja (*boxplot*) y tablas con información estadística de las variables meteorológicas y las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5} y O₃ durante el 2014 y 2015. Estos fueron utilizados para realizar la depuración de los datos atípicos y la validación de la información suministrada.

9.1.1.1 Diagramas de caja: meteorología procesada, 2014

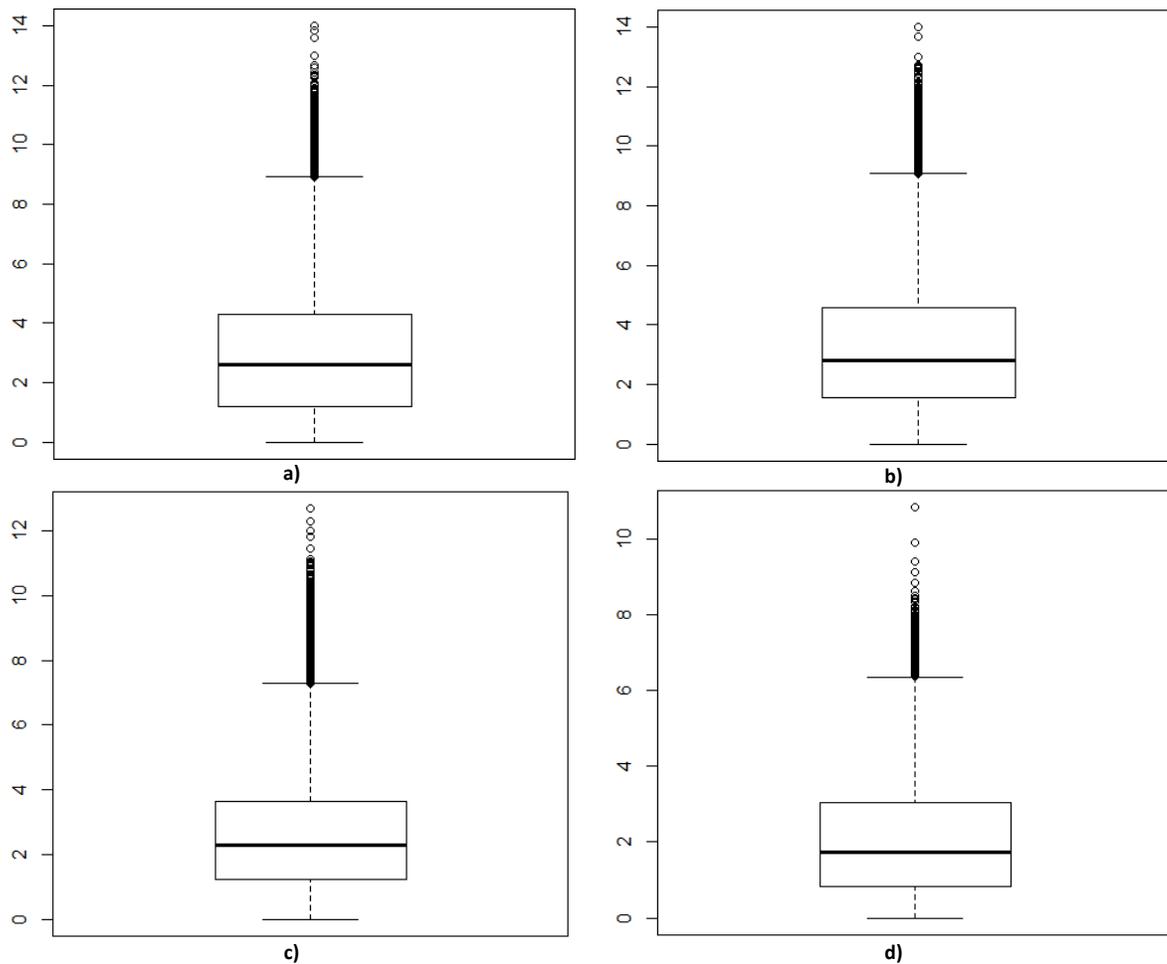
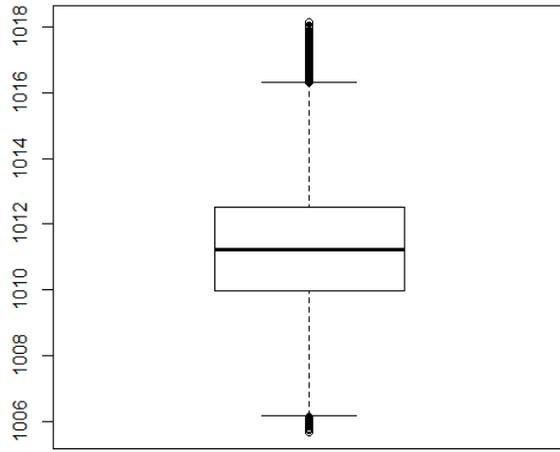


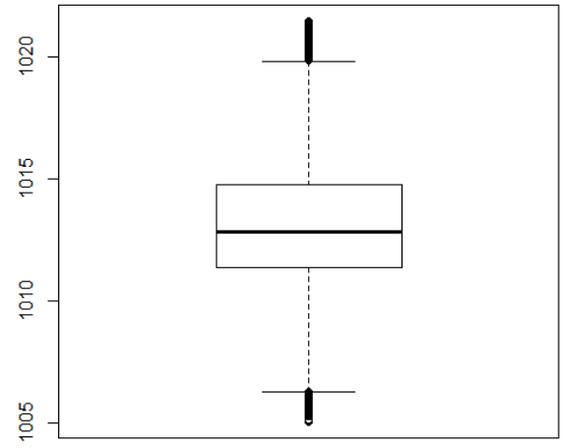
Ilustración 38 – Diagrama de caja (boxplot) de la velocidad del viento [m/s], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

Tabla 7 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la velocidad del viento – 2014

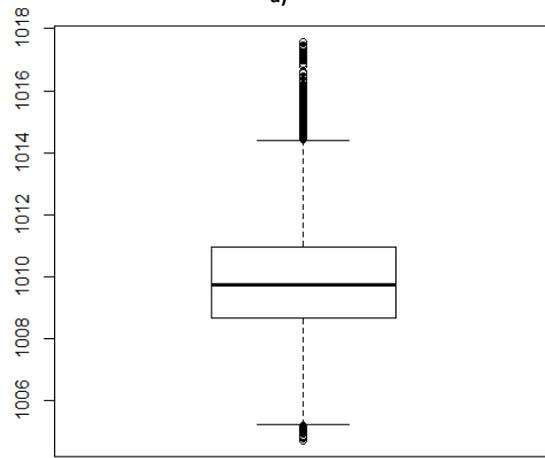
	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>
Datos	72302	79404	64781	56959
Media	2,883436	3,156544	2,5808	2,050667
Varianza simple	4,695817	4,436381	3,3178	2,398283
Desviación estándar	2,166983	2,106272	1,8215	1,548639
Mínimo	0	0	0	0
Máximo	14	14	12,7	10,83
Rango	14	14	12,7	10,83
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	-1,363774	-0,971673	-0,9892	-0,984610
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	7,130645	7,284761	6,1509	5,085944
Margen de error	4,247210	4,128217	3,5700	3,035277
1st cuartil	1,210000	1,550000	1,2300	0,840000
Mediana	2,600000	2,820000	2,3000	1,730000
3rd cuartil	4,300000	4,570000	3,6600	3,050000
Intercuartil Rango	3,090000	3,020000	2,4300	2,210000
Moda	0,000000	0,000000	0,0000	0,000000
Extremos inferiores	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	540	531	1042	488
Extremos superiores	3	2	10	2



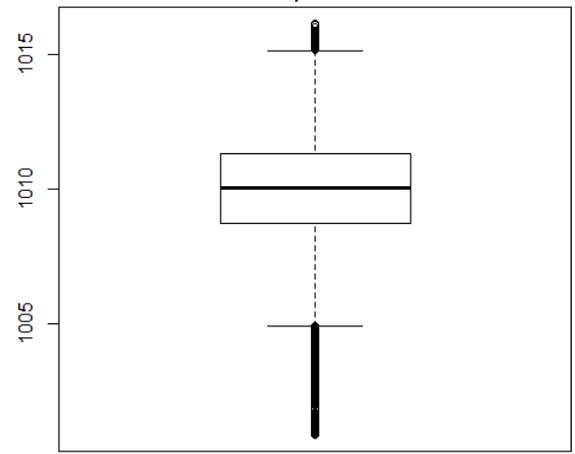
a)



b)



c)



d)

Ilustración 39 – Diagrama de caja (boxplot) de la presión atmosférica [mbar], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

Tabla 8 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la presión atmosférica – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>
Datos	72302	79404	64781	56959
Media	1.011,3047	1.013,0952	1.009,8766	1.009,9631
Varianza simple	3,5101	5,7220	3,0698	4,0734
Desviación estándar	1,8735	2,3921	1,7521	2,0183
Mínimo	1005,68	1005,08	1004,72	1000,88
Máximo	1018,14	1021,43	1017,57	1016,12
Rango	12,46	16,35	12,85	15,24
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	1.007,6327	1.008,4068	1.006,4425	1.006,0074
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	1.014,9768	1.017,7836	1.013,3106	1.013,9189
Margen de error	3,6720	4,6884	3,4340	3,9557
1st cuartil	1.009,9600	1.011,3600	1.008,6600	1.008,7300
Mediana	1.011,2200	1.012,8500	1.009,7400	1.010,0300
3rd cuartil	1.012,5000	1.014,7400	1.010,9600	1.011,2900
Intercuartil Rango	2,5400	3,3800	2,3000	2,5600
Moda	1.011,4400	1.012,1400	1.009,3900	1.011,3000
Extremos inferiores	0	0	0	12
Valores atípicos inferiores	20	74	29	887
Valores atípicos superiores	364	222	806	75
Extremos superiores	0	0	0	0

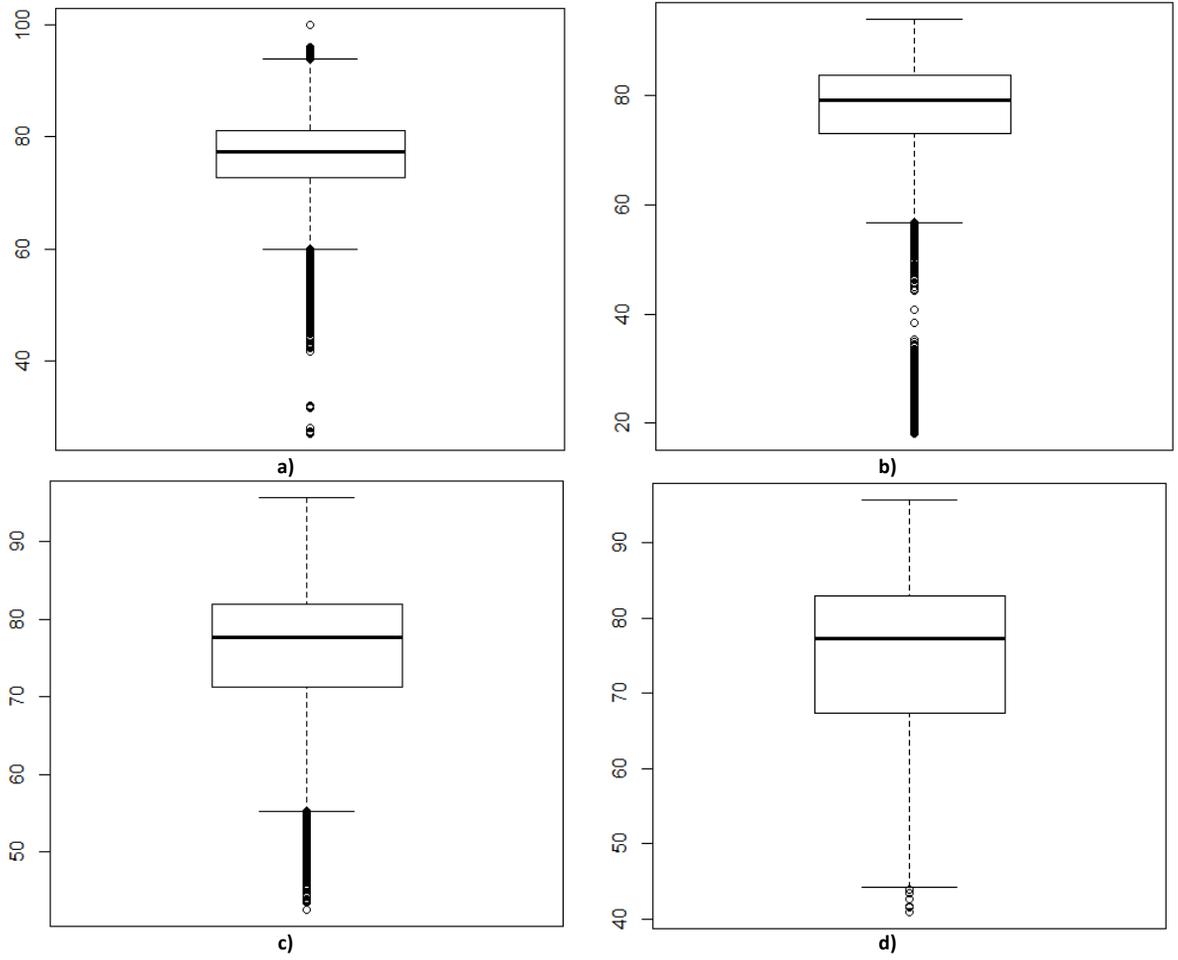


Ilustración 40 – Diagrama de caja (boxplot) de la humedad relativa [%] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

