



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

Sede Santo Domingo

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E INDUSTRIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y MANEJO DE RIESGOS
NATURALES**

Informe de propuesta tecnológica para obtener el título de:

INGENIERA AMBIENTAL Y MANEJO DE RIESGOS NATURALES

**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL
PARTICULADO (PM₁₀) EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE SANTO DOMINGO**

Autora

NICOLE VALERIA GARRIDO HERNÁNDEZ

Director

Ing. RODRIGO SAQUICELA, *MSc.*

Santo Domingo de los Tsáchilas – Ecuador

Enero – 2017

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀) EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE SANTO DOMINGO

Ing. Rodrigo Saquicela, *MSc.*

DIRECTOR

APROBADO

Ing. Miriam Recalde, *MSc.*

PRESIDENTE(A) DEL TRIBUNAL

Ing. Xavier López, *MSc.*

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Lic. Marco Jácome, *MSc.*

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Santo Domingo, de de

Autor: NICOLE VALERIA GARRIDO HERNÁNDEZ

Institución: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**Título: EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE
CONCENTRACIÓN DE MATERIAL
PARTICULADO (PM₁₀) EN EL AIRE DE LA
CIUDAD DE SANTO DOMINGO**

Fecha: ENERO, 2017

El contenido del presente trabajo está bajo la responsabilidad del autor y no ha sido plagiado.



Nicole Valeria Garrido Hernández

C.I. 1721800405

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL
Sede Santo Domingo

INFORME DEL DIRECTOR

Santo Domingo, 03 de enero de 2017

Ing. Miriam Recalde, *MSc.*

**COORDINADORA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y
MANEJO DE RIESGOS NATURALES**

Presente.

De mis consideraciones.-

Mediante la presente tengo a bien informar que el trabajo técnico realizado por el (la) estudiante **NICOLE VALERIA GARRIDO HERNÁNDEZ**, cuyo tema es **EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀) EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE SANTO DOMINGO**; ha sido elaborado bajo mi supervisión y revisado en todas sus partes, el mismo que no ha sido plagiado, por lo cual autorizo su respectiva presentación.

Particular que informo para fines pertinentes.

Atentamente,



Ing. Rodrigo Saquicela, *MSc.*

DIRECTOR

Dedicatoria

Mi tesis se la dedico a Dios Todopoderoso, que ha permitido que se cumplan todas las metas en mi vida y me ha dado la gracia para poder perseverar y no desfallecer, pero sobre todo porque junto a María Santísima me han concedido su amorosa protección todos los días. De igual manera, dedico mi tesis a las personas más especiales en mi vida, mis padres que han sido mi sustento y fortaleza para salir adelante, quienes han estado siempre a mi lado. A mi hermano y abuelita que con su amor incondicional me han apoyado en lo que más necesité. Finalmente a mi familia en general y mis amigos, quienes con sus oraciones han estado pendientes de mí en los momentos de adversidad y felicidad.

Nicole Valeria Garrido Hernández

Agradecimiento

Agradezco a Dios y a mi madre celestial Virgen María por ayudarme a culminar esta etapa de mi vida, al brindarme su amor sin medida. También estoy agradecida por la confianza y apoyo de mis padres porque ellos han sido las primeras personas que han creído en mí y me han impulsado para cumplir mis metas. También agradezco a todos mis familiares, docentes y amigos que me dedicaron tiempo y compañía en este tan esperado logro.

Nicole Valeria Garrido Hernández

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1721800405
APELLIDO Y NOMBRES:	Garrido Nicole Valeria
DIRECCIÓN:	Av. Quito y Calle Río Blanco
EMAIL:	nicovale_13@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	022713415
TELÉFONO MÓVIL:	0989388115

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Evaluación de los niveles de concentración de material particulado (PM ₁₀) en el aire de la ciudad de Santo Domingo
AUTOR O AUTORES:	Nicole Valeria Garrido Hernández
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	25 de enero del 2017
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Ing. Rodrigo Saquicela, MSc.
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Ambiental y Manejo de Riesgos Naturales
RESUMEN: máximo 250 palabras	El material particulado PM ₁₀ es un contaminante de alto impacto para la salud humana en todo el mundo. En Santo Domingo, Ecuador, se evaluó la

	<p>concentración de PM₁₀, que fue analizado en el periodo 2011-2015 con el modelo lineal general y mixto ($P < 0,05$). Se observó que en 2012 el PM₁₀ del aire sobrepasó el nivel crítico de 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ indicado por la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire; mientras que en los demás años la concentración no sobrepasó el límite permisible. Según la Organización Mundial de la Salud solo en los años 2011, 2012 y 2013 sobrepasaron los límites permisibles de 20 $\mu\text{g m}^{-3}$. Además, a nivel nacional entre las ciudades analizadas, se observó que ninguna sobrepasó el límite permisible indicado por la NECA, sin embargo las que presentaron mayor concentración de PM₁₀ fueron Manta y Santo Domingo. La propuesta para mejorar la calidad del aire consistió en elaborar un plan de control de contaminación atmosférica mediante la aplicación de políticas ambientales y la instalación de una red de monitoreo atmosférica. Las políticas ambientales están enfocadas en la reducción de la contaminación atmosférica de las industrias, vehículos y erosión eólica. La red de monitoreo tendría nueve estaciones y medirá el PM₁₀, PM_{2,5}, partículas sedimentables, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y ozono. El costo de las políticas ambientales variará dependiendo de la aplicación de las estrategias propuestas y la red de monitoreo se presupuesta en aproximadamente \$ 4 millones.</p>
<p>PALABRAS CLAVES:</p>	<p>PM₁₀, red de monitoreo, contaminación atmosférica, políticas ambientales, Santo Domingo de los Colorados, contaminantes criterio.</p>
<p>ABSTRACT:</p>	<p>PM₁₀ particulate material is a high-impact contaminant for human health around the world. In Santo Domingo, Ecuador, the concentration of PM₁₀ was evaluated, which was analyzed during 2011-2015 with the general and mixed linear model</p>

	<p>(P <0.05). It was observed that in 2012 the PM₁₀ of the air surpassed the critical level of 50 µg m⁻³ indicated by the Ecuadorian Standard of the Quality of the Air; while in other years the concentration did not exceed the permissible limit. According to the World Health Organization only in the years 2011, 2012 and 2013 exceeded the permissible limits of 20 µg m⁻³. In addition, at the national level between the cities analyzed, it was observed that none exceeded the allowable limit indicated by the NECA, however the ones with the highest concentration of PM₁₀ were Manta and Santo Domingo. The proposal to improve air quality was to develop a plan to control air pollution through the implementation of environmental policies and the installation of an atmospheric monitoring network. Environmental policies are focused on reducing air pollution from industries, vehicles and wind erosion. The monitoring network would have nine stations and measure PM₁₀, PM_{2.5}, sedimentary particles, carbon monoxide, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and ozone. The cost of environmental policies will vary depending on the implementation of the proposed strategies and the monitoring network is budgeted at approximately \$ 4 million.</p>
<p>KEYWORDS</p>	<p>PM₁₀, monitoring network, air pollution, environmental policies, Santo Domingo de los Colorados, contaminants criterion.</p>

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f: _____

NICOLE GARRIDO

CI 1721800405

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **NICOLE VALERIA GARRIDO HERNÁNDEZ**, CI 1721800405 autor del proyecto titulado: **“EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀) EN EL AIRE DE LA CIUDAD DE SANTO DOMINGO”** previo a la obtención del título de **INGENIERA AMBIENTAL Y MANEJO DE RIESGOS NATURALES** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Santo Domingo, 25 de enero de 2017



f: _____

NICOLE VALERIA GARRIDO HERNÁNDEZ

CI 1721800405

ÍNDICE DE CONTENIDO

Portada	I
Sustentación y aprobación de los integrantes del tribunal	II
Responsabilidad del autor	III
Aprobación del director	IV
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento.....	VI
Formulario de registro bibliográfico	VII
Declaración y autorización	X
Índice de contenido	XI
Índice de tablas	XII
Índice de figuras.....	XIII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. CONTENIDO TÉCNICO	3
2.1. Localización.....	3
2.2. Diagnóstico	3
2.3. Propuesta tecnológica	17
2.4. Plan para las pruebas técnicas.....	27
2.5. Análisis económico.....	28
III. CONCLUSIONES	30
Referencias.....	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas de los equipos de la estación meteorológica propuesta para la red de monitoreo de Santo Domingo, Ecuador.....	23
Tabla 2. Métodos o principio de operación para medir las variables de contaminación atmosférica en la red de monitoreo de Santo Domingo, Ecuador	24
Tabla 3. Contaminantes y límites permisibles para la red de monitoreo de Santo Domingo, Ecuador	26
Tabla 4. Análisis económico de la aplicación de medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire de Santo Domingo, Ecuador	29
Tabla 5. Análisis económico de la instalación de la red de monitoreo atmosférica en Santo Domingo, Ecuador	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Promedio de la concentración de material particulado (PM_{10}) en las ciudades de Ecuador medido entre los años 2011-2015	4
Figura 2. Promedios de material particulado 10 (PM_{10}) de las ciudades del Ecuador según meses y años	7
Figura 3. Promedios de material particulado 10 (PM_{10}) en el año 2015 en las ciudades de Ecuador de Sangolquí, Quevedo, Babahoyo y Esmeraldas	12
Figura 4. Promedios de material particulado 10 (PM_{10}) en el periodo 2011-2015 en la ciudad de Santo Domingo, Ecuador	15

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de los países son un riesgo medioambiental para la salud. Se estima que en el mundo la contaminación causa alrededor de 3,7 millones de muertes prematuras anuales. La mortalidad por contaminación atmosférica se debe principalmente a la exposición de pequeñas partículas de 10 μg de diámetro o menores, llamado material particulado 10 (PM_{10}). La exposición puede causar cardiopatías, neumopatías y cáncer (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2016).

