

Proyecto Fin de Máster Ingeniería Ambiental

Evaluación de la calidad del aire en Salvador, Brasil

Autor: Mirella Calasans Souza

Tutor: Dra. Carmen Arnáiz Franco

**Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Ambiental

Evaluación de la calidad del aire en Salvador, Brasil

Autor:

Mirella Calasans Souza

Tutor:

Dra. Carmen Arnáiz Franco

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación de la calidad del aire en Salvador, Brasil

Autor: Mirella Calasans Souza

Tutor: Dra. Carmen Arnáiz Franco

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis amigos

Agradecimientos

Agradezco a Dios en primer lugar por permitir todas las condiciones necesarias para la realización de este trabajo.

Sin lugar a dudas, me siento privilegiada por la guía de la profesora Carmen Arnaiz, quien desde el primer contacto mantuvo viva la llama del entusiasmo en mí, alimentada constantemente por la fuente de inspiración de su magnífica persona y admirable vida académica.

Tengo innumerables razones para agradecer también la contribución incomparable de muchos al logro de esta difícil tarea. Así que gracias especialmente:

A mi familia por entender la distancia durante un año para hacer este trabajo y por apoyarme siempre en la búsqueda de mis sueños.

A mis colegas del máster, en particular a Luciana, Pablo y María Luisa, por su constante aliento, comprensión y por hacer que mi tiempo en Sevilla fuera único. Fue un privilegio compartir con ustedes todas estas experiencias.

A los representantes de CETREL por su comprensión y atención en todas las etapas de la recopilación de datos que hicieron este trabajo posible.

A los amigos que me escuchan atentamente en todos los momentos de angustia y celebran cada pequeña victoria lograda con este trabajo.

Resumen

La ciudad de Salvador (Brasil) se encuentra en un período de crecimientos poblacional y económico acompañado de una expansión industrial, promovida por su ubicación estratégica en el sector logístico. Sin embargo, el desarrollo de estos grandes centros industriales, el crecimiento demográfico desenfrenado y el aumento de la circulación de vehículos, sin una planificación adecuada, expone a la población a altos niveles de contaminación del aire. A partir de este problema, el objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del aire actual de la región y verificar la contribución de las fuentes industriales y móviles a los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos en el lugar. Salvador tiene 8 estaciones de medición distribuidas en la ciudad que se utilizan para monitoreo y estudios sobre la calidad del aire. Los contaminantes analizados, que sirven como indicadores de la calidad del aire son: dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3) y material particulado (PM_{10}).

Abstract

The city of Salvador (Brazil) is in a period of population and economic growth accompanied by an industrial expansion, promoted by its strategic location in the logistics sector. However, the development of these large industrial centers, unbridled population growth and increased vehicle circulation, without proper planning, exposes the population to high levels of air pollution. From this problem, the objective of this work is to evaluate the current air quality of the region and verify the contribution of industrial and mobile sources to the concentration levels of air pollutants in the place. Salvador has 8 measuring stations distributed in Salvador that are used for monitoring and studies on air quality. The pollutants analyzed, which serve as indicators of air quality are: nitrogen dioxide (NO₂), carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO₂), ozone (O₃) and particulate material (PM₁₀).

Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	14
2.	OBJETIVOS.....	16
	2.1 Objetivo general.....	16
	2.2 Objetivos específicos.....	16
3.	CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA	17
	3.1 Principales contaminantes del aire.....	18
4.	LEGISLACIÓN	22
	4.1 Legislación brasileña aplicable a la calidad del aire.....	22
5.	METODOLOGÍA.....	27
	5.1 Área de estudio.....	27
	5.2 Dispersión de contaminantes.....	29
	5.2.1. Factores meteorológicos: estabilidad vertical de la atmosfera y viento.....	30
	5.2.2. Efecto de la topografía y los edificios.....	32
	5.3 Red de monitoreo.....	33
	5.4 Analizadores y método de detección.....	36
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
	6.1 Calidad del aire en Salvador.....	38
	6.2 Comparación con la calidad del aire en América Latina	62
	6.3 Comparación con la calidad del aire en China.....	65
7.	CONCLUSIONES.....	67
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	69

Índice de Tablas

Tabla 01 - Estándares nacionales de calidad del aire (Resolución CONAMA n° 03/90)

Tabla 02 - Rangos de concentraciones de los contaminantes para el cálculo del IQA

Tabla 03 - Cantidad de vehículos por tipo en Salvador

Tabla 04 - Movimientos anuales totales en el aeropuerto de Salvador

Tabla 05 - Coordenadas y altitudes de las estaciones de monitoreo

Tabla 06 - Analizadores y métodos de detección

Tabla 07 - Normas nacionales para la calidad del aire en países de América y guías globales de la OMS y Unión Europea (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Índice de Figuras

- Figura 01 - Ubicación de la ciudad de Salvador de Bahía
- Figura 02 - Tiempo en Salvador
- Figura 03 - Topografía de Salvador
- Figura 04 - Proceso de monitoreo del aire
- Figura 05 - Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la región
- Figura 06 - Estación de monitoreo del aire en la avenida ACM
- Figura 07 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en la Av. ACM
- Figura 08 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en la Av. ACM
- Figura 09 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en la Av. ACM
- Figura 10 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en la Av. Barros Reis
- Figura 11 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en la Av. Barros Reis
- Figura 12 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en la Av. Barros Reis
- Figura 13 - Estación de monitoreo en Campo Grande
- Figura 14 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Campo Grande
- Figura 15 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Campo Grande
- Figura 16 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Campo Grande
- Figura 17 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Dique do Tororó
- Figura 18 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Dique do Tororó
- Figura 19 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Dique do Tororó
- Figura 20 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Itaigara
- Figura 21 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Itaigara
- Figura 22 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Itaigara
- Figura 23 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en la Av. Paralela
- Figura 24 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en la Av. Paralela
- Figura 25 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en la Av. Paralela
- Figura 26 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Pirajá
- Figura 27 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Pirajá
- Figura 28 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Pirajá
- Figura 29 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Rio Vermelho
- Figura 30 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Rio Vermelho
- Figura 31 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Rio Vermelho
- Figura 32 - Niveles de inmisión de NO₂ (ppb) del día 31 de Enero de 2014
- Figura 33 - Niveles de inmisión de SO₂ (ppb) y CO (ppm) del día 31 de Enero de 2014

Figura 34 - Niveles de PM_{10} del día 31 de Enero de 2014

Figura 35 - Niveles de lluvia del día 31 de Enero de 2014

Figura 36 - Velocidad del viento del día 31 de Enero de 2014

Figura 37 - Niveles de inmisión de SO_2 (ppb) y CO (ppm) del día 31 de Enero de 2014

Figura 38 - Niveles de inmisión de NO_2 (ppb) del día 31 de Enero de 2014

Figura 39 - Temperatura en Salvador día 31 de Enero de 2014

Figura 40 - Rede de monitoreo en México

Figura 41 - Rede de monitoreo en Chile

Figura 42 - Rede de monitoreo en China

Notación

ACM: Antônio Carlos Magalhães

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

CONAMA: Consejo Nacional de Medio Ambiente

DECEA: Departamento de Control del Espacio Aéreo

EPA: Agencia de Protección Ambiental Americana

ESB: Empresa Ambiental del Estado de São Paulo

IBAMA: Instituto Brasileño de Medio Ambiente y Recursos Naturales Renovables

IBGE: Instituto Brasileño de Geografía y Estadística

INMET: Instituto Nacional de Meteorología

IQA: Índices de Calidad del Aire

H₂S: Gas sulfúrico

H₂SO₄: Ácido sulfúrico

H₂SO₃: Ácido sulfuroso

HSM: Hidrocarburos Sin Metano

NO₂: Dióxido de nitrógeno

NO_x: Óxidos de nitrógeno

O₃: Ozono

OMS: Organización Mundial de la Salud

PDA: Planes de Descontaminación Atmosférica

PDDU: Plan Maestro de Desarrollo Urbano

PRONAR: Programa Nacional de Control de Calidad del Aire

PQAR: Normas de Calidad del Aire

PST: Partículas Suspendidas Totales

RMS: Región Metropolitana de Salvador

SO₂: Dióxido de azufre

SO₃: Trióxido de azufre

1 INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera aire limpio como un requisito básico de salud y bienestar de la población. En el marco de la Constitución Federal Brasileña, todos tienen derecho al medio ambiente ecológicamente equilibrado, bien de uso común del pueblo y esencial a la sana calidad de vida (Art. 225, del Capítulo VI del Título VIII). Sin embargo, se observa que uno de los impactos más representativos en la sociedad actual es la alteración de la calidad del aire.

La contaminación atmosférica principalmente en las regiones urbanas, ha aumentado debido principalmente al creciente número de vehículos automotores en circulación. La baja calidad del aire urbano agrava los problemas relacionados con las condiciones de vida de la población, así como de las plantas y los animales que viven en las ciudades y sus alrededores. Por eso, el estudio de la calidad del aire es fundamental para la planificación urbana y para el establecimiento de políticas públicas que promuevan el desarrollo y la preservación de la salud de la población.

Los contaminantes generados por la combustión en vehículos automotores, como los gases de dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), partículas sólidas en suspensión, gotas de aceite expelidas por los motores y los metales son algunas de las causas de la baja calidad del aire en las grandes ciudades. Estos contaminantes provienen de varias fuentes emisoras, algunos emitidos directamente por los vehículos, otros, como el ozono (O_3), formados indirectamente a través de reacciones fotoquímicas de estos contaminantes en la atmósfera.

La contaminación atmosférica ha sido uno de los principales temas de interés en el medio científico, teniendo en cuenta su implicación en la calidad de la salud humana, de los ecosistemas y de los bienes construidos, identificándose con una dimensión fundamental en la búsqueda del desarrollo sostenible. No es fácil establecer una relación directa entre ciertos contaminantes y los efectos que puede tener sobre el medio ambiente. La dispersión del contaminante en el aire, la distancia

que alcanza su concentración y el tiempo de exposición son algunos factores que influyen directamente en los impactos. La contaminación del aire puede provocar impactos locales, regionales y globales (MOTA, 2000). Por eso es tan importante la evaluación de la calidad del aire en una región.

Monitorear el aire es observar continuamente las concentraciones en la atmósfera de cualquier contaminante que afecte la calidad del aire. En este sentido, el objetivo de la red de monitoreo de la calidad del aire es evaluar continuamente las características que hacen del aire un ambiente propicio al ser humano y al medio ambiente en general, posibilitando observación de las emisiones relativas a las fuentes fijas y móviles. Y esta depende de la obtención de datos fiables que describen las condiciones ambientales existentes y sean representativos.

Con base en estas afirmaciones, Salvador instaló una Red de Monitoreo para la Calidad del Aire para la Región Metropolitana de Salvador (RMS), de acuerdo con los estándares establecidos por la resolución CONAMA 003/90. La red contiene ocho estaciones que monitorean NO_2 , CO , SO_2 , O_3 y PM_{10} .

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo General

Evaluar la contaminación atmosférica en la ciudad de Salvador (Brasil) y sus efectos.

2.2 Objetivos Específicos

Identificar las regiones de Salvador con las tasas de contaminación más altas.

Investigar la contribución de los vehículos como fuente contaminante de aire atmosférico en la capital bahiana.

Demostrar cómo el relieve, el viento, la temperatura, la humedad y la lluvia pueden interferir con la dispersión de contaminantes.

Comparar con la calidad del aire en otros países.

Identificar los episodios de alta contaminación.

3 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación del aire es hoy en día un tema ampliamente discutido en todo el mundo, debido a la relevancia del tema. Ella se caracteriza por la presencia de sustancias indeseables en el aire en cantidades que pueden suponer un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Según la OMS (2005), la contaminación del aire puede definirse como la introducción de cualquier forma de materia o energía responsable de la degradación de la calidad del aire en concentraciones perjudiciales u ofensivas para la salud humana, que pueden dañar los recursos naturales que interfieren con el uso legítimo del medio ambiente.

Estas sustancias pueden ser el resultado de la actividad humana o procesos naturales. Algunos ejemplos de fuentes naturales de contaminación del aire son la quema accidental de biomasa o las erupciones volcánicas, que pueden considerarse las fuentes más antiguas de contaminación del aire. Las fuentes antropogénicas de contaminación atmosférica son diversas, entre ellas la quema de combustibles fósiles para la producción de energía (CANÇADO y col., 2006). Los combustibles fósiles utilizados por los humanos para diversos fines energéticos, como la generación de electricidad, el transporte y las industrias, han sido una causa importante de daños ambientales (MENDES, 2004).

Los contaminantes del aire pueden originarse en fuentes fijas o móviles. Un ejemplo de fuente fija son las industrias, fuentes estacionarias más importantes o potencialmente contaminantes. También hay fuentes fijas naturales, como el mar y los volcanes, que también pueden influir, en menos intensidad, en la calidad del aire. Los vehículos de motor, principales fuentes contaminantes, junto con los trenes, aviones y embarcaciones marinas, son las llamadas fuentes móviles de contaminantes del aire.

La dispersión atmosférica de contaminantes es una función de un conjunto de parámetros meteorológicos y topográficos que actúan simultáneamente para aumentar o reducir los niveles de contaminación en una región determinada (LYRA; TOMAZ, 2006). En general, la atmósfera misma dispersa el contaminante, mezclándolo eficientemente en un gran volumen de aire. La velocidad y la dirección del viento, así

como la estratificación térmica vertical son los principales parámetros que interfiere en la contaminación atmosférica.

Al hacer el monitoreo de la calidad del aire primero se determina la concentración de un contaminante en la atmósfera y después se mide el grado de exposición de los receptores (humanos, otros animales, plantas) como el resultado final del proceso de liberación de este contaminante a la atmósfera desde sus fuentes de emisión y sus interacciones en la atmósfera desde el punto de vista físico (dilución) y químico (reacciones químicas) (CETESB, 2010).

3.1 Principales contaminantes del aire

El monitoreo de la calidad del aire, por razones prácticas, se lleva a cabo a través de una serie de contaminantes seleccionados de acuerdo con la frecuencia con la que se observan y los efectos sobre la salud de la población y el equilibrio ambiental. Los contaminantes generalmente seleccionados para el monitoreo de la calidad del aire son: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y material particulado - PM₁₀.

Las fuentes de los diversos contaminantes, así como los efectos que cada contaminante causa, son bastante diferentes. Estas diferencias comienzan temprano, en su generación como contaminantes primarios y secundarios. El material particulado, por ejemplo, es producido principalmente por el tráfico, las obras de construcción y el sector industrial (cemento, productos químicos y refinerías).

- Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono resulta de la combustión incompleta de materiales ricos en carbono. Su nivel de concentración en grandes áreas urbanas está fuertemente relacionado con el volumen de tráfico. Sin embargo, los procesos industriales, la quema agrícola y los incendios forestales también son fuentes importantes de emisión de este contaminante.

El monóxido de carbono puede considerarse como antimetabólico del oxígeno. Por lo tanto, cuando se aspira al nivel del alveolo pulmonar, se combina irreversiblemente con la hemoglobina para formar carboxihemoglobina, lo que resulta en una capacidad

reducida de transporte de oxígeno en la sangre. Por lo tanto, las personas sometidas a altas concentraciones de monóxido de carbono pueden experimentar problemas de percepción, dolor de cabeza, somnolencia, náuseas y ataques cardíacos.

- Dióxido de azufre (SO₂)

El azufre representa una de las principales impurezas en la gasolina, el diesel y el carbón. La quema de estos combustibles produce dióxido de azufre, un óxido ácido irritante y tóxico para los humanos. Una vez liberado a la atmósfera, el dióxido de azufre se oxida a H₂SO₃. Cuando entra en contacto con la humedad atmosférica, genera H₂SO₄, que contribuye considerablemente a la lluvia ácida.

La inhalación de dióxido de azufre, incluso a concentraciones muy bajas, causa espasmos transitorios de los músculos lisos de los bronquios pulmonares. A concentraciones más altas, provoca un aumento de la secreción mucosa en el tracto respiratorio superior, inflamación severa de la mucosa y reducción del movimiento ciliar del tracto respiratorio, que es responsable de eliminar el moco y las partículas extrañas.

En el medio ambiente, el dióxido de azufre reduce la visibilidad y, como uno de los principales contribuyentes al fenómeno de la lluvia ácida, puede causar daños a los materiales, la vegetación, el suelo y la vida acuática en los lagos.

- Óxidos de nitrógeno (NO_x)

El óxido nítrico (NO) se produce en cualquier proceso de combustión. Este gas se introduce en la atmósfera mediante la operación de equipos tales como motores de combustión interna, hornos, calderas, invernaderos, incineradores y las industrias químicas.