Tabla 9 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la humedad relativa – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>
Datos	72302	79404	64781	56959
Media	76,5256	76,4699	76,1876	75,0349
Varianza simple	44,4115	155,2692	62,1509	93,1003
Desviación estándar	6,6642	12,4607	7,8836	9,6489
Mínimo	27,09	18,19	42,6	40,96
Máximo	100	93,8577	95,69	95,66
Rango	72,91	75,6677	53,09	54,7
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	63,4640	52,0474	60,7361	56,1235
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	89,5872	100,8924	91,6391	93,9463
Margen de error	13,0616	24,4225	15,4515	18,9114
1st cuartil	72,7100	72,9300	71,2800	67,3300
Mediana	77,4400	79,1073	77,6600	77,3000
3rd cuartil	81,1700	83,7500	81,9500	82,9200
Intercuartil Rango	8,4600	10,8200	10,6700	15,5900
Moda	81,0900	82,0100	79,9400	83,6900
Extremos inferiores	52	3184	0	0
Valores atípicos inferiores	1481	351	743	7
Valores atípicos superiores	107	0	0	0
Extremos superiores	0	0	0	0

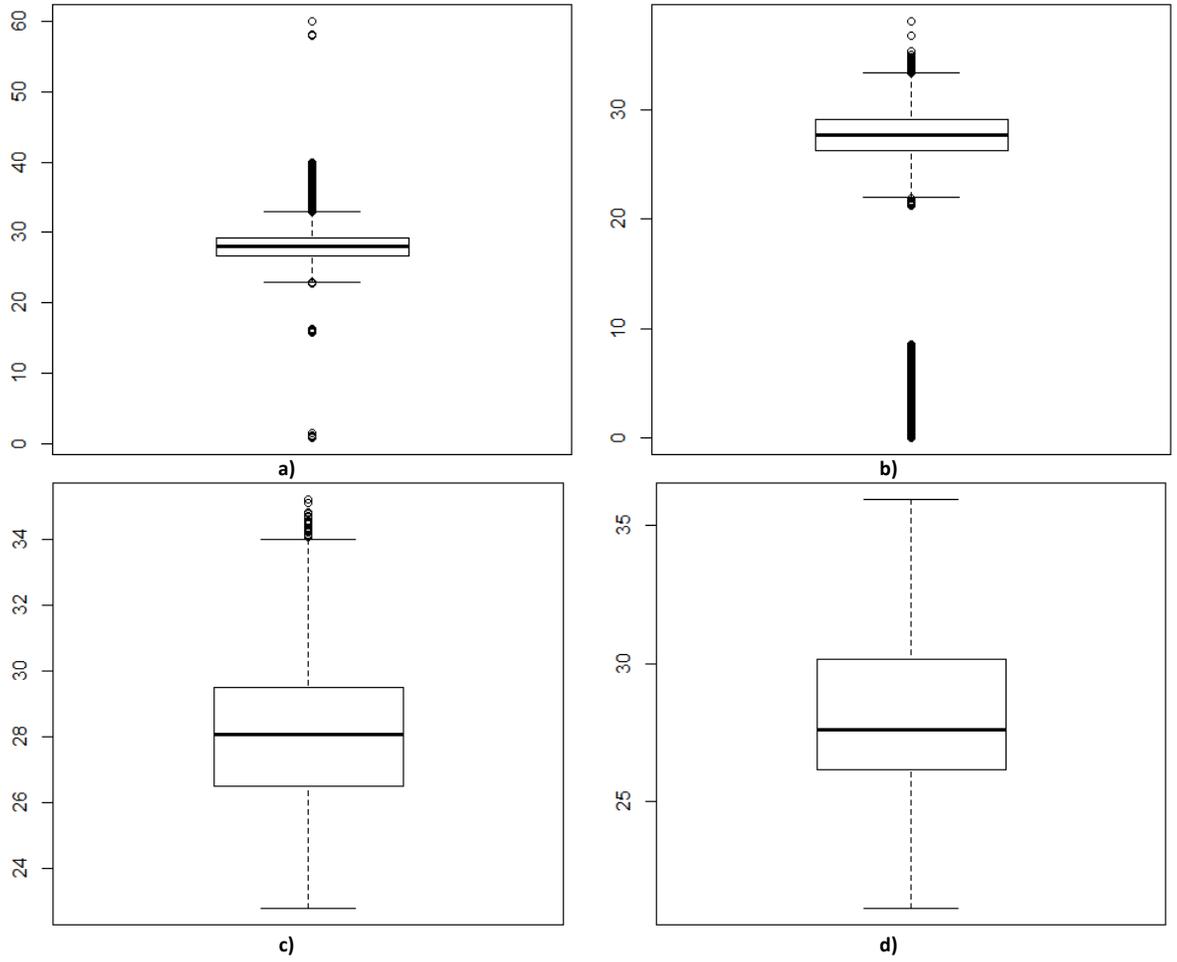


Ilustración 41 – Diagrama de caja (boxplot) de la temperatura [°C] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

Tabla 10 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la temperatura – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>
Datos	72302	79404	64781	56959
Media	28,0447	26,8142	28,0948	28,0449
Varianza simple	3,7695	29,4090	3,6764	5,7812
Desviación estándar	1,9415	5,4230	1,9174	2,4044
Mínimo	0,839346	0	22,81	21,1614
Máximo	60	38,1281	35,2	35,94
Rango	59,160654	38,1281	12,39	14,7786
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	24,2394	16,1853	24,3368	23,3323
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	31,8500	37,4431	31,8529	32,7574
Margen de error	3,8053	10,6289	3,7580	4,7126
1st cuartil	26,6400	26,2800	26,5100	26,1700
Mediana	28,0200	27,7000	28,0600	27,5900
3rd cuartil	29,1700	29,1524	29,5100	30,1500
Intercuartil Rango	2,5300	2,8724	3,0000	3,9800
Moda	28,3100	27,6000	28,1700	26,7000
Extremos inferiores	11	3181	0	0
Valores atípicos inferiores	9	9	0	0
Valores atípicos superiores	1140	41	35	0
Extremos superiores	156	1	0	0

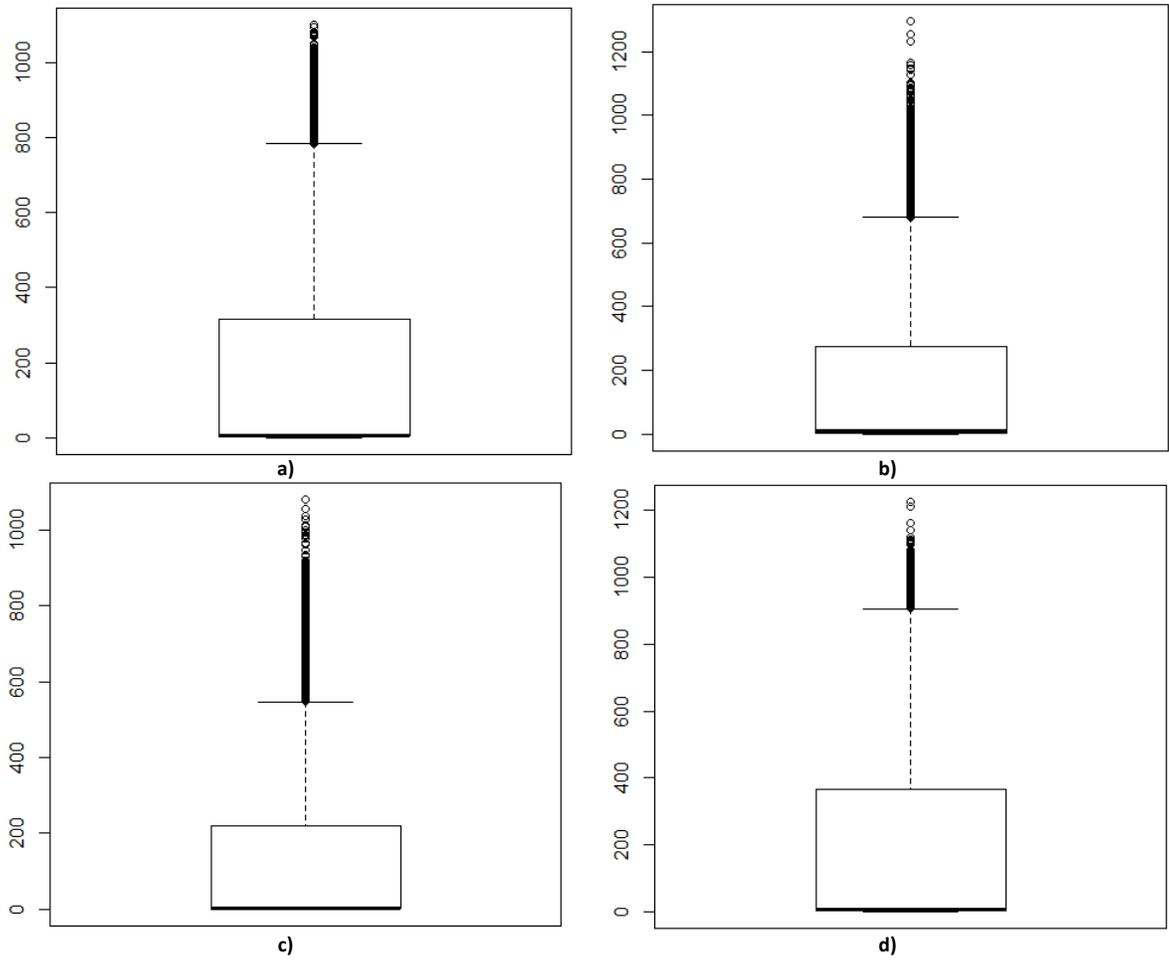


Ilustración 42 – Diagrama de caja (boxplot) de la radiación solar [w/m^2], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique y d) Olaya

Tabla 11 – Estadística descriptiva de los datos procesados de la radiación solar – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>
Datos	72302	79404	64781	56959
Media	189,82	174,76	144,04	201,98
Varianza simple	79.714,35	64.550,73	50.514,07	81.114,56
Desviación estándar	282,34	254,07	224,75	284,81
Mínimo	0,192206	0	0	0
Máximo	1101,09	1295	1081	1226
Rango	1100,8978	1295	1081	1226
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	-363,55	-323,20	-296,46	-356,23
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	743,19	672,73	584,55	760,19
Margen de error	553,37	497,96	440,51	558,21
1st cuartil	4,00	2,00	2,00	2,00
Mediana	6,00	11,00	3,00	5,00
3rd cuartil	316,00	273,00	220,00	364,00
Intercuartil Rango	312,00	271,00	218,00	362,00
Moda	4,00	2,00	2,00	2,00
Extremos inferiores	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	5182	6216	6024	817
Extremos superiores	0	15	57	0