Para controlar la calidad del aire en las ciudades, las entidades reguladoras tienen la obligación de llevar un registro de las concentraciones de los diferentes contaminantes, compararlas con las normativas legales y en caso de incumplimiento, emitir las políticas ambientales respectivas para garantizar en lo posible el derecho de la ciudadanía y la protección del medio ambiente. La normativa ecuatoriana considera dentro de los contaminantes criterio a las partículas sedimentables, el PM_{10} y el $\text{PM}_{2,5}$ (Ministerio del Ambiente del Ecuador [MAE], 2011).

Según Spiegel y Maistre (1998) un plan para el control de la contaminación atmosférica tiene por objetivo reducir y controlar la contaminación del aire. El plan considera aspectos como: descripción del área de estudio, inventario de emisiones y concentraciones, límites máximos permisibles, concentraciones simuladas de contaminantes, inventario de efectos en la salud pública y medio ambiente, causas de la contaminación, medidas de control, costos en la salud pública y ambiente, análisis de costo/beneficio, uso del suelo y transporte, logística de la ejecución, uso de recursos y seguimiento del plan.

El MAE ha escogido como base de su metodología de cuantificación de la concentración del PM_{10} el muestreo pasivo y método gravimétrico, mediante un muestreador de alto o bajo caudal y como método alternativo para la medición continua optó por la microbalanza oscilante y la atenuación beta. El muestreo del aire se obtuvo a través de un equipo de monitoreo del flujo volumétrico, que después de la cuantificación se establece la concentración promedio anual de PM_{10} presente en la atmósfera (MAE, 2011).

De acuerdo al último reporte de la OMS (2016) en el periodo 2012 a 2013 en diferentes ciudades de Ecuador como Santo Domingo, Milagro, Quito, Latacunga, Manta y Portoviejo, las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$, sobrepasan los límites permisibles de la contaminación (Sorgato, 2016). Santo Domingo supera los límites en cuanto a la concentración de PM_{10} , la cual tuvo un promedio anual de $69 \mu g m^{-3}$ y $PM_{2,5}$ de $33 \mu g m^{-3}$ calculada (OMS, 2016). Se considera que la principal fuente de contaminación de PM_{10} en la ciudad de Santo Domingo son los vehículos porque el parque automotor de la ciudad está conformado por más de 71 647 vehículos (MAE, 2014).

Considerando que Santo Domingo es la cuarta ciudad más poblada del Ecuador, con aproximadamente 400 000 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INEC], 2010) y dada la alta contaminación atmosférica, se propone evaluar los niveles de contaminación por PM_{10} en el aire de esta ciudad, a través de un análisis detallado de los datos reportados en el periodo 2011 a 2015 por la Dirección Nacional de Control Ambiental del Ministerio del Ambiente del Ecuador, los datos fueron adquiridos de la plataforma del Sistema Único de Información Ambiental (MAE, 2016).

El objetivo de esta propuesta fue reportar la situación actual de contaminación y proponer medidas correctivas y preventivas que permitan mejorar la calidad del aire. La contaminación del aire de la ciudad se diagnosticó por medio de la concentración de PM_{10} . Finalmente, se comparó los resultados obtenidos de la calidad del aire con reportes de otras ciudades del país y con los límites permisibles de la Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire (NECA) anual de $50 \mu g m^{-3}$ para PM_{10} y las de la OMS de $20 \mu g m^{-3}$ (MAE, 2011).

II. CONTENIDO TÉCNICO

2.1. Localización

El siguiente trabajo se realizó en la ciudad de Santo Domingo de los Colorados, capital de la Provincia Santo Domingo de los Tsáchilas. La ciudad de Santo Domingo de los Colorados, cabecera cantonal, tiene un área de 7 389,6 ha. Es sensiblemente plana (90 %), con una cota que en la parte central oscila entre 550 m y 553 m sobre el nivel del mar (Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial [PDOT], 2015).

Según la clasificación de zonas de vida de Holdrige, Santo Domingo al tener una precipitación media anual de 2522,9 mm y temperaturas que oscilan entre 21,6 °C y 23 °C, corresponde a un clima tropical húmedo (Jiménez, 1980).

2.2. Diagnóstico

2.2.1. Análisis de datos

Los datos del PM₁₀ se analizaron para las siguientes ciudades de Ecuador: Esmeraldas, Ibarra, Loja, Azogues, Sangolquí, Babahoyo, Ambato, Quevedo, Guayaquil, Portoviejo, Latacunga, Quito, Riobamba, Cuenca, Santo Domingo y Manta. Los datos de PM₁₀ se obtuvieron de la plataforma SUIA (2016) para el periodo 2011 a 2015. Algunas ciudades no registraron mediciones en algunos meses y se analizaron como tales. En Santo Domingo existe únicamente una estación de monitoreo que solo mide la concentración de PM₁₀.

La variable PM₁₀ fue modelada con el modelo lineal general y mixto en interfaz con paquetes de R (The R Core Team, 2016) para encontrar diferencias entre meses y años. La comparación de medias se hizo con la prueba DGC (Di Renzo et al., 2002). La significancia se fijó con $P < 0,05$. Además, las ciudades de Sangolquí, Quevedo, Babahoyo y Esmeraldas presentaron datos por un año y fueron analizadas con modelos de regresión polinomial, al igual que los meses de los años 2011 a 2015 de Santo Domingo. Los modelos de regresión se reportaron con intervalos de confianza del 95 % (Montgomery et al., 2006).

El límite máximo permisible de PM_{10} es de $50 \mu g m^{-3}$ según la NECA (MAE, 2011) y de $\leq 20 \mu g m^{-3}$ según la OMS (2005). Se utilizó el programa InfoStat versión 2016 para el análisis estadístico (Di Renzo et al., 2016).

2.2.2. Comparación del PM_{10} entre las ciudades de Ecuador

Hubo diferencias ($P < 0,0001$) en las concentraciones de material particulado (PM_{10}) en el aire de las ciudades de Ecuador. Según MAE (2011) la norma ambiental NECA indica el límite máximo permisible de concentración de PM_{10} de $50 \mu g m^{-3}$, bajo esta norma todas las ciudades no sobrepasan el límite permisible. Sin embargo, según la OMS las siguientes ciudades sobrepasaron los límites permisibles de PM_{10} (OMS, 2005) ($20 \mu g m^{-3}$): Manta, Santo Domingo, Cuenca, Riobamba, Quito, Latacunga, Portoviejo, Guayaquil, Quevedo, Ambato y Babahoyo (Fig. 1).

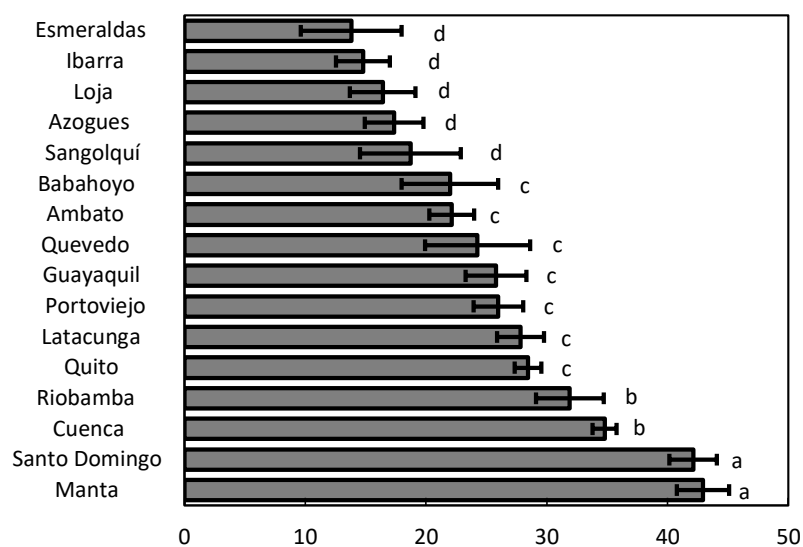


Fig. 1. Promedio de la concentración de material particulado (PM_{10}) en las ciudades de Ecuador medido entre los años 2011-2015. Límites permisibles según la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA) $\leq 50 \mu g m^{-3}$, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) $\leq 20 \mu g m^{-3}$. Letras distintas indican diferencias con DGC al 5%. Las líneas verticales indican el error estándar.

