

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) por difusión activa,  
como indicador de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala

**Ana Delmi Castañeda Franco**

Química

Guatemala, septiembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA

Determinación de la concentración de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) por difusión activa,  
como indicador de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala

**Informe de Tesis**

Presentado por

**Ana Delmi Castañeda Franco**

Para optar al título de

Química

Guatemala, septiembre de 2018

## **JUNTA DIRECTIVA**

Dr. Rubén Dariel Velásquez Miranda	Decano
M.A. Elsa Julieta Salazar Meléndez de Ariza	Secretaria
Msc. Miriam Carolina Guzmán Quilo	Vocal I
Dr. Juan Francisco Pérez Sabino	Vocal II
Lic. Carlos Manuel Maldonado Aguilera	Vocal III
Br. Andreina Delia Irene López Hernández	Vocal IV
Br. Carol Andre Betancourt Herrera	Vocal V

## AGRADECIMIENTOS

- A** Dios por las bendiciones que ha derramado en mí y por permitirme obtener este logro.
- A** Mi madre porque siempre fomento la educación en mis hermanos y en mí. Gracias mami.
- A** Mis hermanos, cuñadas y sobrinos en especial Norma, Maoly, Flavio y Dario por apoyarme y creer en mí siempre.
- A** Mi esposo Eduardo Saquilmer por compartir este logro conmigo, gracias por asesorarme, apoyarme y hacerme reír en todo momento, contigo la vida tiene otro sentido
- A** José Eduardo por ser la luz en mi camino, por enseñarme a disfrutar la vida, y porque en más de una vez nos acompañaste a muestrear.
- A la** Familia Saquilmer en especial a doña Aury y don Antonio por todo su apoyo; a Helen, Marisol y Brenda.
- A la** Universidad de San Carlos de Guatemala por crear y hacer crecer el amor a la Academia y concientizarme sobre la realidad de mi querida Guatemala.
- A la** Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.
- A la** Escuela de Química, por permitirme aprender todas las ramas de la química.
- A** Los catedráticos que transmitieron con sabiduría muchos de sus conocimientos, consejos y agradables momentos, en especial Lcda. Silvia Coto, Lcdo. Oswaldo Martínez, Lcda. Bessie Oliva, Lcda. Nohemí Orozco, Lcda. Idolly Carranza. Lcda. Flor Lara y Dr. Oscar Cobar.
- A mi Asesor** Lcdo. Pablo Oliva por su apoyo incondicional, sus consejos y sobre todo por su paciencia a la hora de revisar este trabajo.
- Al** Departamento de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en especial a Lcda. Carolina Guzmán por confiar en mí y permitirme trabajar en el laboratorio, a Lcda. Cinthya Rivera y Lcda. Mayté de Donis por apoyarme en la parte experimental, gracias a todas por su valiosa amistad.
- A** Mis amigos Brenda María, Enio Lima, Eduardo Mendoza, Marleny Perén, Maximiliano Estrada, Julio Ramos (†), Cristhal García, Francisco Javier, Frankie Monterroso y Erick Barillas, por los buenos momentos compartidos.
- A** Don Sergio, don Panchito, doña Yoli, doña Erica, doña Olguita, don Víctor Hugo (†), Elizabeth Ruiz y Fredy López porque también contribuyeron a mi conocimiento académico y ser mejor ser humano.
- A** Mis peludos Scottie (†), Junior (†), Jack (†), Dante y Sky gracias por su amistad, cariño, travesuras y por cuidarnos siempre.

## **DEDICATORIA**

A mi madre María Areli por todo su esfuerzo, regaños y ser una fuente de fortaleza y cariño inagotable, la amo.

## INDICE

<b>I. RESUMEN</b> .....	1
<b>II. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
<b>III. ANTECEDENTES</b> .....	4
<b>A. Área de estudio</b> .....	4
1. Ubicación y geografía.....	4
2. División política .....	4
3. Clima .....	4
4. Población.....	5
<b>B. Origen de la contaminación</b> .....	6
1. Parque vehicular .....	6
2. Gases de efecto invernadero directos e indirectos .....	7
<b>C. Contaminantes criterio</b> .....	9
1. Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	9
2. Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) .....	10
3. Material particulado (PM) .....	10
4. Plomo (Pb).....	11
5. Monóxido de carbono (CO).....	12
6. Ozono (O <sub>3</sub> ).....	12
<b>D. Daños a la salud por exposición a NO<sub>2</sub></b> .....	12
<b>E. Emisiones más importantes de NO<sub>2</sub></b> .....	14
<b>F. Estudios previos realizados sobre la contaminación del aire en Guatemala</b> .....	15
<b>IV. JUSTIFICACIÓN</b> .....	21
<b>V. OBJETIVOS</b> .....	24
General.....	24
Específicos.....	24
<b>VI. HIPÓTESIS</b> .....	25
<b>VII. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	26
<b>A. Universo y Muestra</b> .....	26
<b>B. Materiales</b> .....	26
1. Equipo .....	26
2. Reactivos .....	27

3.	Material de muestreo .....	27
4.	Cristalería .....	27
C.	Métodos .....	28
1.	Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) .....	28
2.	Preparación de reactivos .....	28
3.	Calibración del equipo .....	29
4.	Desarrollo del muestreo .....	29
5.	Almacenamiento y transporte de la muestra .....	30
6.	Preparación de curva de calibración .....	30
7.	Análisis de la muestra .....	30
D.	Diseño de la Investigación.....	31
VIII.	RESULTADOS .....	32
A.	Estación Calzada San Juan .....	32
B.	Estación Calle Martí .....	33
C.	Estación EFPEM-USAC .....	34
D.	Estación FONTIERRAS .....	35
E.	Estación INCAP.....	36
F.	Estación INSIVUMEH.....	37
G.	Estación MARN.....	38
H.	Estación MUSAC-USAC .....	39
I.	Estación Edificio T-10-USAC.....	40
J.	Comparación de resultados en las distintas estaciones (puntos) de muestreo .....	41
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
X.	CONCLUSIONES.....	47
XI.	RECOMENDACIONES .....	48
XII.	REFERENCIAS .....	49
XIII.	ANEXOS.....	54

## INDICE DE CUADROS

1	Regiones climáticas de Guatemala	5
2	Emisiones de dióxido de nitrógeno (cifras toneladas)	7
3	Promedios anuales de contaminación del aire por NO <sub>2</sub> en Guatemala en los años 199-2016 (( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ))	17
4	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "Calzada San Juan"	28
5	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	28
6	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "Calle Martí"	29
7	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	29
8	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "EFPEM-USAC"	30
9	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	30
10	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "FONTIERRAS"	31
11	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	31
12	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "INCAP"	32
13	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	32
14	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "INSIVUMEH"	33
15	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	33
16	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "MARN"	34
17	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	34
18	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "MUSAC-USAC"	35
19	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	35
20	Parámetros geográficos de la estación de monitoreo "Edificio T-10, USAC"	36
21	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo	36
22	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo comparada con el valor guía de la OMS	37
23	Cálculos estadísticos obtenidos en base a los resultados de cuantificación de NO <sub>2</sub>	38



**INDICE DE GRÁFICAS**

1	Valores mensuales de NO <sub>2</sub> durante el año 2016 en los seis puntos de muestreo del Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA)	16
2	Valores promedio-anales de la concentración de dióxido de nitrógeno NO <sub>2</sub> durante los años 1995-2016	16
3	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "Calzada San Juan"	28
4	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en estación "Calle Martí"	29
5	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "EFPEM"	30
6	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "FONTIERRAS"	31
7	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "INCAP"	32
8	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "INSIVUMEH"	33
9	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "MARN"	34
10	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "MUSAC-USAC"	35
11	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en la estación "Edificio T-10, USAC"	36
12	Concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas durante 6 meses de muestreo comparada el valor guía de la OMS	37
13	Promedios de concentraciones de NO <sub>2</sub> obtenidas en 6 meses de muestreo	38

## INDICE DE FIGURAS

1	Contaminación del aire sobre la Ciudad de Guatemala en el año 2009	48
2	Ilustración de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos	49
3	Contaminación por dióxido de nitrógeno	50
4	Mapa de la República de Guatemala	51
5	Imagen Satelital de la distribución de los puntos de muestreo de la Ciudad de Guatemala	52
6	Imagen Satelital de la ubicación de los puntos de muestreo en la Ciudad de Guatemala	53
7	Mapa de la ubicación de muestreo “Calzada San Juan”	54
8	Mapa de la ubicación de muestreo “Calle Martí”	55
9	Mapa de la ubicación de muestreo “EFPEM-USAC”	56
10	Mapa de la ubicación de muestreo “FONTIERRAS”	57
11	Mapa de la ubicación de muestreo “INCAP”	58
12	Mapa de la ubicación de muestreo “INSIVUMEH”	59
13	Mapa de la ubicación de muestreo “MARN”	60
14	Mapa de la ubicación de muestreo “MUSAC-USAC”	61
15	Mapa de la ubicación de muestreo “Edificio T-10, USAC”	62
16	Colocando equipo en estación “Calzada San Juan”	63
17	Estación de muestreo “Calle Martí”	64
18	Tomando la muestra de la estación “EFPEM-USAC”	65
19	Tomando datos de la muestra de estación “FONTIERRAS”	66
20	Estación de muestreo “INCAP”	67
21	Diagrama del equipo monitor de gases	68
22	Muestras recolectadas esperando llegar a temperatura ambiente para ser analizada	69
23	Analizando muestras	70
24	Muestras preparadas esperando para el análisis	71

## I. RESUMEN

El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub>, es uno de los principales contaminantes atmosféricos producto de actividades antropogénicas. Sin embargo, también se produce por fuentes naturales. La Organización mundial de la salud (OMS) clasifica al NO<sub>2</sub>, como un "contaminante criterio" debido a sus efectos nocivos para la salud de los humanos y deterioro del medio ambiente.

Este trabajo muestra los resultados de la investigación de la determinación de la concentración de NO<sub>2</sub>, en 9 puntos de muestreo ubicados en la ciudad de Guatemala, por el método de difusión activa y arsenito de sodio.

Este es el primer estudio que se realiza en la ciudad de Guatemala con el método de difusión activa en nueve estaciones de muestreo, con la colaboración del Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), y el Laboratorio del Departamento de Toxicología ambos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

El estudio se efectuó con el apoyo del laboratorio de monitoreo del aire ya que prestó el acceso a los puntos de muestreo de Calzada San Juan, Efpem, Incap, Insivumeh, Musac y edificio T-10, mientras que el Fondo Nacional de Tierras (Fontierras), antiguas instalaciones del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la estación ubicada en una residencia particular ubicada en 6-42 zona 2 Calle Martí, prestaron sus instalaciones para este muestreo de NO<sub>2</sub> en el aire.

Los análisis de las muestras recolectadas se realizaron en el laboratorio del departamento de Toxicología de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, mediante espectrofotometría de absorción molecular a 540 nanómetros. El muestreo se llevó a cabo durante la época seca (de noviembre 2017 a abril 2018) por medio del método de difusión activa.

Todas las concentraciones de NO<sub>2</sub> determinadas durante el muestreo se encuentran por debajo de los 40 µg/m<sup>3</sup> que es el valor guía para promedios anuales; en el cuadro No. 22 se compara con este valor debido a que la OMS no reporta un promedio de concentraciones para 24 horas.

## II. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire en la ciudad de Guatemala se ha incrementado debido al crecimiento del parque vehicular y la falta de normas que determinen los límites de los contaminantes ambientales por parte de las autoridades de gobierno, no teniendo así una serie de normas y reglas que respetar para el mejoramiento de la calidad del aire (MARN, 2012, p. 25).

Instituciones como la Universidad de San Carlos de Guatemala, el Instituto Nacional de Meteorología, Vulcanología e Hidrología y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales han realizado estudios sobre la contaminación en el aire de la ciudad de Guatemala encontrando un deterioro en la calidad del aire por altos niveles de contaminación que en su mayoría se debe a fuentes móviles como lo es el parque vehicular (MARN, 2012, p. 25).

Factores como el crecimiento poblacional que ha provocado un aumento del uso de vehículos a combustión y sumado al mal diseño de las calles y avenidas de la ciudad de Guatemala han fusionado en un constante y tedioso tráfico vehicular que ya no es exclusivo de las horas pico como sucedía en la década pasada (MARN, 2012, p. 25).

Por tales razones existe una constante emisión de contaminantes del aire hacia el ambiente urbano, de particular relevancia los “contaminantes criterio” que pone en riesgo la calidad de vida de la población en general en la ciudad de Guatemala. Uno de los contaminantes de mayor importancia es el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), por tener serias implicaciones en la salud de las personas al afectar directamente el sistema respiratorio. Además, esta especie gaseosa mantiene relación con otros contaminantes como lo son el ozono troposférico, las partículas menores a 2.5 micras de diámetro y la lluvia ácida (MARN, 2012, p. 28).

En la ciudad de Guatemala el Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA) perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala ha monitoreado el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en 6 estaciones (Incap ubicado en la zona 11, Musac ubicado en la zona 1, edificio T-10 ubicado dentro de la ciudad universitaria, en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia en zona 12, Insivumeh ubicado en zona 13, calzada San Juan zona 7, Efpem – USAC, zona 12) por el método de difusión pasiva (con 30

días de medición) evidenciándose concentraciones que se encuentran por encima del valor permisible establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) siendo de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para mediciones de promedio anual en los puntos de mayor afluencia vehicular.

El valor guía actual de la OMS de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (media anual) se estableció para proteger al público de los efectos del  $\text{NO}_2$  gaseoso en la salud. El fundamento de esto es que, debido a que la mayoría de los métodos de reducción de la concentración son específicos para los  $\text{NO}_x$ , no están concebidos para controlar otros contaminantes que los acompañan, pudiendo incluso aumentar sus emisiones. Sin embargo, si se vigila el  $\text{NO}_2$  como marcador de mezclas complejas de la contaminación derivada de la combustión se debería utilizar un valor guía anual más bajo (OMS, 2000).

El método de difusión activa para  $\text{NO}_2$  es una metodología puntual que reduce el tiempo de muestreo a 24 horas de medición. Este método consiste en la utilización de una bomba de vacío con la cual se hace pasar una corriente de aire por una solución absorbente de arsenito de sodio en donde se capta el  $\text{NO}_2$  que esté presente en el ambiente para posteriormente realizar el análisis en el laboratorio por espectrofotometría UV/VIS y comparar el resultado obtenido, con el valor establecido por la (OMS) que es de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (media anual) (OMS, 2005).

Los estudios experimentales realizados con animales y personas indican que el  $\text{NO}_2$ , en concentraciones de corta duración pueden ser superiores a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cual, es un gas tóxico con efectos importantes en la salud (OMS, 2000).

Con estos resultados se podrá obtener información del comportamiento del  $\text{NO}_2$  en la ciudad de Guatemala en una menor escala de tiempo (24 horas de medición) durante la época de noviembre de 2017 a abril de 2018. Por lo expuesto con anterioridad, el objetivo de esta investigación es determinar la presencia de contaminación por dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en el aire en la ciudad de Guatemala en 9 puntos de muestreo.

### **III. ANTECEDENTES**

#### **A. Área de estudio**

##### **1. Ubicación y geografía**

El municipio de Guatemala se localiza a una latitud de 14° 38' 29" y una longitud 90° 30' 47". Al norte limita con los municipios de Chinautla y San Pedro Ayampuc (Guatemala), al sur con los municipios de Santa Catarina Pinula, San José Pinula, Villa Canales, San Miguel Petapa y Villa Nueva (Guatemala); al este con el municipio de Palencia (Guatemala); y al oeste con el municipio de Mixco (Guatemala) (Ministerio de Economía de Guatemala; 2013).

Cuenta con una extensión territorial de 228 kilómetros cuadrados, de los cuales 80 km. corresponden a la ciudad capital, incluyendo sus colonias; y se encuentra a una altura de 1498.89 metros sobre el nivel del mar, por lo que generalmente su clima es templado (Ministerio de Economía de Guatemala; 2013).

##### **2. División política**

La Ciudad está dividida en 25 zonas, lo cual hace muy sencillo encontrar direcciones, plan urbanístico diseñado por el Ingeniero Raúl Aguilar Batres. Guatemala tiene una estructura cuadrada que se expande en todas las direcciones lo cual es una característica importante del urbanismo neoclásico de principios de siglo, 15 aldeas y 18 caseríos. Debido a que no todas las zonas son habitadas o transitadas en igual manera existe contaminación variada dentro del municipio de Guatemala (OPS/OMS; 2010; p.8).

##### **3. Clima**

Debido a la variada topografía del país en el territorio existe gran diversidad de climas y microclimas, según el INSIVUMEH, el clima es producto de los factores astronómico, geográfico y meteorológico, adquiriendo características particulares por la posición

geográfica y topografía del país, climáticamente se ha zonificado al país en seis regiones perfectamente caracterizadas por el sistema de Thornthwaite, las cuales se presentan en el siguiente cuadro (MARN, 2012, p. 29).

**Cuadro 1: Regiones climáticas de Guatemala**

<b>Zona</b>	<b>Descripción</b>
Las planicies del Norte	Comprende las planicies de Petén.
La Franja Transversal del Norte	Definida por la ladera de la Sierra de los Cuchumatanes, Chamá y Las Minas, el norte de los departamentos de Huehuetenango, El Quiché, Alta Verapaz y cuenca del río Polochic.
Meseta y altiplanos	Comprende la mayor parte de los departamentos de Huehuetenango, El Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Sololá, Guatemala, Totonicapán, Chimaltenango, sectores de Jalapa y las Verapaces.
La bocacosta	Es una región angosta que transversalmente se extiende desde el departamento de San Marcos hasta Jutiapa, situada en la ladera montañosa de la Sierra Madre.
Planicie costera del Pacífico	Esta región se extiende desde el departamento de San Marcos hasta Jutiapa.
Zona oriental	Comprende la mayor parte del departamento de Zacapa y sectores de los departamentos de Jalapa, El Progreso, Jutiapa y Chiquimula.

Fuente: datos obtenidos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh).

Guatemala alberga seis zonas climáticas, por lo que los parámetros meteorológicos (humedad, presión atmosférica, temperatura, viento y precipitación pluvial) difieren de una zona a otra (MARN, 2012, p. 29).

En el departamento de Guatemala, específicamente en la ciudad de Guatemala existe variedad de climas en temperatura, precipitación y humedad, la temperatura puede variar de 17 a 32 grados, la precipitación puede ser lluvia o granizo (MARN, 2013, p. 123).

#### **4. Población**

Para diciembre del 2015 la población de Guatemala superaba los 17 millones de personas según el Instituto Nacional de Estadística (INE), aunque los índices que se utilizan para

generar las políticas públicas no son confiables, debido a la falta de un censo. Según normas internacionales, es recomendable hacer un censo de población y vivienda cada 10 años, y cada cinco, un conteo general para observar los cambios (INE, 2015).

De acuerdo con el último censo realizado en la ciudad, en ella habitan 2.149.107 personas, pero considerando su área metropolitana de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística, alcanza un estimado de 4.703.865 habitantes para 2015, lo que la convierte en la aglomeración urbana más poblada y extensa de América Central (INE, 2015).

## **B. Origen de la contaminación**

El concepto de vulnerabilidad ambiental tiene que ver con la medida en que un territorio tiene para ser afectado por eventos relacionados con el tema de ambiente y más recientemente con el cambio climático. La probabilidad de ocurrencia y la proporción del evento es lo que se le considera como la amenaza ambiental, se dice que Guatemala está entre los 10 países más vulnerables del planeta ante los efectos del cambio climático (MARN, 2012, p. 37).

La población de Guatemala es mayoritariamente rural, sin embargo, en la actualidad existe una tendencia a la urbanización, por lo cual existe un constante incremento en la cantidad de energía para cubrir las necesidades de la población. Según el Ministerio de Energía y Minas tomando como base el año 2009, el balance energético nacional muestra que el consumo de leña constituyó el 48.9%, el diésel 13.2%, las gasolinas 11.8%, el *fuel oil* 9%, por último, el bagazo de caña 7,9% y el gas licuado de petróleo 3.8%. El NO<sub>2</sub>, es emitido hacia la atmósfera principalmente por los procesos de combustión en la generación de energía (MARN, 2009, p. 15-17).

### **1. Parque vehicular**

La Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), es la institución que cuenta con el registro de la cantidad de vehículos existentes en Guatemala. Según los datos reportados en el portal web de la institución, se tienen registros desde el año 2005 hasta agosto del 2016, observando un incremento anual que oscila entre 6% y 14% en los últimos años.