9.1.1.2 Diagramas de caja: meteorología validada, 2014

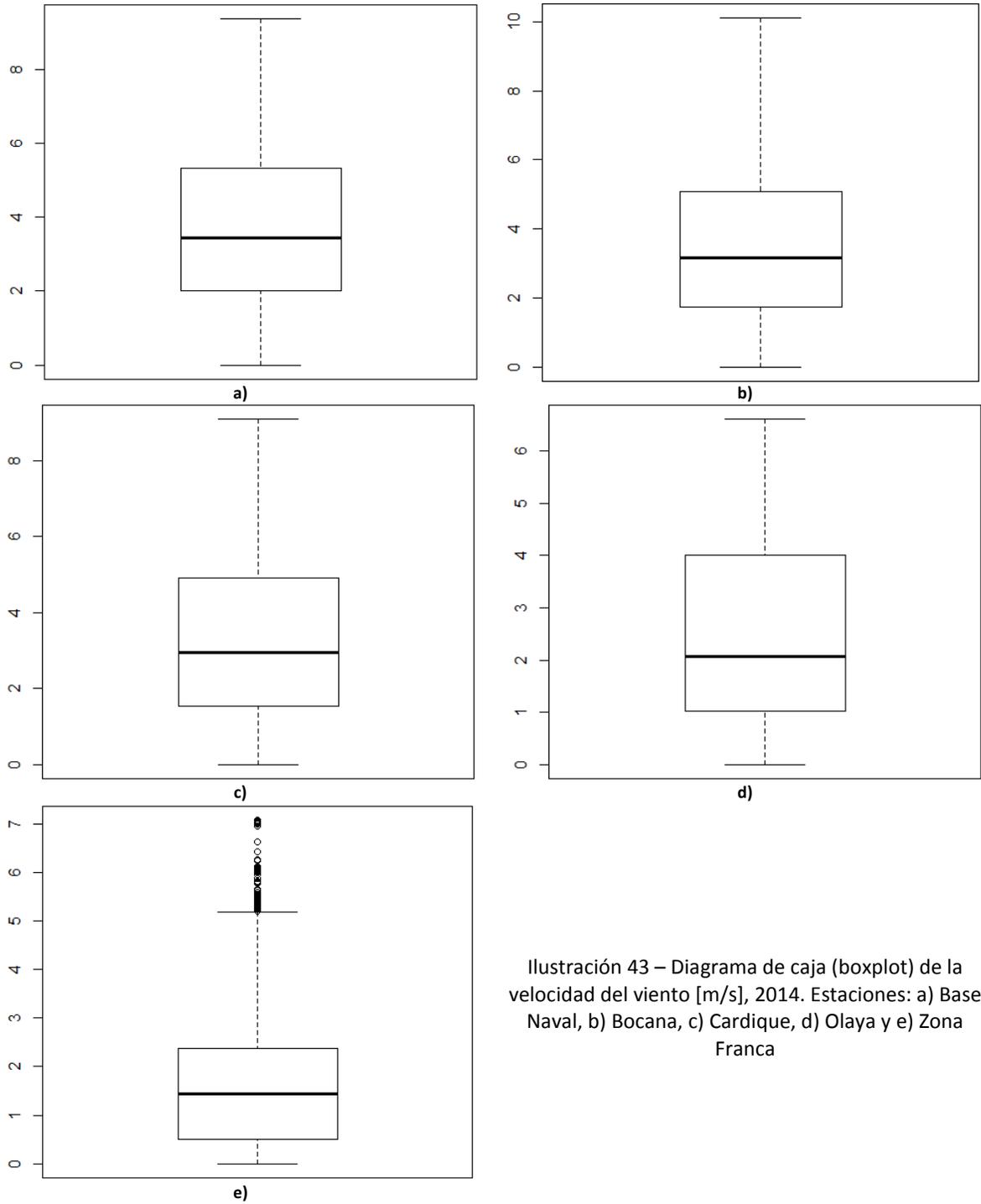
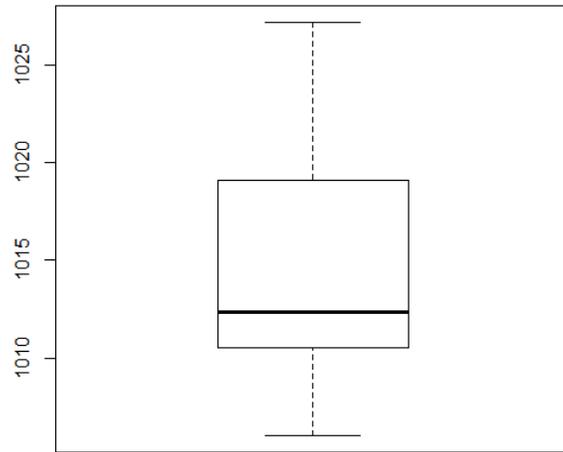


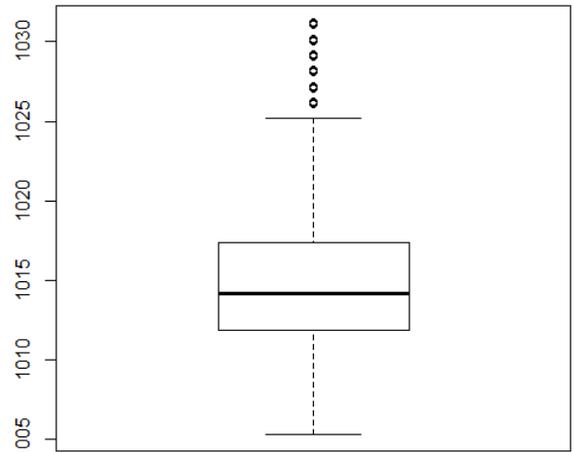
Ilustración 43 – Diagrama de caja (boxplot) de la velocidad del viento [m/s], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 12 – Estadística descriptiva de los datos validados de velocidad del viento – 2014

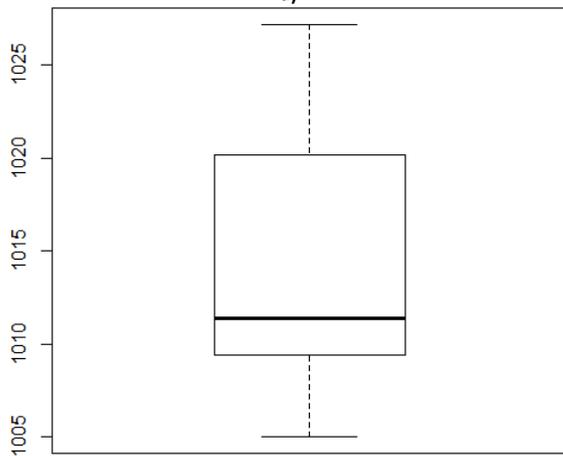
	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	8760	8760	8760	8760	8760
Media	3,8153	3,6178	3,3452	2,4865	1,7533
Varianza simple	5,5797	5,8833	5,5841	3,0898	2,6096
Desviación estándar	2,3621	2,4256	2,3631	1,7578	1,6154
Mínimo	0	0	0	0	0
Máximo	9,37	10,11	9,09	6,61	7,07
Rango	9,37	10,11	9,09	6,61	7,07
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	-0,8144	-1,1362	-1,2863	-0,9587	-1,4129
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	8,4450	8,3718	7,9767	5,9316	4,9195
Margen de error	4,6297	4,7540	4,6315	3,4452	3,1662
1st cuartil	2,0000	1,7400	1,5400	1,0300	0,5000
Mediana	3,4300	3,1700	2,9500	2,0600	1,4300
3rd cuartil	5,3300	5,0900	4,9100	4,0000	2,3800
Intercuartil Rango	3,3300	3,3500	3,3700	2,9700	1,8800
Moda	5,0800	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	0	0	0	0	405
Extremos superiores	0	0	0	0	0



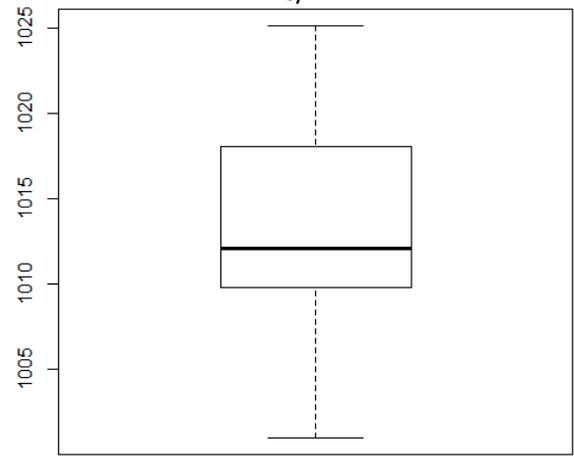
a)



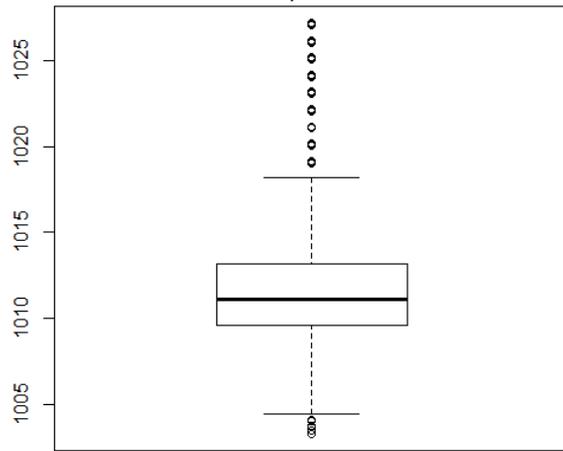
b)



c)



d)

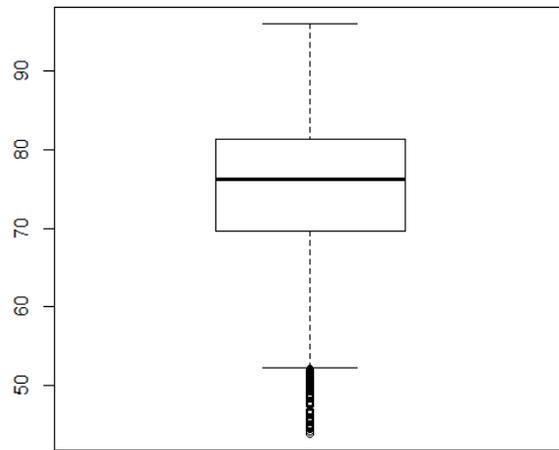


e)

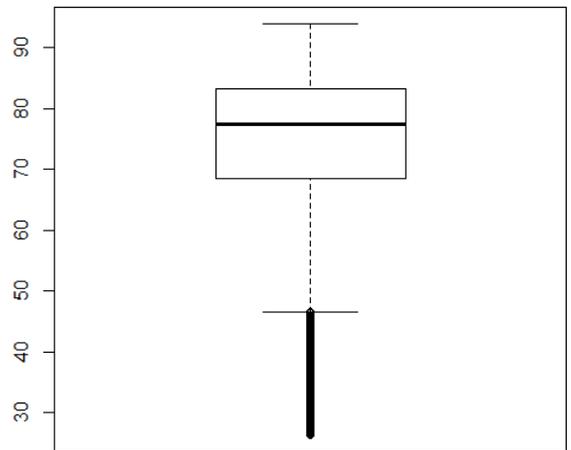
Ilustración 44 – Diagrama de caja (boxplot) de la presión atmosférica [mbar], 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 13 – Estadística descriptiva de los datos validados de presión atmosférica – 2014

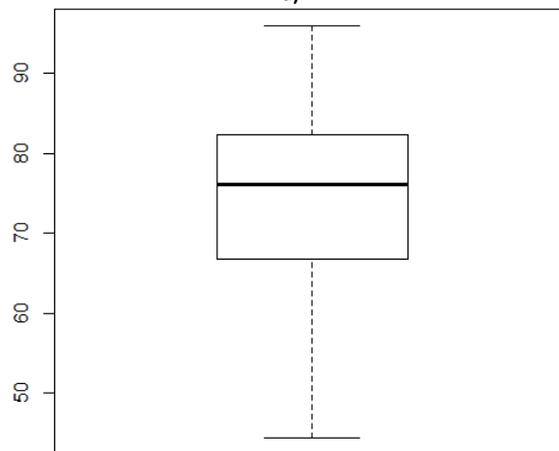
	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	8760	8760	8760	8760	8760
Media	1.014,6801	1.015,7070	1.014,5692	1.013,9286	1.012,3119
Varianza simple	30,6138	30,5563	40,9988	28,4892	19,7178
Desviación estándar	5,5330	5,5278	6,4030	5,3375	4,4405
Mínimo	1006,05	1005,35	1005,03	1001,02	1003,31
Máximo	1027,17	1031,21	1027,17	1025,15	1027,17
Rango	21,12	25,86	22,14	24,13	23,86
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	1.003,8357	1.004,8728	1.002,0195	1.003,4672	1.003,6088
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	1.025,5246	1.026,5413	1.027,1189	1.024,3899	1.021,0151
Margen de error	10,8444	10,8342	12,5497	10,4614	8,7032
1st cuartil	1.010,5200	1.011,8575	1.009,3800	1.009,8300	1.009,6200
Mediana	1.012,3400	1.014,1500	1.011,3700	1.012,1300	1.011,0900
3rd cuartil	1.019,0800	1.017,4025	1.020,1500	1.018,0600	1.013,1400
Intercuartil Rango	8,5600	5,5450	10,7700	8,2300	3,5200
Moda	1.026,1000	1.011,8500	1.017,1700	1.012,1000	1.010,8000
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0	8
Valores atípicos superiores	0	830	0	0	535
Extremos superiores	0	0	0	0	413



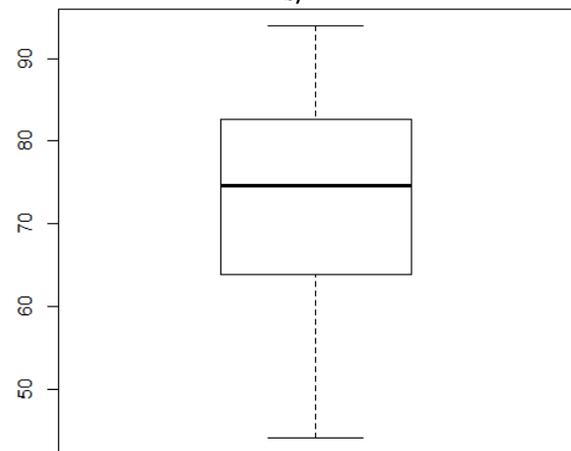
a)