Según la NECA (MAE, 2011) el PM_{10} de Santo Domingo estuvo dentro de los límites permisibles. El valor de la norma NECA es mayor que de la OMS porque los límites máximos permisible son establecidos a medida que su concentración no afecten a los receptores, ya sean personas, animales o medio ambiente (Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito [CORPAIRE], 2004).

Las concentraciones de material particulado PM_{10} en Santo Domingo no tuvo un cambio significativo ($P = 0,1030$) y ningún mes sobrepasó la norma NECA (MAE, 2011) (Fig. 2A). La concentración de PM_{10} en la ciudad de Quito disminuyó en los meses de febrero, marzo y abril ($P = 0,0084$) con un valor menor a $30 \mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 2C). En Cuenca solo en septiembre subió la concentración promedio de PM_{10} ($P < 0,0001$) (Fig. 2E). En la ciudad de Ambato subió la concentración promedio de PM_{10} en enero ($P = 0,3421$); sin embargo no se presentó un cambio significativo (Fig. 2G).

En Latacunga en el mes de abril se incrementó ($P = 0,3386$) la concentración de PM_{10} considerablemente sobrepasando el límite permisible de la NECA (MAE, 2011) llegando a una concentración de $63,09 \mu\text{g m}^{-3}$; en los demás meses del año no se observó un cambio significativo ($P \geq 0,05$) (Fig. 2I). La ciudad de Riobamba, en los meses de enero, febrero, marzo y mayo tuvo la concentración de PM_{10} más alta y fue mayor a $40 \mu\text{g m}^{-3}$, entre meses no se presentó un cambio significativo ($P = 0,6495$); sin embargo, ninguno de los meses sobrepasó el límite permisible de la NECA (MAE, 2011) (Fig. 2K).

En Manta durante los meses enero y noviembre hubo la mayor concentración de PM_{10} y solo en el mes de enero sobrepasó ($P = 0,8325$) los límites permisibles de la NECA (MAE, 2011) (Fig. 2M). La ciudad de Ibarra ($24,68 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,1167$) y Portoviejo ($31,32 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,3055$) presentaron en el mes de julio el valor más alto de concentración de PM_{10} (Fig. 2O y 2Q). En Guayaquil el mes que tuvo menor concentración de PM_{10} fue junio ($P = 0,0003$) con $12,13 \mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 2S). Para la ciudad de Loja en el mes de noviembre hubo la concentración de PM_{10} más alta ($P = 0,1149$) (Fig. 2U).

Finalmente, en la ciudad de Azogues, en marzo y julio hubo la menor concentración de PM_{10} ($P = 0,508$) (Fig. 2W). En el mes de enero las siguientes ciudades del Ecuador tuvieron las concentraciones más altas de PM_{10} : Azogues, Guayaquil, Manta, Riobamba, Ambato y Quito.

La excesiva concentración de material particulado se debe a la alta dispersión de material sedimentable de zonas en donde se construye o reconstruye carreteras, además de los lugares de explotación y transporte de material pétreo en las diferentes ciudades;

sin embargo, la disminución de las concentraciones de material particulado están influenciadas por la meteorología de los lugares evaluados principalmente por la precipitación, humedad y velocidad del viento (Díaz, 2015).

En Santo Domingo se observó que la concentración de PM_{10} disminuyó al pasar los años (2015 = $19,64 \mu\text{g m}^{-3}$), en el año 2012 esta ciudad sobrepasa los límites permisibles de la NECA (MAE, 2011) ($68,39 \mu\text{g m}^{-3}$; $P < 0,0001$) (Fig. 2B). El periodo 2011-2013 en la ciudad de Quito la concentración de PM_{10} no tuvo un cambio significativo ($P = 0,1625$) se tomó en cuenta los datos de seis estaciones de monitoreo atmosférico (Fig. 2D).

En la ciudad de Cuenca la concentración de PM_{10} en el año 2015 aumentó considerablemente a comparación del 2014 ($8,77 \mu\text{g m}^{-3}$; $P < 0,0001$). Los datos se tomaron de tres estaciones de monitoreo atmosférico (Fig. 2F). En la ciudad de Ambato la concentración de PM_{10} disminuyó con el paso de los años (2015 = $16,62 \mu\text{g m}^{-3}$; $P < 0,0001$) (Fig. 2H). La concentración de PM_{10} en Latacunga no tuvo un cambio significativo manteniéndose constante en el tiempo (2015 = $25,44 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,7825$) (Fig. 2J).

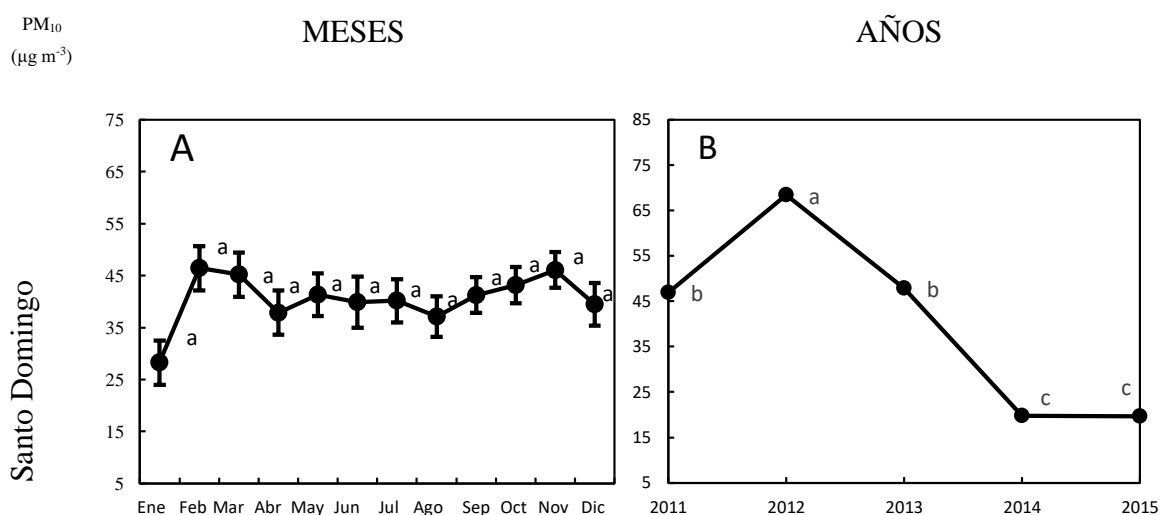
El periodo del 2011-2012 en Riobamba no se observó un cambio considerable de concentración de PM_{10} ($P = 0,0798$) (Fig. 2L). En la ciudad de Manta en el periodo 2012-2015 se presentó un cambio significativo en la concentración de PM_{10} , el año 2013 sobrepasa los límites permisibles de la NECA (MAE, 2011) ($85,82 \mu\text{g m}^{-3}$; $P < 0,0001$) (Fig. 2N). En Ibarra para el periodo del 2012-2015 no se presentó un cambio significativo en la concentración de PM_{10} manteniéndose constante al pasar los años (2015 = $12,39 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,2340$) (Fig. 2P).

En la ciudad de Portoviejo en el periodo del 2012-2015 la concentración de PM_{10} disminuyó con el pasar del tiempo (2015 = $18,12 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,0056$) (Fig. 2R). En el periodo 2013-2015 en la ciudad de Guayaquil se observó que la concentración de PM_{10} incrementó con el paso de los años (2015 = $26 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,0023$) (Fig. 2T). En Loja en el periodo 2012-2015 la concentración de PM_{10} no tuvo un cambio significativo, manteniéndose constante con el paso de los años (2015 = $11,56 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,0723$) (Fig. 2V). En el periodo 2013-2015, la ciudad de Azogues no presentó un cambio

significativo en la concentración de PM_{10} , manteniéndose con el paso del tiempo (2015 = $15,68 \mu\text{g m}^{-3}$; $P = 0,2468$) (Fig. 2X).

Se observó que en 8 de las 15 ciudades evaluadas la concentración de PM_{10} disminuyó con el paso de los años. El PM_{10} está constituido principalmente por el polvo resuspendido presente en las ciudades, este polvo generalmente proviene de sedimentos de construcción, erosión de terrenos, vías que no están adoquinadas o pavimentadas, desgaste de material de frenos y neumáticos (Díaz, 2015).

La disminución de concentración de PM_{10} con el paso de los años en las diferentes ciudades del Ecuador, se debe principalmente al mejoramiento de vías o construcción de carreteras, puesto que en los últimos ocho años en Ecuador a través del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO, 2011) se ha remodelado, repavimentado, rehabilitado, ampliado y rectificado, alrededor de 5 000 km de carreteras, puentes, puertos y aeropuertos ubicados en todo el país, además la mayoría de las carreteras de Ecuador están en buen estado.