Los óxidos de nitrógeno son extremadamente reactivos. El óxido nítrico en presencia de oxígeno, ozono e hidrocarburos se transforma en dióxido de nitrógeno (NO₂). A su vez, el dióxido de nitrógeno, en presencia de la luz solar, reacciona con hidrocarburos y oxígeno para formar ozono. El dióxido de nitrógeno es, por lo tanto, uno de los principales precursores del ozono en la troposfera.

El dióxido de nitrógeno es altamente tóxico, de color marrón rojizo, tiene un olor y sabor desagradables, es muy irritante para los ojos y las membranas mucosas

nasales, y puede causar enfisema pulmonar o convertirse en sustancias cancerígenas en el pulmón. Este contaminante puede estar asociado con una mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias y otros problemas respiratorios en general. Reacciona con el agua en el aire, formando otro componente importante de la lluvia ácida, el ácido nítrico.

- Ozono (O₃)

El ozono es un gas que, en condiciones naturales, está presente en las capas superiores de la atmósfera, donde tiene la importante función ecológica de absorber la radiación ultravioleta del sol y, en consecuencia, reducir sus efectos en la superficie de la Tierra. Por otro lado, en la atmósfera inferior, la troposfera, incluso en concentraciones relativamente pequeñas, el ozono ejerce una acción nociva sobre materiales, plantas, animales y el hombre.

El ozono troposférico es un gas contaminante secundario formado por diferentes mecanismos de reacciones fotoquímicas entre contaminantes primarios, principalmente óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. Los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles se combinan químicamente con el oxígeno para formar ozono durante los días soleados de alta temperatura debido a la alta incidencia de radiación solar. En general, la formación de altas concentraciones de ozono ocurre en la tarde. Por la noche, sin embargo, hay una reducción significativa.

El ozono troposférico es uno de los contaminantes que más contribuye a la degradación de la calidad del aire en los grandes centros urbanos. El efecto más drástico sobre la salud humana ocurre en el tracto respiratorio, y la extensión de los efectos depende de la concentración y la duración de la exposición. En el medio ambiente, el ozono contribuye a disminuir la visibilidad, reduce la eficiencia de la fotosíntesis y daña las pinturas, telas y gomas.

- Material Particulado

La materia particulada está compuesta de partículas de material sólido o líquido que están suspendidas en el aire en forma de polvo, niebla, humo, hollín y otras de dimensiones menores a 10 micrómetros. Las principales fuentes antropogénicas de partículas son la combustión: en la generación de vapor, el uso de vehículos, la calefacción del hogar; procesos industriales, especialmente industrias de cemento, y

procesos metalúrgicos. Las emisiones también contribuyen al desgaste de neumáticos y frenos de vehículos en general y a las quemaduras en actividades agrícolas y mineras. El material particulado se puede utilizar como medio de transporte para sustancias como metales e hidrocarburos, que se agregan a otras partículas (QUITERIO, 2003).

La salud humana puede verse comprometida por las partículas de muchas maneras, ya que el grado de penetración de partículas en el tracto respiratorio superior depende de su tamaño y su velocidad de penetración. La materia particulada se puede clasificar como: partículas suspendidas totales (PST) y partículas inhalables (PM_{10}).

Estas partículas pueden presentar una composición química variada de acuerdo con las fuentes emisoras existentes, influyendo su grado de toxicidad, lo que puede acarrear sus efectos en mayor o menor grado a la salud. De acuerdo con datos analizados de la OMS, la contaminación del aire, en ambiente externo e interno, es responsable de 7 millones de muertes en todo el mundo.

4 LEGISLACIÓN

El monitoreo del aire es el resultado de los procedimientos de muestreo y análisis de los contaminantes atmosféricos. Los contaminantes atmosféricos importantes que se monitorean comúnmente son: SO₂, CO, PST, PM₁₀, ozono y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos contaminantes son conocidos como contaminantes criterio, para los cuales existen normas de calidad del aire. La finalidad de las normas es proteger la salud humana (normas primarias), así como el bienestar del ser humano y los ecosistemas (normas secundarias). Los hidrocarburos sin metano (HSM) también son contaminantes atmosféricos importantes por sus potenciales efectos en la salud y por ser, junto con NO_x, los precursores del ozono.

4.1 Legislación brasileña aplicable a la calidad del aire

El primer intento a nivel nacional de establecer el control sobre las emisiones de contaminantes aéreos se dio a partir de la edición de la Ordenanza n° 231 de 27 de abril de 1976 del Ministerio del Interior. En esta orden se establecieron niveles de concentración máximos permitidos a través de patrones de emisión, con el objetivo de proteger a la población y crear metas que darían orientación a los planes regionales de control de la contaminación del aire. Estos patrones fueron traídos de la legislación estadounidense (hasta entonces la más desarrollada a nivel mundial), y débilmente adaptadas a la realidad brasileña (SANTOS, 1996).

En el año 1989, se instituyó el PRONAR - Programa Nacional de Control de la Calidad del Aire, a partir de la resolución CONAMA 05. Con la institución del PRONAR el gobierno federal pretendió reducir los efectos ambientales negativos de la contaminación atmosférica a nivel nacional, principalmente en las regiones metropolitanas. La estrategia básica del programa era limitar a nivel nacional las emisiones por tipología de fuentes y contaminantes prioritarios, reservando el uso de los estándares de calidad del aire como acción complementaria de control (CONAMA, 1989). Es decir, los estándares de calidad serán objetivo a ser alcanzado mediante estrategia fijada por el patrón de emisión en las fuentes (SANTOS, 1996). Estos instrumentos se definieron mejor en las Resoluciones CONAMA siguientes.

Por medio de la Resolución CONAMA N° 03, de 28 de junio de 1990, el Instituto Brasileño de Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (IBAMA) estableció los estándares nacionales de calidad del aire y los respectivos métodos de referencia. Mientras que en la Resolución CONAMA N° 08, también de 1990, el IBAMA fijó patrones de emisión para fuentes fijas basadas en procesos de combustión externa, que constituyen el mayor contingente de fuentes contaminantes industriales a nivel nacional. En esta resolución, se fijan aún diferentes límites para plantas industriales por potencia total (SANTOS, 1996).

Un estándar de calidad del aire (PQAR) especifica legalmente el límite máximo para la concentración de un componente atmosférico que garantice la protección de la salud y del bienestar de la población, así como de la fauna, flora, materiales y el medio ambiente en general; y que la concentración máxima de un contaminante se determina en función de un período medio de tiempo (IEMA, 2007).

La resolución CONAMA N°03/90 presenta dos tipos de estándares de calidad del aire:

- a) Estándares Primarios: son las concentraciones de contaminantes presentes en el aire que, superados, pueden afectar a la salud. En estos, se incluye, un margen de seguridad para proteger a la población más sensible como niños, ancianos y personas con problemas respiratorios. Así, estos pueden ser entendidos como niveles máximos tolerables de concentración de contaminantes atmosféricos.

- b) Estándares Secundarios: son las concentraciones de contaminantes que provocan el mínimo efecto adverso sobre el bienestar de la población, así como el mínimo daño a la fauna, a la flora, a los materiales y al medio ambiente en general. De esta forma, estos, pueden ser entendidos como niveles deseados de concentración de contaminantes a largo plazo.

Por lo tanto, bajo el aspecto legal, los límites máximos para ciertos productos químicos en el aire se conocen como estándares de calidad del aire, que a su vez se definen a partir de estudios científicos sobre los efectos que pueden producir sobre la salud de la población. El objetivo del establecimiento de estándares es crear una base para una política de prevención de la degradación de la calidad del aire. Los estándares nacionales de calidad del aire regulados se presentan en la Tabla 01:

Tabla 01 - Estándares nacionales de calidad del aire (Resolución CONAMA n°03/90)

Contaminante	Tiempo de muestreo	Estándar primario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estándar secundario ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Método de medición
PM ₁₀	24 h	240	150	Muestreo de grandes volúmenes
	MGA	80	60	
Dióxido de azufre	24h	365	100	Pararosanilina
	MAA	80	40	
Dióxido de nitrógeno	24h	320	190	Quimioluminiscencia
	MAA	100	100	
Monóxido de carbono	24h	35 ppm	35 ppm	Infrarrojo no dispersivo
	8h	9 ppm	9 ppm	
Ozono	1h	160	160	Quimioluminiscencia

MGA = media geométrica anual

MAA = media aritmética anual

El rigor adoptado en estos estándares, en términos de vigilancia de la calidad del aire, es que el patrón medio anual no debe ser excedido ninguna vez y los patrones horarios no deben ser excedidos más que una vez al año.

Los índices de calidad del aire (IQA) son subdivisiones en bandas de concentración para cada contaminante y se clasifican por colores que indican los efectos que los contaminantes causan a la salud humana y el tiempo de exposición, subdividiendo a intervalos calculados por las medias móviles de las últimas 24h para los contaminantes PM₁₀ y SO₂, 1h para los contaminantes NO₂ y O₃ y 8h para el CO (IEMA, 2007).

La estructura del IQA se obtiene a través de una función lineal segmentada, donde los puntos de inflexión son los estándares de calidad del aire. De esta función, que relaciona la concentración del contaminante con el valor índice, resulta un número adimensional referido a una escala basada en estándares de calidad del aire. Para cada contaminante medido se calcula un índice. El desarrollo del IQA se basa en estudios hechos por la Agencia de Protección Ambiental Americana - EPA y se presentan en los informes "Pollutant Standards Index" EPA- 454/R-00-005. La relación entre el IQA y los efectos sobre la salud se presenta en la Tabla 02:

Tabla 02 - Rangos de concentraciones de los contaminantes para el cálculo del IQA. Fuente: CESTESB (2010)

Calidad	PM ₁₀ (µg / m ³)	Dióxido de azufre (µg / m ³)	Dióxido de nitrógeno (µg / m ³)	Monóxido de carbono (ppm)	Ozono (µg / m ³)	Significado
Buena	0-50	0-80	0-100	0-4,5	0-80	Prácticamente no hay riesgos para la salud.
Regular	>50-150	>80-365	>100-320	>4,5-9	>80-160	Personas de grupos sensibles* pueden presentar síntomas como tos seca y cansancio.
Inadecuada	>150-250	>365 -800	>320-1130	>9-15	>160-200	Toda la población puede presentar síntomas como cansancio, ardor en los ojos, nariz y garganta. Personas de grupos sensibles* pueden presentar efectos más graves en la salud.
Mala	>250-420	>800-1600	>1130-2260	>15-30	>200-800	Toda la población puede presentar agravamiento de los síntomas como tos seca, cansancio, ardor en los ojos, nariz y garganta y aún presentar falta de aire y respiración jadeante.
Muy mala	≥420	≥1600	≥2260	≥30	≥800	Toda la población puede presentar serios riesgos de manifestaciones de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Aumento de muertes prematuras en personas de grupos sensibles*.

* Grupos sensibles son niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias y cardíacas.

A partir de estos diversos índices, canales pueden ser puestos a disposición para la información, permitiendo al individuo planificar sus actividades diarias, tales como: actividades físicas al aire libre donde la calidad del aire sea más sana, evitando horarios de picos de contaminación; o monitorear la exposición de individuos susceptibles a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, si es necesario el uso de

máscaras. Espacios de divulgación científica han proporcionado orientaciones sobre la necesidad de acceso por medio de mensajes en sitios oficiales o dirigidos a grupos específicos que presentan vulnerabilidad en la exposición. La generación de datos locales en todo Brasil son cruciales para proporcionar informaciones que den soporte a la toma de decisiones en políticas públicas, así como la revisión para su implementación en regulaciones locales.

A pesar de las resoluciones, en Brasil, hay una limitación muy grande en la gestión de la calidad del aire: la falta de una Política Nacional de Calidad del Aire con responsabilidades, sanciones y fuentes de financiamiento definidas. Los órganos ambientales de muchos Estados y Municipios no poseen infraestructura y cuadro de personal adecuados para desarrollar acciones específicas frente a situaciones de contaminación, dada la escasez de recursos o capacidad técnica para el análisis. Esta es una limitación importante porque la gestión de la calidad del aire se realiza individualmente por los estados, en base a resoluciones frágiles para abordar un problema de esta dimensión.

Uno de los grandes desafíos para el sector público, en lo que se refiere a la gestión de riesgos y la implementación de los programas de vigilancia preconizados por el Ministerio de Salud en Brasil, es la elaboración de métodos capaces de reproducir realidades que puedan ser aplicadas a todo el territorio, ya que tecnologías de monitoreo de contaminantes atmosféricos no son accesibles para todas las comunidades.

Las políticas públicas locales deben contemplar la mitigación de riesgos a los que están expuestas su población. Para ello, la toma de decisiones debe ser sostenida por datos e indicadores locales que puedan disminuir las incertidumbres acerca de los riesgos potenciales. La caracterización del contaminante, la exposición a la salud humana y la comunicación de riesgos son etapas cruciales para el desarrollo de estos indicadores, ya que las condiciones ambientales, climáticas, sociales y económicas pueden diferir de una localidad a otra. Por eso, el monitoreo es tan importante.

5 METODOLOGÍA

5.1 Área de estudio

El estudio fue realizado en una ciudad de Brasil llamada Salvador. La ciudad es la capital del estado de Bahía y tiene una población estimada de 2.872.347 habitantes, según datos del IBGE (2018). Salvador es actualmente la cuarta ciudad más poblada de Brasil, está solo detrás de São Paulo, Río de Janeiro y Brasilia. La ciudad posee un área territorial de aproximadamente 693,8 km² y una densidad demográfica de 3.859,44 hab/km², conforme datos del IBGE (2010).



Figura 01 - Ubicación de la ciudad de salvador de Bahía. Fuente: Google Maps (2019)

La caracterización de la ciudad de Salvador de Bahía con respecto a las emisiones de fuentes fijas y móviles de contaminación del aire debe considerar el proceso intenso y acelerado de modificación que está experimentando la ciudad. Cada vez más, la región adquiere características de un gran polo nacional y centro de negocios. En la región metropolitana se encuentra el mayor Polo Petroquímico de América Latina, lo que representa una significativa fuente de contaminación atmosférica para la ciudad y el entorno.

La participación significativa del transporte individual, hace que la flota activa de vehículos motorizados sea para Salvador una gran causante de la contaminación atmosférica. En Salvador de Bahía, la flota vehicular es de 1004034 vehículos y representa la mayor flota de vehículos de todo el Norte-Nordeste, según

datos de Transalvador (2019). Lo que lleva a la ciudad a tener un automóvil por cada tres habitantes.

Tabla 03 - Cantidad de vehículos por tipo en Salvador. Fuente: Transalvador (2019)

Tipo de Vehículos	Cantidad (2019)
Automóviles	66,28%
Motos	14,18%
Camiones	2,27%
Autobuses	1,43%
Otros	15,84%

La estructura vial de Salvador, debido a diversas implementaciones realizadas en diferentes momentos y con enfoques urbanos disociados, les dificultaba articularse entre sí y, por lo tanto, permitir un intercambio y/o apoyo conveniente entre las ciudades, en el cumplimiento de los principales flujos de tráfico.

En cuanto a las señales de orientación del tráfico, hay una falta de estandarización, no estandarización en la fabricación de las señales y, principalmente, en la secuencia de los mensajes, con respecto a una buena orientación del tráfico, a lo largo del sistema de carreteras principales.

También se observan flujos de tráfico significativos utilizando "cambios de sentido" distantes con la creación de largas rutas negativas en las avenidas principales, aumentando el índice de permanencia en la vía hasta que el motorista encuentra el cambio de sentido, lo que perjudica la eficiencia en la operación de tráfico. La combinación de estos factores adversos caracteriza una imagen de la saturación de la carretera, con congestión constante, que provoca un aumento de las emisiones de contaminantes atmosféricos.

Las modalidades de transporte aéreo y marítimo se han vuelto accesibles para una gran cantidad de usuarios en los últimos años, lo que ha provocado un aumento en la circulación de aviones y barcos por las rutas de Salvador. Como Salvador es una ciudad costera, es común utilizar el transporte acuático, incluidas algunas rutas a las cercanas islas de Itaparica y Morro de São Paulo.

Con el volumen de carga creciendo año tras año siguiendo el mismo ritmo de desarrollo económico implementado en el estado, el puerto de Salvador, ubicado

en la Bahía Todos os Santos, tiene el estado de puerto de contenedores más grande en el norte / nordeste y el segundo mayor puerto exportador de fruta de Brasil.

Según la Socicam, el tráfico de pasajeros en la Terminal Marítima de Salvador fue de 151 622 pasajeros de cruceros, que llegaron a la ciudad en los 50 cruceros de la temporada (2018-2019), un aumento del 7% en el número de pasajeros que viajan en comparación con la temporada anterior.