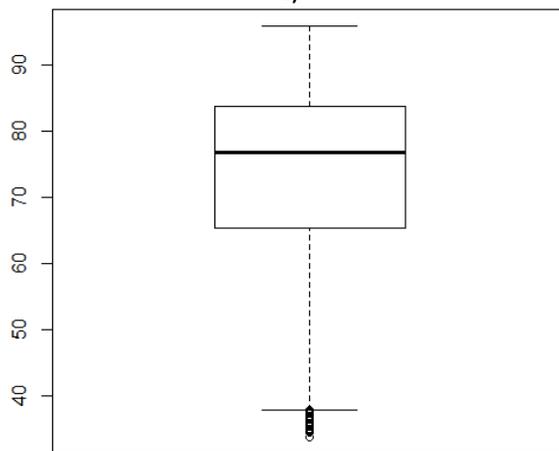
b)



c)



d)

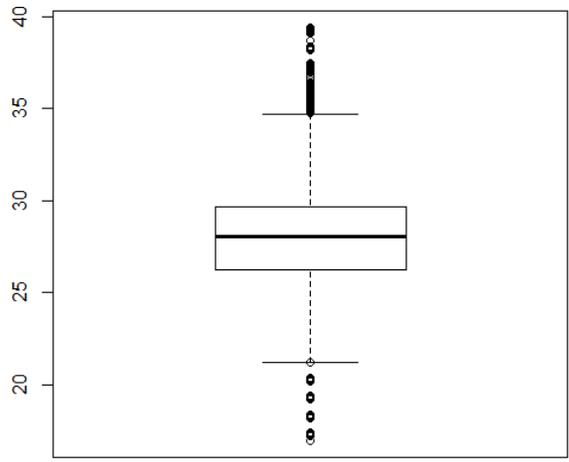


e)

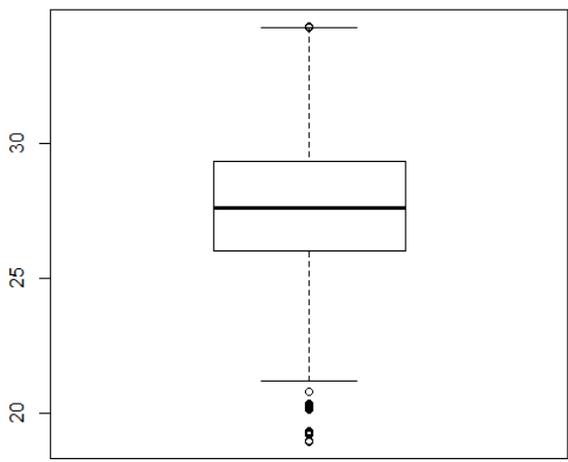
Ilustración 45 – Diagrama de caja (boxplot) de la humedad relativa [%] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 14 – Estadística descriptiva de los datos validados de humedad relativa – 2014

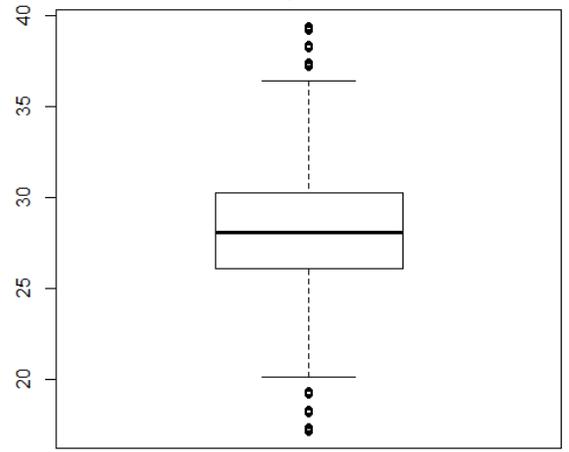
	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	8760	8760	8760	8760	8760
Media	74,3800	73,0256	73,8920	72,8870	73,5256
Varianza simple	109,5163	230,3742	131,7428	143,9811	171,7895
Desviación estándar	10,4650	15,1781	11,4779	11,9992	13,1068
Mínimo	43,94	26,36	44,47	44,21	33,77
Máximo	95,95	93,93	95,95	93,93	95,81
Rango	52,01	67,57	51,48	49,72	62,04
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	53,8690	43,2771	51,3957	49,3689	47,8367
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	94,8910	102,7741	96,3884	96,4050	99,2146
Margen de error	20,5110	29,7485	22,4963	23,5180	25,6890
1st cuartil	69,6500	68,5600	66,7975	63,8600	65,2900
Mediana	76,2100	77,4500	76,1650	74,5900	76,7650
3rd cuartil	81,2800	83,2900	82,2700	82,7000	83,6300
Intercuartil Rango	11,6300	14,7300	15,4725	18,8400	18,3400
Moda	80,7700	83,1200	79,6100	82,7300	84,0000
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	450	809	0	0	89
Valores atípicos superiores	0	0	0	0	0
Extremos superiores	0	0	0	0	0



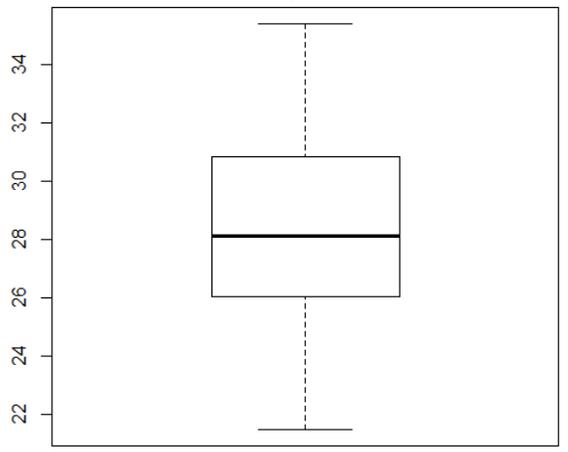
a)



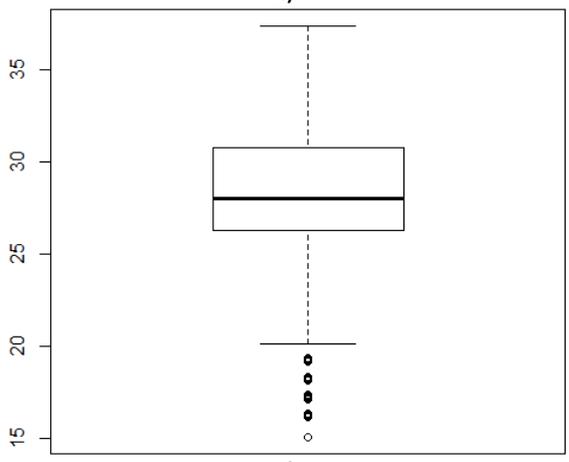
b)



c)



d)

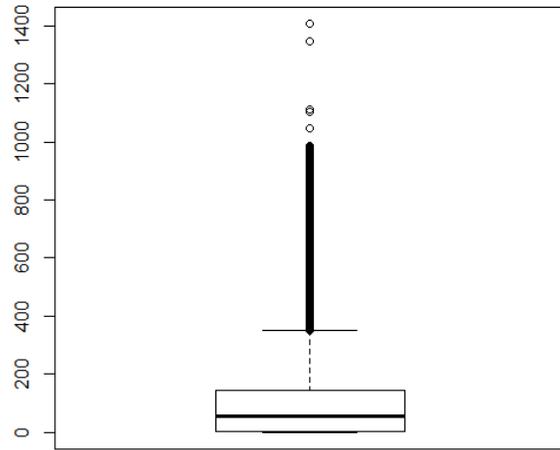


e)

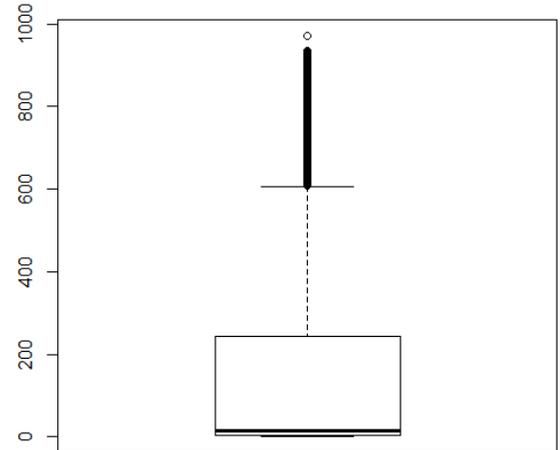
Ilustración 46 – Diagrama de caja (boxplot) de la temperatura [°C] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 15 – Estadística descriptiva de los datos validados de temperatura – 2014

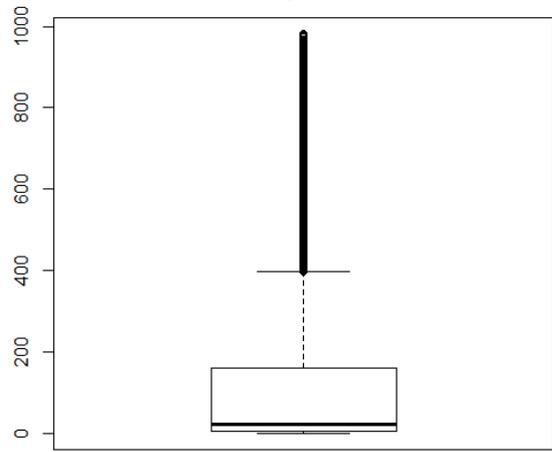
	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	8760	8760	8760	8760	8760
Media	28,0832	27,5004	28,1610	28,3837	28,3043
Varianza simple	16,1657	8,1978	19,5600	10,6433	13,1833
Desviación estándar	4,0207	2,8632	4,4227	3,2624	3,6309
Mínimo	16,96	18,95	17,17	21,5	15,11
Máximo	39,39	34,34	39,39	35,38	37,37
Rango	22,43	15,39	22,22	13,88	22,26
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	20,2028	21,8887	19,4928	21,9895	21,1879
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	35,9635	33,1121	36,8293	34,7778	35,4207
Margen de error	7,8803	5,6117	8,6683	6,3942	7,1164
1st cuartil	26,2600	26,0000	26,0900	26,0300	26,3200
Mediana	28,0400	27,6150	28,1100	28,1250	28,0100
3rd cuartil	29,6500	29,3200	30,2800	30,8200	30,8000
Intercuartil Rango	3,3900	3,3200	4,1900	4,7900	4,4800
Moda	28,1900	26,2500	26,1700	26,2700	27,3300
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	495	285	455	0	244
Valores atípicos superiores	637	37	465	0	0
Extremos superiores	0	0	0	0	0



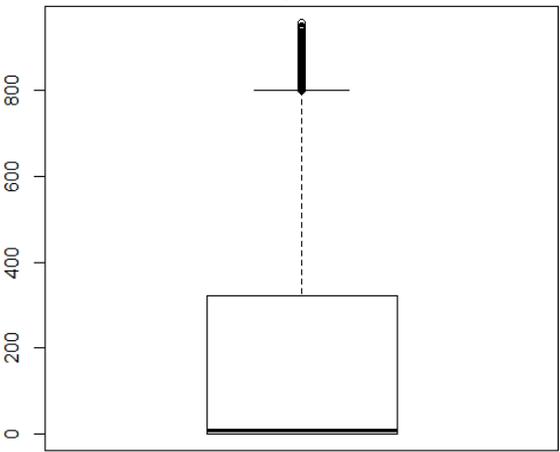
a)



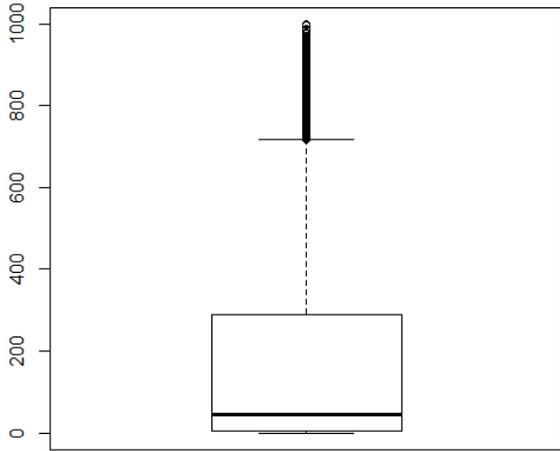
b)



c)



d)



e)