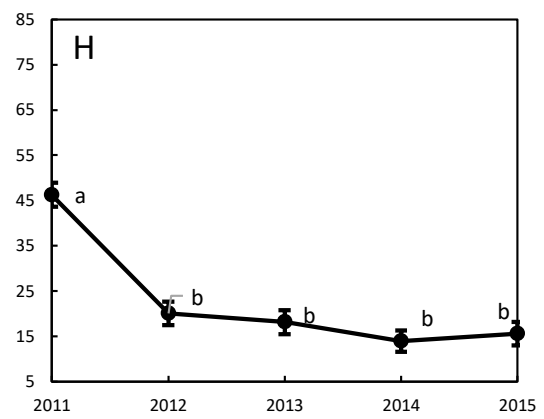
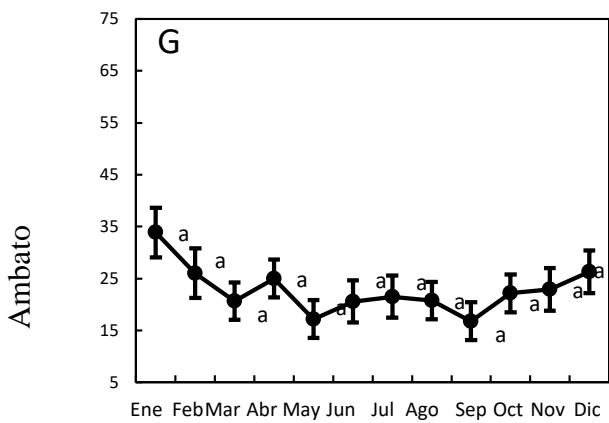
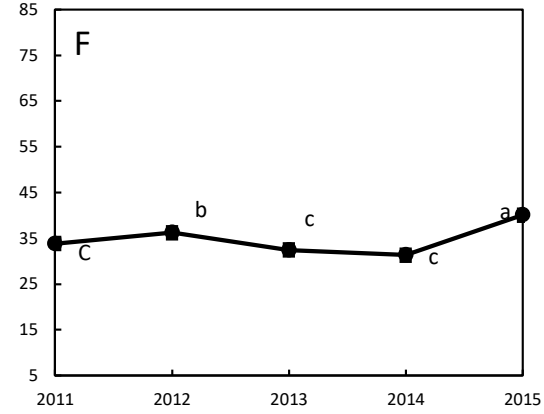
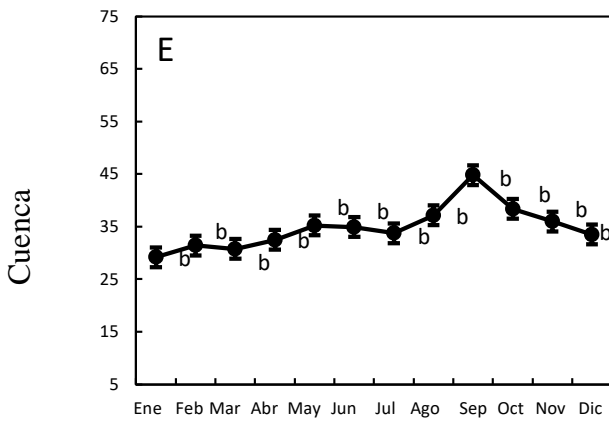
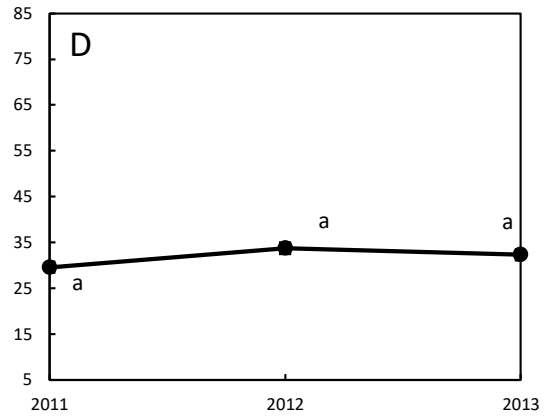
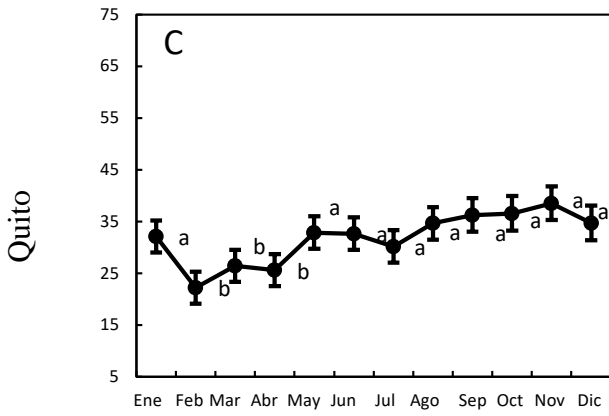


continúa...

PM₁₀
(µg m⁻³)

MESES

AÑOS



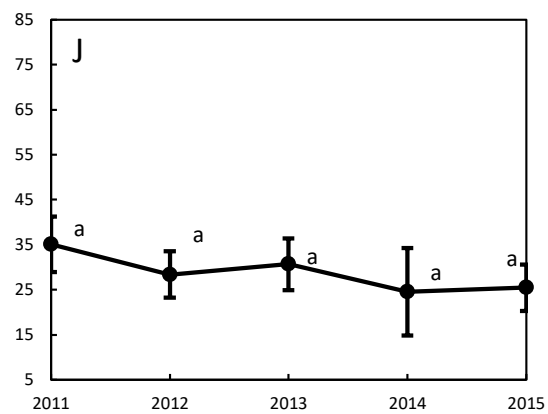
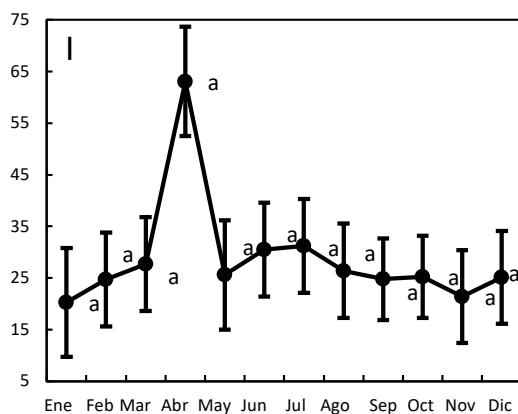
continúa...

PM₁₀
(µg m⁻³)

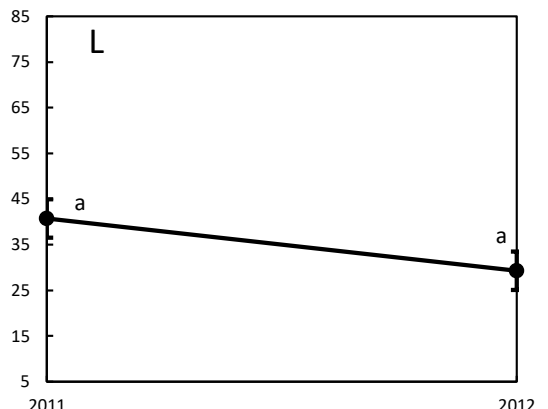
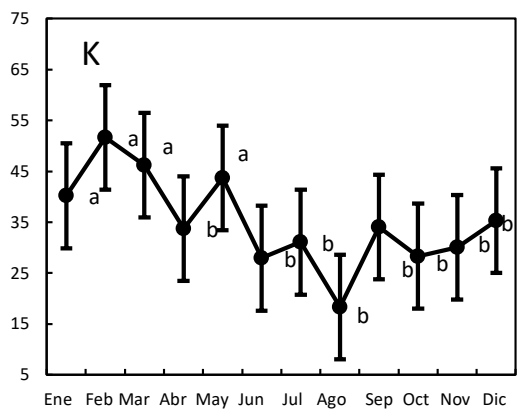
MESES

AÑOS

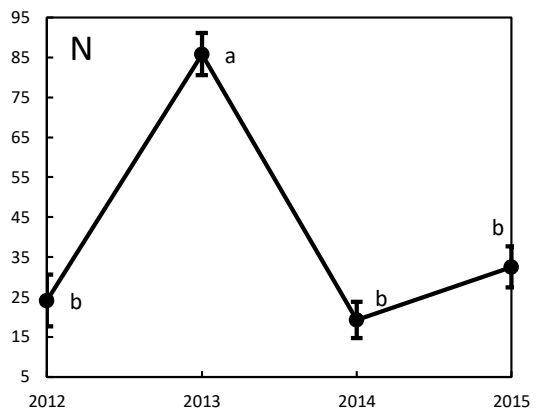
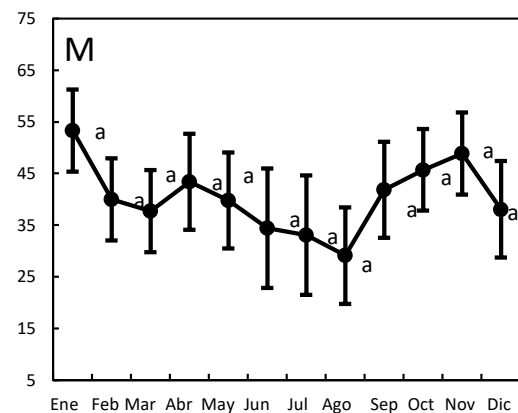
Latacunga