Los registros vehiculares de la SAT, están orientados particularmente al pago de impuestos, sin embargo, muchas variables consignadas en los registros pueden ser útiles para un análisis ambiental general. El incremento del parque vehicular de Guatemala durante el periodo diciembre 2005 a septiembre 2016 ha aumentado un 232%, ya que en el año 2005 en el departamento de Guatemala solamente existían 658,691 vehículos registrados ante la SAT un dato mucho menor al que existe actualmente que es de 1.414,746 (SAT, 2016).

## **2. Gases de efecto invernadero directos e indirectos**

Los inventarios de gases de efecto invernadero comprenden la identificación y cuantificación de las emisiones y absorciones de gases capaces de producir el calentamiento global y el cambio climático generadas en un territorio en particular, en este caso la República de Guatemala, que es el lugar donde se monitorea el aire para cuantificar sus niveles de contaminación (MARN, 2016, p. 173).

Las emisiones de gases de efecto invernadero provienen de la quema de combustibles fósiles como el carbón mineral, el gas natural, el petróleo y sus derivados, además, de la quema de productos de biomasa como leña, bagazo de caña, residuos de cosechas, papel y cartón, generando de esta forma el desprendimiento de NO<sub>2</sub> (MARN, 2016, p.120).

Esto ha provocado una alteración en el sistema atmosférico a nivel mundial. Las actividades humanas, desarrolladas durante la última parte del siglo XIX, asociada con la revolución industrial, y continuadas durante el siglo XX han producido un incremento significativo en la concentración de gases de efecto invernadero (MARN, 2016, p.120). Las emisiones y absorciones de los gases de efecto invernadero (GEI) de Guatemala se calcularon siguiendo la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) contenida en las Guías Revisadas de 1996 para inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, así como la Guía de las buenas prácticas para el cambio de uso de la tierra, utilizando la información nacional disponible y valores predeterminados en la metodología mencionada (MARN, 2012, p. 156).

Cuadro 2: **Emisiones de dióxido de nitrógeno (cifras en toneladas)**

Sector/Gases	Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )		
	1990	2000	2005
Energía	36.9	69.8	87.1
Procesos industriales	0.0	0.0	0.0
Agricultura	5.7	15.8	16.9
Cambio y uso de la tierra y silvicultura	1.2	4.1	2.5
Desechos	0.0	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>43.8</b>	<b>89.7</b>	<b>106.5</b>

Fuente: MARN-SCN (2012).

Los contaminantes en la atmósfera se pueden clasificar como primarios y secundarios: primarios son los contaminantes atmosféricos que se emiten directamente, en cambio los contaminantes secundarios se forman por medio de procesos químicos atmosféricos que actúan sobre los contaminantes primarios o incluso sobre especies no contaminantes en la atmósfera (Figueruelo, p.38).

Cuadro 3: **Contaminantes primarios asociados a problemas medioambientales**

Contaminantes primarios	
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrógeno
CO	Monóxido de carbono
SO <sub>2</sub>	Dióxido de azufre
PTS	Partículas totales en suspensión
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
N <sub>2</sub> O	Monóxido de nitrógeno
HFC	Hidrofluorocarbonados
SF <sub>6</sub>	Hexafluoruro de azufre
Metales pesados (Hg, Pb, Cd)	Hg: Mercurio, Pb: Plomo y Cd: Cadmio.

Fuente: Figueruelo (2004).

El  $\text{NO}_2$  es considerado un contaminante primario debido a este gas es emitido directamente de una fuente a la atmósfera. Generalmente los contaminantes secundarios son producidos por la tendencia natural de la atmósfera a oxidar las sustancias del medio; por ejemplo, el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), el cual es un contaminante secundario que se genera por la oxidación del contaminante primario  $\text{SO}_2$ . El ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), es el principal responsable de la lluvia acida y el ozono  $\text{O}_3$ , en la tropósfera (Álvarez, 2002, p. 8).

### **C. Contaminantes criterio**

Los contaminantes criterios se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población (INECC, 2012).

El término “contaminantes criterio” se ha adoptado en varios países, por lo que cada país establece sus normas de acuerdo con sus criterios de evaluación y legislación. En las normas se establecen las concentraciones máximas de exposición ante estas especies nocivas en el aire para un periodo definido.

Los contaminantes criterio son: el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, material particulado en suspensión, monóxido de carbono, plomo y ozono (OMS, 2006; Darío Sbarato y otros, 2007, p. 19-20).

#### **1. Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )**

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) pertenece a la familia de los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ) que son gases incoloros que se forman al quemar azufre y tienden a disolverse fácilmente en agua. La fuente primaria de  $\text{SO}_x$  es la quema de combustibles fósiles, que contienen azufre en su composición, como el combustóleo; producto residual derivado de la destilación atmosférica y de la destilación al vacío del petróleo crudo; y en particular, el carbón. Sin embargo, dentro de los  $\text{SO}_x$ , se incluyen a otros compuestos de azufre de origen natural, como el ácido

sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el dimetilsulfuro ( $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ) proveniente de erupciones volcánicas y de la brisa marina.

La exposición a  $\text{SO}_2$  produce irritación e inflamación aguda o crónica de las mucosas conjuntival y respiratoria. El  $\text{SO}_2$  puede transformarse en otros productos, tales como partículas finas de sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) y niebla de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Se ha visto que bajo la combinación de partículas y  $\text{SO}_4^{-2}$ , suele aumentar el riesgo en la salud al incrementar la morbilidad y mortalidad de enfermos crónicos del corazón y vías respiratorias. En individuos asmáticos puede producir broncoconstricción (INECC, 2012).

## **2. Dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )**

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), junto con las partículas suspendidas son los responsables de la capa café-rojiza que se puede ver con frecuencia sobre muchas áreas urbanas. Este gas pertenece a los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), término genérico comúnmente empleado para referirse a un grupo de gases altamente reactivos, que contienen diferentes cantidades de oxígeno y nitrógeno como el óxido nítrico y dióxido de nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno se forman cuando un combustible es quemado a altas temperaturas y/o cuando éste contiene compuestos nitrogenados. Las principales fuentes antropogénicas de  $\text{NO}_x$ , son los vehículos automotores, plantas de generación de electricidad, y otras fuentes industriales, comerciales y residenciales que queman combustibles. Los  $\text{NO}_x$  pueden formarse también naturalmente, por la descomposición bacteriana de nitratos orgánicos, incendios forestales y de pastos y en menor grado en tormentas eléctricas. El aumento progresivo en la exposición al  $\text{NO}_2$  puede producir problemas de percepción olfativa, molestias respiratorias, dolores respiratorios agudos y edema pulmonar (INECC, 2012).

## **3. Material particulado (PM)**

El material particulado forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. El tamaño del material

particulado varía desde 0.005 hasta 100 micras de diámetro aerodinámico, desde unos cuantos átomos hasta el grosor de un cabello humano (INECC, 2012).

Las partículas se forman por procesos naturales como la polinización de las plantas, incendios y por fuentes antropogénicas que abarcan, desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas. Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, como partículas primarias y pueden formarse partículas secundarias cuando reaccionan algunos gases en la atmósfera tales como: los óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, amoníaco, compuestos orgánicos, etc. (INECC, 2012).

Entre más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente hasta el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus inherentes características fisicoquímicas. En varios estudios, llevados a cabo en Estados Unidos y en Europa, se ha encontrado que la exposición prolongada a partículas finas provenientes de la combustión es un factor importante de riesgo ambiental en casos de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardio-pulmonares (Pope et al., 2002)

Además de los sistemas respiratorio y cardiovascular, el sistema nervioso también es un blanco para los efectos sobre la salud de la contaminación por carbón. Los mismos mecanismos que se cree intervienen en el efecto que tienen los agentes contaminantes del aire sobre las arterias coronarias, también se aplican a las arterias que irrigan el cerebro. Estos incluyen la estimulación de la respuesta inflamatoria y el estrés oxidativo, los cuales, a su vez, pueden provocar un accidente cerebrovascular y otras enfermedades vasculares del cerebro (Lockwood, 2010, p.7).

#### **4. Plomo (Pb)**

El plomo es un metal que se usaba frecuentemente para fabricar tuberías de agua, recipientes para alimentos, pinturas y gasolina. La fuente primaria de contaminación del aire por plomo ha sido el uso de combustibles con plomo en los automóviles. Debido a que el plomo no se consume en el proceso de combustión, se emite como material particulado. Uno de los más grandes éxitos ambientales de los dos últimos decenios, ha sido la reducción de plomo en el aire gracias a la sustitución de gasolinas con plomo por gasolinas sin plomo.

El plomo es un contaminante tóxico para los humanos, su difícil remoción del cuerpo hace que se acumule en varios órganos y pueda dañar el sistema nervioso central. Un gran número de estudios científicos ha documentado los efectos nocivos de la exposición al plomo. La intoxicación aguda produce síntomas como diarrea, vómito, cólico, convulsiones y dolor de cabeza. Su eliminación del cuerpo es posible mediante tratamientos médicos, aunque el daño provocado principalmente al sistema nervioso es irreversible (INECC, 2012).

### **5. Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inodoro que en concentraciones altas puede ser letal, ya que impide distribuir el oxígeno a la sangre, lo que puede ocasionar una reducción significativa en la dotación de oxígeno al corazón.

El monóxido de carbono se forma en la naturaleza mediante la oxidación del metano ( $\text{CH}_4$ ), que es un gas común producido por la descomposición de la materia orgánica. La principal fuente antropogénica de monóxido de carbono es la quema incompleta de combustibles como la gasolina por falta de oxígeno (INECC, 2012).

### **6. Ozono ( $\text{O}_3$ )**

El ozono es un compuesto gaseoso incoloro, que posee la capacidad de oxidar materiales. El ozono es un contaminante secundario que se forma mediante la reacción química del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COV's) en presencia de la luz solar.

El ozono puede ocasionar inflamación pulmonar, depresión del sistema inmunológico frente a infecciones pulmonares, cambios agudos en la función, estructura y metabolismo pulmonar y efectos sistémicos en órganos blandos como el hígado (INECC, 2012).

### **D. Daños a la salud por exposición a $\text{NO}_2$**

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es un gas irritante que se absorbe a través de la mucosa de las vías respiratorias. En la inhalación se puede absorber entre 80-90 por ciento, aunque esta proporción difiere según sea respiración oral o nasal.

Como el NO<sub>2</sub> no es muy soluble en las superficies húmedas las vías aéreas y superiores retienen solamente una pequeña fracción de los óxidos de nitrógeno inhalado.

Los niveles de dióxido de nitrógeno que no deben ser excedidos son 400 µg/m<sup>3</sup> (0.21 ppm) durante una hora y 150 µg/m<sup>3</sup> (0.08 ppm) durante 24 horas (Mage & Zali, 1992, 14).

En algunas ocupaciones los trabajadores están expuestos de manera intermitente a altas concentraciones de óxido de nitrógeno, particularmente NO y NO<sub>2</sub>. El espectro de los efectos patológicos en el pulmón que resultan de la exposición ocupacional a los óxidos de nitrógeno oscila desde una respuesta inflamatoria leve en la mucosa del árbol traqueobranquial por bajas concentraciones hasta bronquitis, bronconeumonía y edema pulmonar agudo por altas concentraciones.

La mayoría de los estudios epidemiológicos de carácter poblacional se han enfocado a los efectos agudos a altas concentraciones de NO<sub>2</sub> y existen pocos datos acerca de los efectos a largo plazo por la exposición a bajos niveles y por la exposición repetida a episodios. Se ha demostrado que el NO<sub>2</sub> puede ser tóxico para diversos sistemas biológicos y se ha reportado que la exposición aguda a este gas afecta el sistema inmunológico celular y humoral.

Se han llevado a cabo múltiples estudios controlados sobre el efecto del dióxido de nitrógeno en las funciones pulmonares de los individuos sanos, así como de asmáticos y sujetos con bronquitis crónica. Una exposición breve (10-15 minutos) a concentraciones de NO<sub>2</sub> por arriba de 1300 µg/m<sup>3</sup> produjeron cambios en individuos sanos, particularmente un aumento de la resistencia de las vías aéreas.

Recientes estudios controlados han mostrado resultados ambiguos respecto a los efectos respiratorios en individuos asmáticos y sanos a concentraciones de dióxido de nitrógeno en el intervalo de 190-7250 µg/m<sup>3</sup> (0.1-4 ppm). El nivel observado más bajo que afecta de manera consistente la función pulmonar ha sido una exposición de 30 minutos con ejercicio intermitente a una concentración de dióxido de nitrógeno 560 µg/m<sup>3</sup> (0.3 ppm). Los asmáticos parecen ser más reactivos a NO<sub>2</sub> y sus funciones pulmonares pueden ser alteradas por un nivel de 940 µg/m<sup>3</sup> (0.5 ppm). El dióxido de nitrógeno también aumenta la reactividad a los agentes bronco-constrictores, observándose una mayor respuesta a esos agentes de parte de los asmáticos (Mage & Zali, 1992, 16).

Pocos estudios epidemiológicos poblacionales sobre la exposición ambiental a compuestos de  $\text{NO}_x$  han demostrado una asociación entre compuestos de  $\text{NO}_x$  en el aire ambiental y efectos para la salud mensurables. Sin embargo, problemas metodológicos como la presencia de mezclas de contaminantes, falta de control del tabaquismo paterno o de las fuentes intramuros de  $\text{NO}_x$ , en todos los estudios, impide la aceptación de cualquier resultado como una clara evidencia del aumento de enfermedad respiratoria debido a la exposición a monóxido de carbono (NO).

En investigaciones más recientes ha existido la oportunidad de comparar grupos expuestos a  $\text{NO}_2$  emitido por la combustión intramuros de gas. Se ha investigado el efecto de la concentración intramuros de  $\text{NO}_2$  por el uso de estufas de gas y encontró una diferencia en la tasa promedio de infecciones respiratorias antes de los dos años de 32.5/1000 niños entre expuestos y no expuestos. Estos resultados no pudieron ser confirmados por otros estudios que no identificaron un efecto significativo por el uso de aparatos de combustión de gas.

Otro estudio en escolares de 7-11 años en 6 ciudades de los Estados Unidos durante un periodo de 5 años (1983-1988) muestra un aumento de  $28.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.0015 ppm), en el promedio anual dentro del hogar de  $\text{NO}_2$ , se asoció con un incremento acumulado de la incidencia de síntomas respiratorios bajos (riesgos relativos aproximado =1.4; intervalos de confianza del 95% = 1.1-1.7) (Mage & Zali, 1992, 17).

### **E. Emisiones más importantes de $\text{NO}_2$**

Los óxidos de nitrógeno por convenio,  $\text{NO}_x$  designa la suma de  $\text{NO}+\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_y$ . La suma de todas las especies reactivas que contienen nitrógeno  $\text{NO}_y = (\text{NO}+\text{NO}_2+\text{HNO}_3+\text{HONO}+\text{NO}_3+\text{N}_2\text{O}_5+\text{nitratos orgánicos, etc})$ . La más importante de todas es el óxido nítrico, formado cuando el  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  reaccionan en aire en procesos de combustión a alta temperatura. Además, algo de  $\text{NO}_x$  se forma en el combustible. El  $\text{NO}_2$  se produce por oxidación posterior de NO (Martínez & Díaz, 2004; p 32).

La mayoría (90%) del  $\text{NO}_x$  formado en procesos de combustión es NO, y la fracción del  $\text{NO}_2$  puede variar del 1 al 30%. La contribución de varias fuentes a las emisiones de  $\text{NO}_x$  antropogénico es de 21 millones de toneladas en Estados Unidos, mientras que la emisión



total mundial antropogénica es de 72 toneladas de  $\text{NO}_x$ , expresada como  $\text{NO}_2$ . Como fuentes naturales de  $\text{NO}_x$  debe destacarse la quema de biomasa, la emisión de suelos y las descargas de rayos, así como la oxidación de amoníaco en procesos bioquímicos en océanos, estimándose producciones mundiales del orden de unas 100 toneladas (Martínez & Díaz, 2004; p 33).

Las principales fuentes antropogénicas de emisión del dióxido de nitrógeno se encuentran asociadas a procesos de combustión a elevadas temperaturas cercanas a los  $1,100\text{ }^\circ\text{C}$ , como, por ejemplo: termoeléctricas, refinerías de petróleo, motores de combustión interna, etc. Sin embargo, la mayor fuente de contaminación por  $\text{NO}_2$ , se debe a las emisiones de vehículos automotores. Otra parte del  $\text{NO}_2$ , formado en la atmósfera se debe a fuentes naturales, como, por ejemplo: la actividad microbiana en los suelos, los incendios forestales, y fenómenos meteorológicos como los relámpagos (Mage & Zali, 1992, p. 150; Álvarez, 2010 p. 19).

#### **F. Estudios previos realizados sobre la contaminación del aire en Guatemala**

Al inicio de la década de los noventa, la fundación suiza para el desarrollo “Swisscontact”, comenzó una serie de programas de apoyo en la región centroamericana, siendo uno de ellos el Programa Proeco, el cual tenía como objetivo coadyuvar al mejoramiento de las condiciones ambientales en la región, siendo el tema de la calidad del aire una de sus principales líneas de acción. La línea de acción principal de “Swisscontact” estaba encaminada a brindar asesoría al Estado de Guatemala, para la implementación de políticas y normativas relacionadas al control de la contaminación del aire, tomando en cuenta de forma más significativa, al parque automotor como la principal fuente de emisión de contaminantes en la ciudad de Guatemala, así como en otras capitales de Centroamérica.

El producto principal que se pretendía obtener era un reglamento de emisiones vehiculares, por lo que para sustentar dicha política y normativa se deberían obtener los fundamentos científicos para darle el impulso y sustento adecuados. Durante el año 1993, se inició con un plan piloto de monitoreo de emisiones vehiculares, con el objetivo de establecer un diagnóstico del estado de las emisiones de vehículos que de forma voluntaria quisieran participar en dicho plan. El resultado obtenido evidenció el mal estado del parque vehicular en Guatemala, por lo que el siguiente paso consistió en realizar un monitoreo del aire, que

tuviera como objetivo principal la medición de inmisiones (cantidad de un contaminante que respira un ser humano) de algunos de los contaminantes que internacionalmente se han usado para evaluar el impacto de las emisiones por combustión (de automotores y de actividades industriales) a la atmósfera.

En 1994 la fundación “Swisscontact” estableció contacto con la Escuela de Química, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala y otras instituciones a nivel centroamericano que estuvieran interesadas en implementar un sistema de monitoreo del aire en las ciudades capitales correspondientes. “Swisscontact” financió la capacitación del recurso humano necesario para llevar a cabo el monitoreo y donó el equipo, materiales y reactivos necesarios para el mismo. De esta manera se estableció el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos. La primera coordinadora del mismo fue la Licenciada Thelma Alvarado de Gallardo, directora de la Escuela de Química en dicho período. Durante ese año se realizaron planes piloto para establecer puntos de muestreo e implementar metodología para la medición de contaminantes.

Como producto de los planes realizados se estableció la medición de algunos contaminantes del aire en varios puntos de la ciudad de Guatemala. En 1995 inició la medición sistemática de los siguientes contaminantes: partículas totales en suspensión (PTS), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), ozono ( $\text{O}_3$ ) y sólidos sedimentables; obteniendo valores superiores a los límites de referencia internacionales (debido a que Guatemala no contaba con criterios propios).

A partir de 1996, se implementó la medición de partículas totales en suspensión en su fracción  $\text{PM}_{10}$ , además de los indicados anteriormente. Igual que en 1995 y 1996, se obtuvo resultados superiores al límite de referencia sugerido, por lo que se comprobó que en los lugares en donde se realizó el muestreo, sí existió contaminación del aire provocada por contaminantes criterio, principalmente emitidos por el parque vehicular circulante. Esta información sirvió de fundamento científico, para fortalecer la política correspondiente e impulsar a nivel del Estado, la formulación e implementación del Reglamento de Emisiones Vehiculares, como una disposición de carácter obligatorio. Esto obtuvo vigencia a partir de 1997, operado a través de la Comisión de Medio Ambiente (CONAMA), organismo que en

ese período era el encargado de regular lo concerniente al medio ambiente en Guatemala. (Oliva, O; 2008, p 14).

En 1998, Álvaro Arzú, presidente de la República, derogó el Reglamento de Emisiones Vehiculares, aduciendo que era necesario realizar ajustes y modificaciones de carácter técnico a los equipos utilizados para la medición de las emisiones vehiculares. Sin embargo, hasta la fecha dicho Reglamento no volvió a ser activado, teniendo únicamente propuestas y borradores del nuevo Reglamento, para el cual no ha existido la voluntad política para su reactivación.