Ilustración 47 – Diagrama de caja (boxplot) de la radiación solar [w/m²] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 16 – Estadística descriptiva de los datos validados de la radiación solar – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	8760	8760	8760	8760	8760
Media	160,5095	157,6452	134,6313	183,0387	185,9872
Varianza simple	60.051,8556	52.497,4394	49.553,2390	66.571,8163	63.312,2373
Desviación estándar	245,0548	229,1232	222,6056	258,0151	251,6192
Mínimo	0,07	1,49	0,64	1,33	0,15
Máximo	1406,7	970,91	981,63	957,72	998,22
Rango	1406,63	969,42	980,99	956,39	998,07
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	-319,7891	-291,4280	-301,6676	-322,6617	-307,1774
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	640,8081	606,7184	570,9302	688,7391	679,1518
Margen de error	480,2986	449,0732	436,2989	505,7004	493,1646
1st cuartil	4,7350	2,0300	4,2800	1,7400	4,6800
Mediana	54,1850	15,8200	21,3000	8,0700	45,7550
3rd cuartil	142,8700	244,1775	161,8525	321,3400	289,9125
Intercuartil Rango	138,1350	242,1475	157,5725	319,6000	285,2325
Moda	3,8500	2,0000	1,7300	1,7100	2,3700
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	528	662	502	334	568
Extremos superiores	994	1	570	0	0

9.1.2.1 Diagramas de caja: meteorología validada, 2015

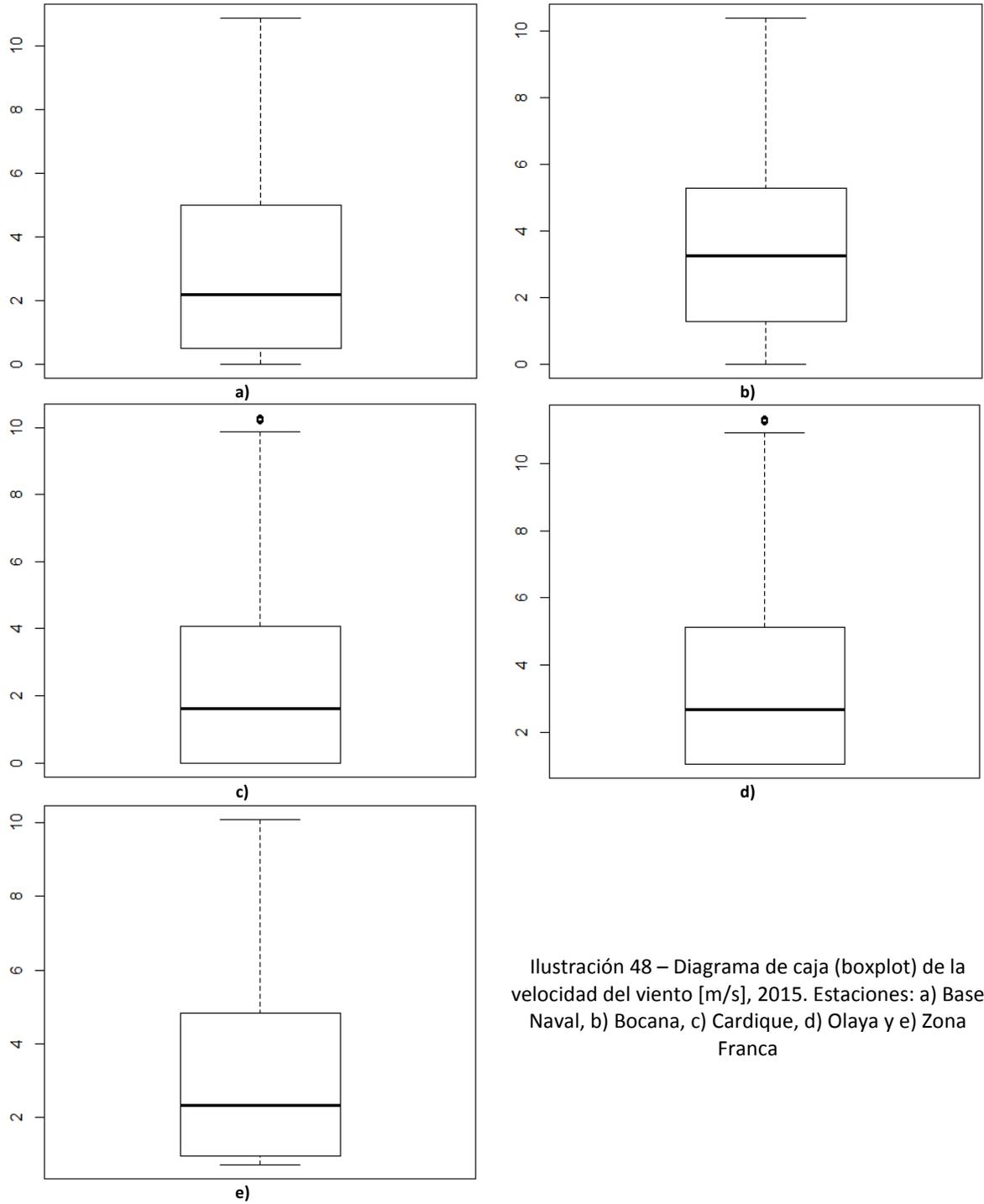
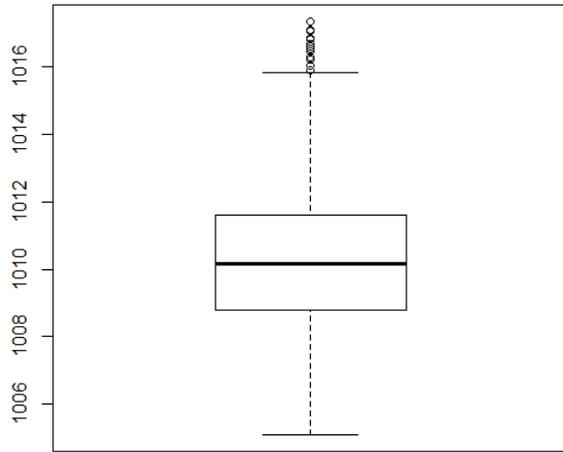


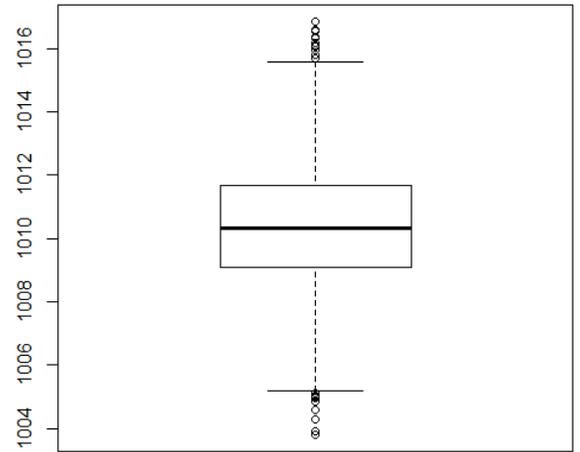
Ilustración 48 – Diagrama de caja (boxplot) de la velocidad del viento [m/s], 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 17 – Estadística descriptiva de los datos validados de la velocidad del viento – 2015

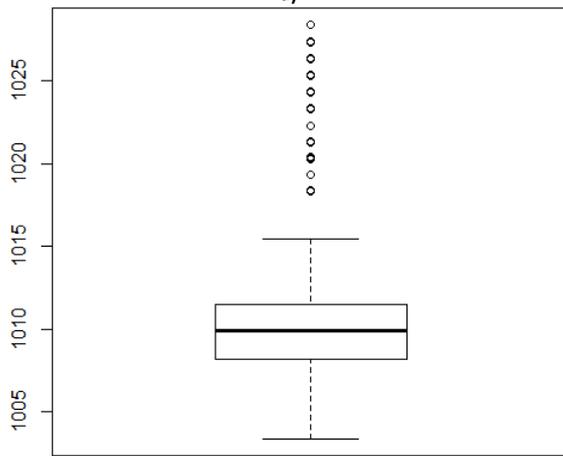
	<i>Base2015</i>	<i>Bocana2015</i>	<i>Cardique2015</i>	<i>Policia2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	4006	4243	4004	4002	4238
Media	2,88	3,44	2,35	3,40	2,99
Varianza simple	6,82	5,34	5,28	5,29	5,01
Desviación estándar	2,61	2,31	2,30	2,30	2,24
Mínimo	0	0	0	1,05	0,7
Máximo	10,87	10,37	10,28	11,33	10,09
Rango	10,87	10,37	10,28	10,28	9,39
tolerance interval 99,73% lower	-4,96	-3,50	-4,55	-3,50	-3,72
tolerance interval 99,73% upper	10,71	10,37	9,24	10,30	9,71
Margen de error	7,83	6,94	6,90	6,90	6,72
1st cuartil	0,50	1,28	0,00	1,05	0,93
Mediana	2,17	3,23	1,63	2,68	2,30
3rd cuartil	4,98	5,27	4,06	5,12	4,83
Intercuartil Rango	4,48	3,99	4,06	4,07	3,90
Moda	0,50	0,00	0,00	1,05	0,70
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	0	0	6	6	0
Extremos superiores	0	0	0	0	0



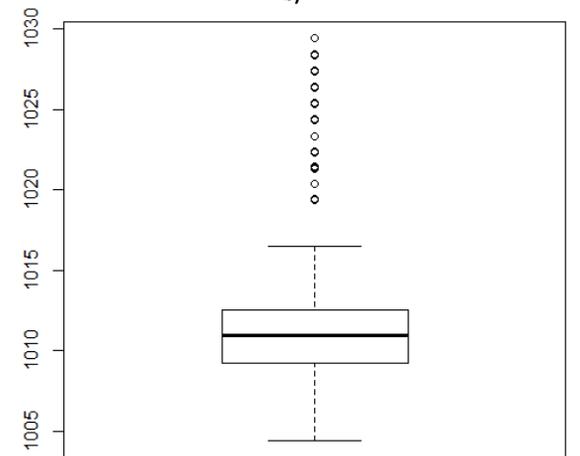
a)



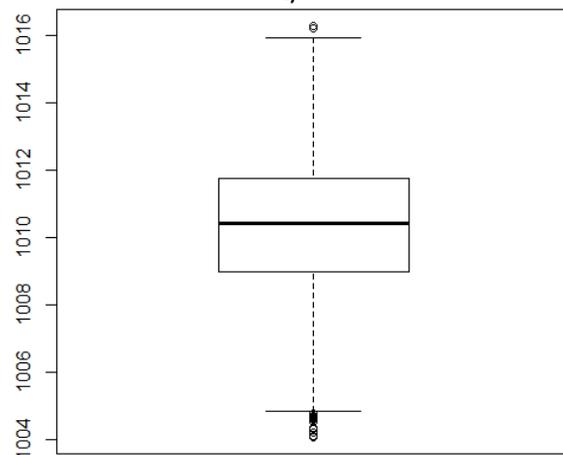
b)



c)



d)

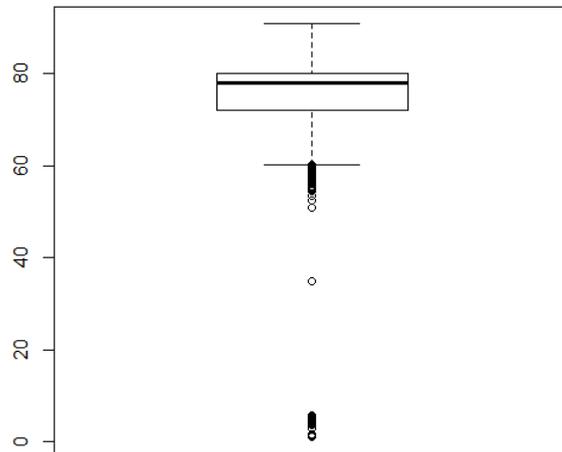


e)

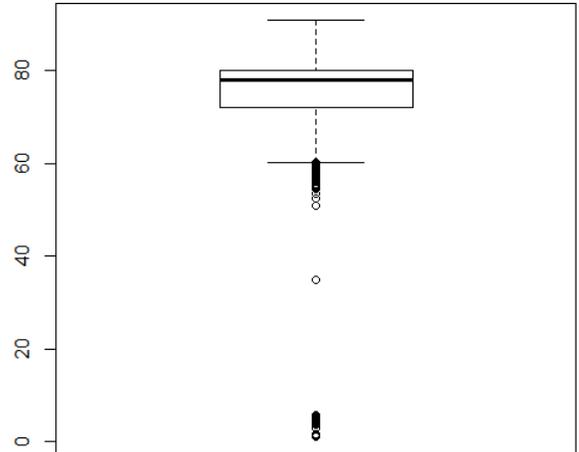
Ilustración 49 – Diagrama de caja (boxplot) de la presión atmosférica [mbar], 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 18 – Estadística descriptiva de los datos validados de la presión atmosférica – 2015