Riobamba



Manta



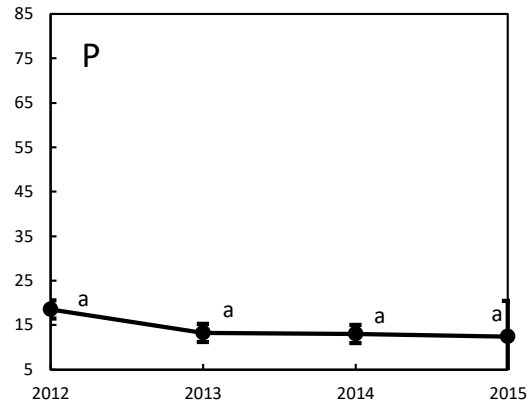
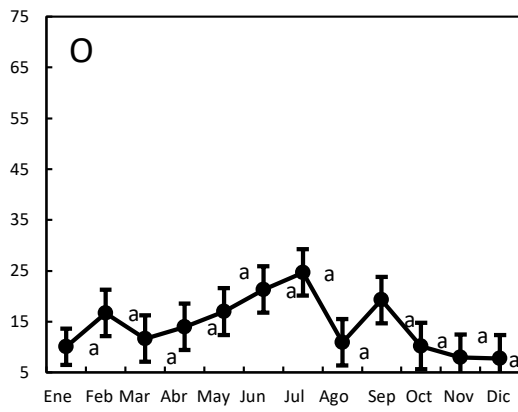
continúa...

PM₁₀
($\mu\text{g m}^{-3}$)

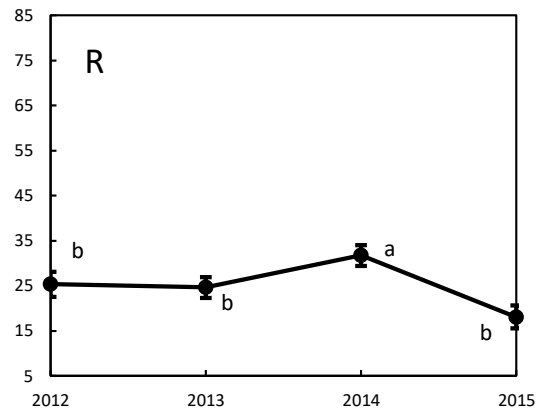
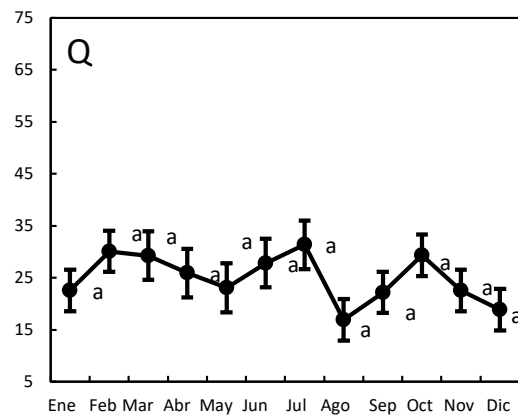
MESES

AÑOS

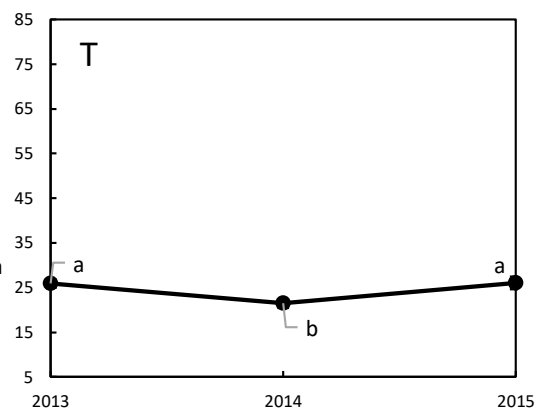
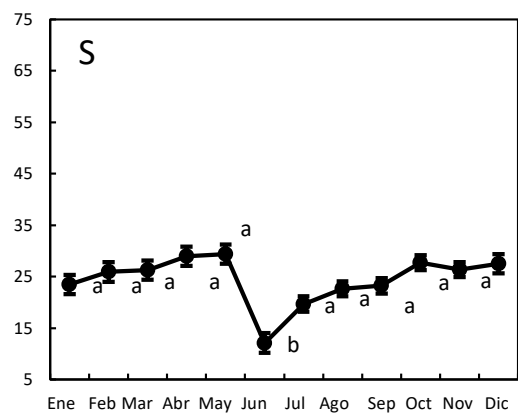
Ibarra



Portoviejo



Guayaquil



continúa...

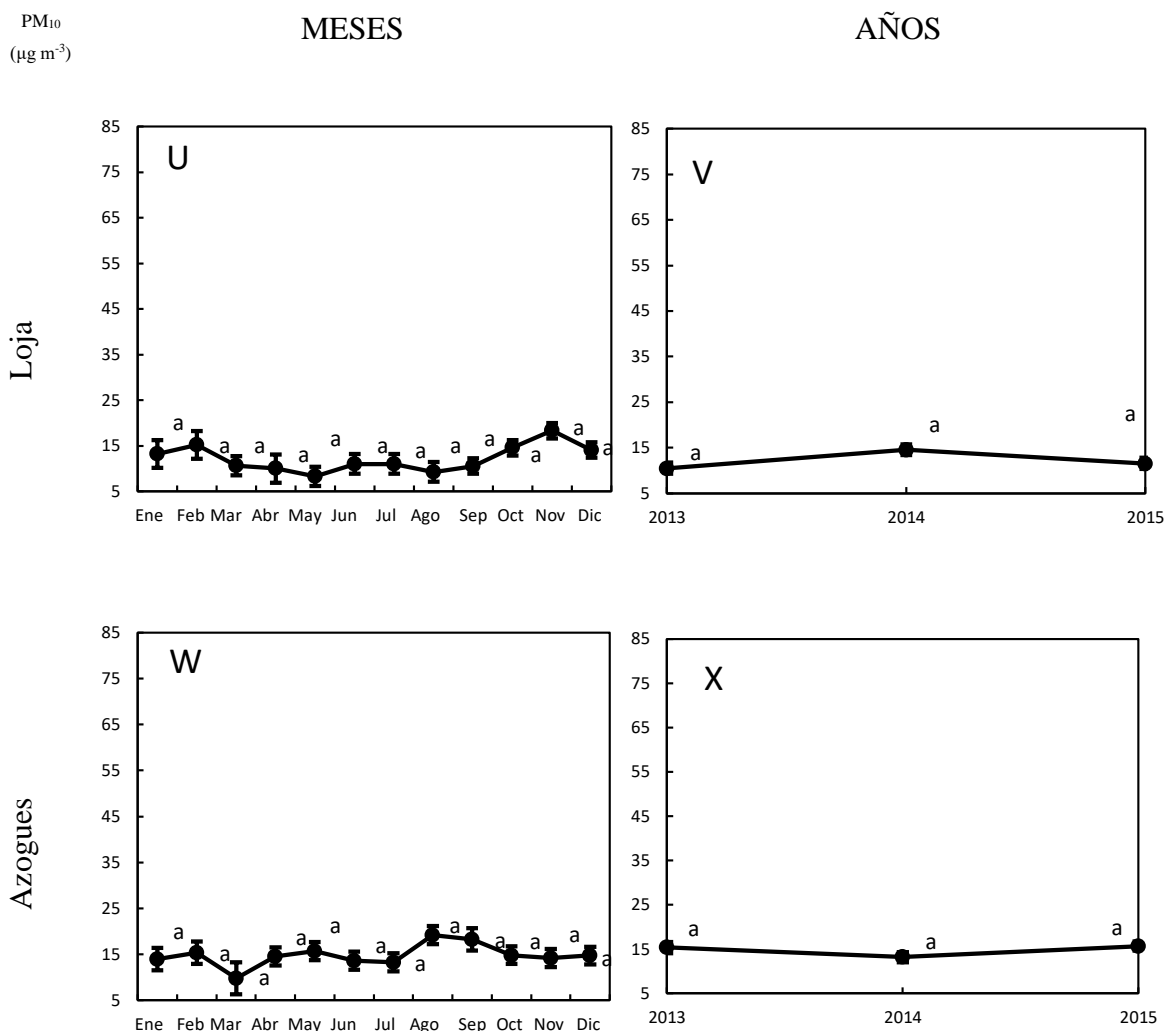
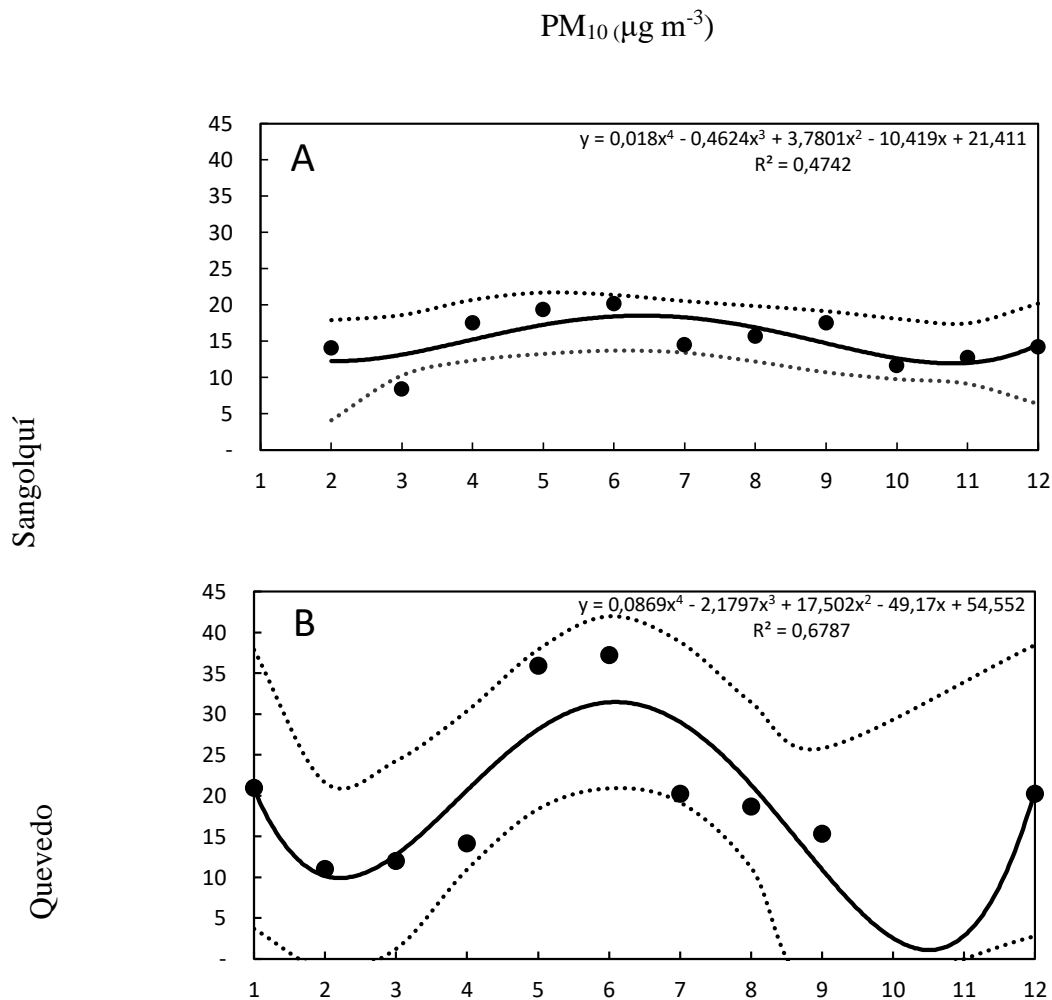