Durante el año 2001 surgió la iniciativa de elaborar un Plan de Gestión de la Calidad del Aire para la República de Guatemala, gracias a la cooperación de la Agencia de Cooperación de los Estados Unidos de América (USAID), la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y el Estado de California, así como la participación del Estado de Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC) y sociedad civil, dicho plan quedó terminado y presentado por el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales.

En dicho plan, el Monitoreo del Aire juega un papel importante para conocer la calidad del aire de nuestro país. Lo cual permitiría tomar las medidas correctivas y preventivas en un ámbito legal y vinculante en beneficio de todos los ciudadanos.

Como toda actividad de carácter científico tecnológica, el Monitoreo del Aire necesitaba recursos económicos para su adecuado desarrollo y procurar la implementación de nuevas tecnologías que permitieran obtener una mayor y continua cantidad de datos. La fundación Swisscontact brindó el apoyo técnico y económico para la construcción de una caseta móvil de medición automática que empezó a funcionar a finales del 2002, localizada en el Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá (Incap). Al mismo tiempo la USAID proporcionó en donación una serie de equipos para implementar una estación automática localizada en la USAC; se encuentra dentro de las instalaciones de escuela de formación de profesores de enseñanza media (Efpem) ubicada a un costado de la avenida Petapa.

Por diversas dificultades técnicas no se pudo dar un seguimiento en forma continua a las mediciones de la caseta móvil y del equipo automático, por lo que los resultados obtenidos con dicha metodología fueron escasos. A partir del año 2001, el Laboratorio de Monitoreo

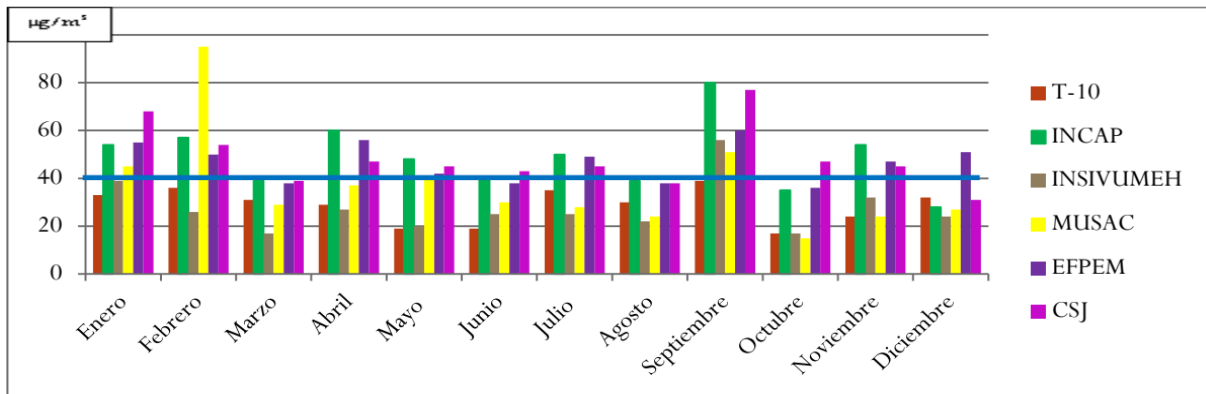
del Aire ha seguido realizando mediciones de algunos de los contaminantes, los cuales se han mantenido en valores que para ciertas épocas del año en algunos de los lugares donde se realizaron muestreos, representaban un riesgo para la salud de los seres humanos, animales, vegetación e inclusive infraestructura expuesta a los mismos (Oliva, O; 2008, p 15).

El trabajo del Laboratorio de Monitoreo del Aire ha sido posible gracias al apoyo de la Escuela de Química, perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC. En el laboratorio han prestado sus servicios estudiantes de la Escuela de Química que realizaron prácticas de Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) y de Experiencias Docentes con la Comunidad (EDC), recurso humano invaluable que ha apoyado las tareas de carácter técnico para los muestreos y trabajo de laboratorio. Asimismo, se ha contado con el apoyo de profesores y personal administrativo de la Escuela de Química.

Actualmente se cuenta con la información técnica que ha obtenido el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Oliva, O; 2008, p 16).

Según el informe ambiental del Laboratorio de Monitoreo del aire (LMA) del año 2016; de las seis estaciones donde se monitoreo este contaminante por medio del método de difusión pasiva, se encuentra que 29 de 72 mediciones, lo que representa el 40%, supero el valor guía sugerido por la OMS que es de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anual (LMA, 2016. P 25).

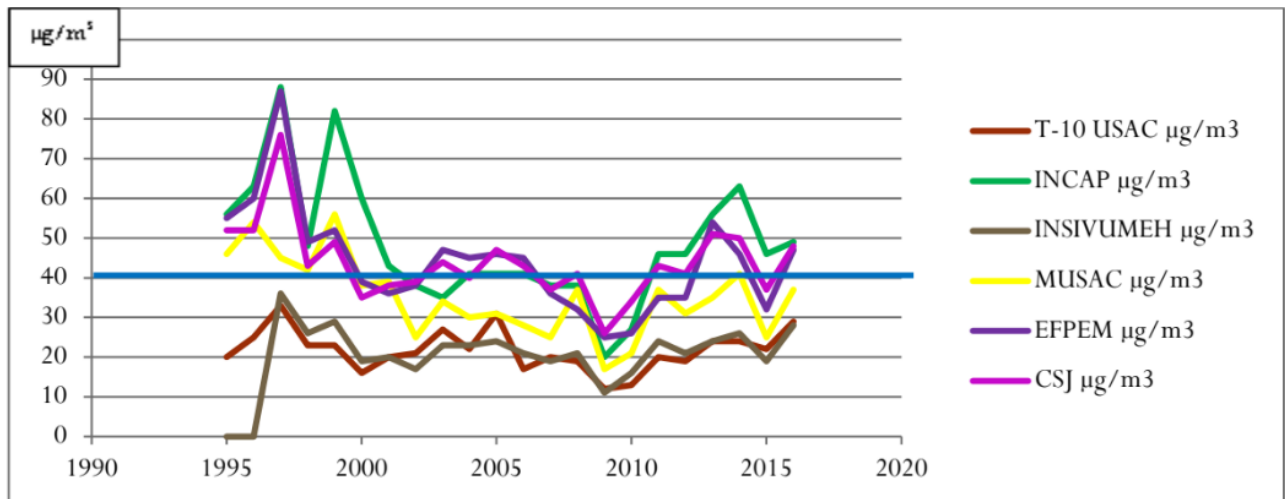
**Gráfica No.1: Valores mensuales de NO<sub>2</sub> durante el año 2016 en los seis puntos de muestreo del Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA)**



Fuente: Informe Anual del Laboratorio de Monitoreo del Aire, USAC (2016)

Los valores más altos de concentración de dióxido de nitrógeno se determinaron en las estaciones ubicadas en el Incap zona 11; Efpem zona 12 y en la Calzada San Juan, zona 7. El resultado de concentración más alto se obtuvo en la estación ubicada en el Musac zona 1 con 95 µg/m<sup>3</sup> de dióxido de nitrógeno en el mes de febrero.

**Gráfica No.2: Valores promedio-anales de la concentración de dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> durante los años 1995 al 2016**



Fuente: ente: Informe Anual del Laboratorio de Monitoreo del Aire, USAC (2016)

**Cuadro 4: Promedios anuales de la concentración de NO<sub>2</sub> en el aire en Guatemala en los años 1995 – 2016 (µg/m<sup>3</sup>)**

AÑO	T-10 USAC µg/m <sup>3</sup>	INCAP µg/m <sup>3</sup>	INSIVUMEH µg/m <sup>3</sup>	MUSAC µg/m <sup>3</sup>	EFPEM µg/m <sup>3</sup>	CALZADA SAN JUAN µg/m <sup>3</sup>
1995	20	56	NM	46	55	52
1996	25	63	NM	54	60	52
1997	33	88	36	45	87	76
1998	23	48	26	42	49	43
1999	23	82	29	56	52	49
2000	16	60	19	38	39	35
2001	20	43	20	39	36	38
2002	21	38	17	25	38	39
2003	27	35	23	34	47	44
2004	22	41	23	30	45	40
2005	31	41	24	31	46	47
2006	17	41	21	28	45	43
2007	20	38	19	25	36	37
2008	19	38	21	37	32	41
2009	12	20	11	17	25	26
2010	13	27	16	21	26	34
2011	20	46	24	37	35	43
2012	19	46	21	31	35	41
2013	24	56	24	35	54	51
2014	24	63	26	41	46	50
2015	22	46	19	25	32	37
2016	29	49	28	37	47	48

NM: no muestreado

Fuente: Informe Anual del Laboratorio de Monitoreo del Aire, USAC (2016)

Las medias anuales para el dióxido de nitrógeno presentan una tendencia de comportamiento ascendente con respecto al año anterior. Es importante mencionar que el dióxido de nitrógeno encontrado probablemente se deba a emisiones antropogénicas, principalmente procesos de combustión tanto de fuentes móviles como de fuentes fijas (LMA, 2016. p. 25-26).

#### IV. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años la ciudad de Guatemala ha experimentado un aumento desproporcionado del parque vehicular en relación con su área geográfica, en donde diariamente circulan más de 1 millón de vehículos en las calles, avenidas y demás zonas de esta ciudad, ocasionando un grave congestionamiento vehicular, generándose una gran cantidad de contaminantes que son emitidos directamente en el ambiente urbano (SAT, 2015).

Uno de los contaminantes de mayor importancia por su toxicidad para el ser humano y estrecha relación con otros contaminantes en el aire, son los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$ , estas especies químicas se generan como subproducto de los procesos de combustión en los vehículos, por tal razón la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasifica al Dióxido de Nitrógeno  $\text{NO}_2$ , como un *contaminante criterio* (OMS, 2006, p. 5, 17-18).

Esta investigación pretende generar información más específica, en una menor escala de tiempo sobre el comportamiento del  $\text{NO}_2$ , por medio de una metodología idónea como lo es el método de difusión activa. Es necesaria la generación de nuevas investigaciones con la implementación de metodologías que ayuden a sustentar la información existente en el tema de la contaminación en el aire en relación a la concentración de  $\text{NO}_2$ .

Actualmente el contaminante  $\text{NO}_2$ , se mide en 6 estaciones de monitoreo que mantiene el Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), por medio del método de difusión pasiva, dicho método consiste en la exposición al ambiente por 30 días, para luego ser analizado por medio de espectrofotometría UV/Vis a 540 nm (LMA, 2016, p.4 y p. 26). Con dicha metodología se realizan informes anuales del comportamiento del  $\text{NO}_2$ , comparados con el valor guía de la (OMS) ( $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para una media anual). Sin embargo, existe otra metodología más puntual que puede ampliar y profundizar la información en relación al  $\text{NO}_2$  en el ambiente urbano (OMS, 2000).

El método activo para determinación de  $\text{NO}_2$ , se basa en la utilización de un monitor de gases que utiliza una fuente de energía, dentro del cual se coloca una solución absorbente de arsenito de sodio, por la cual se bombea una cantidad de aire establecida durante 24 horas de medición, para posteriormente ser cuantificado el  $\text{NO}_2$ , por espectrofotometría UV/Vis a 540

nm. Por lo tanto, la implementación de esta metodología estaría dirigida a establecer resultados más específicos o puntuales en relación a la concentración de NO<sub>2</sub> en el aire, pudiéndose observar con mayor detalle el comportamiento del NO<sub>2</sub>, a una menor escala de tiempo (EQN-1277-026).

Los problemas actuales de contaminación por fuentes móviles en la Ciudad de Guatemala crean las condiciones necesarias para poner más atención al tema de la contaminación en el aire, el cual es un peligro latente para la salud de los guatemaltecos. Según la (OMS) la contaminación en el aire es responsable del padecimiento de graves enfermedades respiratorias, que afectan en mayor grado a ancianos y niños, los cuales son más susceptibles a padecer problemas respiratorios (OMS, 2006, p. 17,18).

Las autoridades de Guatemala han hecho muy poco en contrarrestar o mitigar las causas y efectos de la contaminación en el aire. Sin embargo, en el año 2013 por presiones internacionales el Congreso de la República de Guatemala emitió el Decreto 7-2013 sobre la *“Ley Marco para Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la Adaptación Obligatoria ante los Efectos del Cambio Climático y Mitigación de Gases de Efecto Invernadero”* los estatutos de este decreto proponen incentivar la investigación en el país desde los sectores público, académico y privado. Para el año 2014 se indica que se están desarrollando instrumentos para las medidas de mitigación y que a nivel institucional también están trabajando en las distintas unidades y comisiones creadas en concordancia con dicha ley (Comisión de ambiente, ecología y recursos naturales, 2014, p. 2). En el año 2016 Guatemala ratificó el acuerdo de París sobre el cambio climático, lo que hace retomar en el plano legal y estratégico el decreto 7-2013 (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2017).

El dióxido de nitrógeno NO<sub>2</sub> tiende a interactuar con otras especies químicas en la atmósfera, llegando a formar parte de los aerosoles atmosféricos junto a otras partículas finas, estos aerosoles tienden a tener un impacto directo en el cambio climático mundial.

Actualmente, el Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), mantiene 6 estaciones de medición de contaminantes en el aire, (Incap ubicado en zona 11, Musac ubicado en zona 1, edificio T-10 ubicado en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia en zona 12, Insivumeh ubicado en zona 13, Grupo Codaca ubicado en la calzada San Juan zona 7, Efpem-USAC



zona 12). Sin embargo, el aumento en la cantidad de vehículos registrados en Guatemala, crea las condiciones necesarias para ampliar el área de medición en la ciudad de Guatemala, realizando la medición de NO<sub>2</sub>, por el método activo en los 6 puntos del (LMA) y tres puntos más de medición, uno en el Fondo Nacional de Tierras (Fontierras) ubicado en la zona 9, otro en el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ubicado en zona 10 y otro punto en la calle Martí 6-42 de la zona 2, con lo cual se obtendría información del comportamiento del NO<sub>2</sub>, en otras áreas de la ciudad de Guatemala.

La elección de los nuevos puntos se debe al incremento del parque vehicular en las horas pico. El punto ubicado en el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ubicado en zona 10, se elige debido a que es uno de los puntos de acceso a la ciudad de Guatemala por parte de los automovilistas que ingresan a la ciudad por Carretera a El Salvador. La ruta a El Salvador, cuyo crecimiento poblacional se incrementa cada día que pasa y, así como ha generado desarrollo, principalmente del tipo comercial, también ha dado lugar al incremento en la fluidez de los vehículos por el sector (Morales C; 2016).

Así también el punto de la Calle Martí al ser entrada a la ciudad de Guatemala por medio de la ruta al atlántico, La calzada José Milla y Vidaurre, extendida hacia la Calle Martí o hacia la ruta al Atlántico, es otra vía con altos niveles de circulación vehicular.

El punto de Fontierras se elige debido a que la 7a. Avenida de la zona 9 es un punto con constante afluencia vehicular, debido a que allí transitan la mayoría de los automóviles que pasan por el Bulevar Liberación que vienen de las zonas 7, 8, 11, 21, Villanueva, Amatitlán, Mixco, Ciudad San Cristóbal y sur del país, para conectar con las zonas 9 y 10 de la ciudad de Guatemala (R. Cuellar; 2011, p 28 y 29).

## V. OBJETIVOS

### General

- Determinar la concentración de dióxido de nitrógeno por el método de difusión activa, como indicador de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala durante los meses de noviembre 2017 a abril del año 2018.

### Específicos

- Cuantificar la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire de 9 puntos de muestreo en la Ciudad de Guatemala.
- Determinar el grado de contaminación en el aire que presentan los 9 puntos de muestreo de la Ciudad de Guatemala por el contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), comparando con la Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud que es de 40 µg/m<sup>3</sup> para la media anual (OMS).
- Generar información que respalde el establecimiento de políticas de gestión de la calidad del aire de la ciudad de Guatemala.

## **VI. HIPÓTESIS**

La implementación de esta metodología estaría dirigida a establecer resultados más específicos o puntuales en relación a la concentración de NO<sub>2</sub> en el aire de la ciudad de Guatemala, en una menor escala de tiempo.

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Universo y Muestra

El universo está comprendido por el aire de la ciudad de Guatemala, la muestra estará comprendida por la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) captado en la solución absorbente de arsenito de sodio, en cada uno de los 9 puntos de muestreo por un tiempo de 24 horas de medición.

### B. Materiales

Los materiales que se utilizaron para la realización de este informe se detallan a continuación:

#### 1. Equipo

- Monitor de gases en ambiente, marca LAMOTTE
- Espectrofotómetro Ultravioleta-Visible marca Thermo Scientific®, modelo Evolution 300, con lámpara de xenón y paquete software VISIONPro.
- Espectrofotómetro, marca HACH®, modelo DR2800, con lámpara de Tungsteno en atmósfera gaseosa (visible).
- Balanza analítica marca METTLER TOLEDO®, modelo AG245, capacidad 210 gramos.
- Pipeta manual de volumen variable (10 – 100 µL) marca Eppendorf Research®.
- Agitator Barnstead Thermolyne, Type 16700 Mixer, modelo M16715, 60 Hz, 120 Volts, 24 Watts.
- Bureta de vidrio marca DIN, de 25 mL (0,03 +/- 0.05 mL a 20°C).
- Higrómetro (medidor de humedad) QUALITY.
- IR digital marca QUALITY.
- GPS marca GARMIN eTrex Vista® HCx.

## 2. Reactivos

- Solución de arsenito de sodio  $\text{NaAsO}_2$  0.1 N Merck USP.
- Hidróxido de sodio  $\text{NaOH}$  (grado analítico >99 %).
- Sulfanilamida  $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2\text{S}$  Fluka 86090 (grado analítico).
- N-(1-naftil)-etilendiamina  $\text{C}_{12}\text{H}_{16}\text{Cl}_2\text{N}_2$  (NEDA) Fluka 70720 (grado analítico).
- Ácido fosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$  Fluka 79620 (concentrado al 85%).
- Peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 30%.
- Solución estándar  $\text{NO}_2$  1000 ppm Merck (grado analítico).
- Nitrito de sodio  $\text{NaNO}_2$  (grado analítico >99 %).
- Agua destilada o desmineralizada.

## 3. Material de muestreo

- 15 frascos ámbar marca PYREX® de 100 mL.
- 1 hielera con capacidad de 4 Litros.
- 1 caja de bolsas marca Ziploc de 16 onzas.

## 4. Cristalería

- 5 balones aforados de 500 mL.
- 5 balones aforados de 250 mL.
- 5 balones aforados de 100 mL.
- 20 balones aforados de 25 mL.
- 10 beakers de vidrio de 100 mL.
- 5 beakers de vidrio de 50 mL.
- 100 puntas para pipeta de volumen variable, marca Eppendorf Research®, de 10 a 100  $\mu\text{L}$ .
- 2 buretas marca DIN de 50 mL.
- 1 bureta marca DIN de 25 mL.
- 2 celdas de cuarzo de 1 cm.
- 3 agitadores magnéticos.
- 3 agitadores de vidrio.

- 5 espátulas de metal.
- 3 probetas marca PYREX® de 25 mL.
- 5 probetas marca PYREX® de 10 mL.

## C. Métodos

### 1. Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Método: Difusión activa.

### 2. Preparación de reactivos

A continuación, se detalla paso a paso la metodología para la preparación de reactivos:

- Solución absorbente: pesar 2 g de hidróxido de sodio grado analítico, disolver en 25 mL de agua destilada, agregar 10 mL de solución de arsenito de sodio 0.05 M, trasvasar cuantitativamente a un balón volumétrico de 500 mL y aforar con agua destilada.
- Reactivo A: pesar 5 gramos de sulfanilamida, agregar 25 mL de agua destilada y 12.5 mL de ácido fosfórico concentrado al 85%, trasvasar cuantitativamente a un balón volumétrico de 250 mL. y aforar con agua destilada. (solución estable por 2 meses).
- Reactivo B: pesar 0.100 g de N-(1-naftil)-etilendiamina, disolver en 25 mL de agua destilada, trasvasar cuantitativamente a un balón volumétrico de 100 mL y aforar con agua destilada.
- Reactivo C: medir 2 mL de peróxido de hidrógeno al 30% trasvasarlo cuantitativamente a un balón volumétrico de 250 mL y aforar con agua destilada. (solución estable por 1 mes en refrigeración y protegida de la luz)
- Solución stock de nitrito de sodio: pesar con exactitud 0.3780 g de nitrito de sodio al 99% de pureza, disolver con agua destilada, trasvasar cuantitativamente a un balón volumétrico de 500 mL y aforar con agua destilada. (solución estable por 2 meses).