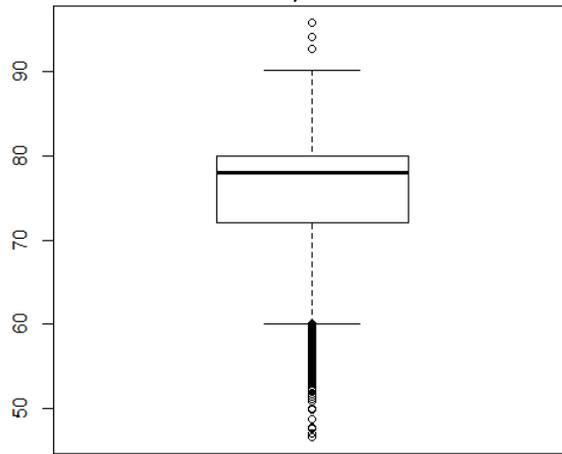
	<i>Base2015</i>	<i>Bocana2015</i>	<i>Cardique2015</i>	<i>Policia2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	4006	4243	4004	4002	4238
Media	1.010,23	1.010,36	1.009,94	1.010,99	1.010,35
Varianza simple	4,08	3,56	7,19	7,18	4,01
Desviación estándar	2,02	1,89	2,68	2,68	2,00
Mínimo	1005,1	1003,8125	1003,38	1004,43	1004,08
Máximo	1017,34	1016,84	1028,37	1029,42	1016,26
Rango	12,24	13,0275	24,99	24,99	12,18
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	1.006,27	1.006,67	1.004,69	1.005,74	1.006,42
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	1.014,19	1.014,06	1.015,20	1.016,24	1.014,27
Margen de error	3,96	3,70	5,26	5,25	3,93
1st cuartil	1.008,79	1.009,07	1.008,15	1.009,20	1.008,98
Mediana	1.010,16	1.010,34	1.009,91	1.010,96	1.010,40
3rd cuartil	1.011,61	1.011,67	1.011,49	1.012,53	1.011,76
Intercuartil Rango	2,82	2,60	3,34	3,33	2,78
Moda	1.009,75	1.010,08	1.011,91	1.012,96	1.011,36
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	9	0	0	14
Valores atípicos superiores	17	13	16	16	2
Extremos superiores	0	0	30	30	0



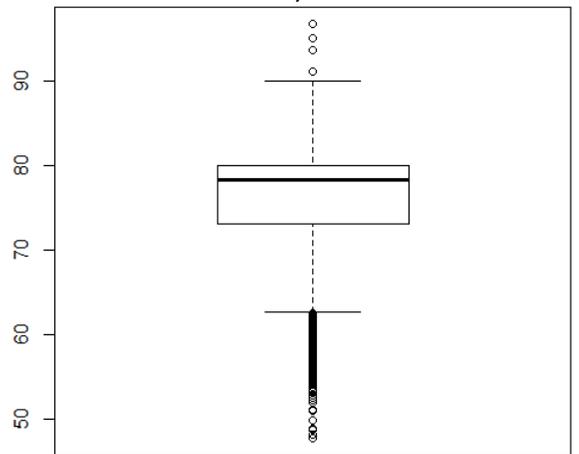
a)



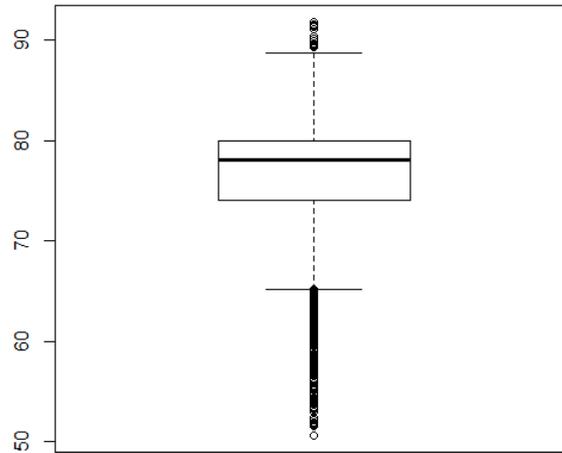
b)



c)



d)

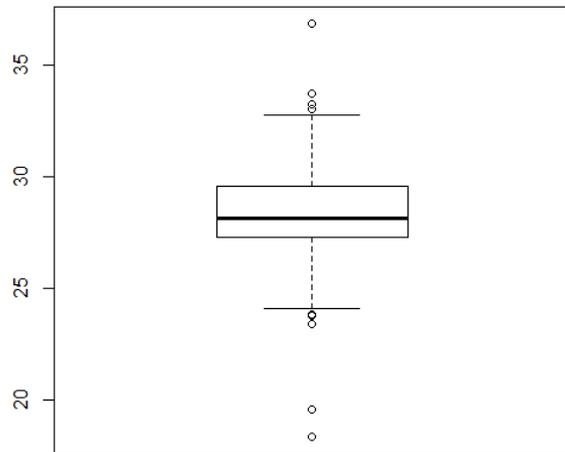


e)

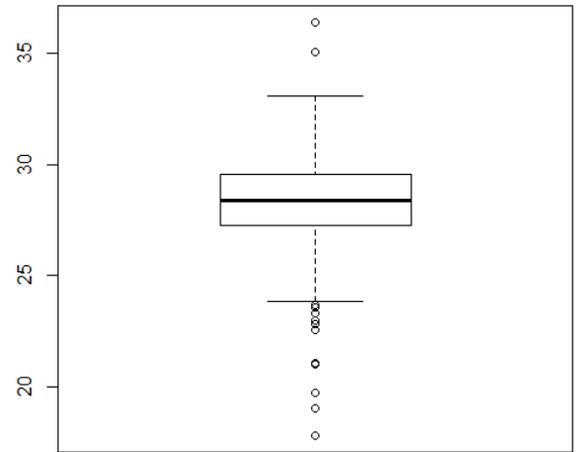
Ilustración 50 – Diagrama de caja (boxplot) de la humedad relativa [%] 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 19 – Estadística descriptiva de los datos validados de la humedad relativa – 2015

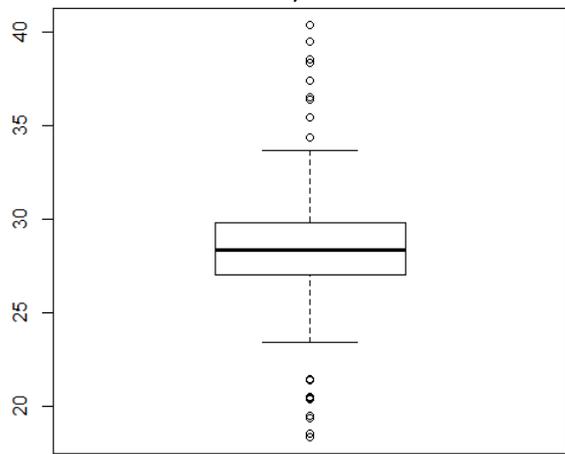
	<i>Base2015</i>	<i>Bocana2015</i>	<i>Cardique2015</i>	<i>Policia2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	4006	4243	4004	4002	4238
Media	70,19	70,48	75,42	76,23	76,34
Varianza simple	463,59	453,19	51,68	50,14	43,04
Desviación estándar	21,53	21,29	7,19	7,08	6,56
Mínimo	1,2	0,7	46,73	47,78	50,66
Máximo	90,8577583	93,7	95,7	96,75	91,78
Rango	89,6577583	93	48,97	48,97	41,12
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	27,99	28,75	61,33	62,35	63,48
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	112,39	112,20	89,51	90,11	89,20
Margen de error	42,20	41,72	14,09	13,88	12,86
1st cuartil	72,12	72,29	72,06	73,10	74,06
Mediana	78,00	78,00	78,00	78,32	78,07
3rd cuartil	80,00	80,00	80,00	80,06	80,00
Intercuartil Rango	7,88	7,71	7,94	6,97	5,94
Moda	79,00	80,00	78,00	80,00	78,00
Extremos inferiores	360	373	4	10	50
Valores atípicos inferiores	68	73	208	272	313
Valores atípicos superiores	0	3	3	4	15
Extremos superiores	0	0	0	0	0



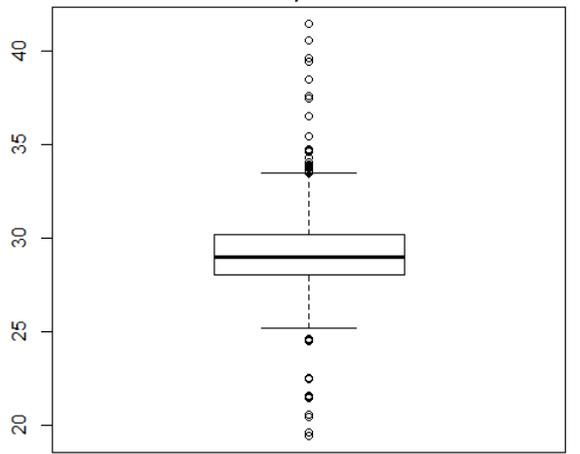
a)



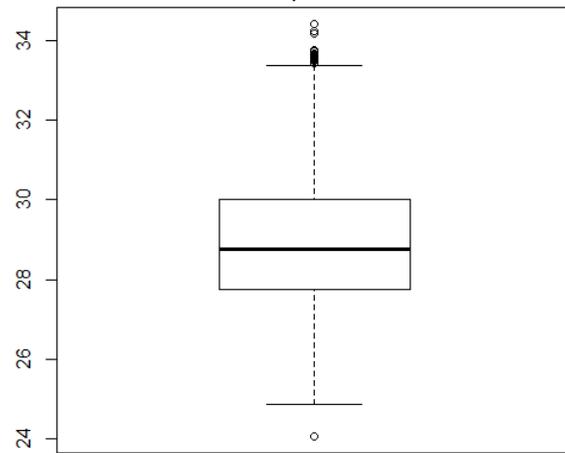
b)



c)



d)



e)

Ilustración 51 – Diagrama de caja (boxplot) de la temperatura [°C] 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 20 – Estadística descriptiva de los datos validados de la temperatura – 2015

	<i>Base2015</i>	<i>Bocana2015</i>	<i>Cardique2015</i>	<i>Policia2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	4006	4243	4004	4002	4238
Media	28,36	28,34	28,39	29,20	28,77
Varianza simple	2,29	2,67	3,30	3,21	2,36
Desviación estándar	1,51	1,63	1,82	1,79	1,54
Mínimo	18,35	17,85	18,38	19,43	24,08
Máximo	36,87	36,37	40,39	41,44	34,41
Rango	18,52	18,52	22,01	22,01	10,33
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	25,40	25,14	24,83	25,68	25,76
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	31,33	31,55	31,95	32,71	31,78
Margen de error	2,96	3,20	3,56	3,51	3,01
1st cuartil	27,28	27,26	27,06	28,00	27,76
Mediana	28,13	28,37	28,37	29,00	28,76
3rd cuartil	29,55	29,58	29,80	30,18	30,00
Intercuartil Rango	2,27	2,32	2,74	2,18	2,24
Moda	30,00	29,00	28,00	29,00	28,00
Extremos inferiores	2	4	2	4	0
Valores atípicos inferiores	3	10	8	11	1
Valores atípicos superiores	3	3	9	19	19
Extremos superiores	1	0	4	9	0