El Aeropuerto Internacional de Salvador ocupa el décimo lugar en el ranking de aeródromos en 2018. El promedio diario de este aeropuerto fue de 229 movimientos por semana, de acuerdo con el Departamento de Control del Espacio Aéreo (DECEA). Durante los meses de 2018, los movimientos totales del aeropuerto alcanzaron su punto máximo en enero y diciembre.

Tabla 04 - Movimientos anuales totales en el aeropuerto de Salvador. Fuente: DECEA (2018)

	2016	2017	2018	Cresc. en 2018
Total	84,317	81,700	83,558	2.3%
Comercial	63,417	61,457	61,020	-0.7%
Geral	17,415	16,437	19,086	16.1%
Militar	3,485	3,806	3,452	-9.3%

5.2 Dispersión de contaminantes

En la atmósfera, los procesos de dispersión de contaminantes desempeñan un papel fundamental, pues permiten la renovación del aire en el ambiente, haciendo que los contaminantes provenientes de las fuentes naturales o antropogénicas asuman concentraciones cuyos valores sean aceptables para la vida humana (BARBON, 2008).

Sin embargo, debido a la intensificación de la contaminación del aire por fuentes antropogénicas, y los consiguientes problemas ocasionados sobre los diversos ecosistemas y sobre la salud de las personas, se hizo esencial entender el proceso de dispersión de los contaminantes para que se pudieran predecir los diferentes escenarios de las condiciones atmosféricas.

Como ya se sabe, la calidad del aire de una región es el resultado de las interacciones complejas entre los contaminantes atmosféricos, los parámetros meteorológicos y las condiciones topográficas. La dispersión, por lo tanto, es un proceso extremadamente complejo. Esto es debido al hecho de que los flujos en la baja atmósfera, o sea, en la llamada capa límite planetaria, son gobernados por la turbulencia, que es resultado directo de los efectos térmicos (corrientes convectivas generadas por la calefacción solar desigual de la superficie) y mecánicos (cantidad de movimiento del viento horizontal, que promueve las capas de aire en contacto con la superficie) (MORAES, 2001; NEDEL, 2003).

5.2.1 Factores meteorológicos: estabilidad vertical de la atmosfera y viento

Los eventos meteorológicos, en particular, tienen una influencia directa en la calidad del aire, ya que son responsables de la orientación y dispersión de los contaminantes, así como de su deposición en el suelo, y pueden promover reacciones químicas. La estabilidad de la atmósfera puede definirse como su capacidad para resistir o intensificar los movimientos verticales. Cuando se resiste a los movimientos verticales se denomina atmósfera estable, cuando se intensifican los movimientos verticales se dice atmósfera inestable o convectiva, y cuando es indiferente a cualquier tipo de movimiento vertical se llama atmósfera neutra. A través del perfil de temperatura potencial en la vertical, se puede determinar el grado de estabilidad de la atmósfera, y cada tipo de estabilidad atmosférica proporcionará una mejor o peor dispersión de los contaminantes (MORAES, 2004).

La dirección inicial del transporte de los contaminantes originados por una fuente está determinada por la dirección del viento medido en el lugar de la fuente. La concentración de contaminantes, originados por fuentes puntuales (una chimenea, por ejemplo), es probablemente más sensible a la dirección del viento que a cualquier otro parámetro. Pequeños errores en la estimación de la dirección e intensidad del viento pueden ocasionar grandes errores en las estimaciones de concentraciones.

La brisa marina y terrestre son parámetros importantes a considerar en esta evaluación ya que Salvador es una ciudad costera. El calentamiento diferencial entre el continente y el océano promueve diferentes flujos de energía hacia la atmósfera, causando gradientes de presión en ciertos niveles sobre la superficie, que impulsan el

movimiento de las masas de aire. Este movimiento genera divergencia y convergencia en diferentes puntos, lo que establece una célula de circulación.

Durante el día, el suelo costero se calienta más fácilmente que el agua. Debido a que el aire caliente es menos denso que el aire frío, ejerce menos presión, por lo que durante el día el aire frío que sale de las capas más cercanas al agua empuja hacia arriba el aire justo por encima del suelo para reemplazarlo. Así viene la brisa marina. Por la noche, el proceso se invierte a medida que el suelo se enfría más rápido que el agua. Esto hace que el aire más cálido se quede ahora sobre el mar y luego es presionado por el aire frío del suelo.

El clima dominante de Salvador, según la clasificación de Strahler, es del tipo litoral húmedo, controlado por masas de aire tropicales marítimas, vinculado a los sistemas de circulación atmosférica que actúan en la costa oriental del Nordeste brasileño, con medias térmicas anuales de 25 °C, las mínimas registradas entre julio y agosto y las máximas de enero a marzo. Las variaciones térmicas diarias y anuales son muy pequeñas, característica de los climas litorales brasileños, sobre todo en la Región Nordeste. Las lluvias son razonablemente bien distribuidas, pero con tendencia a la concentración en los meses de otoño-invierno. La lluvia es un proceso importante para eliminar los gases contaminantes y los elementos asociados con las partículas. El balance hídrico anual es positivo. Según Climatempo, el predominio de los vientos en Salvador es sureste, seguido de este y sur con una velocidad promedio de 2.9 m/s a 3.4 m/s.

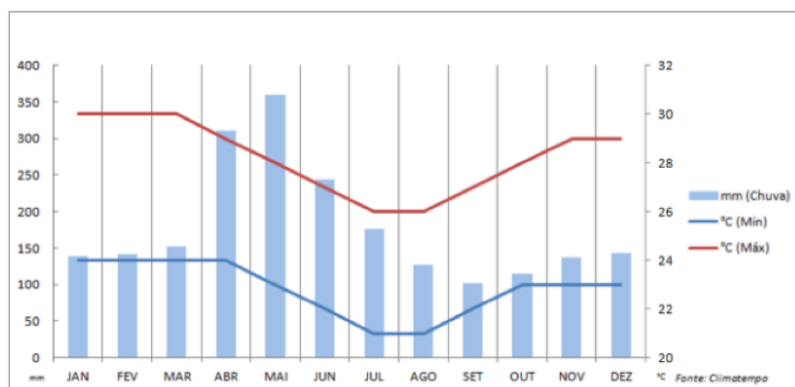


Figura 02 - Tiempo en Salvador. Fuente: Climatempo (2018)

5.2.2 Efecto de la topografía y los edificios

La complejidad del terreno es muy importante para la definición de parámetros en el modelado matemático de contaminantes, pues la misma ocasiona grandes cambios en la dirección / velocidad del viento y en los flujos turbulentos. Los terrenos planos son aquellos sin ningún tipo de elevación en la vertical, o con elevaciones que no influyen significativamente en el flujo a su alrededor, generando recirculaciones. Los terrenos complejos presentan elevaciones verticales son significativas a punto de influir en el flujo atmosférico a su alrededor, generando recirculaciones.

Según Carvalho (1996), las principales situaciones que pueden aumentar las concentraciones en terreno complejo son: encuentro de la pluma con montañas, acumulación de contaminantes en valles, arrastre de los contaminantes a centros urbanos debido al fenómeno de la canalización del viento por los valles. La gran cantidad de edificios altos, combinados con la proliferación de superficies de asfalto y concreto, pueden crear efectos de isla de calor urbano, que también pueden influir en las concentraciones de contaminantes y otras condiciones ambientales (MIRANDA, 2011).

En lo que se refiere a las características del cuadro natural de Salvador, la mayor parte de la región presenta como relieve una figura topográfica marcada por vastas superficies planas, intercaladas por cerros redondeados en forma de "medias naranjas" o por elevaciones más acentuadas con cima en forma de mesa. La altitud media es de 24 m. El relieve de la región favorece una mayor dispersión de los contaminantes atmosféricos, lo que no necesariamente reduce el riesgo de picos en la concentración de contaminantes (Figura 3).

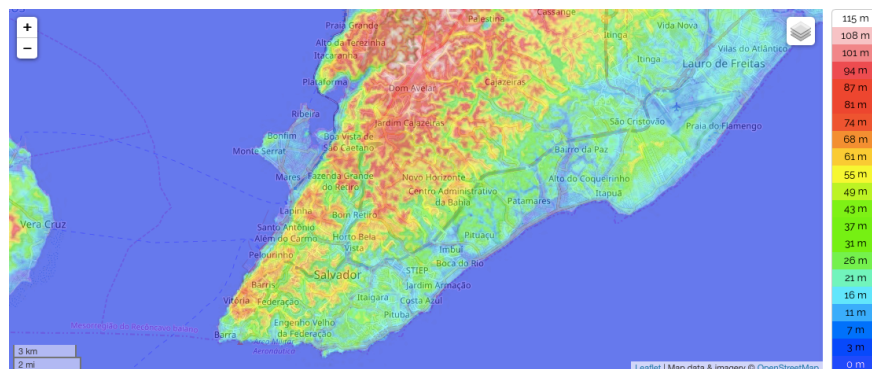


Figura 03 - Topografía de Salvador. Fuente: topographic-map.com

Los edificios situados cerca de las fuentes puntuales de emisiones de contaminantes atmosféricos pueden interferir en su dispersión, a través del impacto de la pluma de contaminantes en las estructuras, que puede causar un cambio en su curso normal, causando la caída de la pluma en el suelo. Este efecto se denomina *building downwash*. Si el contaminante sólo sube a una altura menor que la altura del edificio (u obstáculo), y consecuentemente no lo sobrepasa, eso causa el aumento de su concentración en el vórtice cerca del suelo de aquel obstáculo.

5.3 Red de monitoreo

El acto de monitoreo de contaminantes del aire puede entenderse como un proceso de muestreo y análisis continuo de contaminantes en el aire. En este contexto, es importante definir las ubicaciones, así como considerar el período de tiempo en el que se inserta el monitoreo. La medición continua de la calidad del aire a través de estaciones de monitoreo es una de las herramientas adoptadas para la gestión de los recursos atmosféricos, cuyo objetivo principal es garantizar la salud y el bienestar de la población con respecto al cumplimiento de los estándares actuales.

Esta actividad debe ser llevada a cabo por la Institución Pública a través de mediciones efectivas de los diversos contaminantes en áreas urbanizadas e industrializadas. Sin embargo, la operación sistemática de una red de monitoreo de la calidad del aire es compleja y costosa, especialmente si el foco de las fuentes de emisión de contaminantes no se concentra en la misma región. Por lo tanto, el monitoreo de la calidad del aire a menudo es realizado por compañías privadas, a pedido de las agencias ambientales, como condiciones en los procesos de adjudicación de licencias.

Salvador es la primera ciudad del Norte-Nordeste en tener una Red de Monitoreo del Aire. Administrada por CETREL, una empresa privada del estado de Bahía, el sistema de monitoreo del aire está compuesto por torres meteorológicas capaces de medir dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad y precipitación, además de medir contaminantes atmosféricos. El equipo tiene un software responsable por la recolección, almacenamiento y tratamiento de datos. Sus estaciones están interconectadas por un sistema de telemetría que permite la disponibilidad en línea y en tiempo real de los datos obtenidos (Figura 04).



Figura 04 - Proceso de monitoreo del aire. Fuente: CETREL

A través de este servicio, es posible identificar y entender detalles del comportamiento de los contaminantes en el área monitoreada, generando subsidios para el perfeccionamiento continuo de la estructura de protección ambiental de la región. También se tomaron en cuenta parámetros meteorológicos como la temperatura, la velocidad del viento, lluvia y la humedad relativa, ya que afectan la forma en que los contaminantes se comportan en el aire, ya que estos parámetros pueden o no favorecer la dispersión de contaminantes en una región determinada.

El viento, por ejemplo, lleva los contaminantes del aire lejos de su fuente, haciendo que se dispersen. En general, cuanto mayor es la velocidad del viento, más contaminantes se dispersan y menor es su concentración. Cuando no llueve, las concentraciones de contaminantes en la atmósfera aumentan continuamente (SHUKLA e col, 2008). Por lo tanto, es importante tomar como parámetro la lluvia de la región al analizar contaminantes, especialmente el PM_{10} que se eliminan por el proceso de impactación. De las ocho estaciones, cinco midieron las precipitaciones de la región: Av. ACM, Av. Paralela, Dique do Tororó, Pirajá y Rio Vermelho. Los valores de las mediciones diarias de temperatura, velocidad del viento y humedad en la ciudad de Salvador se obtuvieron a través de las ocho estaciones de monitoreo de aire de la Cetrel. La empresa también hace previsiones meteorológicas para anticipar y alertar a las empresas sobre las condiciones climáticas desfavorables a la dispersión de los contaminantes, visando la protección de las comunidades vecinas.

La red automática tiene ocho estaciones de medición de la calidad del aire ubicadas en Campo Grande, Dique do Tororó, Rio Vermelho, Itaigara, Pirajá y en las avenidas Barros Reis, Antônio Carlos Magalhães (ACM) y Paralela. Las

estaciones de monitoreo ubicadas en Av. ACM, Barros Reis e Itaigara solo comenzaron a operar en 2013, mientras que las otras comenzaron sus actividades en 2011. La red de monitoreo funcionó hasta 2015.



Figura 05 - Ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en la región. Fuente: Google Maps (2019)

De las ocho estaciones, la única ubicada en un punto alto de la ciudad es Pirajá (Tabla 05), un parámetro que facilita la dispersión de contaminantes. La ciudad en sí no tiene muchos puntos altos. La altitud máxima de Salvador es de 359 metros, según Topographic-map.com, pero la altitud promedio es de 24 metros.

Tabla 05 - Coordenadas y altitudes de las estaciones de monitoreo. Fuente: CETREL

Estaciones	Coordenadas UTM		Altitud (m)
	X	Y	
Av. Paralela	562.002	8.567.902	40
Rio Vermelho	555.661	8.562.198	12
Campo Grande	552.044	8.563.951	71
Dique do Tororó	553.467	8.564.614	39
Pirajá	558.816	8.573.982	104
Av. ACM	557.615	8.565.234	41
Itaigara	556.896	8.563.356	27
Av. Barros Reis	556.476	8.566.758	20

El monitoreo fue un requisito de la Federación Internacional de Fútbol (FIFA) para las ciudades anfitrionas de la Copa del Mundo de 2014. Según el periódico "Bahia no ar", en junio de 2019, el gobernador del estado y el jefe de operaciones de la CETREL se asociaron para la rehabilitación de 10 estaciones de monitoreo, nueve fijas y una móvil, para analizar la calidad del aire en Salvador. Los contaminantes monitoreados son los gases NO₂, CO, SO₂, O₃ y PM₁₀. Los datos obtenidos se transmiten en tiempo real a la central y componen la base de datos del Instituto.

5.4 Analizadores y métodos de detección

La elección de los monitores de contaminación debe tener en cuenta, además de las normas legales, los recursos necesarios para la adquisición, operación y mantenimiento de los equipos. Se desarrollaron varias metodologías y equipos para detectar la cantidad de partículas y gases presentes en el aire atmosférico. Estos equipos tienen sensores electroquímicos que son responsables del monitoreo de estos gases.

Al igual que cualquier equipo de medición, la confiabilidad de los valores obtenidos depende de la sensibilidad y precisión del equipo. Se debe respetar el intervalo de calibración. Además, el operador del equipo debe ser consciente de su funcionamiento y ser capaz de comprender cuándo el instrumento tiene problemas. La Tabla 6 muestra el método de detección para cada contaminante utilizado por la CETREL.

Tabla 06 - Analizadores y métodos de detección. Fuente: CETREL

Analizadores	Método de detección
Dióxido de Azufre (SO₂)	Fluorescencia Ultravioleta
Material Particulado Inhalable (PM₁₀)	Radioactividad Beta
Óxidos de Nitrógeno (NO, NO₂, NO_x)	Quimioluminiscencia
Monóxido de Carbono (CO)	Infrarrojo
Ozono (O₃)	Fotometría Ultravioleta

- Fluorescencia Ultravioleta

El método de fluorescencia ultravioleta se basa en el hecho de que las moléculas de SO₂ presentes en una muestra de aire, cuando son bombardeadas con radiación de luz ultravioleta, son excitadas a SO₂^{*}, mostrando fluorescencia característica al regresar al estado no excitado (SO₂). La concentración de SO₂ en la muestra se mide por los cambios de fluorescencia capturados por los sensores.

- Radioactividad Beta

La absorción de los rayos beta que atraviesan la materia depende principalmente de la masa analizada. Una muestra de aire que contiene partículas suspendidas totales se ve obligada a pasar durante un cierto tiempo a través de un filtro limpio a un caudal controlado. La lectura de absorción de rayos beta se toma al

principio y al final de cada ciclo de medición, siendo la diferencia de lectura proporcional a la masa de partículas atrapadas en el material del filtro. El monitor de partículas inhalables tiene una unidad de fraccionamiento de partículas instalada antes del filtro, que elimina las partículas de más de 10 μm , permitiendo que solo se mida la fracción para alcanzar el filtro.