- Solución de trabajo de nitrito de sodio: medir 5 mL de solución stock de nitrito de sodio, trasvasar cuantitativamente un balón volumétrico de 250 mL y aforar con agua destilada.

### **3. Calibración del equipo**

Para la calibración del equipo se debe realizar el siguiente procedimiento:

- Armar el equipo conectando la unidad de muestreo (monitor de gases) al medidor de flujo (flujómetro) en la salida de este colocar el regulador de flujo, y conectar a la bomba succionadora.
- Colocar en el tubo de vidrio del equipo (impinger) de 30 mL, 25 mL de solución absorbente de arsenito de sodio en medio básico.
- Iniciar la succión de aire anotando el volumen de aire inicial.
- Succionar por 5 minutos anotando la presión de la bomba a la cual se trabaja.
- Finalizar anotando el volumen de aire succionado, y calcular el flujo en base al método de difusión activa para NO<sub>2</sub>.

### **4. Desarrollo del muestreo**

- Transportar la solución absorbente de arsenito de sodio en frascos ámbar de 75 mL.
- En el sitio de muestreo colocar 25 mL de la solución absorbente en el tubo de vidrio del equipo (impinger) de 30 mL.
- Conectar la unidad de muestreo, el regulador de flujo, la bomba de succión y conectar el temporizador.
- Iniciar la succión, ajustando la presión de la bomba al valor previamente calibrada en el laboratorio.
- Anotar las condiciones ambientales de temperatura y humedad para la interpretación de resultados.
- Luego de transcurridas las 24 horas de muestreo, anotar la presión de la bomba y el tiempo transcurrido que marque el temporizador y desconectar el equipo.

### **5. Almacenamiento y transporte de la muestra**

- Transportar la muestra al laboratorio en un frasco ámbar de 75 mL de capacidad.
- Refrigerar la muestra a una temperatura menor a 4°C, para la preservación de la muestra durante la transportación hacia el laboratorio.
- Al ingresar la muestra al laboratorio, esta puede ser estable hasta por 30 días si se mantiene a una temperatura menor a 4°C, realizar el análisis al terminar todo el muestreo mensual.

### **6. Preparación de curva de calibración**

- Preparar una dilución de 1/10 de la solución de trabajo de nitrito de sodio, y preparar 6 puntos para la curva de 1, 2, 5, 10, 20 y 40 µL en matraces aforados de 25 ml.
- A cada matraz se le deben agregar 10 mL de reactivo A, 4 mL del reactivo B y 1 mL de reactivo C.
- Se debe esperar 10 minutos para que se revele el color de la curva de calibración.
- Medir por espectrofotometría UV/VIS a 540 nanómetros en celdas de 1 cm de trayectoria óptica.

### **7. Análisis de la muestra**

- Servir en un matraz de 25 mL, 10 mL de la muestra y rotular adecuadamente.
- A cada una de las muestras servidas en matraz se le debe agregar 10 mL de reactivo A, 4 mL del reactivo B y 1 mL de reactivo C.
- Se debe esperar 10 minutos para que se revele el color de la curva de calibración.
- Medir por espectrofotometría UV/VIS a 540 nanómetros en celdas de 1 cm de trayectoria óptica.
- Calcular la cantidad en µg (microgramos) de NO<sub>2</sub> en la muestra utilizando la curva de calibración.
- Utilizando el flujo promedio y el tiempo de muestreo, calcular la concentración de NO<sub>2</sub> para cada muestra.



#### **D. Diseño de la Investigación**

Esta investigación será de naturaleza descriptiva, experimental, transversal, donde se determinará la presencia del contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en el aire de la ciudad Guatemala, utilizando espectrofotometría UV- Visible.

El muestreo se realizó en los puntos que actualmente utiliza el Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), que están ubicados en el Incap, Efpem y edificio T-10 de la USAC, Musac en la zona 1, Insivumeh y en la calzada San Juan, adicionalmente los puntos de muestreo ubicados en Fontierras, MARN y calle Martí en la zona 2, sumando un total de 9 puntos en la ciudad de Guatemala

Para realizar la captación de  $\text{NO}_2$  en cada punto de muestreo se colocó un monitor de difusión activa con la solución absorbente de arsenito de sodio por un tiempo de 24 horas según la metodología establecida en el Laboratorio de Monitoreo de Aire (LMA).

El muestreo se realizó de acuerdo con las mediciones programadas por el Laboratorio de Monitoreo del Aire, una medición por mes, durante un periodo de 6 meses, el cual es de noviembre 2017 a abril de 2018.

Cada resultado obtenido en relación con la concentración de  $\text{NO}_2$  se comparará con el valor guía establecido por la OMS para promedios anuales que es de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , para clasificarlo como aceptable o no aceptable.

Los resultados serán objeto de un análisis estadístico descriptivo calculando la media, desviación estándar y el coeficiente de variación.

Cada punto de medición será identificado por su posición geográfica realizando la medición de coordenadas GPS. Además, se realizará la medición de los parámetros meteorológicos: humedad relativa, presión atmosférica, temperatura, dirección del viento y velocidad del viento, durante el tiempo de medición que puedan ocasionar cambios significativos en los resultados.

## VIII. RESULTADOS

### A. Estación Calzada San Juan

Cuadro No. 5: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación Calzada San Juan		
Dirección	Coordenadas	Altitud
Calzada San Juan 11-95 zona 7.	N 14°37'21.4788'' W 90°32'51.63''	1528.0 m

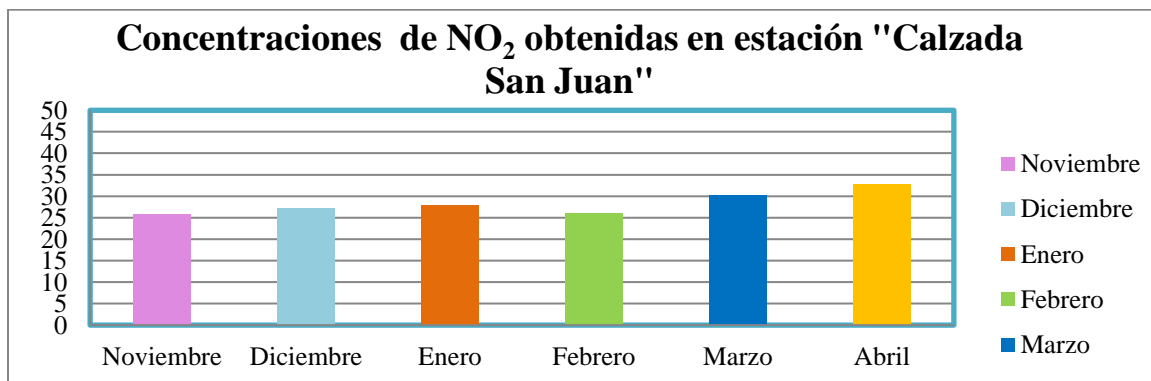
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo

Cuadro No. 6: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación Calzada San Juan	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	26
Diciembre	27
Enero	28
Febrero	26
Marzo	30
Abril	33

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Grafica No. 3: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## B. Estación Calle Martí

Cuadro No. 7: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación Calle Martí		
Dirección	Coordenadas	Altitud
Calle Martí 6-42 de la Zona 2	N 14°39'6.6564'' W 90°30'42.0696''	1496.0 m

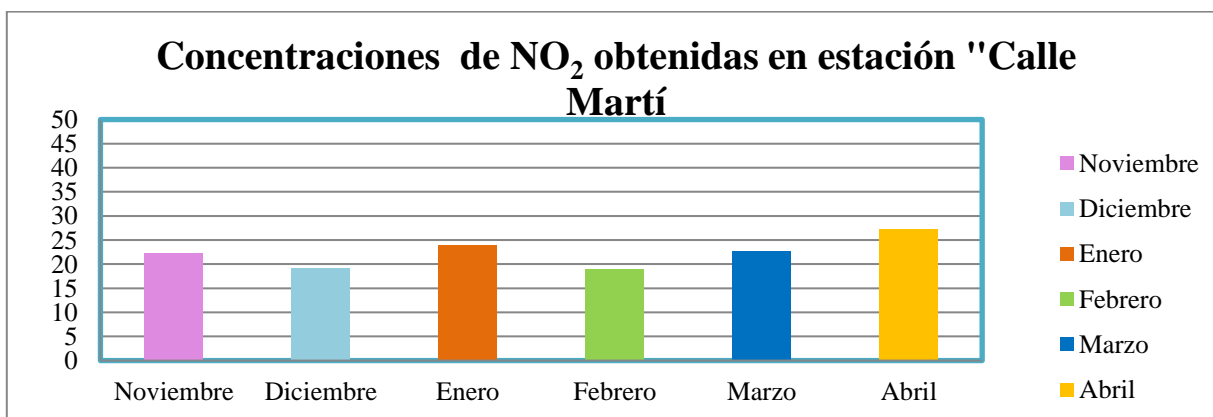
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 8: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación Calle Martí	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	22
Diciembre	19
Enero	24
Febrero	19
Marzo	23
Abril	27

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 4: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### C. Estación EFPEM-USAC

Cuadro No. 9: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación EFPEM		
Dirección	Coordenadas	Altitud
Avenida Petapa y 32 calle, Ciudad universitaria zona 12	N 14°35'17.2716'' W 90°32'43.6092''	1498.0 m

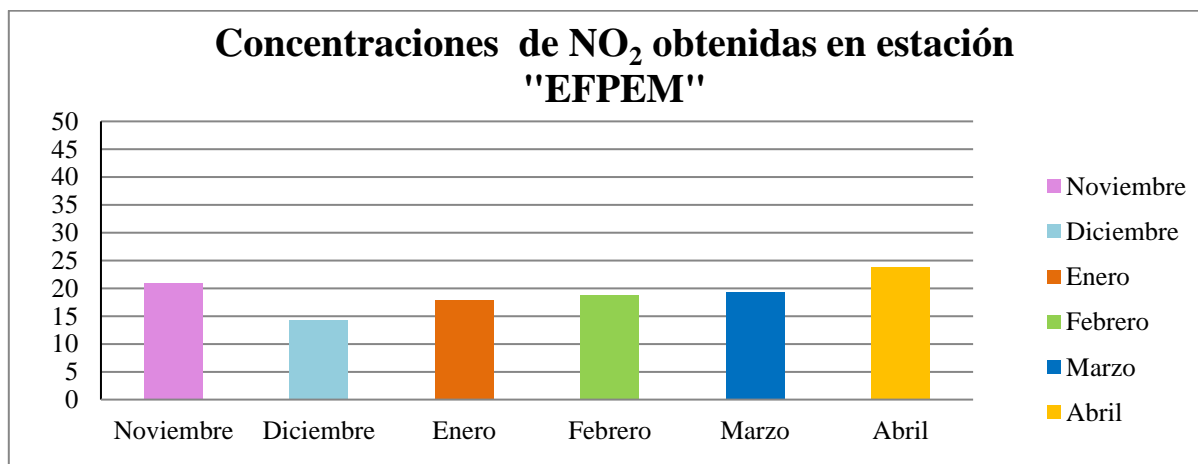
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 10: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación EFPEM	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	21
Diciembre	14
Enero	18
Febrero	19
Marzo	19
Abril	24

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 5: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

#### D. Estación FONTIERRAS

Cuadro No. 11: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación FONTIERRAS		
Dirección	Coordenadas	Altitud
7 <sup>a</sup> . Avenida 8-92, zona 9.	N 14°36'18.6084'' W 90°31'5.934''	1513.0 m

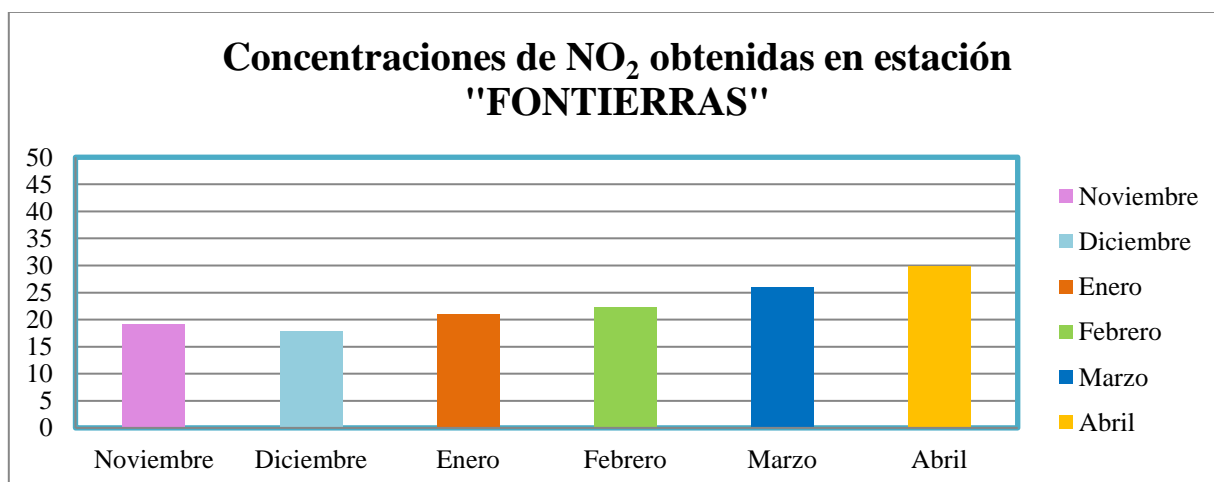
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 12: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación FONTIERRAS	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	19
Diciembre	18
Enero	21
Febrero	22
Marzo	26
Abril	30

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 6: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

### E. Estación INCAP

Cuadro No. 13: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación INCAP		
Dirección	Coordenadas	Altitud
Calzada Roosevelt 6-25 zona 11	N 14°36'57.8628'' W 90°32'32.938''	1530.0 m.

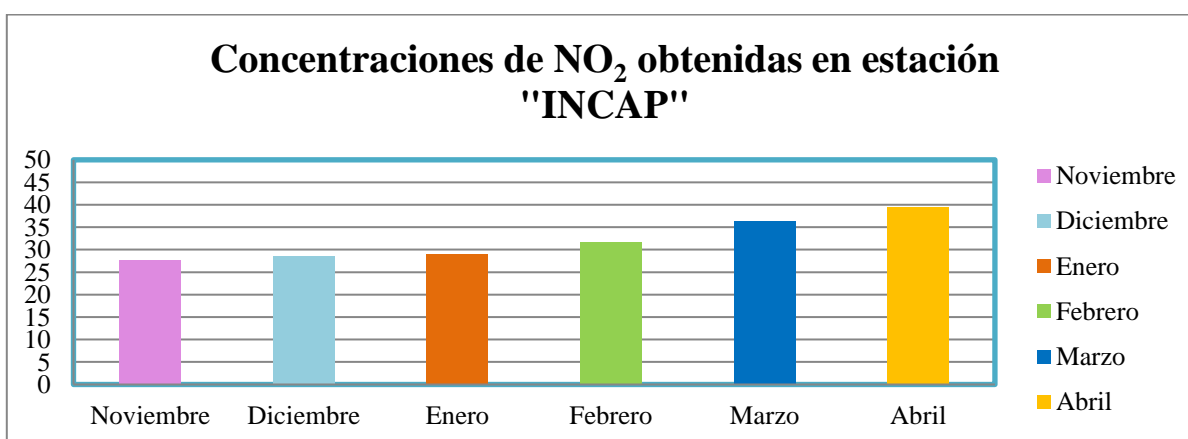
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 14: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación INCAP	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	28
Diciembre	29
Enero	29
Febrero	32
Marzo	36
Abril	39

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 7: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## F. Estación INSIVUMEH

Cuadro No. 15: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación INSIVUMEH		
Dirección	Coordenadas	Altitud
7a. Avenida, 14 -57, zona 13, Colonia Nueva Aurora	N 14°35'13.8192'' W 90°31'57.6624''	1510.0 m

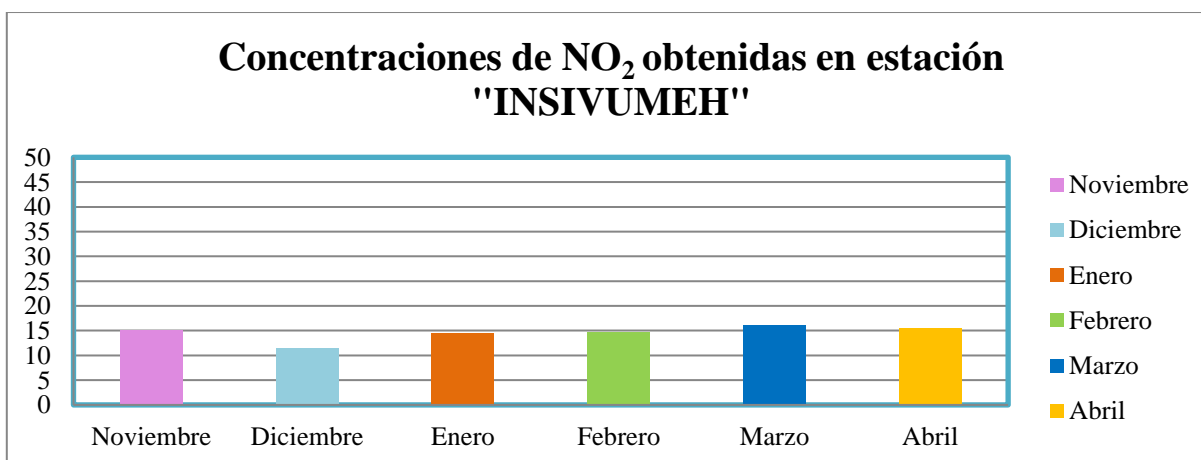
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 16: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación INSIVUMEH	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	15
Diciembre	11
Enero	14
Febrero	15
Marzo	16
Abril	16

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 8: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

## G. Estación MARN

Cuadro No. 17: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación MARN		
Dirección	Coordenadas	Altitud
20 calle 28-58 zona 10	N14°34'30".6228'' W90°29'25.62''	1582.0 m.

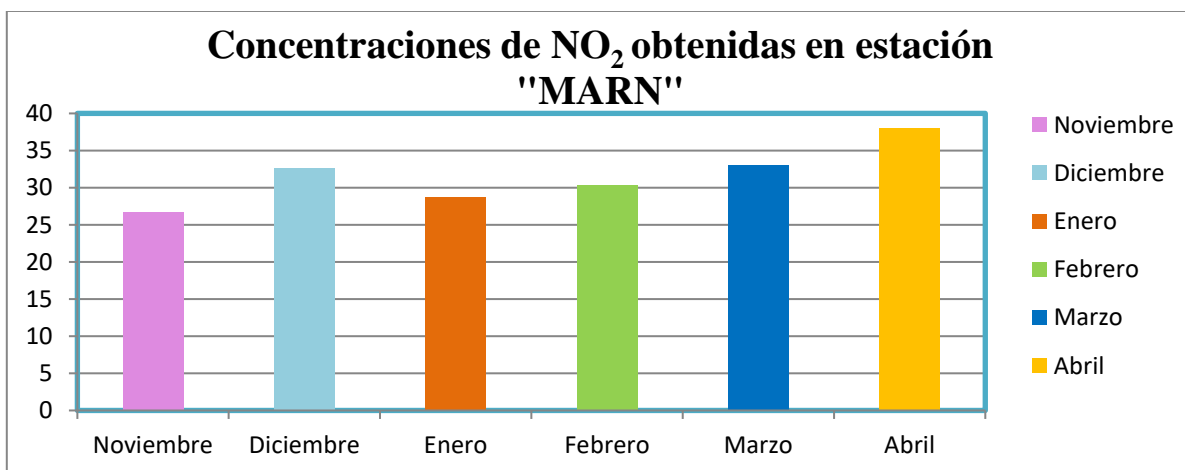
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 18: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación MARN	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	27
Diciembre	33
Enero	29
Febrero	30
Marzo	33
Abril	36

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 9: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.