Fig. 2. Promedios de material particulado 10 (PM₁₀) de las ciudades del Ecuador según meses y años. Límites permisibles según la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA) $\leq 50 \mu\text{g m}^{-3}$, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) $\leq 20 \mu\text{g m}^{-3}$. Letras distintas indican diferencias con DGC al 5%. Líneas verticales indican el error estándar.

En la ciudad de Sangolquí y Quevedo en el mes de junio ($20,12 \mu\text{g m}^{-3}$; $37,27 \mu\text{g m}^{-3}$) se presentó la mayor concentración de PM₁₀ (Fig. 3A, 3B). En la ciudad de Babahoyo la menor concentración de PM₁₀ se presentó en el periodo febrero-mayo, el mes de julio tuvo mayor concentración ($31,01 \mu\text{g m}^{-3}$), los datos que se obtuvo entre meses fueron variables (Fig. 3C). En la ciudad de Esmeraldas en el periodo de junio-octubre se presentó la mayor concentración de PM₁₀ ($16,24 \mu\text{g m}^{-3}$) (Fig. 3D). En ningún mes del año 2015 se sobrepasó el límite permisible de la concentración de PM₁₀ de la NECA (MAE, 2011).

Las diferencias de concentración de material particulado se deben a las condiciones climáticas del año evaluado. Según el Instituto Geográfico Militar (IGM, 2004) en Ecuador, debido a sus características geográficas presenta una variedad de microclimas, en la Costa la época lluviosa es húmeda y se extiende de diciembre-mayo, mientras que la época seca se extiende de junio-noviembre. En la sierra la temporada lluviosa abarca los meses de noviembre-mayo y la temporada seca de junio-octubre.



continúa...

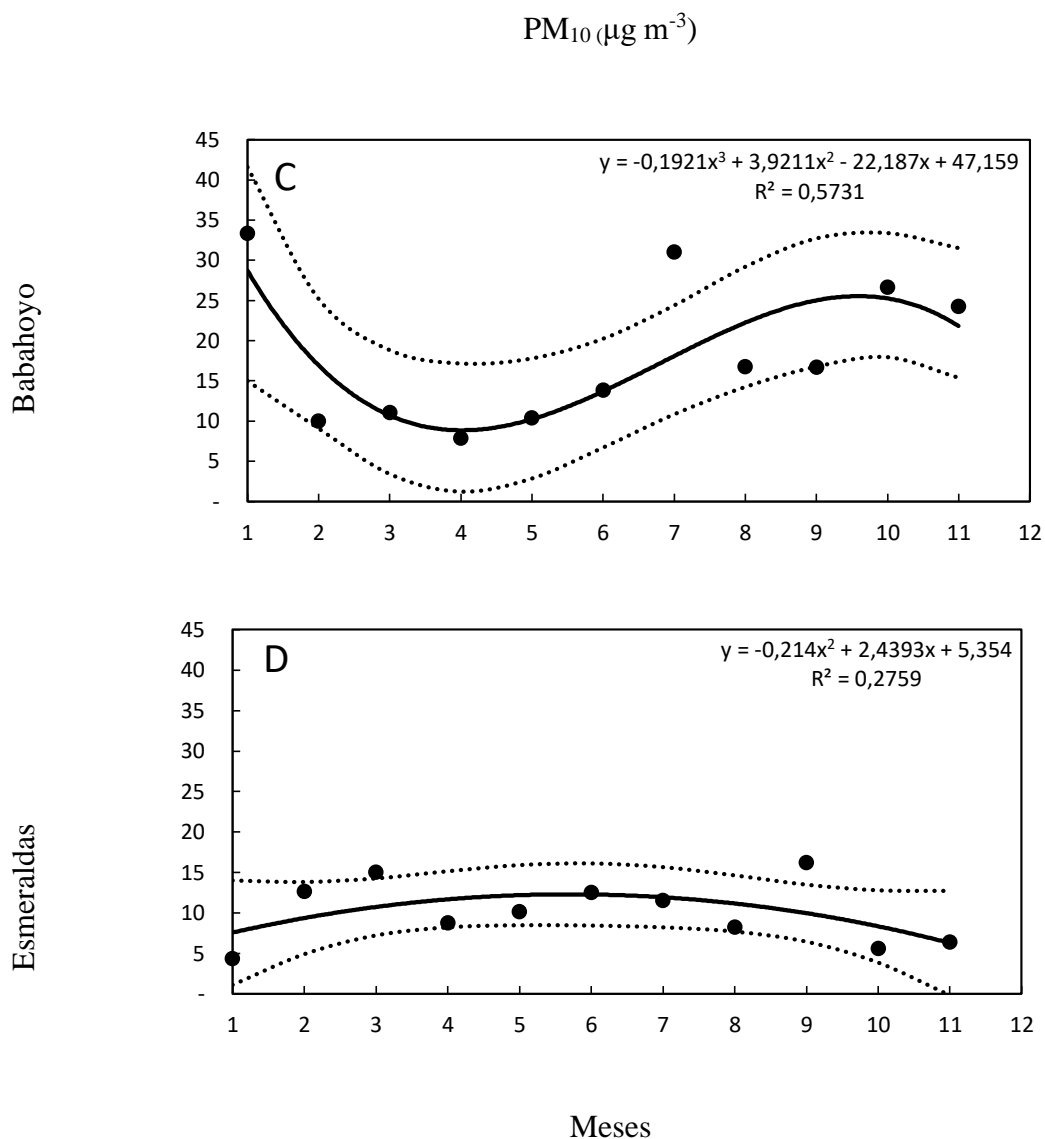


Fig. 3. Promedios de material particulado 10 (PM_{10}) en el año 2015 en las ciudades de Ecuador de Sangolquí, Quevedo, Babahoyo y Esmeraldas. Límites permisibles según la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA) $\leq 50 \mu g m^{-3}$, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) $\leq 20 \mu g m^{-3}$. Líneas punteadas indican intervalo de confianza al 95 %.