- Quimioluminiscencia

Este principio de medición se basa en la luminiscencia generada por la reacción química de NO (monóxido de nitrógeno) con O_3 inyectado (ozono) junto con la muestra, lo que resulta en $\text{NO}_2 + \text{O}_2$. Una porción de NO_2 (dióxido de nitrógeno) generado en esta reacción alcanza el estado excitado NO_2^* (dióxido de nitrógeno + energía). Estas moléculas de NO_2 vuelven a su estado básico, liberando energía luminosa. La intensidad de la luz generada es proporcional a la concentración de moléculas de NO contenidas en la muestra. Después del análisis de NO, la muestra se pasa a un dispositivo que promueve la desoxidación de NO_2 nuevamente a NO y la muestra se vuelve a analizar. La concentración de NO_2 se obtiene por diferencia entre las 2 lecturas.

- Infrarrojo

La medición del monóxido de carbono por absorción infrarroja se basa en el hecho de que el CO absorbe energía de luz de cierta longitud de onda en el rango infrarrojo. Entonces es posible medir la concentración de CO presente en una muestra de aire ambiente por la diferencia entre la cantidad de energía de luz específica emitida por una fuente y recibida por un sensor ubicado opuesto al camino óptico cruzado que contiene la muestra de aire.

- Fotometría Ultravioleta

La concentración de ozono se mide mediante a fotometría ultravioleta. Un haz de alta energía de una lámpara UV se dirige a través de un tubo lleno con la muestra. Se utiliza la propiedad de las moléculas de ozono de absorber parte de la radiación ultravioleta y al final es posible estimar la concentración ambiente en función de la atenuación de la misma.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Calidad del aire en Salvador

- Avenida Antonio Carlos Magalhães

La avenida Antonio Carlos Magalhães (ACM) tiene en su extensión pocos edificios residenciales, centros de negocios y empresas comerciales. Debido a su ubicación estratégica y características comerciales, los embotellamientos son constantes en la región, y la falta de espacios de estacionamiento también se ha convertido en un problema para los conductores. Es una de las avenidas más concurridas de la ciudad donde pasan diariamente cientos de automóviles.



Figura 06 - Estación de monitoreo del aire en la avenida ACM. Fuente: Jornal A tarde

Fue en las Avenidas ACM y Paralela donde hubo los índices más altos de NO_2 (Figura 08). Dado que la fuente principal de NO_2 en la atmósfera es el tráfico, ya se esperaba obtener las mayores concentraciones de NO_2 en las avenidas principales de Salvador. Aunque tenía valores altos, los niveles de concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) permanecieron dentro del límite establecido por la Resolución CONAMA 03/1990 y por la OMS que recomiendan un límite máximo de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, durante un período de 24h. En el día 15 de agosto de 2015 a las 17:00, el nivel de PM_{10} alcanzó $148,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la concentración más alta observada de este contaminante en la región durante todos los años. Aunque es un valor alto, no excedió los límites establecidos por el CONAMA 03/1990, que es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por un período de 24 horas.

En la Figura 08, puede verse claramente que el nivel de CO ha ido disminuyendo con los años. La tendencia actual es reducir aún más las tasas de contaminantes, ya que las personas de hoy son más conscientes y hay sustitutos para los vehículos contaminantes. Lamentablemente, esto no ocurre en todas las situaciones.

Según datos de CETREL, la mayor concentración de lluvia en Av. ACM se observó en abril, con valores de hasta 64.8 mm, considerada lluvia torrencial, según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). De acuerdo con el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), la precipitación promedio en abril de Salvador es de 309.7mm de lluvia, pero en 2015, Salvador registró 329.8mm. Como se ve en las Figuras 07, 08 y 09, durante abril de 2015 disminuyó la concentración de todos los contaminantes monitoreados, que puede haber sido influenciada por las fuertes lluvias del mes.

La temperatura más alta registrada en la Av. ACM fue de 35,1 °C en abril de 2015 y el promedio anual fue de 27,1 °C, siendo que Salvador tiene una temperatura promedio anual de 25 °C y es una de las ciudades más soleadas del mundo, con unas 2.466 h de sol al año, según Portella (2008). La alta temperatura en este punto puede haber sido influenciada por la gran cantidad de asfalto y cemento que refleja mucho calor, aumentando la temperatura de la avenida. Las temperaturas más altas conducen a la formación de movimientos verticales ascendentes (convección) más pronunciados, generando un arrastre eficiente de contaminantes localizados desde los niveles más bajos hasta los más altos. Estas altas temperaturas favorecen la dispersión vertical ascendente de contaminantes pero también contribuyen a la conversión de NO₂ en ozono.

La velocidad máxima del viento por hora medida en Av. ACM fue de 11 m/s durante junio de 2015, la velocidad más alta registrada entre todos los puntos. Mientras que la velocidad media anual en Av. ACM fue de 2,76 m/s. Los vientos a esta velocidad, según la escala de Beaufort, se clasifican como aire ligero. Por lo tanto, se puede suponer que los valores de contaminación podrían ser aún mayores en la Av. Paralela, pero la velocidad del viento, las altas temperaturas, las fuertes lluvias y la falta de edificios altos en la región facilitan la dispersión de contaminantes.

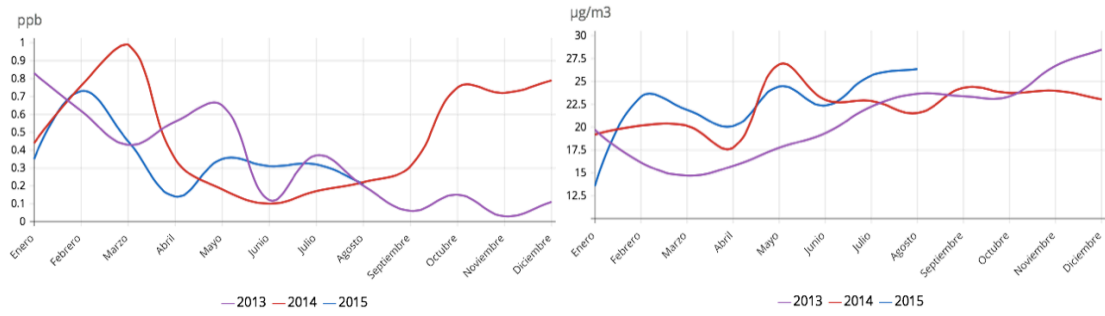


Figura 07 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en la Av. ACM. Fuente: Elaboración personal

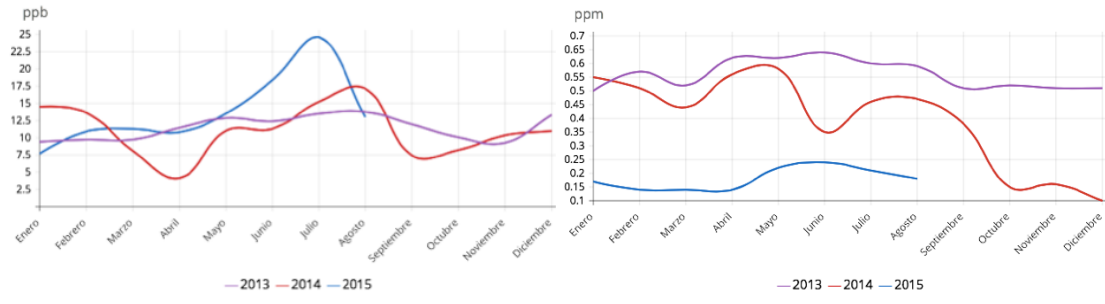


Figura 08 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en la Av. ACM. Fuente: Elaboración personal

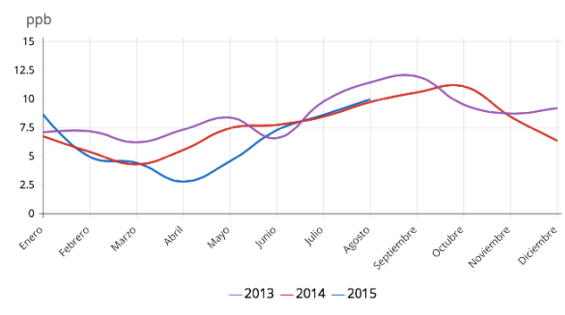


Figura 09 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en la Av. ACM. Fuente: Elaboración personal

- Avenida Barros Reis

La región es muy comercial, los embotellamientos son frecuentes y la cantidad de vegetación es mínima. La medición en Av. Barros Reis comenzó el 8 de octubre de 2013. Fue en esta avenida donde se observaron los niveles medios más altos de PM₁₀ y CO (Figuras 10 y 11). Los valores promedio de CO alcanzaron 1,25 ppm y el máximo monitoreado fue 4,77 ppm en marzo de 2014. Los valores más altos de PM₁₀ medidos (hasta 229,9 µg/m³) fueron durante el 23 y 24 de junio de 2015. El nivel promedio de PM₁₀ de estos días fue, respectivamente, 49,6 µg/m³ y 57,4 µg/m³, permaneciendo dentro del límite del promedio diario de la resolución CONAMA (240 µg/m³) pero el nivel del día 24 fue superior al establecido por la OMS (50 µg/m³). Estas fechas son tradicionalmente atribuidas al nacimiento de San Juan y son vacaciones en Bahía. Los salvadoreños generalmente viajan fuera de la región metropolitana para disfrutar de las festividades de San Juan y siempre hay mucho embotellamiento saliendo de la ciudad en estas fechas. En 2015, el CO tuvo sus valores máximos en los mismos días, alcanzando 2,77 ppm en 24 de junio a las 1:00.

La humedad alcanzó un mínimo de 36% en 2013 y un máximo de 91% en 2015. El promedio durante los 3 años fue de 69,7%. Un valor por debajo del promedio anual de la ciudad que es de 81%, según Portella (2008). Esta humedad puede favorecer el desarrollo de nubes y la precipitación, lo que hace que el escenario sea favorable a la dispersión. Sin embargo ella también puede favorecer la formación de lluvia ácida y empeorar la contaminación por partículas. Son aerosoles y la humedad agregará un poco de agua, haciéndolos más pesados y más cerca del nivel del suelo.

En cuanto a la temperatura promedio anual para el período de estudio, se observó una variación entre 25 °C en 2015 y 26,3 °C en 2013, alcanzando un promedio durante los 3 años de 25,5 °C, valor inferior al medido en Av. ACM. La velocidad del viento no excedió los valores medidos en Av. ACM, con un máximo de 9,8 m/s y un promedio de 2,1 m/s. Como la velocidad del viento aumenta con la altitud, este es un resultado esperado ya que la Av. Barros Reis, junto con Río Vermelho, tienen las altitudes más bajas de los ocho puntos monitoreados, 20 m y 12 m, respectivamente.

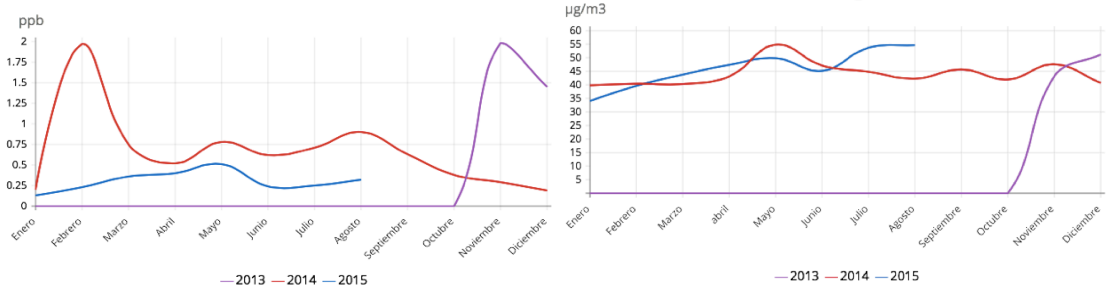


Figura 10 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en la Av. Barros Reis. Fuente: Elaboración personal

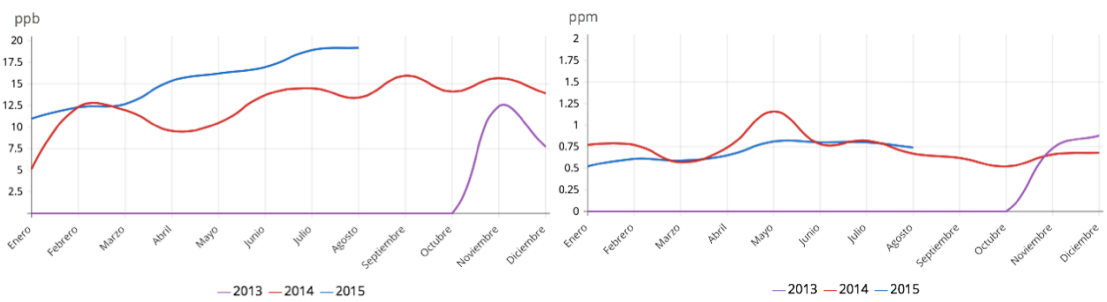


Figura 11 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en la Av. Barros Reis. Fuente: Elaboración personal

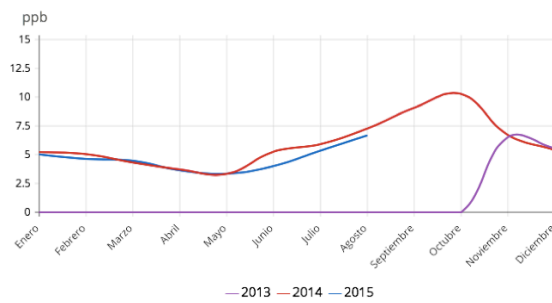


Figura 12 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en la Av. Barros Reis. Fuente: Elaboración personal

- Avenida Paralela

La Avenida Paralela se identifica en el Plan Maestro de Desarrollo Urbano - PDDU (1985/2004) como un componente fundamental de la estructura urbana de la ciudad: un corredor de transporte público capaz de inducir el crecimiento de áreas adyacentes y articular nuevas áreas de expansión (LIMA, 2007).

Fue en la Avenida Paralela donde se presentaron los promedios más altos de ozono y NO₂. Aun así, los valores se mantuvieron dentro de los límites establecidos por CONAMA y la OMS. En esta región solo hubo un día en que el valor de un contaminante (PM₁₀) superó el estipulado por la OMS (50 µg/m³). En 2012, el nivel de PM₁₀ alcanzó en una hora 278,7 µg/m³ y el promedio diario fue de 51,8 µg/m³. Los niveles promedio de SO₂, PM₁₀ y CO (Figuras 23 y 24) están dentro del promedio de los otros puntos de la ciudad.

Con respecto al ozono, sus valores de concentración son más altos en los lugares alejados del centro de la ciudad. Las reacciones de formación de ozono no son instantáneas, sino que tienen lugar durante varias horas o días, dependiendo de los precursores. Además, una vez que se ha producido el ozono, puede persistir durante varios días y viajar largas distancias (GAGA y col, 2012). Esto puede explicar los altos niveles en este punto, que es el más alejado del centro de la ciudad y de los otros puntos centrales. Aún así, los valores de ozono no excedieron los estándares de calidad del aire previstos en la Resolución CONAMA 03/1990. De manera diferente, se descubrió que en São Paulo, a través del informe de calidad del aire publicado por Cetesb (2011), el ozono ha excedido 96 veces el límite máximo establecido en la legislación brasileña, que es de 160 µg/m³.

La velocidad del viento alcanzó los 41,9 m/s en julio de 2011, un valor alto en comparación con las otras velocidades registradas. En otros años, los valores no superaron los 6,7 m/s. Esta región midió altas precipitaciones también en abril de 2015, con precipitaciones que alcanzaron 43.4mm por hora. Las Figuras 23, 24 y 25 muestran una disminución en los niveles de contaminantes durante este período, que puede estar relacionado.

La temperatura promedio fue de 26,1 °C y los valores más altos fueron de diciembre a mayo, valores normales para Salvador. En este periodo, hubo una

disminución en el promedio mensual de NO_2 . Esto puede ser respaldado por el hecho de que el aumento de la temperatura en esta región es mayor durante este período, convirtiendo NO_2 en ozono más rápido. Esta misma situación puede haber sucedido en otros puntos monitoreados.