## H. Estación MUSAC-USAC

Cuadro No. 19: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación MUSAC-USAC		
Dirección	Coordenadas	Altitud
9a. avenida 9-79, zona 1	N 14°38'19.7196'' W 90°30'39.7116''	1507.0 m

Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

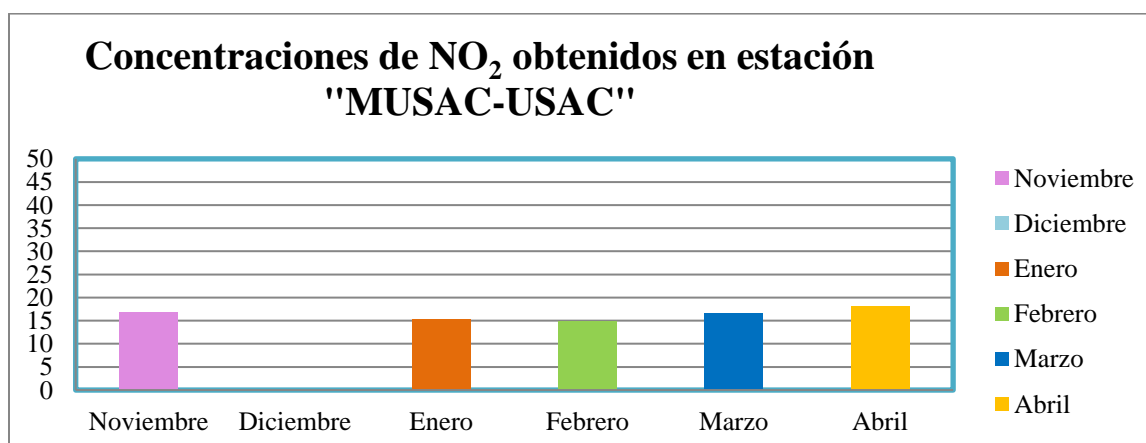
Cuadro No. 20: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo**

Estación MUSAC-USAC	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	17
Diciembre	ND.
Enero	15
Febrero	15
Marzo	17
Abril	18

ND.: No Determinado.

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 10: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## I. Estación Edificio T-10-USAC

Cuadro No. 21: **Parámetros geográficos de la estación de monitoreo.**

Estación Edificio T-10, USAC		
Dirección	Coordenadas	Altitud
Edificio T-10, Ciudad Universitaria. Zona 12	N 14°35'16.4076'' W 90°33'12.3776''	1502 m

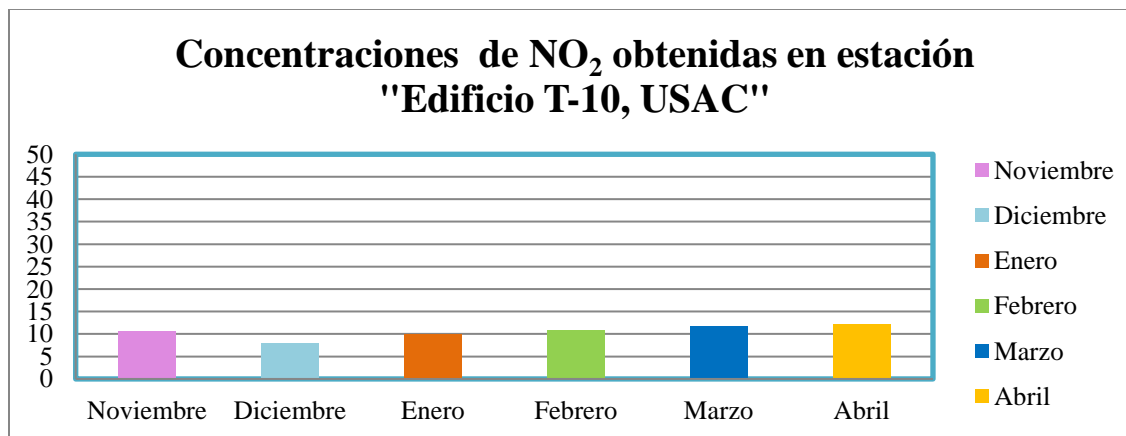
Fuente: datos de campo obtenidos en cada punto de monitoreo.

Cuadro No. 22: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**

Estación Edificio T-10, USAC	
Mes	Concentración [NO <sub>2</sub> µg/m <sup>3</sup> ]
Noviembre	11
Diciembre	8
Enero	10
Febrero	11
Marzo	12
Abril	12

Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Gráfica No. 11: **Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los 6 meses de muestreo en la estación de monitoreo.**



Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

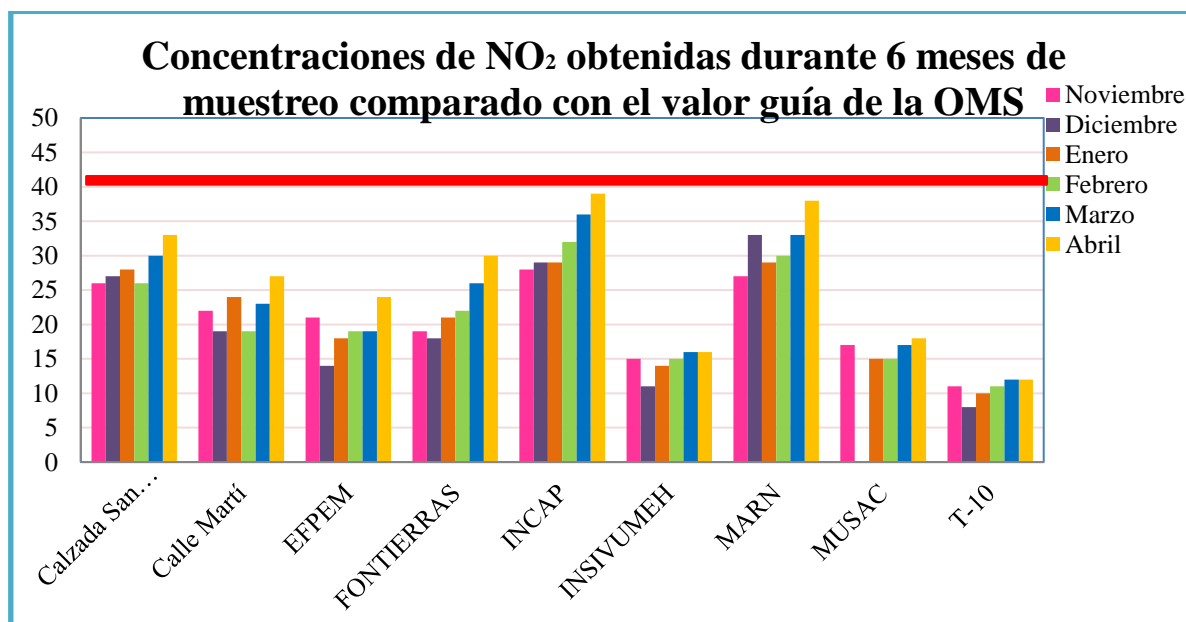
## J. Comparación de resultados en las distintas estaciones (puntos) de muestreo

Cuadro No. 23: Concentraciones de NO<sub>2</sub> en µg/m<sup>3</sup> obtenidas durante 6 meses de muestreo comparadas con el valor guía de la OMS

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Valor guía de OMS del promedio anual
<b>Calzada San Juan</b>	26	27	28	26	30	33	40 µg/m <sup>3</sup>
<b>Calle Martí</b>	22	19	24	19	23	27	
<b>EFPEM</b>	21	14	18	19	19	24	
<b>FONTIERRAS</b>	19	18	21	22	26	30	
<b>INCAP</b>	28	29	29	32	36	39	
<b>INSIVUMEH</b>	15	11	14	15	16	16	
<b>MARN</b>	27	33	29	30	33	36	
<b>MUSAC</b>	17	ND.	15	15	17	18	
<b>Edificio T-10</b>	11	8	10	11	12	12	
<b>Valor máximo</b>	39						
<b>Valor mínimo</b>	8						

ND.: No Determinado. Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Grafica No. 12: Concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas en las nueve estaciones de muestreo durante un tiempo de 6 meses.



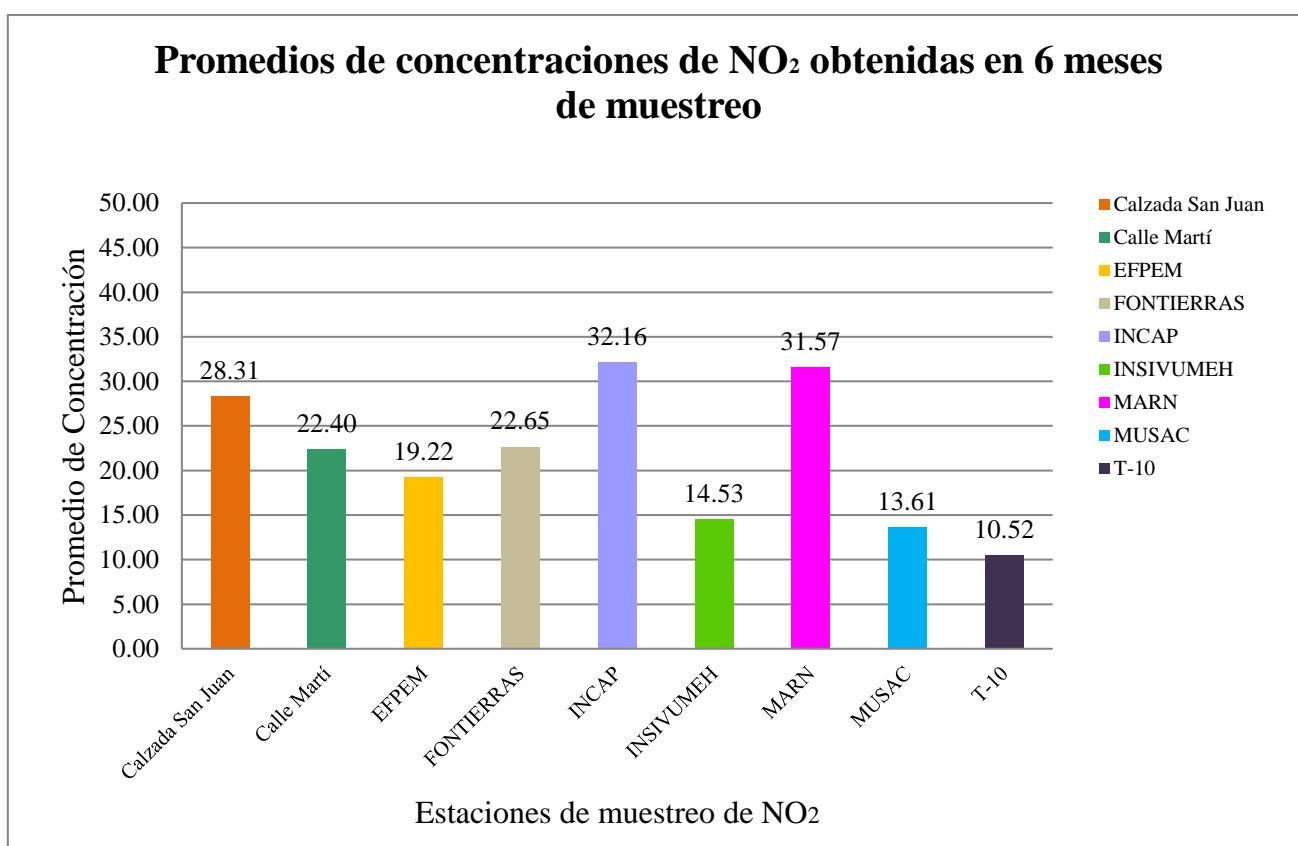
— Valor guía para media anual de 40 µg/m<sup>3</sup> según OMS. Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Cuadro No. 24: **Cálculos estadísticos obtenidos en base a los resultados de cuantificación de NO<sub>2</sub> en 9 estaciones de la ciudad de Guatemala.**

		Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación
1	Calzada San Juan	28.31	2.71	0.096
2	Calle Martí	22.40	3.07	0.137
3	EFPEM	19.22	3.16	0.165
4	FONTIERRAS	22.65	4.48	0.198
5	INCAP	32.16	4.79	0.149
6	INSIVUMEH	14.53	1.65	0.113
7	MARN	31.57	3.29	0.105
8	MUSAC	13.61	6.77	0.497
9	Edificio T-10	10.52	1.50	0.142

Determinado. Fuente: datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

Gráfica No. 13: **Promedios de concentraciones de NO<sub>2</sub>**



Fuente: Datos obtenidos experimentalmente en el laboratorio de Toxicología de la Universidad de San Carlos de Guatemala

## IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Por medio del método de difusión activa se determinó la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), en 9 estaciones (puntos) de la ciudad de Guatemala ubicados en la calzada San Juan, calle Martí, Efpem - USAC, Fontierras, Incap, Insivumeh, MARN, Musac y en el edificio T-10 – USAC, así mismo, se estableció que todos cumplen con el valor guía que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el promedio anual.

El muestreo se realizó en los meses de noviembre 2017 a abril 2018 época que se caracteriza por no tener lluvia (época seca). El país fue afectado por varios frentes fríos desde el mes de noviembre hasta inicio del mes de marzo, provocando una dispersión más alta y un rápido movimiento de los contaminantes en las áreas de muestreo.

En el cuadro No. 6 y la gráfica No. 3, se presentan los datos obtenidos de la concentración de NO<sub>2</sub> por medio del método de difusión activa, en la estación de Calzada San Juan que se ubica en la zona 7 de la ciudad Guatemala. El valor más bajo obtenido corresponde a los meses de noviembre 2017 y de febrero 2018, siendo este de 26 µg/m<sup>3</sup> estos valores fueron determinados durante los distintos frentes fríos que afectaron al territorio nacional, mientras que el valor más alto es del mes de abril 2018 con 33 µg/m<sup>3</sup>. Los valores son aceptables ya que no sobrepasan el valor guía establecido por la OMS que es de 40 µg/m<sup>3</sup> para el promedio anual, a pesar de que la calzada San Juan es una ruta con alta afluencia vehicular.

En el cuadro No. 8 y gráfica No. 4, se presentan los datos obtenidos de la concentración de NO<sub>2</sub> en la estación Calle Martí, que muestra concentraciones con el valor más bajo de 19 µg/m<sup>3</sup> en los meses de diciembre 2017 y febrero 2018, mientras que el valor más alto lo representa el mes de abril 2018 con 27 µg/m<sup>3</sup>, estos valores también son permisibles según el valor establecido por la OMS para el promedio anual. Cabe mencionar que la toma de muestras se realizó en segundo nivel, produciendo con esto una mayor dispersión de los contaminantes. La calle Martí que se encuentra en la zona 2 de la ciudad de Guatemala es un área de alta afluencia vehicular por donde ingresan los automóviles que vienen de zona 18, zona 6 y carretera al Atlántico.

En el cuadro No. 10 y la gráfica No. 5, se presentan los datos obtenidos de la concentración de NO<sub>2</sub> en la estación de Efpem-USAC, el valor más bajo fue de 14 µg/m<sup>3</sup> obtenido en el mes de diciembre 2017 debido a que esta muestra se tomó el día 26 de diciembre un día de poca afluencia vehicular en los alrededores del punto de muestreo, debido a los días festivos de fin de año, mientras que el valor más alto le corresponde al mes de abril del 2018 con 24 µg/m<sup>3</sup>. Los valores de concentración obtenidos son aceptables según el valor guía de la OMS que es de 40 µg/m<sup>3</sup> para el promedio anual.

El cuadro No. 12 y la gráfica No. 6, se presentan los valores obtenidos de la concentración de NO<sub>2</sub> en la estación Fontierras que tiene el valor más bajo en el mes de diciembre 2017, siendo de 18 µg/m<sup>3</sup>. El valor más alto se obtuvo en el mes de abril 2018 siendo de 30 µg/m<sup>3</sup>. Los valores obtenidos son aceptables según el valor guía que establece la OMS para promedios anuales siendo de 40 µg/m<sup>3</sup>, a pesar de que este punto se encuentra sobre la 7a. avenida de la zona 9 y mantiene una alta afluencia vehicular en las horas pico.

Los resultados obtenidos en la estación Incap se presentan en el cuadro No. 14 y la gráfica No. 7, indicando que el valor más bajo de concentración de NO<sub>2</sub> obtenido es de 28 µg/m<sup>3</sup> correspondiente al mes de noviembre 2017, y la concentración de NO<sub>2</sub> más alta en el mes de abril siendo de 39 µg/m<sup>3</sup>. Este último valor es bastante alto debido a que este punto de muestreo se encuentra sobre la Calzada Roosevelt en la zona 11 de la capital, siendo una ruta de acceso a la ciudad para las personas que vienen de algunas zonas de Mixco, San Lucas Sacatepéquez, Santa Lucía Milpas Altas y otros municipios aledaños del Departamento de Sacatepéquez y Chimaltenango. A pesar de que es el punto de muestreo con los valores más altos no sobrepasa el límite establecido por la OMS que es de 40 µg/m<sup>3</sup> para promedios anuales.

En el cuadro No. 16 y gráfica No. 8, se presentan los resultados de las concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas durante los seis meses de muestreo en la estación de INSIVUMEH. El resultado de menor concentración corresponde al mes de diciembre 2017 siendo de 11 µg/m<sup>3</sup>, mientras que la concentración más alta fue de 16 µg/m<sup>3</sup>, indicando de esta forma que no es

un área de alta contaminación y que la afluencia vehicular en este punto no es alta. Las concentraciones obtenidas no sobrepasan el límite establecido por la OMS.

El cuadro No. 18 y la gráfica No. 9, muestran los valores de concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidos en la estación del antiguo edificio del MARN, un área de alta afluencia vehicular, indicando que la concentración más baja obtenida es de 27 µg/m<sup>3</sup> correspondiente al mes de noviembre 2017 y la concentración más alta obtenida en esta estación es de 38 µg/m<sup>3</sup> en el mes de abril 2018. Cabe mencionar que por esta vía de acceso a la ciudad capital ingresan la mayoría de las personas que vienen de carretera a El Salvador, San José Pínula, Fraijanes, Santa Elena Barillas, Santa Catarina Pínula y Boca del Monte.

En el cuadro No. 20 y gráfica No. 10 se presentan los valores de concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidos en la estación de Musac-USAC, indicando que el valor de la concentración más baja es de 15 µg/m<sup>3</sup> correspondiente a los meses de enero y febrero 2018, y la concentración más alta se encontró en el mes de abril 2018 siendo de 18 µg/m<sup>3</sup>. Cabe mencionar que el área donde se encuentra este punto de muestreo es un área de regular afluencia vehicular, pero debido a que este punto se encuentra en la terraza del inmueble de un nivel esto ayuda a que la dispersión de contaminantes sea mayor. Los datos son aceptables según el valor guía de la OMS que es de 40 µg/m<sup>3</sup>.

En el cuadro No.22 y gráfica No. 11 se presentan las concentraciones obtenidas en la estación del Edificio T-10 que se encuentra en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, la concentración más baja fue de 8 µg/m<sup>3</sup> correspondiente al mes de diciembre 2017, y la concentración más alta corresponde al mes de abril 2018 siendo de 12 µg/m<sup>3</sup>. El área de la estación de muestreo no es un área muy transitada y se encuentra en un tercer nivel, teniendo una mayor dispersión de contaminantes en el aire por lo cual se obtienen estos datos. Este punto de muestreo es el que presenta las concentraciones más bajas de NO<sub>2</sub> de todas las estaciones.

En el cuadro No. 24 se presentan los valores de las distintas concentraciones de NO<sub>2</sub> obtenidas en las nueve estaciones de muestreo durante los seis meses de muestreo, se puede

observar que los valores más bajos los presenta la estación de T-10, y los valores más altos los presenta la estación de Incap y ninguno de los valores sobrepasa el valor límite establecido por la OMS de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para promedios anuales.

En la gráfica No. 12, se presenta que la tendencia a mostrar los valores más bajos fue en el mes de diciembre 2017 debido a que es un mes donde hay más frío y viento por lo tanto hay una mayor dispersión de contaminantes y los valores más altos se obtuvieron en el mes de abril 2018 un mes caracterizado por ser el más seco del año, manteniendo de esta forma una menor dispersión en la concentración de contaminantes.

La desviación estándar y coeficiente de variación nos indican que existe dispersión en los datos obtenidos en la medición de  $\text{NO}_2$  por el método de difusión activa, esto posiblemente se debe a condiciones climatológicas, temporales y condiciones de flujo vehicular propias en cada punto de medición.

Cada punto de medición refleja la concentración de  $\text{NO}_2$  captado por el método de difusión activa, en relación al día (24 horas) de medición, en cada uno de los seis meses.