En la ciudad de Santo Domingo en los meses del año 2011 se tuvo la misma variación de concentración de material particulado PM_{10} que los demás años ($P \geq 0,05$) (Fig. 4A). La concentración de PM_{10} en los meses del año 2012 se asemeja solo a los del 2011 y 2013 ($P \geq 0,05$) (Fig. 4B). En los meses del año 2013 obtuvo la misma concentración de PM_{10} que los meses de los años 2011, 2012 y 2015 ($P \geq 0,05$), mientras que no se asemeja a la concentración de PM_{10} de los meses del año 2014 ($P \leq 0,05$) (Fig. 4C). Para los meses del año 2014 hubo la misma concentración de PM_{10} que los meses del

año 2015 ($P \geq 0,05$) (Fig. 4D). Finalmente los meses del año 2015 se asemeja la concentración de los meses del año 2013 y 2014 ($P \geq 0,05$) (Fig. 4E).

Se comparó los resultados obtenidos de concentración de PM_{10} con los límites de la norma NECA (MAE, 2011) ($50 \mu\text{g m}^{-3}$) y la OMS (2005) ($20 \mu\text{g m}^{-3}$). En el año 2011 la ciudad de Santo Domingo sobrepasa los límites permisibles de la NECA (MAE, 2011) para la concentración de PM_{10} en los siguientes meses: mayo, agosto, octubre y septiembre. En el año 2012 todos los meses sobrepasan el límite permisible de la NECA (MAE, 2011). En el año 2013 solo febrero, agosto, octubre y diciembre sobrepasan los límites permisibles de la NECA (MAE, 2011). En el año 2014 y 2015 ningún mes sobrepasa los límites permisibles de la NECA (MAE, 2011). Sin embargo en los años 2011, 2012, 2013 y 2014 la concentración de PM_{10} sobre pasa los límites permisibles de la OMS (2005).

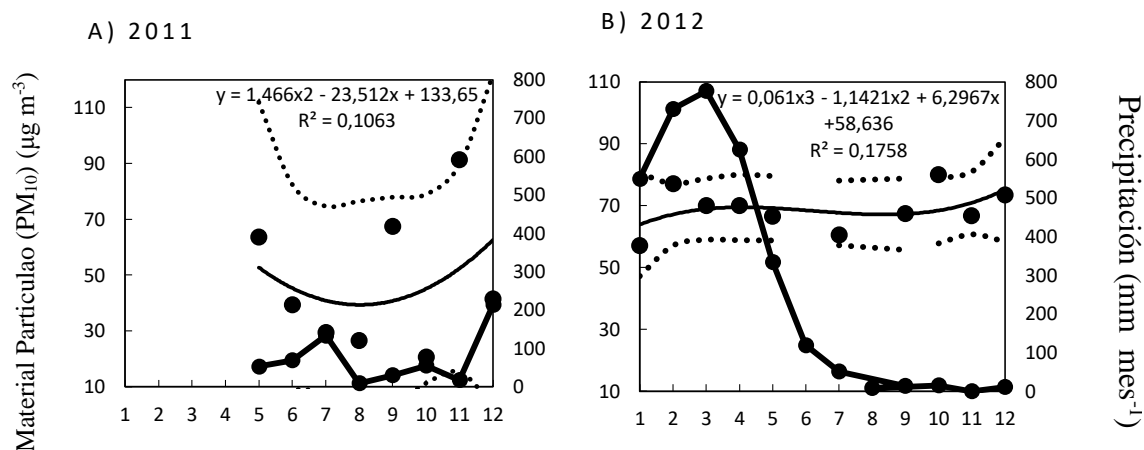
2.2.3. Relación entre el PM_{10} y la precipitación en la ciudad de Santo Domingo

Para diagnosticar la concentración de PM_{10} se estableció una relación con los niveles de precipitación en cada mes del periodo 2011-2015, tomando en cuenta que la ciudad de Santo Domingo pertenece a la región andina. En el año 2011 los meses de mayor concentración fueron junio, septiembre y noviembre, en este año no se vio una relación directa con respecto a la precipitación presente debido a que no varió la concentración de PM_{10} con altas precipitaciones de los meses de diciembre, mayo, junio, julio (70 mm mes^{-1} - 214 mm mes^{-1}) (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, [INAMHI], 2014) (Fig. 4A).

En el año 2012 los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre tuvieron mayor concentración de PM_{10} y los meses de mayor precipitación fueron de enero-mayo en los que se presenta una relación directa con los niveles de menor concentración de PM_{10} (Fig. 4B). En el año 2013 los meses de febrero, marzo, mayo y noviembre fueron los de mayor concentración de PM_{10} , en este año no se observó una relación directa con los niveles de precipitación, debido a que los meses de mayor precipitación, de enero a mayo (250 mm mes^{-1} - 472 mm mes^{-1}) (Palacios, 2014), no fueron los de menor concentración de PM_{10} (Fig. 4C).

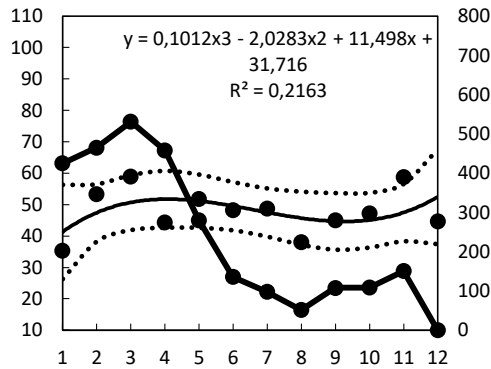
En el año 2014 no se observó relación entre los niveles de precipitación y los de concentración de PM_{10} debido a que ambos fueron constantes (Fig. 4D). En el año 2015 la concentración de PM_{10} de junio-noviembre fue más alta debido a la baja precipitación que se presentó (0 mm mes^{-1} - 160 mm mes^{-1}). El mes de abril fue el de menor concentración de PM_{10} ($6,55 \mu\text{g m}^{-3}$) y el que tuvo mayor precipitación ($477,40 \text{ mm mes}^{-1}$) (Sistema de Información Nacional, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, [SINAGAP], 2015). Se observó en este año que en los meses de la época seca hubo mayor concentración de material sedimentable, las mayores precipitaciones permiten evitar la resuspensión de material sedimentable (Fig. 4E).

El aumento de concentración de PM_{10} en Santo Domingo en los diferentes meses del periodo 2011-2015 no fue influenciado directamente con los niveles de precipitación, por lo tanto no se puede descartar que otros factores incidan en la formación del material sedimentable. Se puede mencionar que la ampliación de dos a cuatro carriles de la vía Alóag – Santo Domingo en una longitud 35,41 km desde el año 2007 al 2013 habría generado la resuspensión de material particulado en la atmósfera y ha provocado un notable incremento de su concentración en los años 2011, 2012 y 2013 (Parra, 2013).

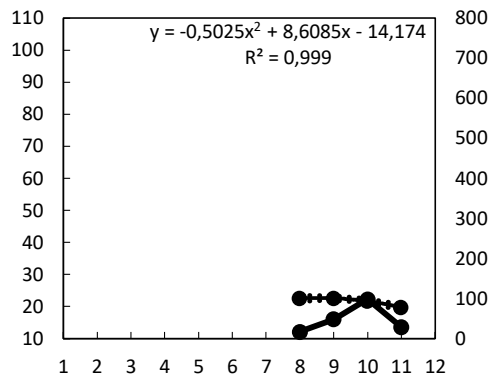


continúa...

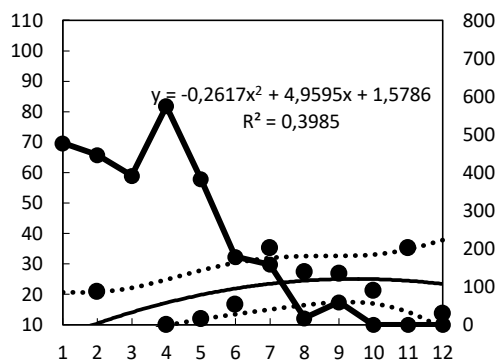
C) 2013



D) 2014



E) 2015



Meses

Fig. 4. Promedios de material particulado 10 (PM_{10}) en el periodo 2011-2015 en la ciudad de Santo Domingo, Ecuador. Límites permisibles según la Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire (NECA) $\leq 50 \mu\text{g m}^{-3}$, según la Organización Mundial de la Salud (OMS) $\leq 20 \mu\text{g m}^{-3}$. Líneas punteadas indican intervalo de confianza al 95 %.

Se evaluó que el aire de la ciudad de Santo Domingo no está contaminado con respecto a la concentración de PM_{10} en el año 2015 según la NECA; sin embargo en los meses de junio a octubre en el último año evaluado la concentración de PM_{10} sobrepasa el límite máximo permisible de la OMS, esto implica que se deberá tomar las medidas necesarias para que la concentración PM_{10} disminuya y se mantenga bajo los límites permisibles tanto de la NECA y la OMS.

2.3. Propuesta tecnológica

La propuesta tecnológica tendrá como finalidad la disminución y control de la contaminación atmosférica en el aire de la ciudad de Santo Domingo, para generar una mejor calidad de vida en la ciudadanía.