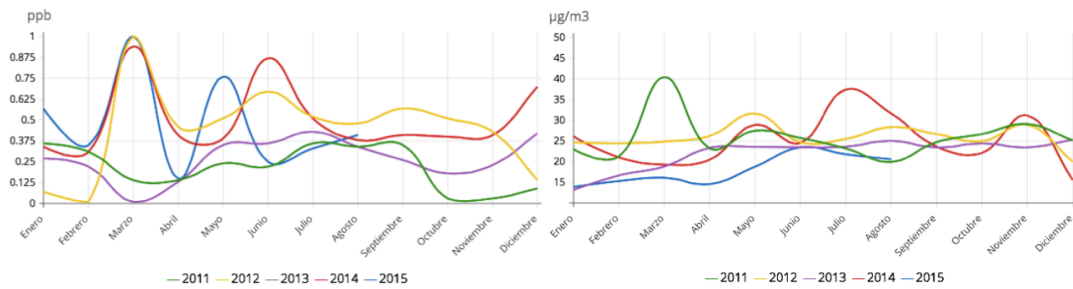


Figura 23 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en la Av. Paralela.
Fuente: Elaboración personal

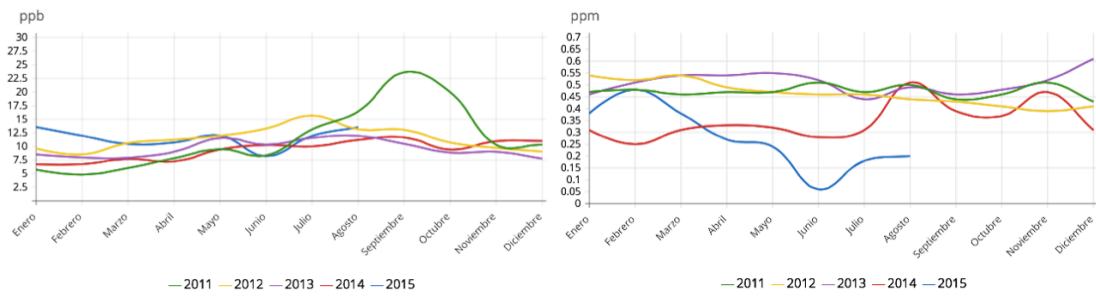


Figura 24 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en la Av. Paralela.
Fuente: Elaboración personal

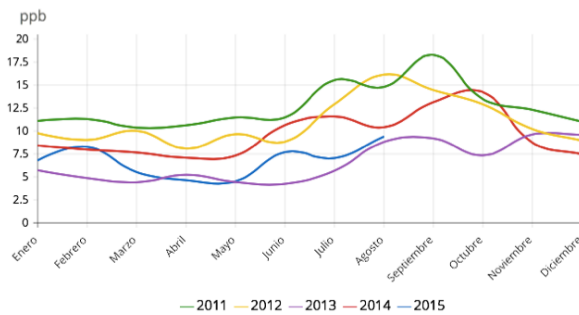


Figura 25 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en la Av. Paralela. Fuente: Elaboración personal

- Campo Grande

Es en esta región donde se encuentran los principales árboles centenarios de la ciudad y donde la flota de vehículos en circulación es baja en comparación con otras regiones analizadas. Campo Grande es el punto de partida para el circuito de carnaval más tradicional de Salvador, el circuito de Osmar, y durante esta fiesta las calles de Campo Grande se llenan de gente. El resultado del Proyecto de Monitoreo de la Calidad del Aire del Circuito Carnaval, promovido por la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Hídricos (Semarh), mostró un resultado aterrador: la cantidad de partículas suspendidas en el aire cerca de la tubería de descarga de los tríos durante el carnaval alcanza concentración de $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ cuando, de acuerdo con los estándares de la OMS, el índice de inhalación humana diaria no debe exceder los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 13 - Estación de monitoreo en Campo Grande. Fuente: Romulo Faro

Las tasas de contaminantes en general en el Campo Grande se consideraron bajas. El único día que hubo un nivel muy alto en la región fue de PM_{10} , con $229 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 7 de diciembre de 2013. La Figura 14 muestra el aumento de PM_{10} en diciembre del mismo año. La temperatura promedio de la región fue de $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ y la máxima alcanzada fue de $34,3 \text{ }^\circ\text{C}$ en 2015, niveles en la temperatura promedio de Salvador.

En este punto, el valor del 100% de humedad se midió en varios días de 2011 y también hubo la humedad promedio más alta con 72,8%. Estos valores ya se esperaban ya que la región tiene una gran cantidad de vegetación y la presencia de una mayor cobertura vegetal influye en la cantidad de humedad presente en el aire. La mayor parte de la flora existente está emitiendo humedad en gran medida a través de un proceso llamado evapotranspiración.

Valores preocupantes porque en la atmósfera, el SO_2 puede reaccionar con el oxígeno y convertirse en SO_3 , que reacciona con la humedad del aire y forma H_2SO_3 y

H₂SO₄, en forma de gotas, que el viento puede transportar durante cientos de kilómetros antes de caer en la deposición ácida (lluvia ácida) (ONURSAL; GAUTAM, 1997). Por lo tanto, es importante que en regiones muy húmedas y con altas temperaturas que la concentración de contaminantes, especialmente PM₁₀, SO₂ y NO_x, sea baja. Como es el caso con el campo Grande que cuenta con una gran cobertura vegetal que ayuda en la absorción de contaminantes.

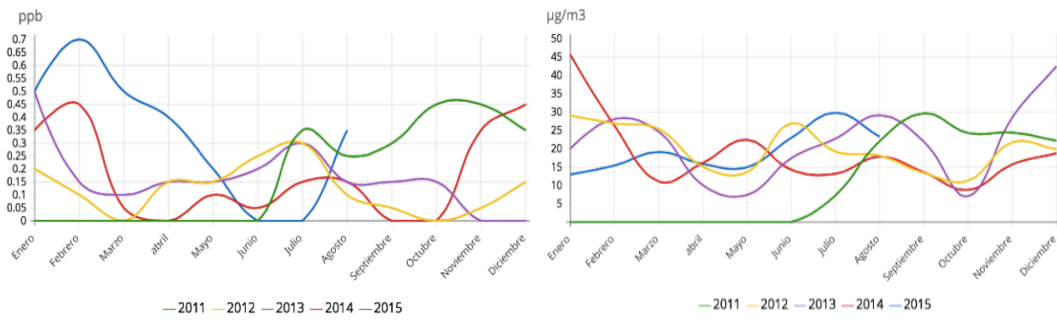


Figura 14 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Campo Grande.
Fuente: Elaboración personal

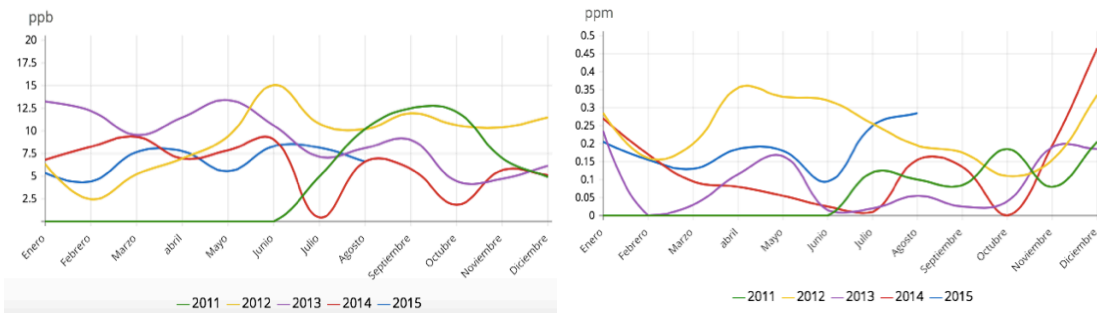


Figura 15 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Campo Grande.
Fuente: Elaboración personal

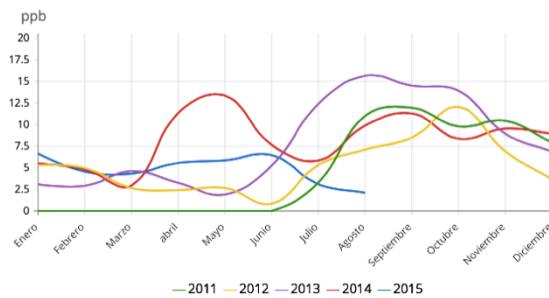


Figura 16 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Campo Grande. Fuente: Elaboración personal

- Dique do Tororó

En la región del Dique do Tororó se encuentra el estadio de fútbol utilizado en los juegos de la Copa del Mundo de 2014, la Fonte Nova Arena. Además de los partidos de fútbol, Fonte Nova Arena permite otros eventos como actuaciones musicales, congresos y reuniones de negocios. El Dique de Tororó tiene un estanque de 110 mil metros cuadrados que no es apto para bañarse, además de estar contaminado. Para dar la vuelta al Dique, puedes caminar, montar en bicicleta o recorrer 2,5 km en coche. Actualmente es la única fuente natural de Salvador que figura en el Instituto del Patrimonio Histórico y Artístico Nacional y es de gran importancia para las religiones de origen africano.

Los niveles de contaminantes en esta región fueron predominantemente bajos. Solo hubo aumentos leves en los niveles durante los días de partido y durante la Copa del Mundo (junio a julio de 2014). Todos los contaminantes tuvieron valores altos durante la Copa del Mundo, excepto el CO (Figura 18). Durante este tiempo, los embotellamientos eran constantes en la región, debido a partidos de fútbol.

En los últimos años, China ha acogido muchos eventos internacionales importantes. El gobierno local ha implementado numerosas normas de emisiones locales estrictas, que redujeron significativamente las emisiones y concentraciones de contaminantes atmosféricos en la ciudad (ZHAO y col, 2017). Durante los Juegos Olímpicos de Beijing 2008, la concentración media de SO₂, PM_{2.5} y NO₂ se redujo en 51,0%, 43,7% y 13% en comparación con el período anterior a los Juegos Olímpicos en Beijing y sus alrededores (XIN y col, 2010). El gobierno brasileño también debería haber tomado medidas para reducir la contaminación del aire sabiendo que sería el anfitrión de un evento tan importante.

En cuanto a las precipitaciones, en la región de Dique do Tororó el máximo fue de 48,6 mm, ligeramente por debajo de la Av. Paralela. La velocidad del viento fue baja con un promedio de 1,66 m/s. Excepcionalmente, algunos días en junio el máximo fue de 49,9 m/s. En general, esta región tiene buena calidad del aire, solo durante el evento deportivo, ya que había mucho tráfico, los valores de contaminantes aumentaron un poco. Pero nada que exceda los valores recomendados por la ley brasileña.

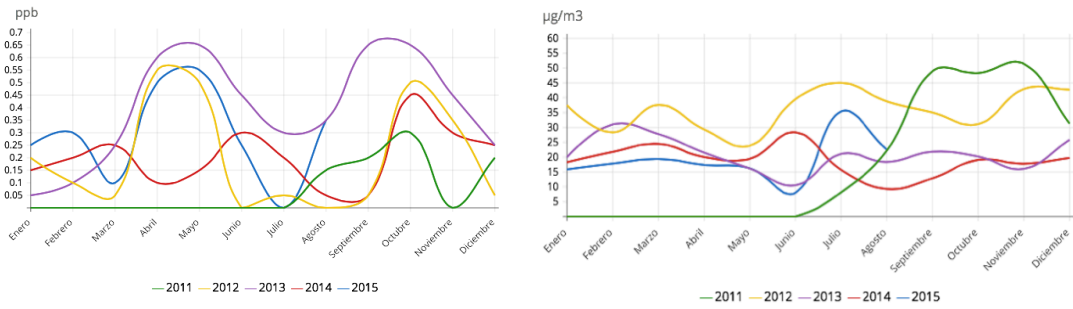


Figura 17 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Dique do Tororó. Fuente: Elaboración personal

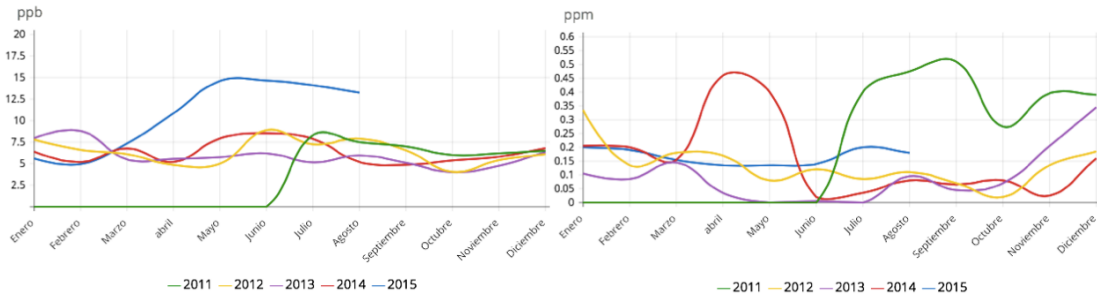


Figura 18 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Dique do Tororó. Fuente: Elaboración personal

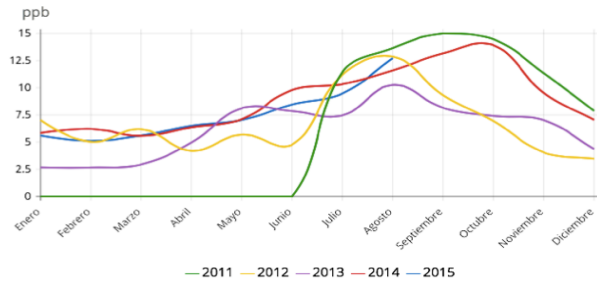


Figura 19 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Dique do Tororó. Fuente: Elaboración personal

- Itaigara

Itaigara se encuentra en una región de clase alta de la capital bahiana, habitada principalmente por personas con alto poder adquisitivo. En 2004, presentó el Índice de Desarrollo Humano (IDH) más alto que Noruega, líder entre los países, según Wanderley (2011). El barrio es predominantemente residencial y de servicios, rodeado de plazas y edificios modernos. Los contaminantes en esta región solo se monitorearon entre 2013 y 2015, y los niveles fueron bajos. Solo 3 días durante los tres años, el valor de PM_{10} excedió el recomendado por la OMS.

El 24 de octubre de 2014, el nivel de PM_{10} alcanzó $969,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16:00, el valor por hora más alto de PM_{10} registrado en Salvador. El promedio durante el período de 24 horas fue de $205,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando niveles de la OMS y también los límites de CONAMA para el estándar primario. En los otros dos días, los valores promedio de 24 horas fueron: $77,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 y $93,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2013. Aun así, el promedio mensual de PM_{10} fue bajo (Figura 20).

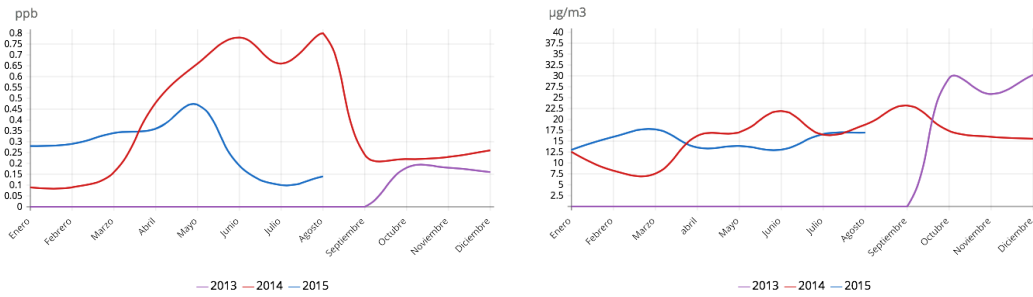


Figura 20 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Itaigara. Fuente: Elaboración personal

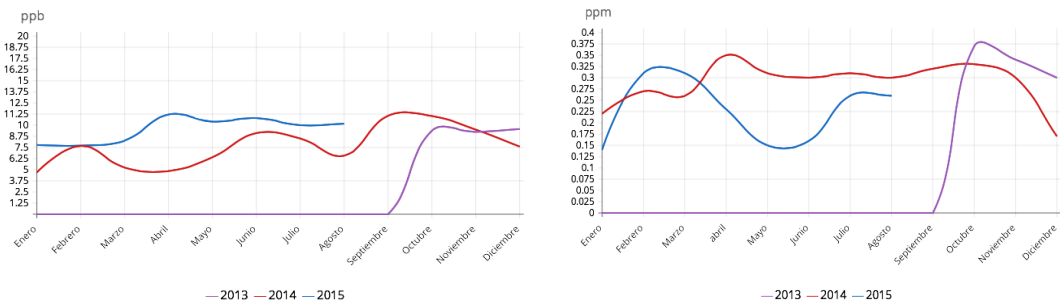


Figura 21 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Itaigara. Fuente: Elaboración personal

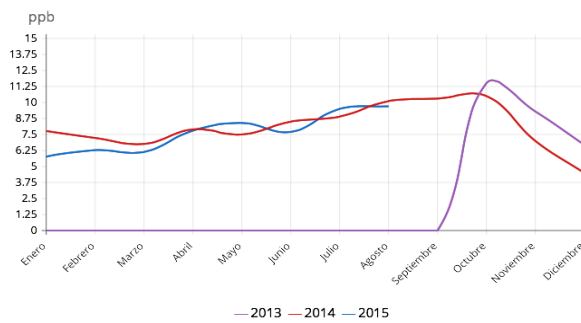


Figura 22 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Itaigara. Fuente: Elaboración personal

- Pirajá

Pirajá es un barrio ubicado en el suburbio ferroviario de Salvador, a orillas de la carretera federal BR 324. La región está densamente poblada y la situación económica en la región es desfavorable. En este barrio se encuentra una de las mayores reservas de bosque atlántico en área urbana de Brasil, llamada Parque São Bartolomeu, un espacio importante para la protección del medio ambiente y donde se proclamó la Independencia de Bahía. Hoy, a pesar de todo su potencial turístico, el vecindario sufre el despliegue agresivo de industrias en la región y el crecimiento desenfrenado que ocurre por toda la ciudad.