## X. CONCLUSIONES

1. Se determinó la concentración de dióxido de nitrógeno por el método de difusión activa, como indicador de la calidad del aire en la Ciudad de Guatemala durante los meses de noviembre 2017 a abril del año 2018.
2. Se cuantificó la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire de 9 puntos de muestreo en la Ciudad de Guatemala.
3. Con relación al grado de contaminación por dióxido de nitrógeno en el aire, en los 9 puntos de muestreo no se sobrepasa el límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el promedio anual.
4. Se generó información que puede respaldar el establecimiento de políticas de gestión de la calidad del aire de la Ciudad de Guatemala.
5. La estación de muestreo INCAP presenta la mayor concentración NO<sub>2</sub>, mientras que la estación Edificio T-10 presenta la menor concentración de NO<sub>2</sub>.
6. El mes de abril 2018 presenta una mayor concentración de NO<sub>2</sub>, mientras que el mes de diciembre 2017 tiende a ser el que presenta menor concentración del mismo.
7. Los resultados obtenidos de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en las estaciones de INCAP y MARN son bastante altas y algunas casi llegan al límite establecido por la OMS por lo que es posible que se ponga en riesgo la salud de la población que transcurre o vive en los sectores aledaños a dichas áreas.

## XI. RECOMENDACIONES

1. Realizar una medición de este contaminante atmosférico en otros puntos de la ciudad capital, como lo es la calzada Raúl Aguilar Batres, debido a que esta calzada es el punto de ingreso a la Ciudad Capital de la mayoría de los automovilistas que vienen del sur del país.
2. Realizar una medición de la concentración de NO<sub>2</sub> en el municipio de Mixco, debido a que presenta uno de los puntos de ingreso a la Ciudad de Guatemala, y mantiene una alta afluencia vehicular en horas pico.
3. Realizar una medición de este contaminante por medio del método de difusión activa, en otros departamentos con alta afluencia vehicular como lo es Quetzaltenango y Escuintla, debido a que solamente se ha realizado un estudio realizado de la determinación de la concentración de NO<sub>2</sub> en las ocho cabeceras departamentales por el método de difusión pasiva
4. Completar la información obtenida realizando un monitoreo en las mismas estaciones de muestreo durante la época lluviosa, de mayo a octubre.
5. Realizar mediciones con monitores automáticos, para conocer la concentración de NO<sub>2</sub> en tiempo real todo el año.

## XII. REFERENCIAS

- Alvarado, T., Paredes, A. (1996) *Informe anual 1995 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Álvarez, J. (2008). *Informe anual 2009 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Álvarez, J. (2009). *Informe anual 2010 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Álvarez, J. (2010). *Informe anual 2011 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Álvarez, J. (2011). *Informe anual 2012 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Comisión de Ambiente, Ecología y Recursos Naturales Congreso de la República Guatemala C.A. (2014). Citación a la Ministra de Ambiente y Recursos Naturales, Licenciada Michelle Melisa Martinez Kelly, para conocer avances en relación al Cambio Climático. Recuperado de <http://www.congreso.gob.gt/manager/images/2838703A-E120-C65D-19BB-5E12F6557DA4.pdf>
- Cuellar, R. (2011). *Análisis Jurídico del Acuerdo Municipal que restringe la circulación del transporte comercial pesado en el municipio de Guatemala en determinados horarios*. Facultad de Ciencias Jurídicas. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

- Hernández, E. (2013). *Informe anual 2013 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Elblogverde. (2016). *Contaminación atmosférica*. Recuperado de <http://elblogverde.com/contaminacion-atmosferica/>.
- Figueruelo, J. (2004). *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. New York: Reverte.
- INE. (2015). *Compendio anual del medio ambiente*. Recuperado de <https://www.ine.gob.gt/index.php/estadisticas/tema-indicadores>.
- INECC. (2012). *Informe anual de medio ambiente*. Recuperado de <http://www.inecc.gob.mx/calair-indicadores/523-calair-cont-criterio>.
- INSIVUMEH. (2010). *Informe de calidad del aire*. Recuperado de <http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/index.html>.
- Mage, D. Zali, O. (1992). *Contaminación Atmosférica por Vehículos Automotores "Impacto en la salud pública y medidas de control"*. Suiza: Reverte.
- Martínez, A. Romieu, I. (1997). *Introducción al Monitoreo Atmosférico*. México: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. ECO/OPS.
- MINAMBIENTE. (2015). *Contaminación Atmosférica*. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-2>.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2009). *Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del aire. Guatemala 2009*. Guatemala: Herrera, J.

- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Aerosoles Atmosféricos en Guatemala año base 2009*. Guatemala: Pérez, A.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2011). *Perfil de la caracterización del parque vehicular de Guatemala año base 2010*. Guatemala: Pérez, A.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2012). *Perfil de la caracterización del parque vehicular de Guatemala año base 2009*. Guatemala: Pérez, A.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Primer informe indicativo de la calidad del aire en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala*. Guatemala: Perez, A.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Guatemala ratificará acuerdo de París sobre el Cambio Climático*. Recuperado de [http://www.marn.gob.gt/noticias/noticia/Guatemala\\_ratificar\\_acuerdo\\_de\\_Paris\\_sobre\\_el\\_Cambio\\_Climtico](http://www.marn.gob.gt/noticias/noticia/Guatemala_ratificar_acuerdo_de_Paris_sobre_el_Cambio_Climtico).
- Morales C. (2016). *Parque Vehicular: 30 nuevos automotores se suman cada hora*. Guatemala: La revista del Líder Actual.
- NASA. (2016). *Administracion Nacional de la Aeronautica y el Espacio*. Recuperado de [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/juno/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/juno/main/index.html).
- Oliva, P. (2000). *Monitoreo del Aire en ciudad de Guatemala, Informe Anual*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. (2001). *Informe anual 2001 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.

- Oliva, P. (2002). *Informe anual 2002 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. (2003). *Informe anual 2003 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. (2004). *Informe anual 2004 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. (2005). *Informe anual 2005 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. (2006). *Informe anual 2006 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. (2007). *Informe anual 2007 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Oliva, P. (2008). *Calidad del aire en Guatemala Compilación de la Información Existente*. (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Oliva, P. (2013). *Informe anual 2013 de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire. Escuela de Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

- Oliva, P. (2016). *Informe anual de la calidad del aire ciudad de Guatemala 2016*. Laboratorio de Monitoreo del aire USAC:. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/0BwslezsEzB1qMjVhQS1ad1FTTWs/view>.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de Calidad del Aire de la OMS. Actualización Mundial 2005*. Organización Panamericana de la Salud.
- Organización Mundial de la Salud. (2016). *Calidad del aire y salud*. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
- Prensa Libre. (16 de diciembre 2015). Ingreso a la capital dura más de dos horas y media. Prensa Libre. Recuperado de [//www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/ingreso-a-la-capital-dura-mas-de-dos-horas-y-media](http://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/ingreso-a-la-capital-dura-mas-de-dos-horas-y-media).
- Roberts, E. & Associates, Inc. (2000). *Manual de control de la calidad del aire*. México: McGraw-Hill.
- Saravia, P. (1983). *Investigación de la contaminación del aire en el área central de la ciudad de Guatemala* (Tesis de Maestría). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- SAT. (2014). *Parque vehicular*. Recuperado de <http://portal.sat.gob.gt/sitio/indicadores-tributarios>
- Shooter, D. (1993). *Nitrogen dioxide and its Determination in the Atmosphere. A Simple Method for Surveying Ambient Pollution Concentrations*. Washington: McGraw-Hill.
- WHO. (2000). World Health Organization. *Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark "Oxides of Nitrogen*. Washington.

### XIII. ANEXOS

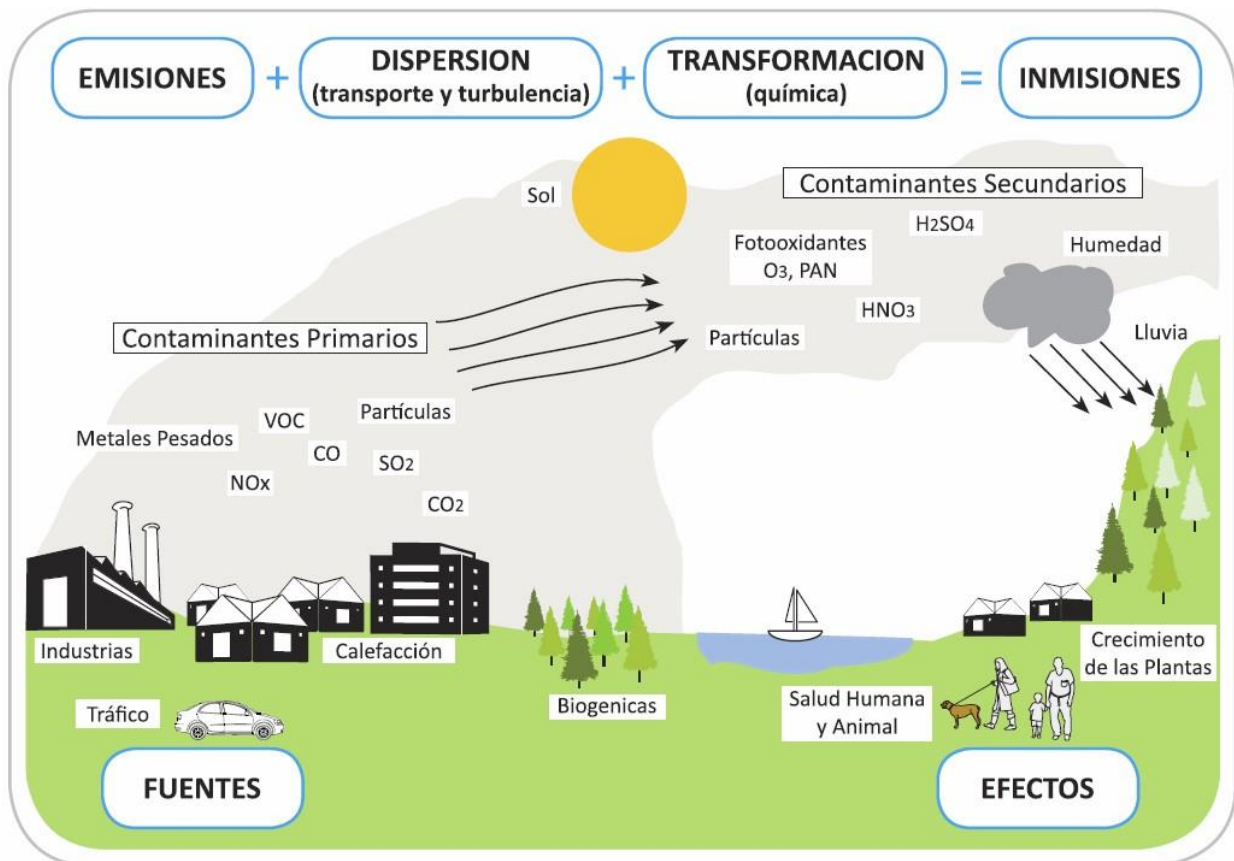
Figura No. 1: **Imagen de la contaminación del aire sobre la ciudad de Guatemala en el año 2009**



Fuente: MARN Aerosoles Atmosféricos en Guatemala 2009

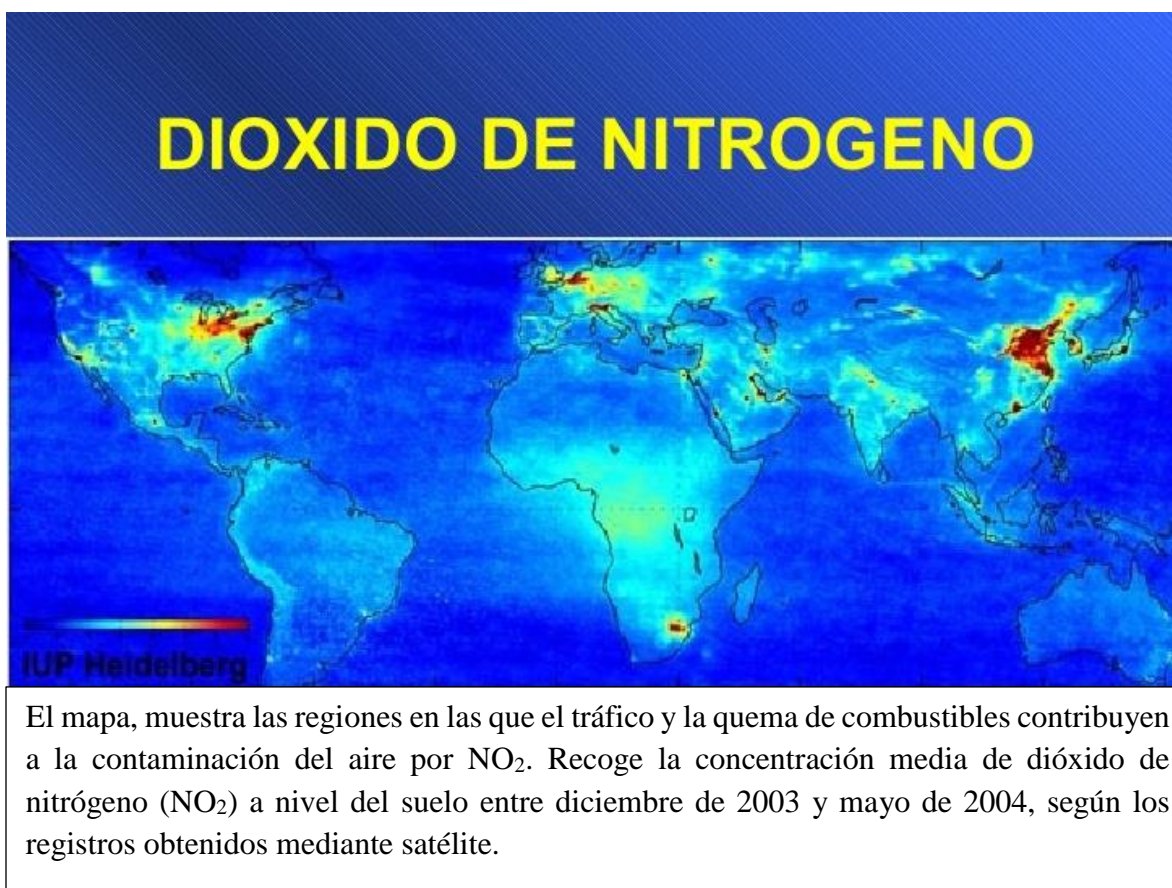


Figura No. 2: Ilustración de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos.



Fuente: Ministerio de Ambiente de Colombia. (2017). Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-2>.

Figura No. 3: **Contaminación por dióxido de nitrógeno.**



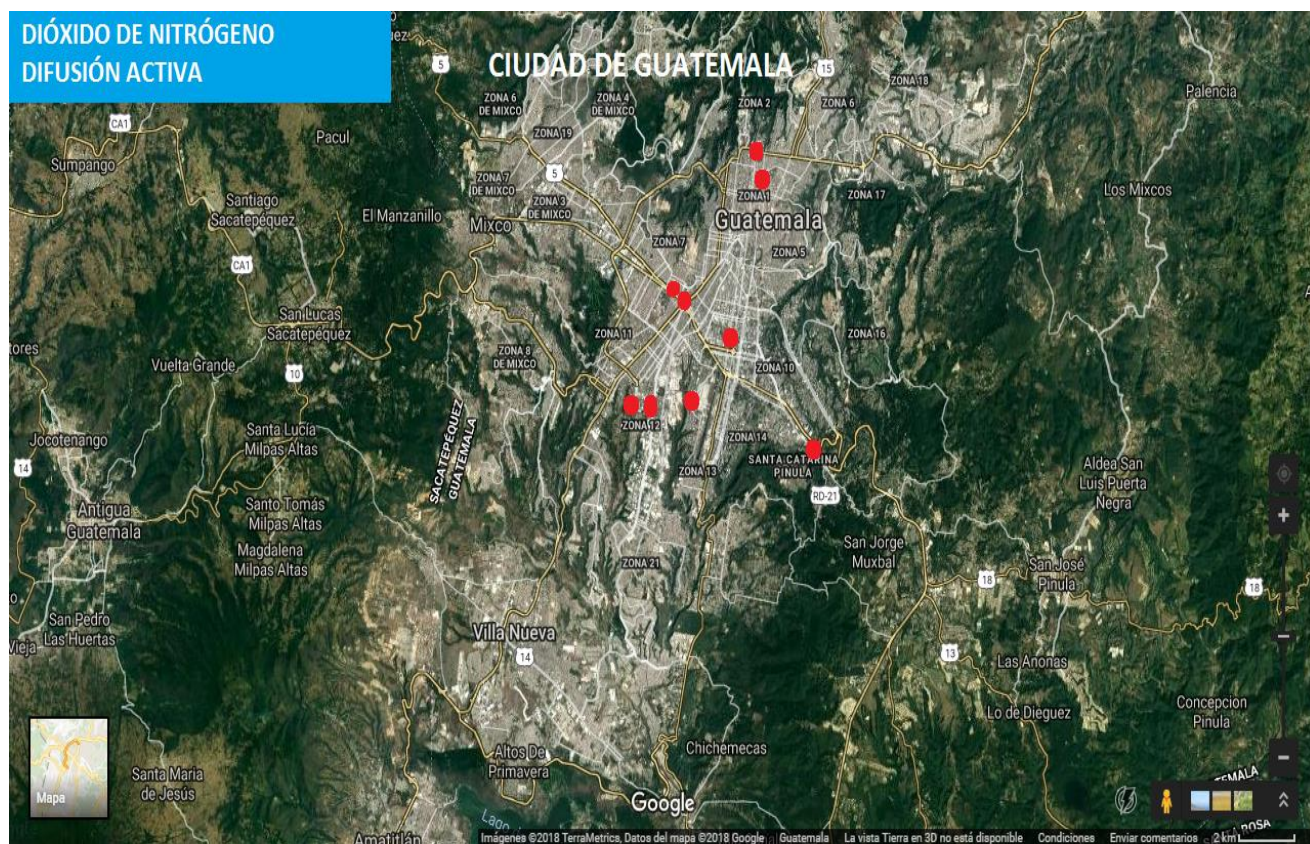
Fuente: NASA. (2016). Recuperado de: [www.nasa.gov/mission](http://www.nasa.gov/mission)

Figura No. 4: Mapa de la República de Guatemala.



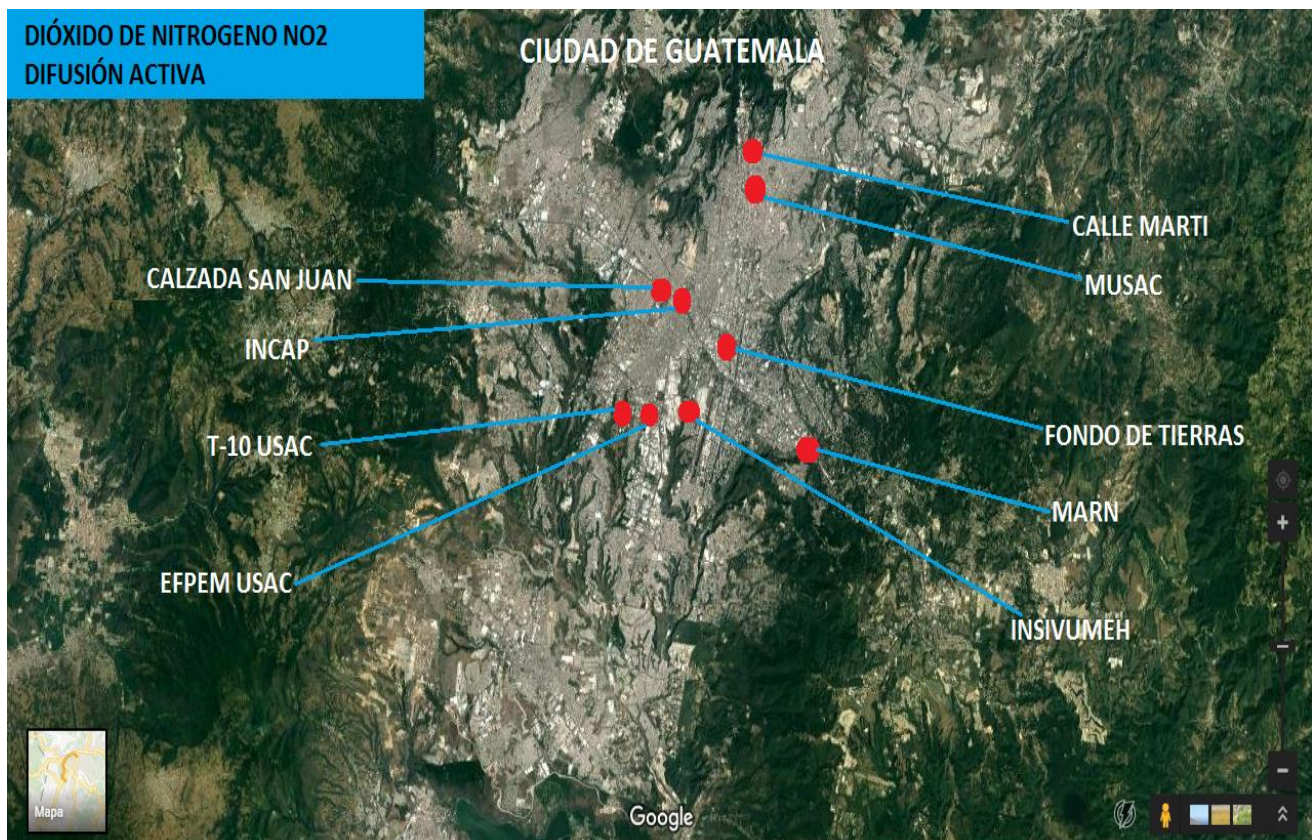
Fuente: Google Maps (2018).