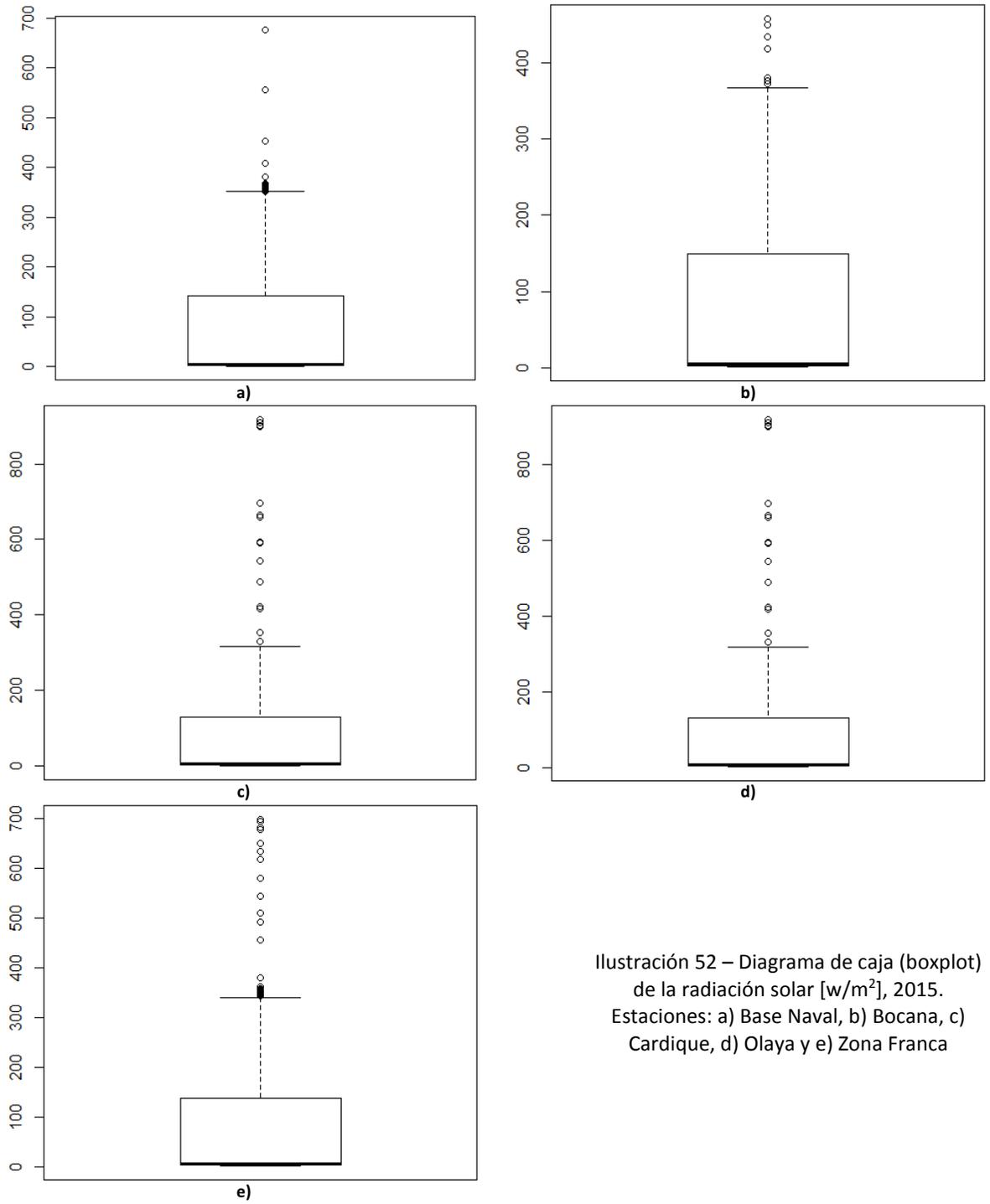


Ilustración 52 – Diagrama de caja (boxplot) de la radiación solar [w/m^2], 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 21 – Estadística descriptiva de los datos validados de la radiación solar – 2015

	<i>Base2015</i>	<i>Bocana2015</i>	<i>Cardique2015</i>	<i>Policia2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	4006	4243	4004	4002	4238
Media	78,02	78,96	72,75	73,81	76,25
Varianza simple	10.983,22	11.163,84	10.407,63	10.412,52	10.645,24
Desviación estándar	104,80	105,66	102,02	102,04	103,18
Mínimo	1,44	1,57	1,217970417	2,27	2,04
Máximo	675,97	457,67	917,18	918,23	698,45
Rango	674,53	456,1	915,9620296	915,96	696,41
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	-127,39	-128,13	-127,20	-126,19	-125,97
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	283,42	286,05	272,70	273,81	278,47
Margen de error	205,41	207,09	199,95	200,00	202,22
1st cuartil	2,65	2,19	1,75	2,80	2,78
Mediana	4,76	5,27	5,60	6,65	5,29
3rd cuartil	142,59	148,83	130,41	131,46	137,57
Intercuartil Rango	139,94	146,64	128,66	128,66	134,79
Moda	2,65	2,15	1,63	2,73	2,37
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	35	7	5	5	20
Extremos superiores	1	0	11	11	10

9.2.1 Diagramas de caja: concentraciones 2014

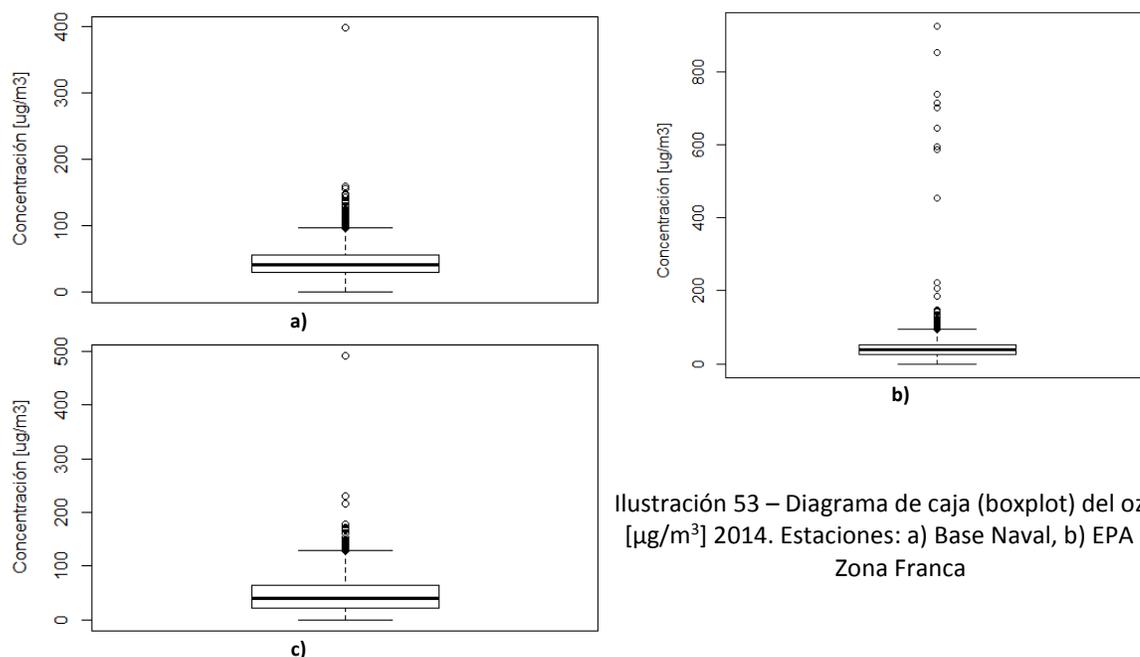


Ilustración 53 – Diagrama de caja (boxplot) del ozono [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) EPA y c) Zona Franca

Tabla 22 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de ozono – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>EPA2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	7282	6498	6591
Media	43,783129	41,51	44,567841
Varianza simple	500,571832	1.094,74	944,957292
Desviación estándar	22,373463	33,09	30,740158
Mínimo	0,05374702	0	0
Máximo	398,334595	923,764934	491,702447
Rango	398,280848	923,764934	491,702447
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	-0,068052	-23,34	-15,681761
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	87,634310	106,36	104,817443
Margen de error	43,851181	64,85	60,249602
1st cuartil	28,627563	25,41	21,474495
Mediana	40,709544	39,57	40,141805
3rd cuartil	56,054800	53,15	64,452305
Intercuartil Rango	27,427237	27,74	42,977810
Moda	#N/A	#N/A	#N/A
Extremos inferiores	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0
Valores atípicos superiores	158	88	56
Extremos superiores	7	15	3

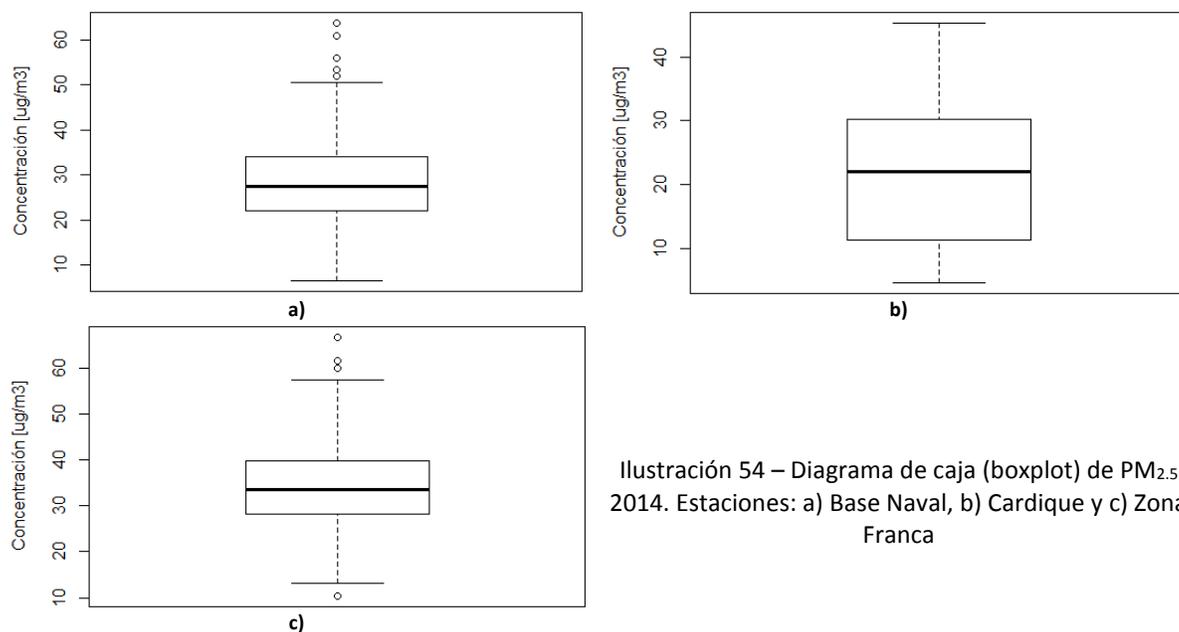
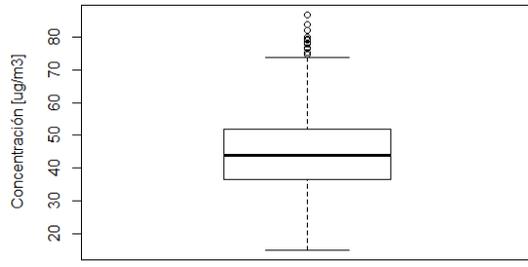


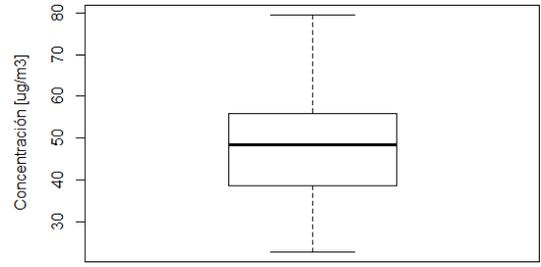
Ilustración 54 – Diagrama de caja (boxplot) de PM_{2.5} 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Cardique y c) Zona Franca

Tabla 23 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM_{2.5} – 2014

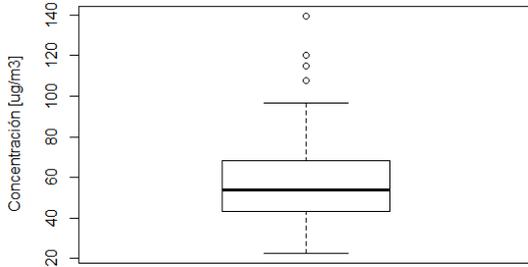
	<i>Base2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	365	67	365
Media	28,427696	21,3379	34,224399
Varianza simple	81,149785	109,8408	79,683255
Desviación estándar	9,008318	10,4805	8,926548
Mínimo	6,59059253	4,59	10,3798182
Máximo	63,6864923	45,34	66,6120617
Rango	57,0958998	40,75	56,2322435
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	10,771718	0,7965	16,728687
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	46,083674	41,8793	51,720111
Margen de error	17,655978	20,5414	17,495712
1st cuartil	22,180199	11,2250	28,212366
Mediana	27,499232	22,0800	33,522278
3rd cuartil	33,944224	30,2050	39,852983
Intercuartil Rango	11,764025	18,9800	11,640618
Moda	#N/A	5,2400	#N/A
Extremos inferiores	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	1
Valores atípicos superiores	5	0	3
Extremos superiores	0	0	0



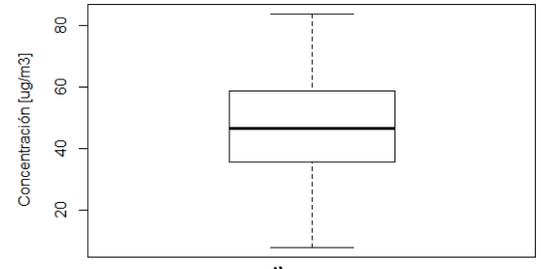
a)



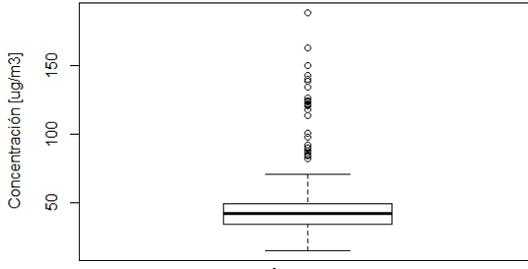
b)



c)



d)



e)