El 24 de junio de 2015, hubo un aumento en la concentración de PM_{10} con valores que alcanzaron $184,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación puntual puede haber sido causada por la temporada de vacaciones de San Juan. El 13 de enero de 2013, el valor de PM_{10} también aumentó considerablemente, llegando a $389,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Su promedio durante el período de 24 horas fue de $73,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando lo recomendado por la OMS. En la Figura podemos notar el aumento de PM_{10} en enero de 2013, llegando a casi $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el promedio del mes.

Durante los otros días las tasas de contaminantes no fueron altas y la calidad del aire entre 2011 y 2015 se consideró buena. Pirajá es la región más alta entre los lugares monitoreados, y por lo tanto bien ventilada. La velocidad media del viento alcanzó los 3.5 m/s, promedio más alto registrado, situación que facilita la dispersión de contaminantes.

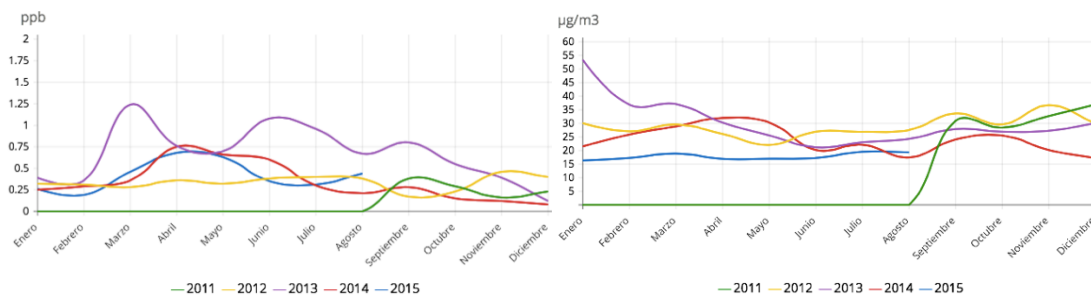


Figura 26 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en Pirajá. Fuente: Elaboración personal

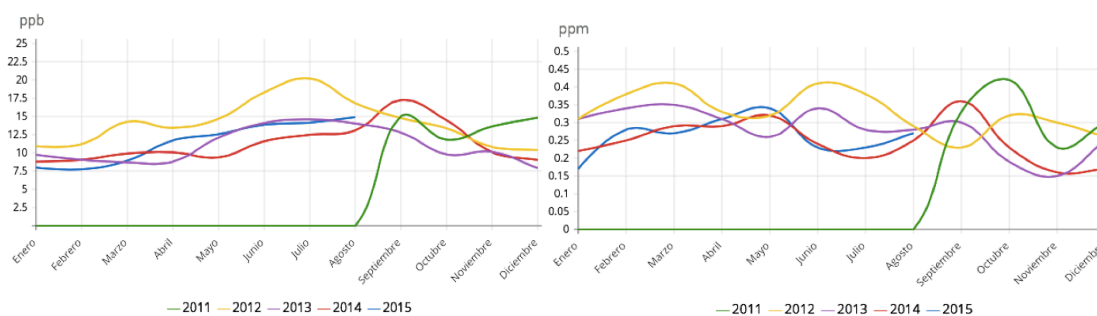


Figura 27 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en Pirajá. Fuente: Elaboración personal

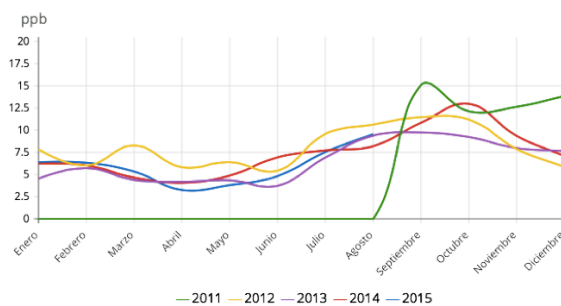


Figura 28 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en Pirajá. Fuente: Elaboración personal

- Río Vermelho

El barrio más bohemio de Salvador es el Río Vermelho, ubicado en el paseo marítimo de la ciudad. En este barrio se ubican hoteles y posadas de lujo, siendo intensa su vida nocturna. Debido a sus calles estrechas, incluso las carreteras principales, calles Oswaldo Cruz y Odilon Santos, tiene tráfico de vehículos difícil. En las avenidas Cardeal da Silva y Rua João Gomes, el tráfico entra en un estrechamiento que en ciertos momentos lo deja prácticamente estancado, especialmente durante la noche. Fue en esta región donde hubo las tasas más altas de SO₂, promediando casi 3 ppb. Los valores más altos de contaminantes se encontraron durante la noche, ya que la región recibe una gran cantidad de personas.

Este es el punto de monitoreo más cercano al mar y la proximidad al océano es un factor determinante para el comportamiento del mecanismo de brisa observado en el municipio. Salvador presenta un patrón de vientos influenciado por la topografía local y por la proximidad al océano. Aunque es un punto bajo de la ciudad de Salvador, su proximidad al mar facilita la circulación del viento. Entonces, como se esperaba, la velocidad del viento promedio fue alta (3,2 m/s) y alcanzó valores máximos de 10,5 m/s. Situación que ayuda en la dispersión de contaminantes.

Sin embargo fueron encontrados valores puntuales altos en algunos días de PM₁₀ y SO₂. El valor máximo de SO₂ fue de 18,2 ppb en el día 24 de diciembre de 2014 (día de la cena de navidad) a las 13:00 horas. Un valor inusual ya que en otros días la mayoría de los valores estaban por debajo de 4ppb. Aun así, los valores no excedieron los límites recomendados por la OMS o CONAMA. Para el PM₁₀ fue ligeramente diferente, varios días el nivel del contaminante durante 24 horas excedió el recomendado por la OMS (50 µg/m³). En octubre de 2013, el nivel de PM₁₀ durante un período de 24 horas alcanzó 152,5 µg/m³, valor que también excede el límite de CONAMA para el estándar secundario (150 µg/m³). Se puede ver en la Figura 29 que hubo un aumento de PM₁₀ en el mes de octubre de 2013.

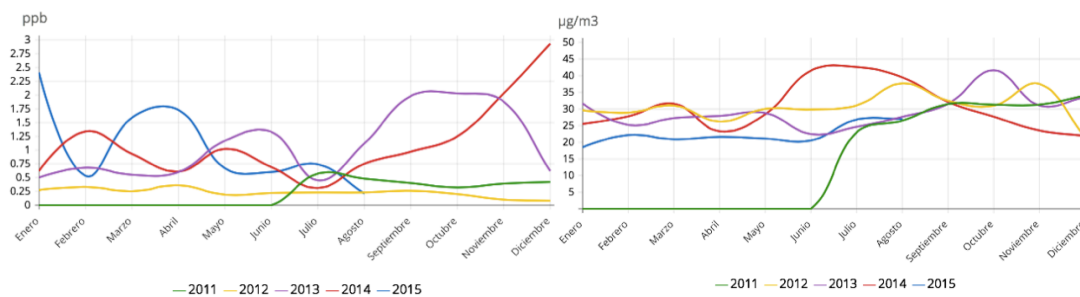


Figura 29 - Niveles medios de inmisión de SO₂ (ppb) y de PM₁₀ (µg/m³) en el Rio Vermelho. Fuente: Elaboración personal

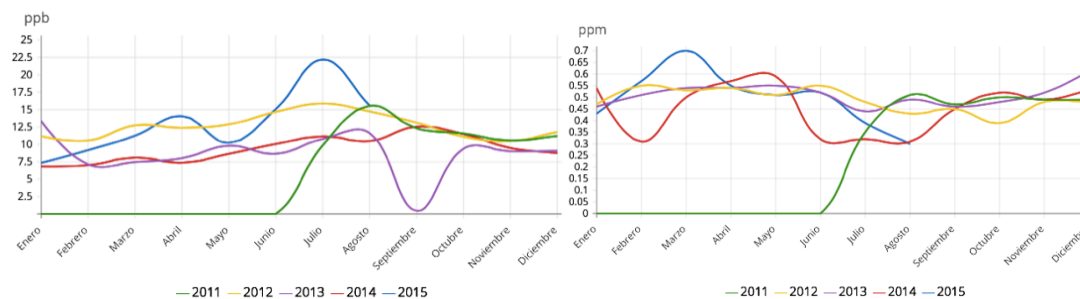


Figura 30 - Niveles medios de inmisión de NO₂ (ppb) y de CO (ppm) en el Rio Vermelho. Fuente: Elaboración personal

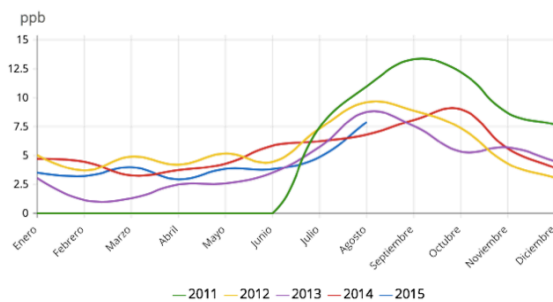


Figura 31 - Niveles medios de inmisión de O₃ (ppb) en el Rio Vermelho. Fuente: Elaboración personal

El ozono formado en la atmósfera a través de reacciones fotoquímicas que dependen de la radiación solar, entre otros factores, ocurre con mayor frecuencia en primavera y verano, cuando los meses son más cálidos y con una mayor incidencia de radiación solar en la parte superior de la atmósfera. Sin embargo, es en invierno que este contaminante permanece estacionario cerca de la superficie. Se observó en las Figuras 09, 12, 25, 16, 19, 22, 28 y 31 que en todos los puntos monitoreados el ozono (O_3) presentó un comportamiento estacional, con valores más altos de julio a octubre que corresponden al período de invierno. Esto se debe a que en invierno el suelo se enfría más rápido, el aire caliente continúa subiendo pero el aire más frío (más denso) que está cerca del suelo permanece estático. Por lo tanto, el ozono y otros contaminantes quedan atrapados cerca de la superficie. Este fenómeno se llama inversión térmica. Así, es natural que la mayor incidencia de enfermedades respiratorias ocurra en el período invernal donde las bajas temperaturas perjudican la dispersión de contaminantes, lo que resulta en un aumento de las concentraciones de contaminantes.

Los puntos de monitoreo ubicados en Campo Grande e Itaigara tienen los niveles más bajos de contaminación atmosférica y en consecuencia tiene una mejor calidad del aire. En ambas regiones, los niveles de CO no excedieron 0.45ppm y en Itaigara, los valores de NO_2 y ozono no superaron los 11,25 ppb. En estas regiones hay mucha vegetación que puede haber contribuido a tales resultados. Los árboles eliminan la contaminación del aire mediante la intercepción de partículas en las superficies de las plantas y la absorción de contaminantes gaseosos a través de los estomas de las hojas.

En general, de todos los contaminantes, solo el PM_{10} tenía concentraciones puntuales altas que a veces excedían los límites presentados por CONAMA y la OMS. Así mismo, todas las regiones monitoreadas tenían niveles de contaminantes con valores cercanos, nada muy atípico y dentro de la legislación brasileña. La calidad del aire de Salvador se considera buena la mayor parte del día, de acuerdo con las tasas medidas por las estaciones de monitoreo de aire instaladas en lugares estratégicos de la ciudad. Salvador tiene la ventaja de estar rodeado por el mar por 3 lados. Las ubicaciones costeras y las áreas abiertas a menudo experimentan un clima más ventoso y, por lo tanto, es probable que experimenten una mejor calidad del aire, además de ser ideal para la atracción turística.

La calidad del aire se reduce solo en las horas punta cuando aumenta el

movimiento del vehículo. Como puede ver en este ejemplo con datos del 31 de enero de 2014, un viernes, en la Avenida ACM, avenida con altos índices de embotellamiento y la que presentó, en general, los mayores niveles de contaminantes. Fue en las horas pico, que son de 6:00 a.m. a 10:00 a.m. y de 6:00 p.m. a 9:00 p.m., que aumentaron los niveles de contaminantes como se ve en las Figuras 32, 33 y 34.

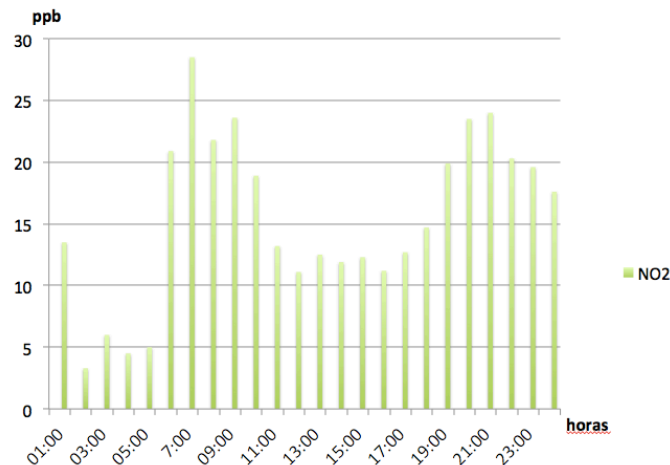


Figura 32 - Niveles de inmisión de NO₂ (ppb) del 31 de enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

En el mismo día, se analizaron los niveles de SO₂, CO y PM₁₀, que también tienen como fuente los vehículos automotores. Los resultados fueron los mismos. Durante las horas de más embotellamiento en Avenida ACM, presentaron los niveles más altos de CO, SO₂ y PM₁₀. Incluso aumentando los niveles durante ciertas horas, los valores de NO₂, CO e SO₂ no excedieron los límites establecidos por CONAMA y por la OMS.

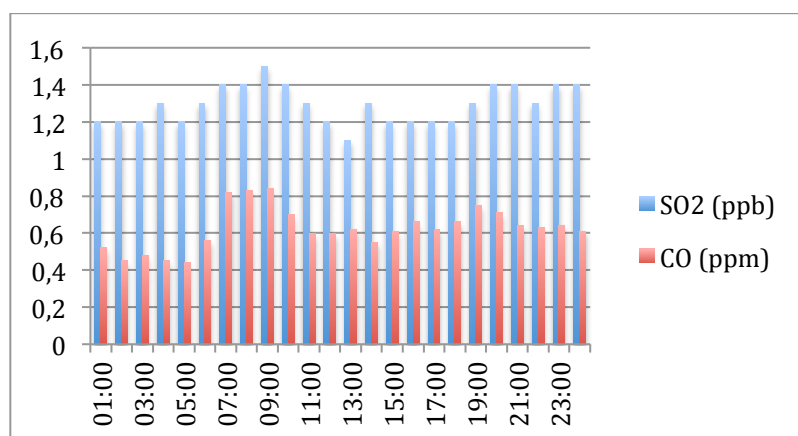


Figura 33 - Niveles de inmisión de SO₂ (ppb) y CO (ppm) del día 31 de Enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

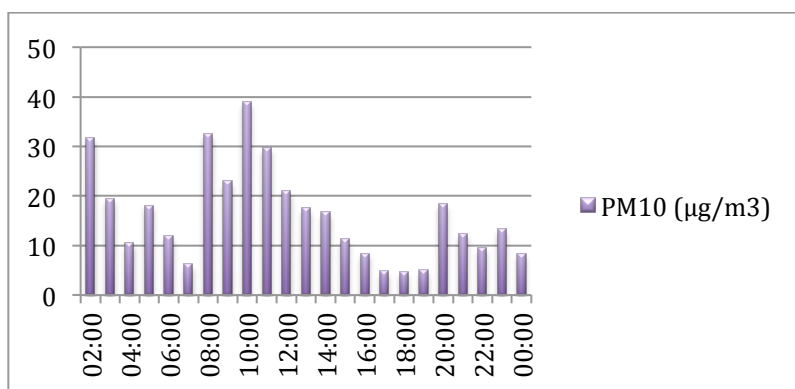


Figura 34 - Niveles de PM₁₀ del día 31 de Enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

Debido a su topografía y ubicación geográfica, Salvador tiene una excelente circulación del viento y excelentes condiciones de dispersión de contaminantes del aire, lo que contribuye a la calidad del aire. Sin embargo la calidad del aire tiende a empeorar en la región cuando falta lluvia y el aire casi se detiene, lo que contribuye al aumento de la concentración de contaminantes. Así, se analizaron los niveles de lluvia y la velocidad del viento del mismo día, 31 de enero de 2014.