Figura No. 5: Imagen satelital de la distribución de los puntos de muestreo en la ciudad de Guatemala



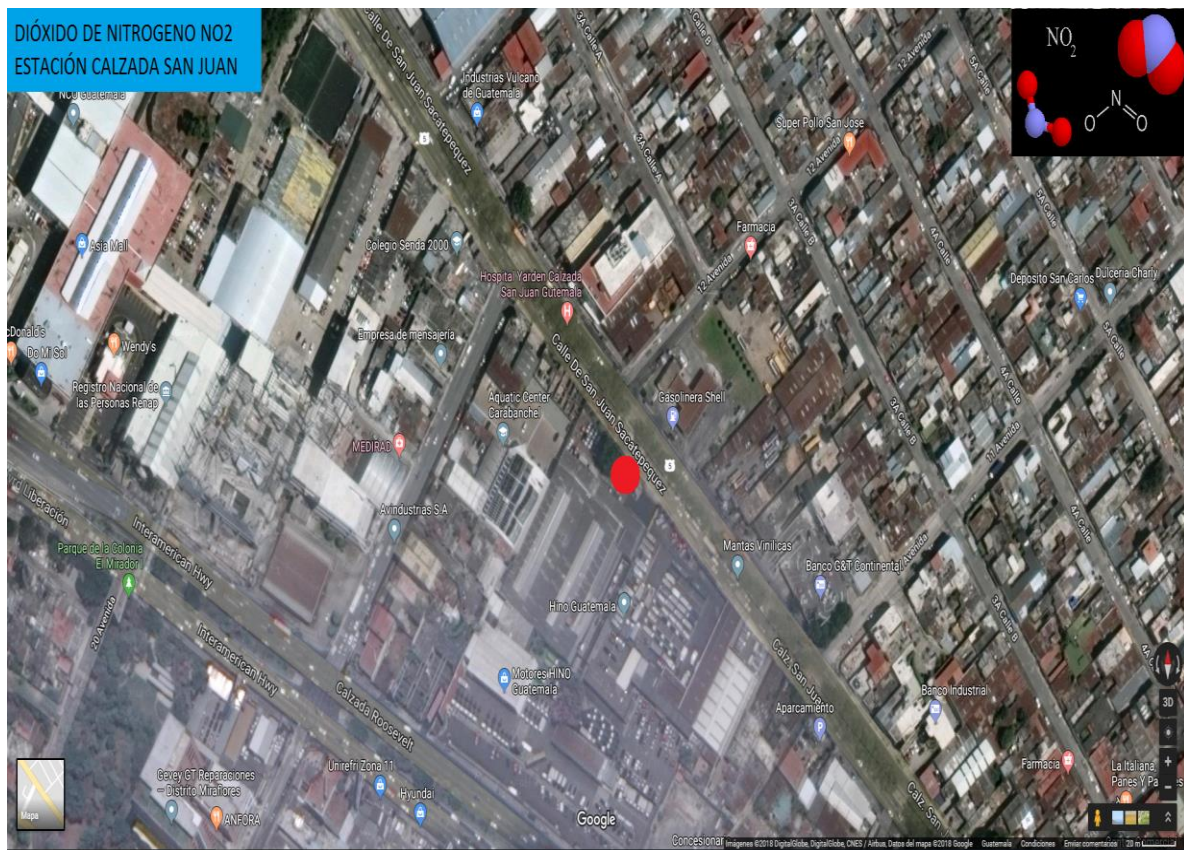
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 6: Imagen satelital de la ubicación de los puntos de muestreo en la ciudad de Guatemala



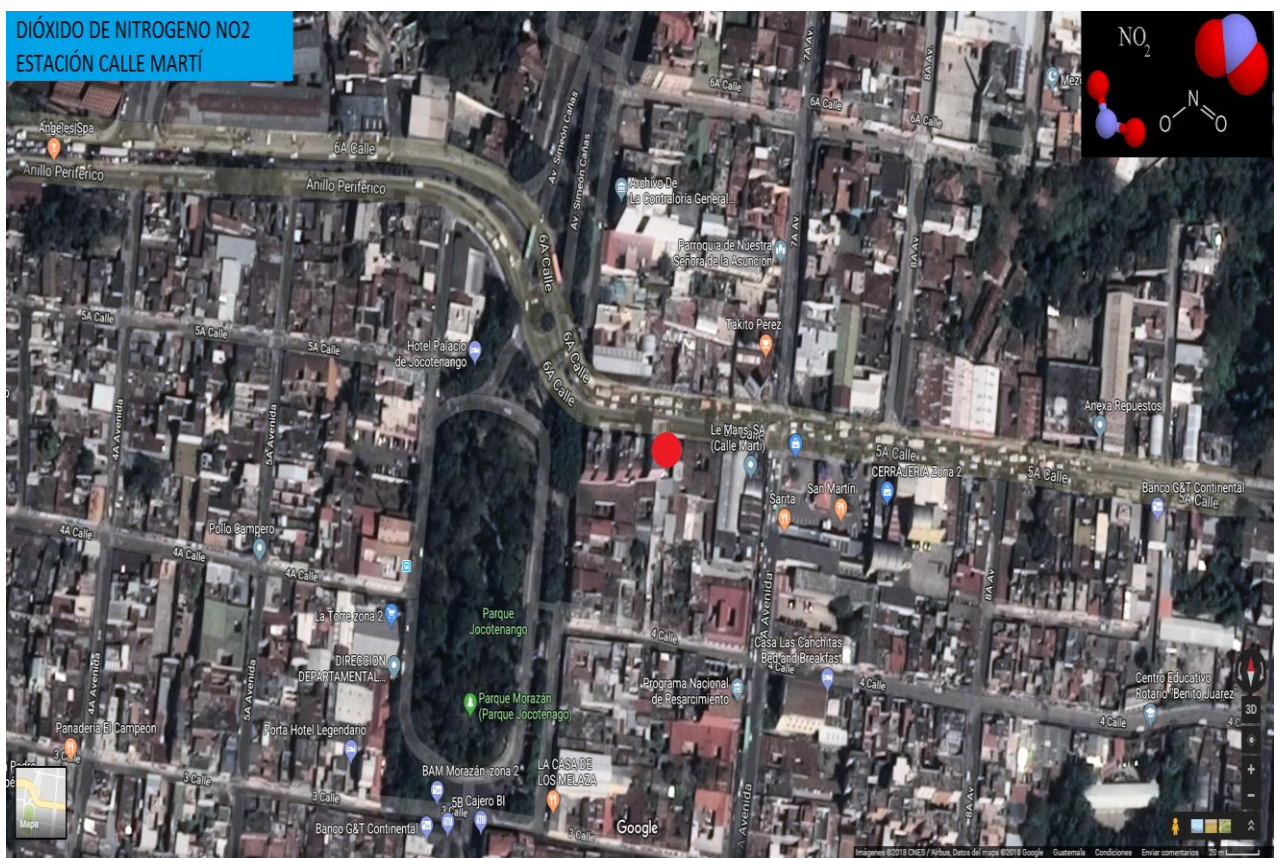
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 7: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “Calzada San Juan”



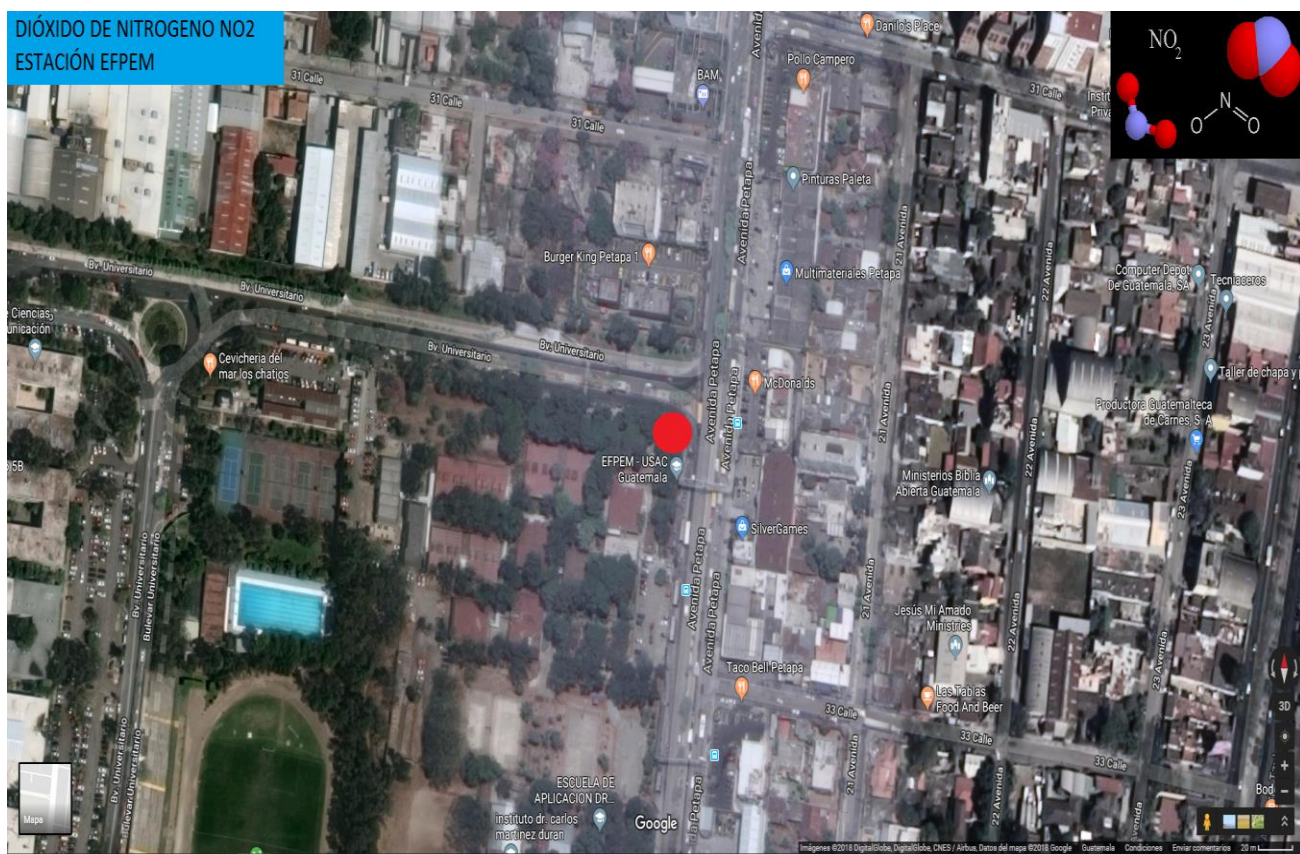
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 8: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “Calle Martí”



Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

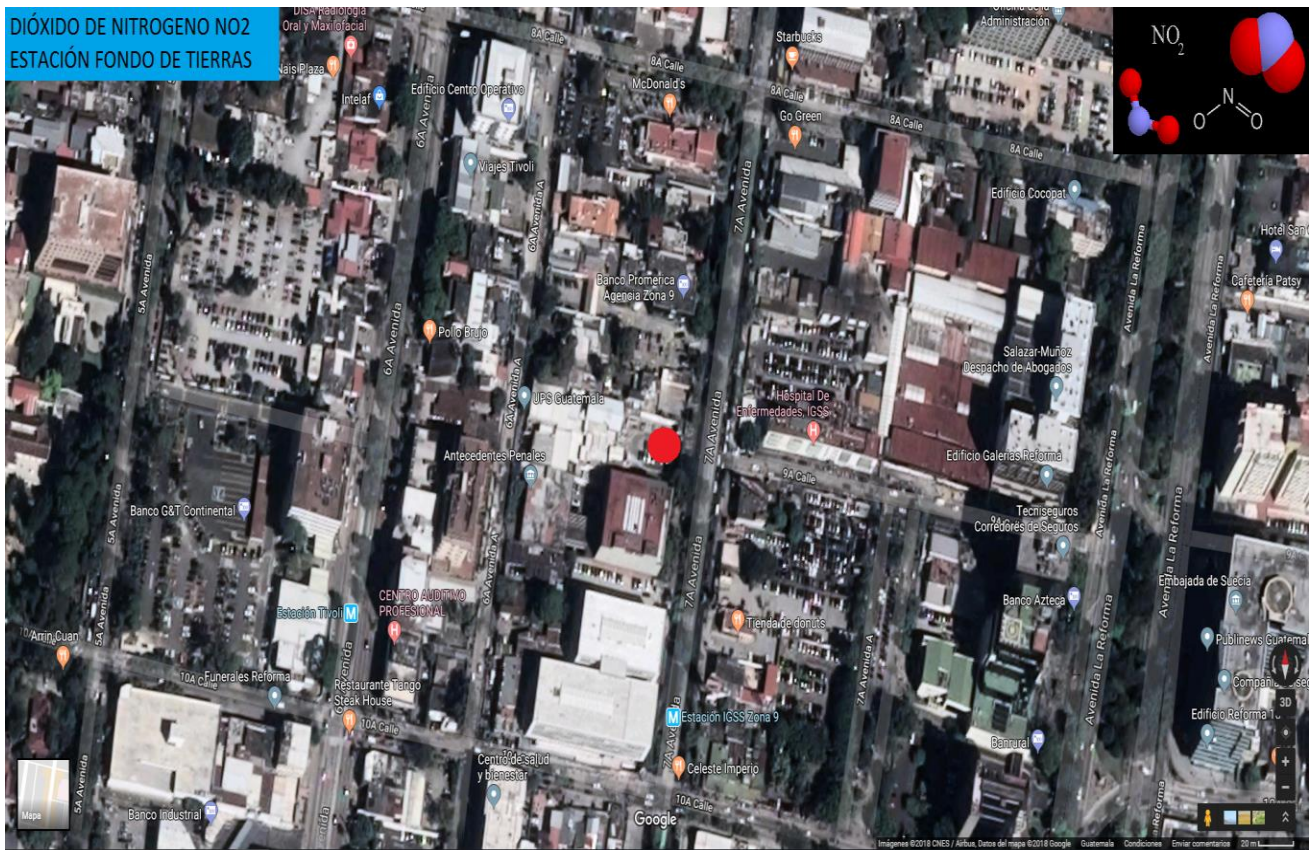
Figura No. 9: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “EFPEM-USAC”



Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

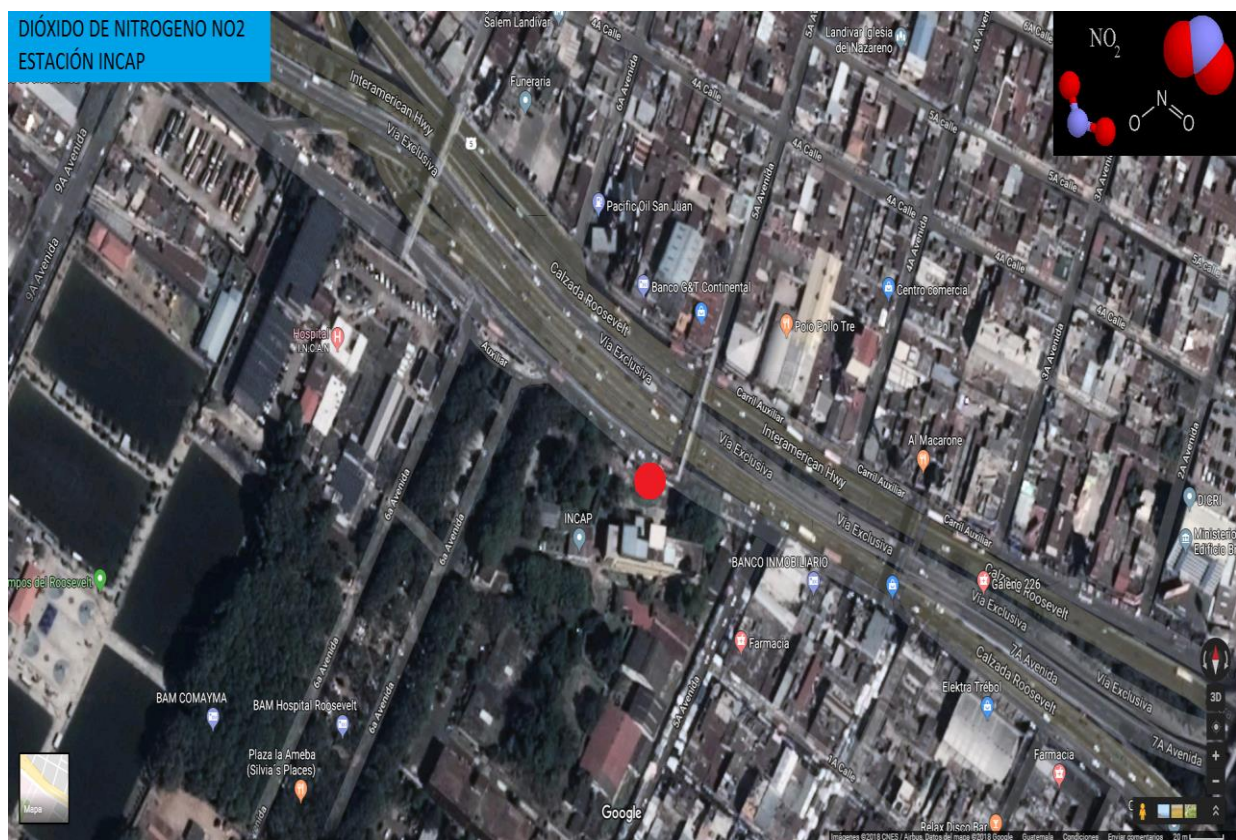


Figura No. 10: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “FONTIERRAS”



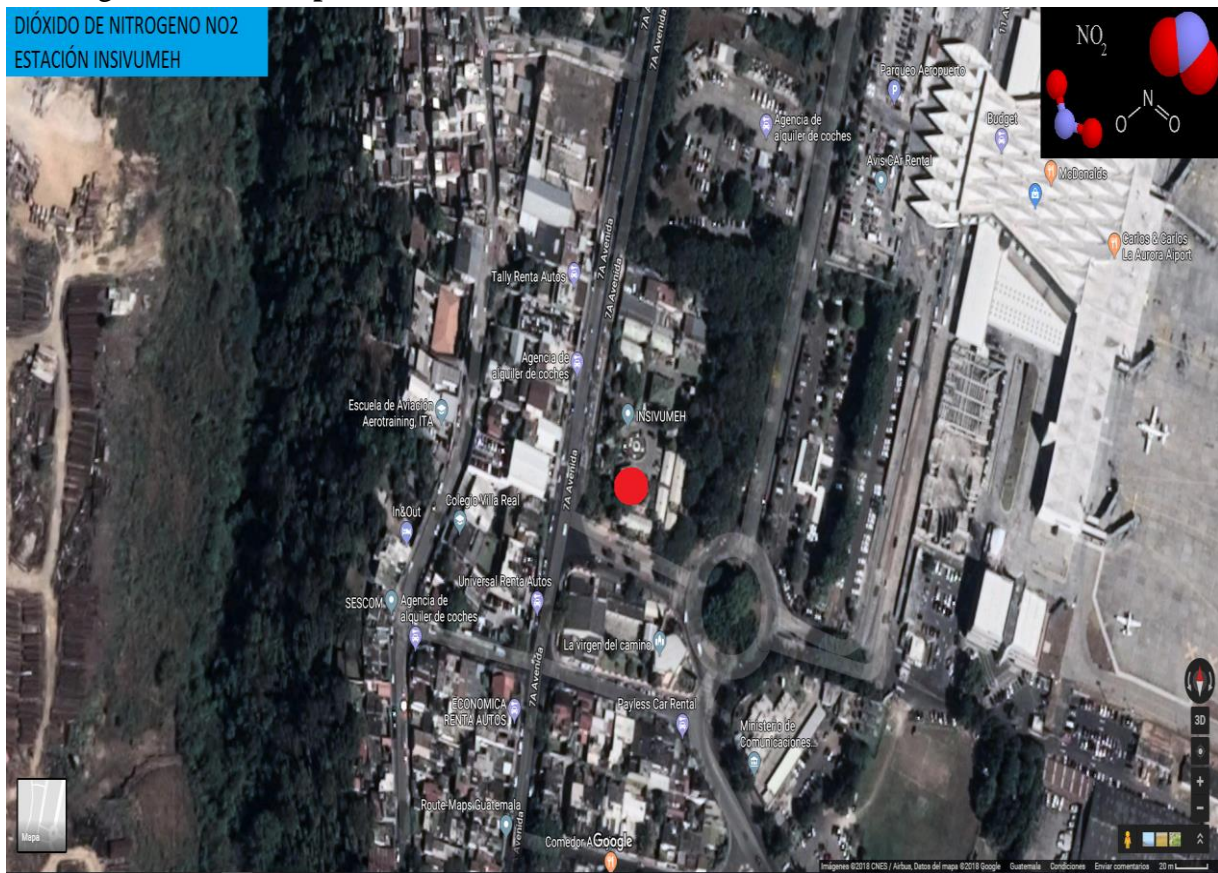
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 11: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “INCAP”