Ilustración 55 – Diagrama de caja (boxplot) de PM₁₀ 2014. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Cardique, d) Olaya y e) Zona Franca

Tabla 24 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM₁₀ – 2014

	<i>Base2014</i>	<i>Bocana2014</i>	<i>Cardique2014</i>	<i>Policia2014</i>	<i>Zona2014</i>
Datos	364	114	114	114	365
Media	44,991849	47,8081	57,5639	46,6525	45,276231
Varianza simple	169,291693	143,5925	431,1048	260,4070	536,945251
Desviación estándar	13,011214	11,9830	20,7631	16,1371	23,172079
Mínimo	14,8713317	22,7	22,7	7,88	14,6804835
Máximo	86,8298314	79,55	139,43	83,65	189,093952
Rango	71,9584997	56,85	116,73	75,77	174,413468
Intervalo de tolerancia del 95,%, menor	19,490338	24,3218	16,8690	15,0243	-0,140210
Intervalo de tolerancia del 95,%, mayor	70,493360	71,2943	98,2587	78,2807	90,692671
Margen de error	25,501511	23,4863	40,6949	31,6282	45,416441
1st cuartil	36,546672	38,4950	43,5300	35,7100	33,764454
Mediana	43,811851	48,4100	53,7800	46,6500	41,557938
3rd cuartil	51,779081	55,7500	68,2100	58,6225	49,313557
Intercuartil Rango	15,232408	17,2550	24,6800	22,9125	15,549104
Moda	#N/A	38,6000	34,7700	38,6900	50,526790
Extremos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	12	0	4	0	7
Extremos superiores	0	0	0	0	17

9.2.2 Diagramas de caja: concentraciones 2015

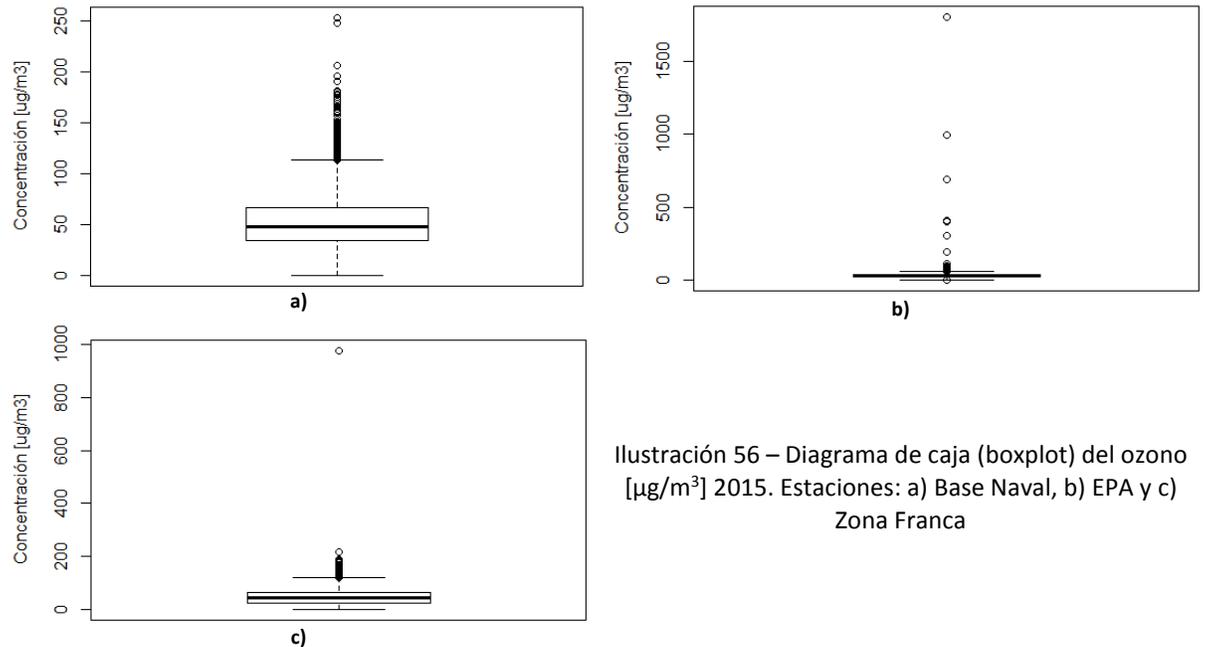


Ilustración 56 – Diagrama de caja (boxplot) del ozono [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) EPA y c) Zona Franca

Tabla 25 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de ozono – 2015

	<i>Base2015</i>	<i>EPA2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	8760	8760	8760
Media	51,756679	32,192811	46,138472
Varianza simple	658,806322	727,514806	910,391246
Desviación estándar	25,667223	26,972482	30,172690
Mínimo	0	0,04280076	0
Máximo	253,50205	1804,66349	977,642967
Rango	253,50205	1804,62069	977,642967
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	1,449847	-20,672283	-12,998915
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	102,063511	85,057905	105,275858
Margen de error	50,306832	52,865094	59,137386
1st cuartil	34,344174	23,945366	25,148990
Mediana	48,248239	31,469854	43,967755
3rd cuartil	66,128229	38,532391	63,618727
Intercuartil Rango	31,784055	14,587025	38,469737
Moda	0,000000	32,252396	#N/A
Extremos inferiores	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	23	0
Valores atípicos superiores	158	80	95
Extremos superiores	18	12	6

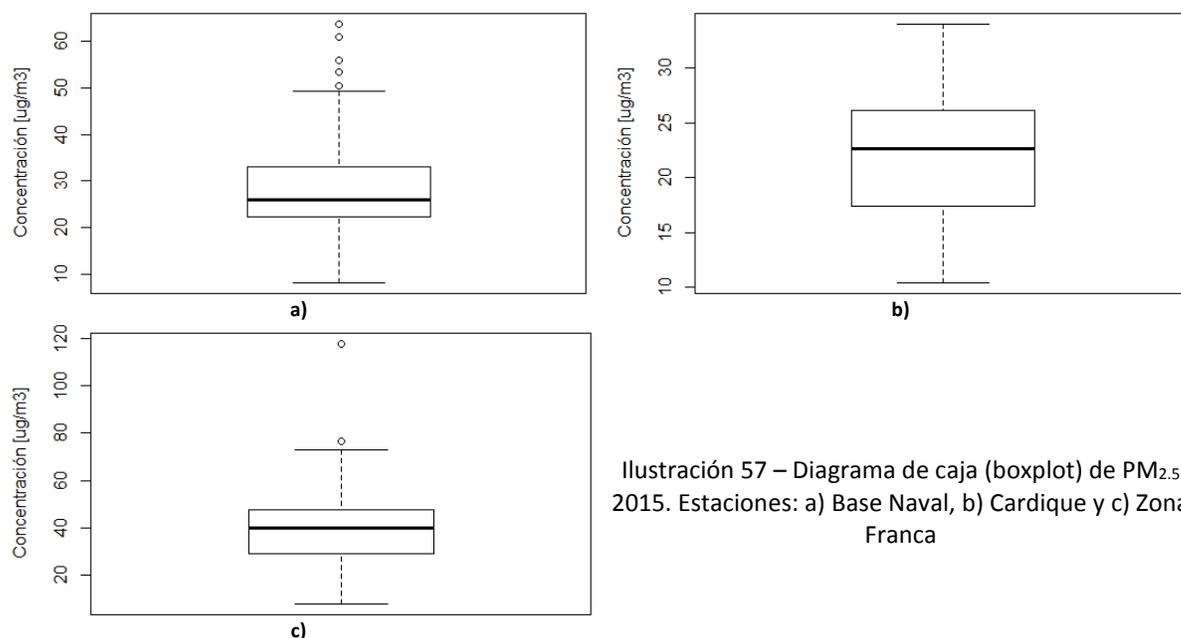


Ilustración 57 – Diagrama de caja (boxplot) de PM_{2.5} 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Cardique y c) Zona Franca

Tabla 26 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM_{2.5} – 2015

	<i>Base2015</i>	<i>Cardique2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	365	117	362
Media	27,689553	22,2388	39,014087
Varianza simple	69,394845	30,5223	182,800802
Desviación estándar	8,330357	5,5247	13,520385
Mínimo	8,19612448	10,41	7,99404143
Máximo	63,6864923	34	117,718712
Rango	55,4903678	23,59	109,72467
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	11,362353	11,4106	12,514620
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	44,016752	33,0670	65,513554
Margen de error	16,327199	10,8282	26,499467
1st cuartil	22,236879	17,4100	29,103116
Mediana	26,056591	22,5900	39,779937
3rd cuartil	33,070022	26,1400	47,736922
Intercuartil Rango	10,833143	8,7300	18,633806
Moda	#N/A	24,2200	#N/A
Extremos inferiores	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0
Valores atípicos superiores	5	0	1
Extremos superiores	0	0	1

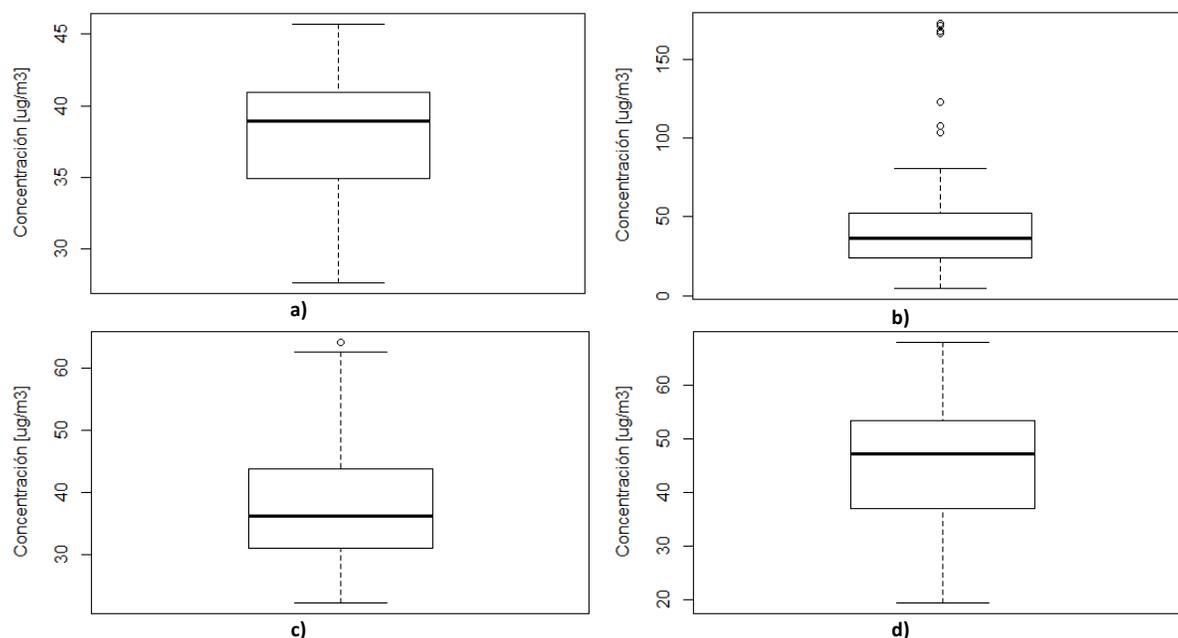


Ilustración 58 – Diagrama de caja (boxplot) de PM₁₀ 2015. Estaciones: a) Base Naval, b) Bocana, c) Olaya y d) Zona Franca

Tabla 27 – Estadística descriptiva de los datos validados de concentración de PM₁₀ – 2015

	<i>Base2015</i>	<i>Bocana2015</i>	<i>Policia2015</i>	<i>Zona2015</i>
Datos	174	116	32	365
Media	37,684999	44,2921	38,4919	44,713005
Varianza simple	19,382885	1.128,9661	118,6948	129,797332
Desviación estándar	4,402600	33,6001	10,8947	11,392863
Mínimo	27,6712595	4,8	22,36	19,341592
Máximo	45,6875618	172,66	64,1	67,999139
Rango	18,0163022	167,86	41,74	48,657547
Intervalo de tolerancia del 95%, menor	29,056062	-21,5629	17,1386	22,383404
Intervalo de tolerancia del 95%, mayor	46,313936	110,1470	59,8451	67,042607
Margen de error	8,628937	65,8550	21,3532	22,329602
1st cuartil	34,908023	23,8850	31,2175	36,866217
Mediana	38,954771	36,7700	36,2350	47,171177
3rd cuartil	40,940228	52,4825	43,6650	53,377623
Intercuartil Rango	6,032205	28,5975	12,4475	16,511406
Moda	#N/A	33,5700	#N/A	#N/A
Extremos inferiores	0	0	0	0
Valores atípicos inferiores	0	0	0	0
Valores atípicos superiores	0	3	2	0
Extremos superiores	0	5	0	0