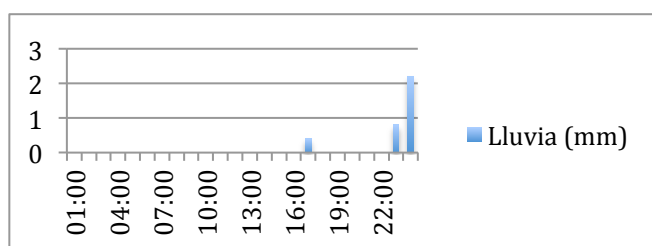


Figura 35 - Niveles de lluvia. Fuente: Elaboración personal

El día en cuestión solo llovió a las 17:00 (0,4 mm) y al final de la noche, donde alcanzó niveles de 2,2 mm (Figura 35), un pequeño volumen en comparación con otros días. También se analizó la velocidad del viento que ayuda en la dispersión de contaminantes, evitando así la acumulación de contaminantes en la misma región. A las 18:00 la velocidad del viento alcanzó casi 6 m/s.

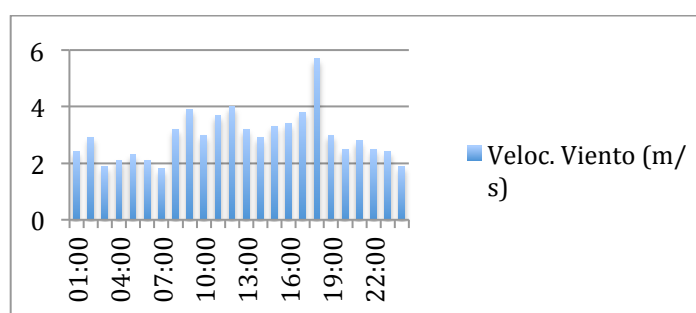


Figura 36 - Velocidad del viento del día 31 de Enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

Para hacer una comparación, se analizaron los niveles de SO₂, CO y NO₂ durante el mismo día, 31 de enero de 2014, en otras regiones. En la región de Paralela, que también es otra región con altos índices de vehículos, los valores de CO y SO₂ no excedieron 0,7 ppm y ppb, respectivamente (Figura 37).

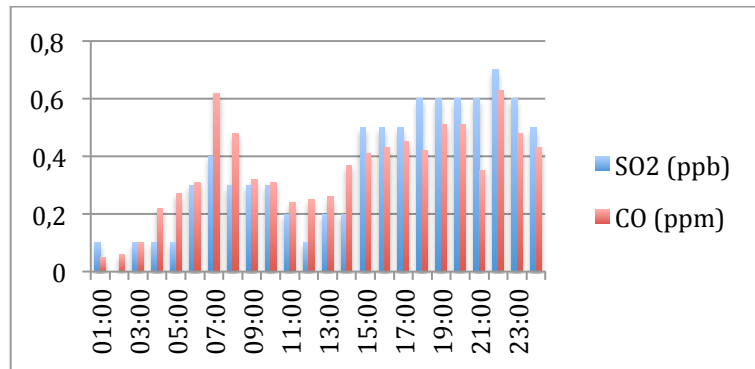


Figura 37 - Niveles de inmisión de SO₂(ppb) y CO (ppm) del día 31 de Enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

Los niveles de NO₂ en la región paralela también fueron más bajos que los valores presentados en la región Av. ACM. Lo que permaneció constante en todas las regiones fue que en las horas pico de embotellamiento los niveles de contaminantes se quedaban más altos.

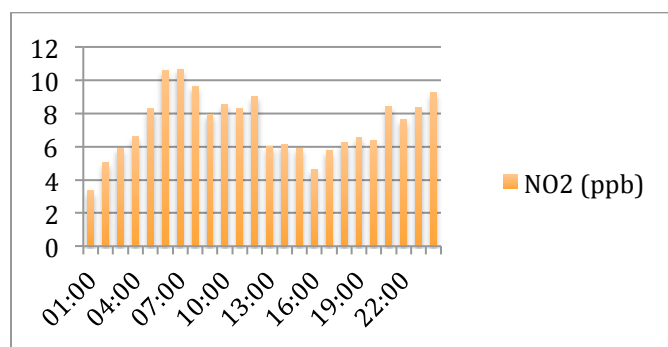


Figura 38 - Niveles de inmisión de NO₂ (ppb) del día 31 de Enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

Enero es uno de los meses más calurosos en la capital bahiana. En el día 31, la temperatura promedio fue de 27,2 °C (Figura 39). Para Bakonyi et al. (2004), la disminución en la incidencia de enfermedades respiratorias en el período de verano, se debe al hecho de que las altas temperaturas favorecen la dispersión de contaminantes, lo que resulta en una disminución en sus concentraciones. También es este mes la temporada alta, cuando la ciudad recibe a millones de turistas. El turismo tiene una serie de impactos positivos, que contribuyen en particular al desarrollo socioeconómico de los destinos turísticos, así como a la promoción y preservación de los recursos culturales y

naturales. Pero si la calidad del aire en una ciudad disminuye mucho, las tasas de turismo tienden a caer, como ha sucedido en China y Hong Kong.

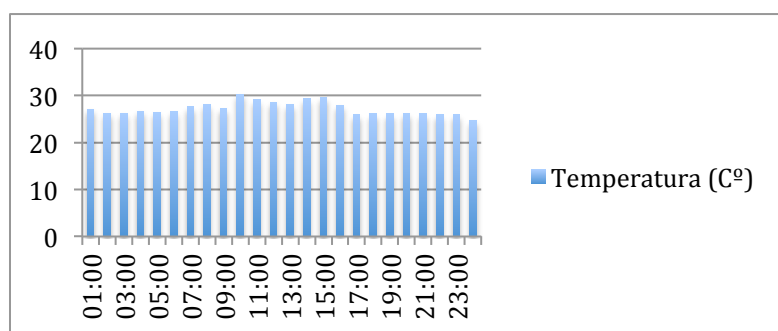


Figura 39 - Temperatura en Salvador día 31 de Enero de 2014. Fuente: Elaboración personal

Si la flota de vehículos de Salvador sigue creciendo, la calidad del aire de Salvador puede deteriorarse y además de dañar la fauna y la flora, la contaminación del aire puede afectar la salud de las personas. Varios estudios sugieren que existe una asociación entre la contaminación del aire y los problemas de salud en las poblaciones estudiadas. Una revisión de los efectos de la contaminación del aire y los problemas de salud realizada por Toledo y Nardocci (2011) en la ciudad de São Paulo (SP) también encontró resultados capaces de afirmar que la exposición a la contaminación del aire contribuye a aumentar la mortalidad y la morbilidad, principalmente para enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Según Negrete y col. (2010) los efectos adversos de los contaminantes también se pueden observar entre las personas más jóvenes sin enfermedades preexistentes. Yanagi y col. (2012) verificaron la influencia de las partículas inhalables en la incidencia y mortalidad por cáncer en los distritos donde se controlan los contaminantes en São Paulo (SP).

La falta de monitoreo de la calidad del aire en varias regiones de Brasil dificulta no solo el control de la contaminación, arriesgando la salud de la población y la degradación ambiental, sino también la posibilidad de estudios comparativos con otros países. Es difícil decir qué países emiten la mayor cantidad de contaminantes si no todos tienen una buena red de monitoreo. Aún así países como China, India y Hong Kong están en la parte superior de la lista como los países con la peor calidad del aire, afectando a la población, las regiones circundantes y el turismo en el país. Según un informe realizado por CNN, India representa siete de las 10 ciudades del mundo con los peores niveles de contaminación del aire. Las ciudades chinas, que alguna vez estuvieron en esta posición, han visto una mejora notable.

6.2 Comparación con la calidad del aire en América Latina

En América Latina y el Caribe (ALC), al menos 100 millones de personas están expuestas a la contaminación del aire por encima de los niveles recomendados por la OMS (Cifuentes et al, 2005). La única forma de tener estos datos es por medio de la medición. Sin embargo, el monitoreo de los contaminantes del aire es muy desigual en los países de América Latina, y generalmente está restringido a las grandes ciudades (Clean Air Institute, 2012; UNEP, 2016). Brasil, Chile y México son los países de América Latina con las mejores capacidades de monitoreo. En consecuencia se sabe que las áreas urbanas latinoamericanas más afectadas por las emisiones de contaminantes antropogénicos son: el área de São Paulo (Brasil), la ciudad de Santiago (Chile) y el área metropolitana de la Ciudad de México.

La Ciudad de México en los años 80 y 90 tenía tasas tan altas en plomo, ozono, carbono y azufre que incluso podría derribar a las aves, como decían los mexicanos. Los toques de queda, las alertas rojas y las crisis de salud pública fueron parte de la vida de los residentes de la Ciudad de México. Según el director general de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, los niveles de contaminación de la ciudad fueron similares a los observados en Beijing y el norte de China. La situación era tan crítica que llevó a las autoridades de la ciudad a crear un plan de contingencia ambiental, restringiendo el uso de vehículos y obligando a las fábricas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 40%. La combinación de inversiones en monitoreo (Figura 40), innovación de políticas y colaboración entre científicos y reguladores ha ayudado a diagnosticar y reducir la contaminación en el área metropolitana. Plan que se ha extendido a todo el país. Según el monitoreo de la calidad del aire en México, el país mantiene las condiciones del aire entre buenas y moderadas.



Figura 40 - Rede de monitoreo en México. Fuente: <http://aqicn.org/map/mexico/>

En Chile, según el Ministerio del Medio Ambiente, la Contaminación del Aire se mantiene por tercer año consecutivo como el principal problema ambiental para los chilenos, con un 38,4%, seguido por la basura y suciedad en las calles (20,7%). Se reconocen tres grandes fuentes de contaminación del aire: los medios de transporte, las actividades industriales y la calefacción de las viviendas. Con el propósito de disminuir los episodios críticos de contaminación del aire, principalmente en la zona centro sur del país, el Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio de Transportes desarrollaron las siguientes medidas: restricción vehicular y vías exclusivas en caso de preemergencia ambiental, Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), Guía de calefacción sustentable, monitoreo de la calidad del aire y por denuncias y fiscalización.



Figura 41 - Red de monitoreo en Chile. Fuente: <http://aqicn.org/map/chile/>

Para evaluar el estado de la calidad del aire, en relación con los estándares establecidos en las normas chilenas, se analizan los registros de las estaciones de monitoreo. Analizando las redes de monitoreo (Figura 09) se observó que hay varias estaciones $PM_{2.5}$ que demuestran condiciones insalubres o muy poco saludables en el país.

A pesar de la escasa red de monitoreo en los otros países latinoamericanos, alrededor de dos tercios de ellos tienen normas nacionales para la calidad del aire. Honduras, Belice, Haití, Cuba, Paraguay, Guatemala y Uruguay aún no tienen estándares por el momento. Cada país debe tener su propio conjunto de estándares de calidad del aire y redes de monitoreo como una forma de control. La siguiente tabla muestra los límites establecidos para cada país y como la OMS y la Unión Europea son mucho más exigentes con respecto a los límites de contaminantes.

Tabla 07 - Normas nacionales para la calidad del aire en países de América y guías globales de la OMS y Unión Europea (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Fuente: Elaboración personal

Contaminantes	PM ₁₀		Ozono		SO ₂		NO ₂		CO	
	24h	Anual	1h	8h	24h	Anual	1h	Anual	1h	8h
Unión Europea	50	40	-	120	125	-	200	40	-	10
OMS	50	20	-	100	20	-	200	40	-	-
Argentina	-	-	196	-	365	80	-	-	58	12
Bolivia	150	50	236	-	365	80	400	-	40	10
Brasil	150	50	160	-	365	80	320	100	40	10
Colombia	100	50	120	80	250	80	200	100	40	10
Chile	150	50	-	120	250	80	400	100	30	10
Costa Rica	150	50	160	-	365	80	400	100	40	10
Ecuador	150	50	160	120	350	80	-	100	40	10
El Salvador	150	50	235	120	365	80	-	100	40	10
Jamaica	150	50	235	-	365	80	100	-	40	10
México	120	50	216	157	288	66	395	100	-	13
Nicaragua	150	50	235	160	365	80	400	100	40	10
Panamá	150	50	235	157	365	80	-	100	30	10
Perú	150	50	-	120	80	-	200	100	30	10
Puerto Rico	150	-	235	147	367	79	188	100	40	10
Rep. Dominicana	150	50	250	160	150	100	400	100	40	10
Venezuela	150	50	200	160	365	80	367	100	35	10

Todos los países que tienen estándares tienen un estándar para el PM₁₀, excepto Argentina. Sin embargo, casi todos los países mencionados en la Tabla 07 tienen sus estándares más altos que los sugeridos por la OMS. Solo Puerto Rico y Jamaica tuvieron sus límites de NO₂ con una exposición de 1 hora por debajo de lo sugerido por la OMS y la Unión Europea. Los efectos del NO₂ son más significativos con la exposición a corto plazo, por lo que los estándares a corto plazo son de

particular importancia y debería ser más restringido. Perú y Colombia tienen estándares iguales a los límites de las directrices de la OMS, pero los otros países tienen estándares mucho más altos o no tienen estándares.

Los estándares para SO₂ por 24 horas en casi todos los países son significativamente más altos que las pautas de la OMS. Esto es motivo de preocupación debido a los efectos directos del SO₂ en la salud que se observa a concentraciones considerablemente más bajas (tan bajas como 5 µg/m³) (OMS, 2006). La directriz de la OMS sugiere los estándares de 10 minutos para SO₂, pero ningún país latinoamericano lo tienen. Es probable que esto esté asociado con el equipo raro y costoso requerido para permitir que se obtengan tales mediciones. Los países latinoamericanos han establecido estándares anuales que no son sugeridos por la OMS.

6.3 Comparación con la calidad del aire en China

Durante mucho tiempo, China ha puesto el crecimiento económico por delante del medio ambiente. Como resultado, se convirtió en uno de los mayores poderes planetarios, mientras que la población de sus grandes ciudades vivía en el humo. Eso es hasta 2014, cuando en el 4 de marzo, el primer ministro Li Keqiang anunció un cambio en la dirección del país: *"Declararemos la guerra a la contaminación tal como declaramos la guerra a la pobreza"*.

El problema de la contaminación del aire hoy está afectando prácticamente a todos los centros industriales más importantes de China porque detrás de cada producto *"hecho en China"* hay una industria fuertemente dependiente del carbón. China es hoy la chimenea de nuestro planeta, según CNN, el 75% de toda la electricidad generada en el país proviene de la quema de carbón. En el mundo, es el mayor productor y consumidor de este mineral. Según la Figura 42, es digno de mención que varios puntos del país no son saludables para vivir.

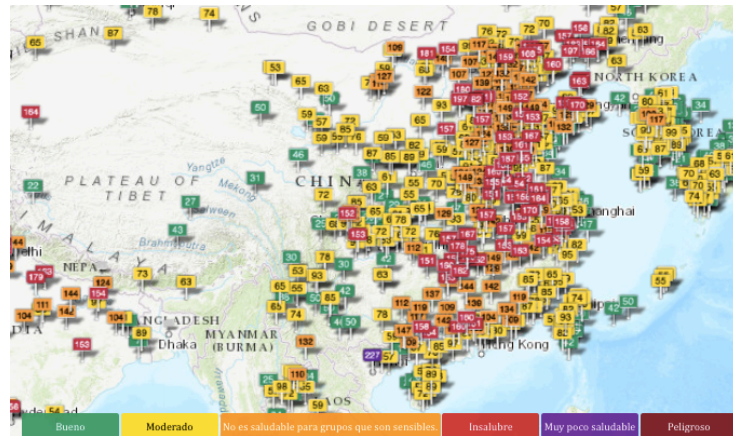


Figura 42 - Rede de monitoreo en China. Fuente: <http://aqicn.org/map/china>

De acuerdo con CNN, el país realizó un estudio de calidad del aire que mostró la necesidad de reducir la concentración de contaminación de partículas en un 10%, más aún en algunas ciudades. Solo en Beijing, donde la contaminación debía reducirse en un 25%, se destinaron 120 mil millones de dólares para este propósito. Para haber este cambio, el primer paso fue reducir el uso de carbón. Las nuevas plantas termoeléctricas que usarían carbón como combustible fueron prohibidas y las existentes tuvieron que reducir las emisiones. Los que fallaron en reducir las emisiones tuvieron el carbón reemplazado por gas natural como su matriz energética.