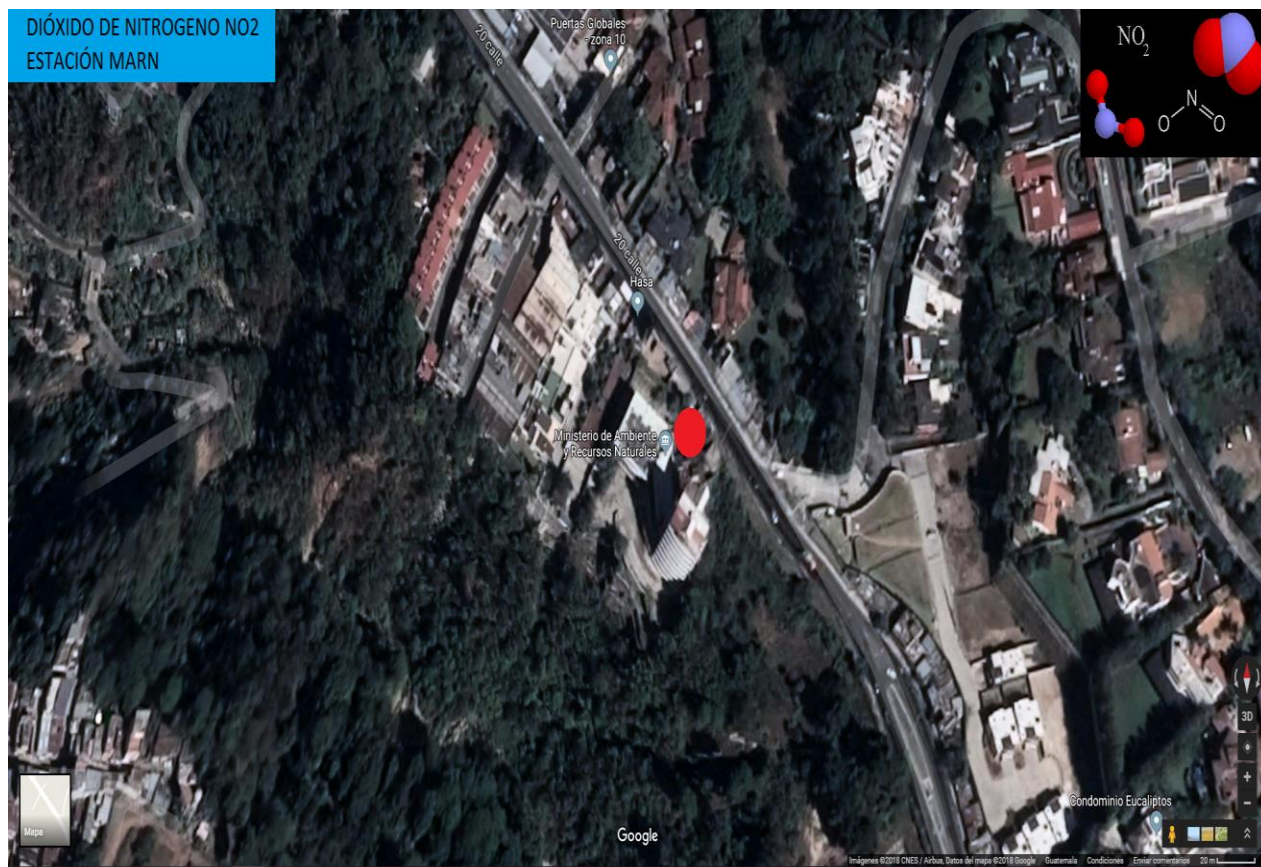
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 12: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “INSIVUMEH”



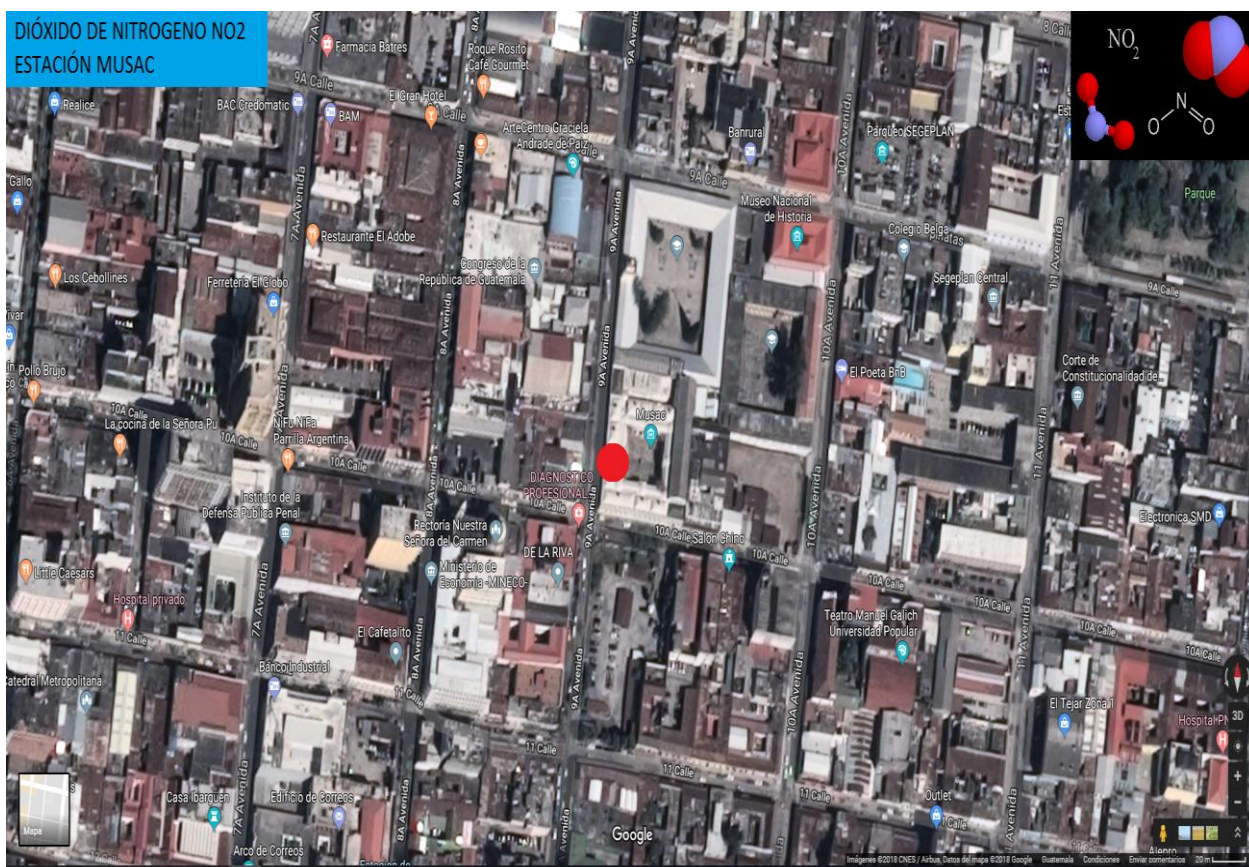
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 13: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “MARN”



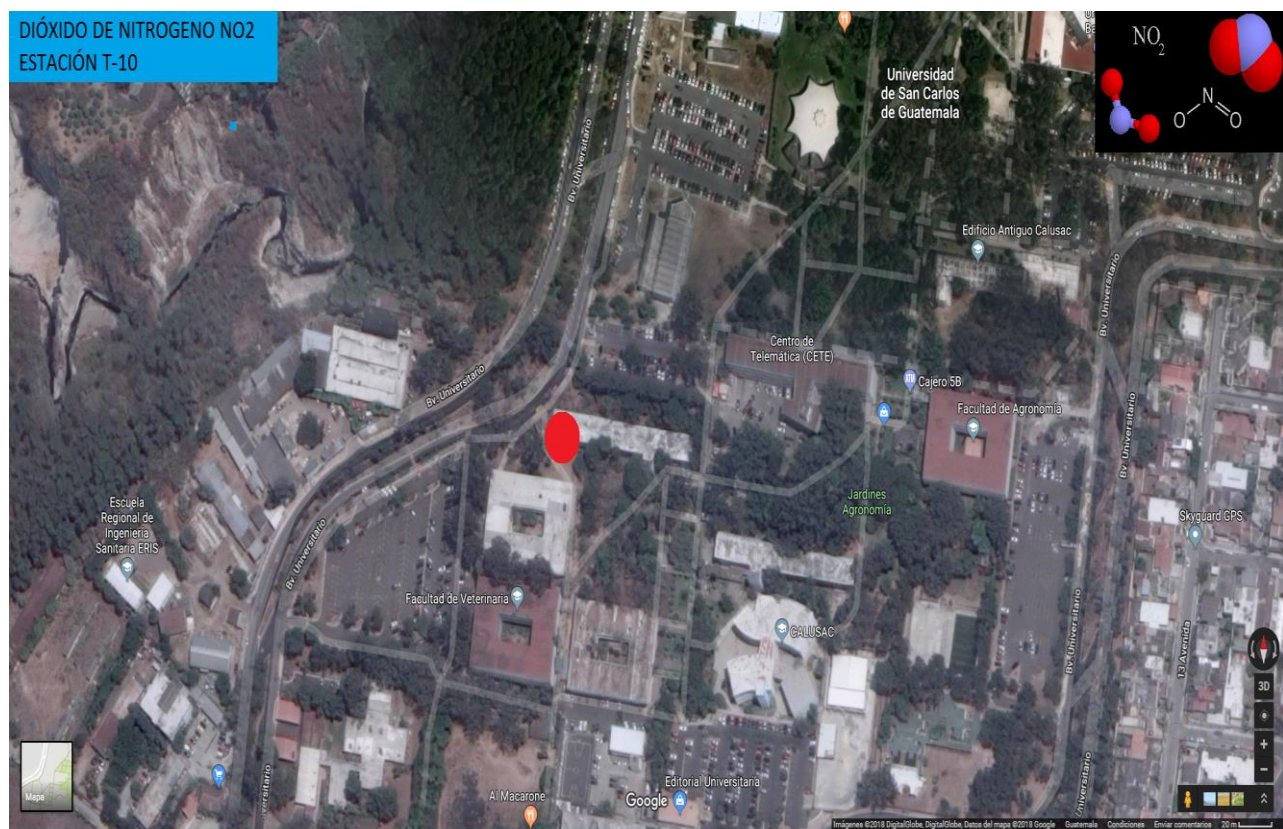
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 14: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “MUSAC-USAC”



Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018).

Figura No. 15: Mapa de ubicación de la estación de muestreo “Edificio T-10”



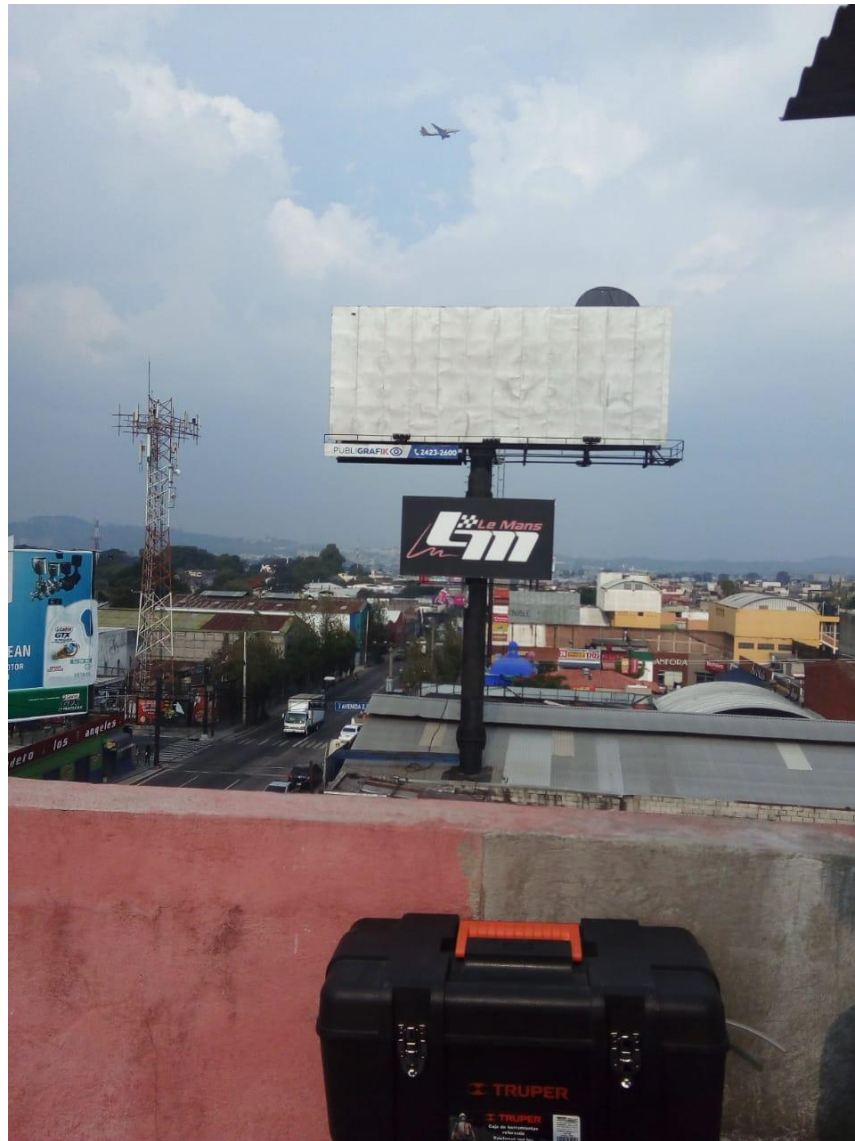
Fuente: Edición propia realizada con google maps, (2018)

Figura No. 16: Colocando equipo en Estación “Calzada San Juan”



Fuente: propia, fotografía tomada en estación Calzada San Juan 11-95 zona 7, (2018).

Figura No. 17: Estación de muestreo “Calle Martí”



Fuente: propia, fotografía tomada en Calle Martí 6-42 zona 2, (2018).



Figura No. 18: Tomando la muestra de la estación “EFPEM-USAC”



Fuente: propia, fotografía tomada en estación “EFPEM-USAC”, (2018).

Figura No. 19: Tomando datos de la muestra en estación “FONTIERRAS”



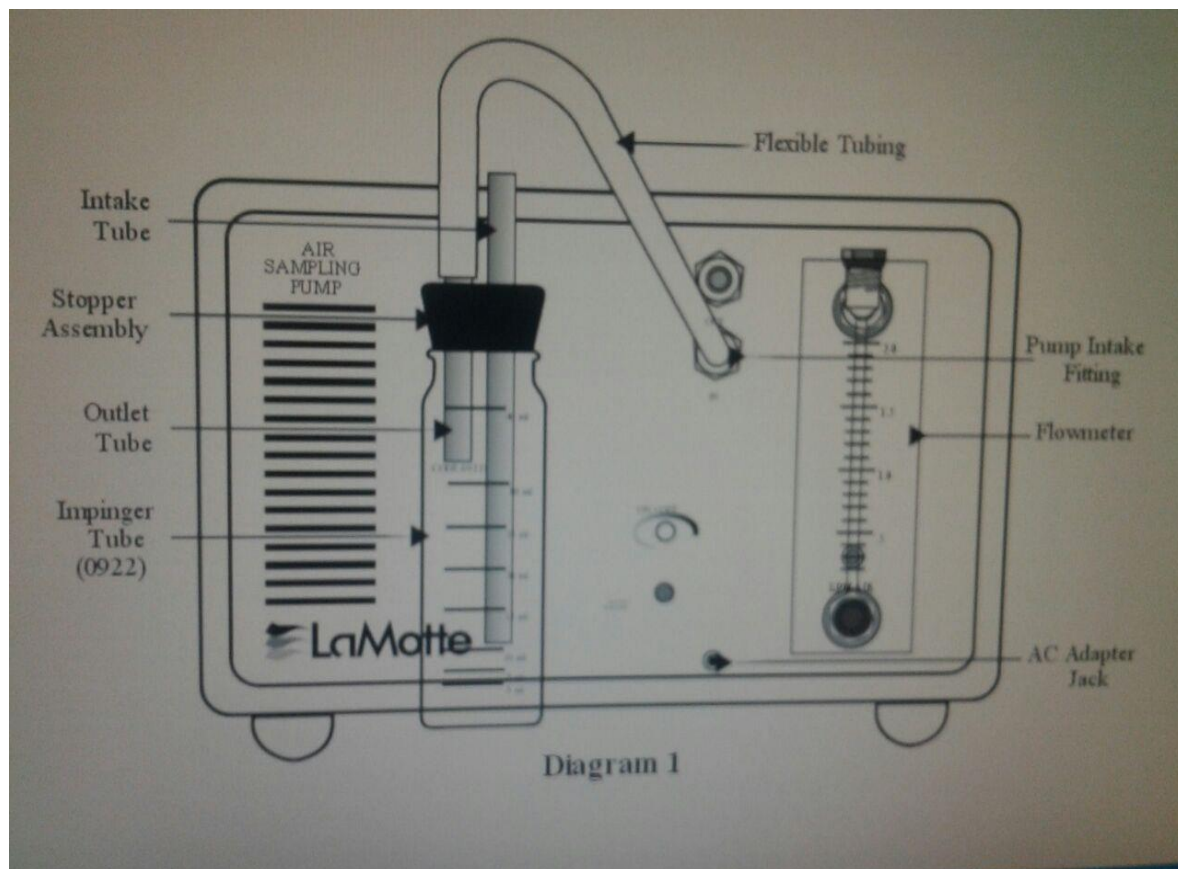
Fuente: propia, fotografía tomada en 7ma. Avenida 8-92 zona 9, (2018).

Figura No. 20: Estación de muestreo “INCAP”



Fuente: propia, fotografía tomada en Calzada Roosevelt 6-25 zona 11, (2018).

Figura No. 21: Diagrama del equipo monitor de gases



Fuente: manual del equipo monitor de gases LaMotte, (2012).

Figura No. 22: Muestras recolectadas, esperando llegar a temperatura ambiente para ser analizadas



Fuente: propia, fotografía tomada en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Universidad de San Carlos, (2018).

Figura No. 23: **Analizando muestras**



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Universidad de San Carlos, (2018).

Figura No. 24: Muestras preparadas esperando para el análisis.



Fuente: Fotografía tomada en el laboratorio del Departamento de Toxicología de la Universidad de San Carlos, (2018).



---

Br. Ana Delmi Castañeda Franco

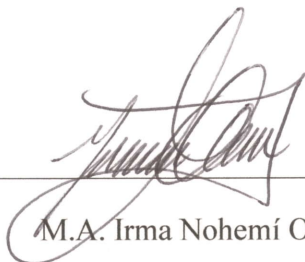
Autora



---

M.A. Pablo Ernesto Oliva

Asesor



---

M.A. Irma Nohemí Orozco

Directora de Escuela



---

Dr. Rubén Velásquez

Decano