China parece estar transformándose gradualmente. En menos de una década, el país se ha convertido en un líder mundial en energía solar, eólica e hidroeléctrica, produciendo más GW de energía renovable que la potencia total de todos los demás países del mundo, excepto Estados Unidos. El gobierno también proporciona subsidios masivos para crear un entorno más propicio para la producción de energía renovable, así como formas de transporte menos contaminantes y un diseño urbano sostenible. Aunque los datos apuntan a una mejora en la calidad del aire, la contaminación del aire en China es aún mayor de lo que la OMS considera segura.

7 CONCLUSIONES

El examen periódico de la calidad del aire, es decir, su monitoreo, proporciona un conjunto de datos esenciales para guiar las políticas públicas para el control y el reemplazo de las tecnologías utilizadas en las actividades antrópicas. También señala la necesidad de introducir nuevos procesos menos contaminantes. La mala calidad del aire está teniendo serios impactos en la salud, el bienestar social y el desarrollo económico en todo el mundo.

Sin embargo, la diferencia significativa entre los patrones de comportamiento y los límites legales de concentración entre los principales contaminantes crea la necesidad de medios simplificados para la difusión de información, que permitan orientar las decisiones para el bienestar de la población. El monitoreo atmosférico constituye una necesidad urgente para la realización de diagnóstico de la situación ambiental, ya que el crecimiento de las fuentes emisoras en las ciudades se encuentran en plena expansión. La ley brasileña también necesita ser actualizada. Como se trata de una resolución de 1990, las autoridades brasileñas deben analizar y mejorar los estándares de calidad del aire para O₃, NO₂, CO, PM₁₀ y SO₂, e incluir estándares para PM_{2,5}.

Como toda gran ciudad, en Salvador, la expansión industrial y circulación de vehículos constituyen fuentes importantes de contaminantes atmosféricos y la proximidad de las emisiones generadas de la población se convierte en un problema de salud pública. Los resultados obtenidos por la red de monitoreo muestran que los límites de calidad del aire previstos en la Resolución 03/90 de CONAMA no se han excedido y que la calidad del aire en la capital de Bahía es buena: esto porque Salvador presenta condiciones geográficas que facilitan la dispersión de los contaminantes en la atmósfera. Incluso con este resultado, se deben realizar actividades para reducir aún más la concentración de contaminantes en Salvador. No se puede olvidar que, la emisión generada por el intenso tráfico de vehículos y por sus grandes centros industriales pueden exponer directamente a las personas que circulan o residen cerca de estas vías.

La generación local de datos en Brasil es crucial para proporcionar información que respalde la toma de decisiones de políticas públicas, así como la revisión para su implementación en las regulaciones locales. La adopción de políticas públicas para la mejora de la calidad del aire debe contemplar acciones continuas de monitoreo y requiere la efectividad de medidas específicas para minimizar los efectos adversos producidos por la contaminación vehicular y industrial.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A TARDE. Monitoramento do ar detecta poluição maior em Salvador. 15 de Septiembre de 2014. Disponible en: <<http://atarde.uol.com.br/bahia/salvador/noticias/monitoramento-do-ar-detecta-poluicao-maior-em-salvador-1622742>>.

A TARDE. Poluição do ar excede limites no Carnaval. 12 de Febrero de 2008. Disponible en: <<https://atarde.uol.com.br/bahia/salvador/noticias/1275157-poluicao-do-ar-excede-limites-no-carnaval>>.

BAHIA NO AR. Cetrel e Estado assinam protocolo de intenções para monitoramento da qualidade do ar em Salvador. 5 de Junio de 2019. Disponible en: <<https://bahianoar.com/cetrel-e-estado-assinam-protocolo-de-intencoes-para-monitoramento-da-qualidade-do-ar-em-salvador/>>.

BAKONYI, S. M. C.; DANNI-OLIVEIRA, I. M.; MARTINS, L. C.; BRAGA, A. L. F. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. Revista de Saúde Pública. São Paulo: n. 38, v. 5, 2004.

BELL, M. L.; DOMINICI, F.; SAMET, J. M. A Meta-Analysis of Time-Series Studies of Ozone and Mortality With Comparison to the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. *Epidemiology*, v. 16, n.4, jul 2005.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, Senado, 1998.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (CONAMA). Resolução CONAMA nº03/90, de 28-6-1999. [Estabelece padrões primários e secundários de qualidade do ar e critérios de classificação de episódios críticos de poluição do ar]. Disponible en: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (CONAMA). Resolução CONAMA nº05/89, de 06-12-1989. [Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do ar - PRONAR.] Disponible en: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>.

CANÇADO, J. E. D.; BRAGA, A.L.F.; AMADOR, L. A.; ARBEX, Marcos Abdo; SALDIVA, P. H. N.; SANTOS, U. P. . Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica.. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, v. 32, p. S5-S11, 2006.

CARVALHO, J.C. Estudo dos processos de transporte e difusão na camada limite planetária utilizando os modelos RAMS e SPRAY: Aplicação ao caso do experimento TRACT. 1999. 184 f. Tese de doutorado - IAG-USP, São Paulo.

CETESB. Qualidade do ar no estado de São Paulo. São Paulo, 2010. (Série Relatórios / CETESB, ISSN 0103-4103) . Disponible en: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>>.

CETESB. Relatório Anual da Qualidade do Ar do Estado de São Paulo. São Paulo; 2009. Disponible en: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>>.

CIFUENTES, L. A.; KRUPNICK, A. J.; O'RYAN R.; TOMAN M, A. (2005). Urban Air Quality and Human Health in Latin America and the Caribbean. Pan American Health Organization, Washington DC.

CHANG, S.; LEE, C. Evaluation of the trend of air quality in Taipei, Taiwan from 1994 to 2003. 2006.

CHEN, Y.; Impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy. Proceeding of the National Academy of Sciences. 2013. Disponível en: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3740827/>>.

CLENA AIR INSTITUTE. Air Quality in Latin America: An Overview. 2012. Disponível en: <http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/19502/Air_Quality_in_Latin_America_An_Overview.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CNN. 22 of the top 30 most polluted cities in the world are in India. Marzo de 2019. Disponível en: <<https://edition.cnn.com/2019/03/04/health/most-polluted-cities-india-china-intl/index.html>>.

CNN. Solar Power is now cheaper than the grid in hundred of chinese cities. 15 de Agosto de 2019. Disponível en: <<https://edition.cnn.com/2019/08/15/business/china-solar-electricity-scli-intl/index.html>>.

CNN. Por James Griffiths. China has made major progress on air pollution. Wuhan protests show there's still a long way to go. 11 de enero de 2019. Disponível en: <<https://edition.cnn.com/2019/07/10/asia/china-wuhan-pollution-problems-intl-hnk/index.html>>.

CUNHA, R. M. P. Transporte de poluentes na região do Polo Petro químico de Triunfo - RS. 2002. 155f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2002.

DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Anuário estatístico de tráfego aéreo. 2018. Seção 1, p.112-114. Rio de Janeiro.

FURLAN, C. M., Efeitos da poluição aérea de Cubatão. 1998. 108f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, USP, Brasil.

GAGA, E.O.; DÖGEROGLU, T.; ÖZDEN, Ö.; ARI, A.; YAY, O. D.; ALTUG, H.; AKYOL, N; ÖRNEKTEKIN, S.; DOORN, W. V. Evaluation of air quality by passive and active sampling in an urban city in Turkey: current status and spatial analysis of air pollution exposure. 2012.

G1 BAHIA. Volume de chuva em Salvador nesta segunda é de 198mm, diz prefeitura. 2015. Disponível en: <<http://g1.globo.com/bahia/noticia/2015/04/volume-de-chuva-em-salvador-nesta-segunda-e-de-198-mm-diz-prefeitura.html>>.

GURJAR, B. R.; BUTLER, T. M.; LAWRENCE, M. G.; LELIEVELD, J. Evaluation of emissions and air quality in megacities. 2007.

HAJAT, S.; HAINES, A.; ATKINSON, R.W.; BREMNER, A. S.; ANDERSON, H. R.; EMBERLIN, J. Association between air pollution and daily consultations with general practitioners for allergic rhinitis in London, United Kingdom. American Journal of Epidemiology. v.153, 2001.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível en: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/salvador/panorama>>.

IEMA. Dados das estações de monitoramento de qualidade do ar na região de Anchieta e dados meteorológicos da Estação do Porto. 2010.

- IEMA. Relatório da Qualidade do Ar na Região da Grande Vitória - 2007. IEMA. Cariacica. 2007.
- INEA. Relatório Anual da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro; 2009. Disponível em: < <http://www.inea.rj.gov.br> >.
- LIMA, C. B. V. Paralela em movimento: um estudo sobre apropriação do espaço público do canteiro central da Avenida Luís Viana. Universidade Federal da Bahia; Instituto de Geociências. P. 53. Salvador, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/19788/1/Cláudia%20Brandão%20Vieira%20Lima.pdf>>.
- LYRA, D. G. P. Modelo Integrado de Gestão da Qualidade do Ar da Região Metropolitana de Salvador. 2008. 262 f. Tese (Doutorado em engenharia química) - Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas. 2008.
- LYRA, D. G. P.; TOMAZ, E. A influência da meteorologia na dispersão dos poluentes atmosféricos da Região Metropolitana de Salvador. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis. 2006.
- MARCILIO, I.; GOUVEIA, N. Quantifying the impact of air pollution on the urban population of Brazil. Cad. Saúde Pública. Rio de Janeiro, 2007.
- MARTINS, E. M.; CORRÊA, S. M.; ARBILLA, G. Impacto dos fatores meteorológicos na qualidade do ar. In: Xi Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro, Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2000.
- MIRANDA J. (2006). Impacto Económico en la Salud por Contaminación del Aire en Lima Metropolitana. Instituto de Estudios Peruanos. Setiembre, 2006.
- MIRANDA, R. M; ANDRADE, M. de F.; FORNARO, A.; ASTOLFO, R.; ANDRE, P. A.; SALDIVA, P. Urban air pollution: a representative survey of PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. 2011.
- MOURA, M.; JUNGEN, W. L.; MENDONÇA, G. A. S.; LEON, A. P. D. Air quality and emergency pediatric care for symptoms of bronchial obstruction categorized by age bracket in Rio de Janeiro, Brazil. Cad. Saúde Pública. Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, p. 635-644, Mar. 2009.
- MORAES, M. R. Implementação de um sistema de modelos para a qualidade do ar. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2001.
- MURTAUGH, D. China is winning its war on air pollution, at least in Beijing. Bloomberg. Enero de 2018. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-11/china-is-winning-its-war-on-air-pollution-at-least-in-beijing>>.
- NEDEL, A.S. Aplicação de um Modelo de Dispersão de Poluentes na Região de Candiota-RS e sua Relação com as Condições Meteorológicas. 2003. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- NEGRETE, B. R.; ROSA, C. C.; IKEUTI, D. H.; DELENA, P. J.; BORBA, T. M.; BRAGA, A. L. F. Poluição atmosférica e internações por insuficiência cardíaca congestiva em adultos e idosos em Santo André (SP). Arquivos Brasileiros de Ciências da Saúde, v.35, n. 3, p. 208- 12, Set/Dez 2010.

ONURSAL, B., GAUTAM. S.P. Vehicular Air Pollution: Experiences from Seven Latin American. World Bank Technical Paper, 1997.

PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; INONE, P. C, JUNIOR, S. R.; CABUSSÚ, M. S.; CERQUEIRA, D. P.; CHAVES, C. S. S. Atmospheric pollution (coastal and industrial) effects on electric energy distribution insulators in Salvador, Brazil, metropolitan region. Química. São Paulo, v. 31, 2008.

QIAO, X.; JAFFE, D.; TANG, Y.; BRESNAHAN, M.; SONG, J. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: are China's air quality standards sufficient yet?. Switzerland, 2015.

QUITÉRIO, S. L., ARBILLA, G., SILVA, C.R.S., ESCALEIRA, V. e MAIA, L.F.P.G. "Os Municípios da Baixada Fluminense do Estado do Rio de Janeiro e seus Problemas com a Qualidade do Ar". In: Anais da 26a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Poços de Caldas, Minas Gerais, Maio, 2003.

R7. Centrais vão monitorar qualidade do ar durante o carnaval de Salvador. 13 de Fevereiro de 2014. Disponível em: <<https://entretenimento.r7.com/carnaval-2014/bahia/centrais-vao-monitorar-qualidade-do-ar-durante-o-carnaval-de-salvador-26082019>>.

SÁNCHEZ-CCOYLLO, O.R.; ANDRADE, M.F. The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil. Environmental Pollution. 2002.

SANTOS, M. A.; A Legislação Ambiental no Controle da Poluição Aérea e a Geração Termelétrica no Brasil. In: VIII Congresso Brasileiro de Energia, 1996, Rio de Janeiro. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia. Rio de Janeiro : COPPE/UFRJ, 1996. v. iii. p. 866-875.

SEREMI. Mapa de Calidad del Aire de la Región Metropolitana. Disponível em: <<http://airesantiago.gob.cl/balance-1997-2017/calidad-del-aire/>>.

SILVEIRA, J. C. S.; M.B. J. Análise das anomalias positivas e negativas de precipitações e temperaturas relacionadas com eventos La Niña e El Niño na cidade do Rio Grande – RS. Saraiva, 1999.

SHUKLA, J. B.; MISRA, A. K.; SUNDAR, S.; NARESH, R. Effect of rain on removal of a gaseous pollutant and two different particulate matter from the atmosphere of a city. Septiembre 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717707003640>>

SOCICAM. Temporada de cruzeiros em Salvador teve aumento de 7% no fluxo de passageiros. 4 de Junho de 2019. Disponível em: <<https://www.socicam.com.br/2019/06/04/temporada-de-cruzeiros-em-salvador-teve-aumento-de-7-no-fluxo-de-passageiros/>>.

THE GUARDIAN. Beijing raises 'red alert' threshold for air pollution warning. 22 de febrero de 2016. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/world/2016/feb/22/beijing-raises-red-alert-threshold-for-air-pollution-warning>>.

TOLEDO, G. I. F. M.; NARDOCCI, A.C. Poluição veicular e saúde da população: uma revisão sobre o município de São Paulo (SP), Brasil. Revista Brasileira de Epidemiologia, v.14, n.3, p.445-54, 2011

TRANSALVADOR. Frota de Salvador. 2019. Disponível em:

<<http://transalvador.salvador.ba.gov.br/transparencia/index.php?ano=2019>>.

UNEP. Integrated Assessment of Short-Lived Climate Pollutants for Latin America and the Caribbean: Improving air quality while mitigating climate change. Summary for decision makers. Publisher: United Nations Environmental Program, Nairobi Kenya, 2016.

VENTURA, L. M. B; PINTO, F. de O.; SORAES, L. M.; ADERVAL, S. L.; GIODA, A. Evaluation of air quality in a megacity using statistics tolls. 2017.

WANDERLEY, A.; SANTOS L. Um retrato da prostituição soteropolitana. 21 de Novembro de 2011. Disponível em: <<http://imprensaodigital126.ufba.br/um-retrato-da-prostituicao-soteropolitana/>>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Air Quality Guidelines Global Update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen, 2006.

WATTS, J.; Air pollution could become China's biggest health threat, expert warns. The Guardian. 16 de marzo de 2012. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2012/mar/16/air-pollution-biggest-threat-china>>.

Xin, J.Y.; Wang, Y.S.; Tang, G.Q.; Wang, L.L.; Sun, Y.; Wang, Y.H.; Hu, B.; Song, T.; Ji, D.S.; Wang, W.F.; Variability and reduction of atmospheric pollutants in Beijing and its surrounding area during the Beijing 2008 Olympic Games. Chin. Sci. Bull. 2010.

YANAGI, Y.; ASSUNÇÃO, V. J.; BARROZO, V.L. Influência do material particulado atmosférico na incidência e mortalidade por câncer no Município de São Paulo, Brasil. Cadernos de Saúde Pública, Rio de Janeiro, v.28, n.9, p.1737-48, 2012.

ZHAO, H.; ZHENG, Y.; LI, T. Air quality and control measures evaluation during the 2014 youth olympic games in Nanjing and its surrounding cities. 2017.

ZHOU, K.; YE, Y.; LIU, Q.; LIU A., PENG, S. Evaluation of ambiente air quality in Guangzhou, China. Septiembre, 2006.