El diagnóstico obtenido sobre la evaluación de la concentración de PM₁₀, indicó como estarían influyendo las actividades antrópicas en la disminución o incremento de este contaminante, por lo tanto se propone el siguiente plan de control de la contaminación atmosférica (Spiegel y Maistre, 1998):

1. Aplicación de medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire.
2. Instalación de una red de monitoreo atmosférica.

2.3.1. Aplicación de medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire

Este plan se ejecutará por medio de las Políticas Ambientales que corresponden al conjunto de principios, ideas y estrategias, orientadas a la protección del medio ambiente y el desarrollo sustentable de una población en particular (Rodríguez y Espinoza, 2002). Esta herramienta controlará las emisiones y concentraciones de los contaminantes que inciden en el deterioro de la calidad del aire. Las políticas ambientales propuestas se pondrán en marcha a través de la aplicación de planes estratégicos, que se logrará con la ayuda del departamento de Saneamiento y Gestión Ambiental del GAD Municipal de Santo Domingo.

Para ejecutar las políticas ambientales se tomará en cuenta tres fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos:

- Industrias
- Vehículos
- Erosión eólica

Industrias

Para reducir la contaminación por las industrias se promueve la gestión ambiental integral en las empresas de la ciudad, mediante un control del uso de los recursos

naturales y el cumplimiento de la legislación ambiental aplicable, para que se establezca un desarrollo sostenible en sus operaciones y procesos con la finalidad de generar un progreso social, económico y tecnológico ligado a la protección del medio ambiente.

Estrategias. Se proponen las siguientes estrategias para reducir la contaminación ambiental de las industrias:

- 1) Incentivos fiscales
- 2) Educación ambiental

Las estrategias para implementar la política ambiental de las industrias se basan en la aplicación de incentivos fiscales para el uso de tecnología limpia y de energía renovable con el fin de disminuir las emisiones y ahorrar recursos. Estos incentivos consisten en la exoneración de pago del impuesto a la renta por 5 años para el desarrollo de inversiones nuevas de acuerdo a la matriz productiva y que reduzcan la contaminación atmosférica. El Servicio de Rentas Internas (SRI) (2011) indica que la tarifa del impuesto a la renta para el año 2016 es del 25 %, siendo este el posible valor que dejarán de pagar las empresas en impuestos durante un año.

La otra estrategia es la ejecución de programas de educación ambiental para que los empleados realicen sus actividades laborales sin deteriorar la calidad del ambiente. Estas actividades se realizará por medio de un Plan de Manejo Ambiental dentro de la empresa con una proyección de 30 años, el mismo que constará de los siguientes sub-planes (Morales, 2011):

- 1) Plan de manejo de residuos sólidos.
- 2) Plan de capacitación buenas prácticas ambientales.
- 3) Plan de monitoreo y seguimiento del manejo ambiental.
- 4) Plan de gestión social para el manejo de residuos sólidos.

Vehículos

Para la reducción de la contaminación por los vehículos y mejorar la calidad del aire se regulará las emisiones de los contaminantes, mediante el control de la circulación de

automotores de alta contaminación; como los obsoletos (15 años de antigüedad), de gas y de diésel; y la inversión en nuevas unidades.

Estrategias. La estrategia para reducir la contaminación por los vehículos será la renovación del transporte público con automotores de baja emisión de contaminantes, mediante la incorporación de convertidores catalíticos en los vehículos colectivos (Jiménez, 1980). Los convertidores catalíticos transforman los contaminantes a compuestos menos nocivos. Los contaminantes transformados serán el monóxido de carbono, material particulado e hidrocarburos emitidos por los automóviles con combustible a diésel y gas (Cooper, 2012). La implementación de estos catalizadores en el ensamblaje de los automotores tiene un incentivo para las industrias que consiste en no pagar el impuesto a la renta por 5 años (SRI, 2011).

Erosión eólica

La reducción de la contaminación por erosión eólica consistirá en la disminución del material sedimentable suspendido; a través de la construcción, reconstrucción y adecuación de carreteras y vías de acceso que no estén pavimentadas en la ciudad de Santo Domingo.

Estrategias. La reducción de la erosión eólica se hará mejorando el estado de la red vial secundaria y terciaria de la ciudad para disminuir la concentración de material sedimentable, a través de la pavimentación de las vías de acceso a diferentes parroquias, recintos y barrios. Estos proyectos incluirán la construcción de ciclo vías para fomentar el uso de transporte amigable con el ambiente (Ministerio de Transporte de Obras Públicas [MTO], 2011).

2.3.2. Instalación de una red de monitoreo atmosférica

Las redes de monitoreo atmosférico tienen la función de medir la calidad atmosférica de las zonas urbanas. Los contaminantes que se miden son usualmente: dióxido de azufre, polvo, monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono y cierta cantidad de hidrocarburos (Spiegel y Maistre, 1998).

La evaluación de la calidad del aire de una ciudad se realizará midiendo la concentración de los contaminantes criterio. Estos contaminantes son aquellos especifican un límite máximo permisible de concentración que no afecta a los seres vivos (MAE, 2011). Los contaminantes se miden con estaciones de monitoreo atmosférico que se organizan en una red de monitoreo. La estación de monitoreo debe medir datos confiables de los contaminantes para crear y ejecutar políticas y estrategias ambientales que mejoren la calidad del aire de Santo Domingo. La información generada por la red de monitoreo estará disponible al público.

La red de monitoreo atmosférica se ubicará en la ciudad de Santo Domingo, la misma que tiene 368 013 habitantes que serán los beneficiados (INEC, 2010).

La red de monitoreo se instalará según los siguientes pasos:

1. Diseño de la red de monitoreo atmosférico
2. Diseño de las estaciones de monitoreo de los contaminantes del aire
3. Monitoreo de los contaminantes atmosféricos
4. Análisis de los contaminantes
5. Mantenimiento de la red de monitoreo

Diseño de la red de monitoreo atmosférico

La cantidad de estaciones para la red de monitoreo se calculó con el tamaño de muestra según el muestreo aleatorio simple de población desconocida (Instituto Nacional de Ecología, 2010; Aguilar-Barojas, 2005), para el material particulado PM_{10} con una desviación estándar de $22,03 \mu\text{g m}^{-3}$, intervalo de confianza del 95 % y error máximo permitido de $15 \mu\text{g m}^{-3}$. La desviación estándar se calculó con todas las mediciones ($n = 46$) registradas por la estación de monitoreo de Santo Domingo desde el 2011 al 2015 (SUIA, 2016).

El tamaño de muestra resultante es de nueve estaciones que serán distribuidas en la ciudad según el diseño del muestreo sistemático para evitar el sesgo por el azar que ocasiona el muestreo aleatorio simple en muestreos de superficies (Ormazabal y Larrañaga, 1998).

Diseño de las estaciones de monitoreo de los contaminantes del aire

Las estaciones de monitoreo medirán los contaminantes criterio establecidos en el *Registro Oficial N° 464 de 7 Junio del 2011* y son los siguientes (Díaz, 2015; MAE, 2011):

- Partículas sedimentables
- PM₁₀
- PM_{2.5}
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Ozono (O₃)

Las estaciones estarán formadas por los equipos que permitan medir los contaminantes criterio; además, de las variables meteorológicas para incrementar la precisión y exactitud de los datos de contaminación (Díaz, 2015) y son las siguientes:

- 1) Sensores meteorológicos
- 2) Analizadores automáticos de gases y partículas
- 3) Muestreadores activos semiautomáticos
- 4) Calibradores

Sensores meteorológicos. Los sensores meteorológicos medirán las siguientes características climáticas (Díaz, 2015):

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Humedad relativa
- Radiación solar global
- Temperatura
- Presión atmosférica
- Precipitación

Analizadores automáticos de gases y partículas. El analizador automático de gases y partículas medirá las emisiones de los siguientes contaminantes criterio (Díaz, 2015):

- Partículas sedimentables
- PM₁₀
- PM_{2.5}
- NO₂
- SO₂
- CO
- O₃

Muestreadores activos semiautomáticos. Los muestreadores activos semiautomáticos medirán las concentraciones de los siguientes contaminantes (Díaz, 2015):

- PM₁₀
- PM_{2.5}
- Partículas sedimentables

Calibradores. Los calibradores son equipos utilizados para comprobar la calibración de los analizadores de la red. A continuación se mencionan las características de los equipos necesarios para medir las variables.

Estos equipos mencionados (Tabla 1) estarán instalados en una estación de monitoreo con las siguientes recomendaciones técnicas (Martínez y Romieu, 1997).

- La caseta de la estación de monitoreo atmosférico tendrá las siguientes dimensiones 3 m por 2 m por 2,5 m de alto. El material de construcción será aluminio y acero para los equipos de monitoreo activo y automáticos; y de cloruro de polivinilo, las de monitoreo pasivo. La caseta tendrá los siguientes compartimentos: sistema eléctrico, aire acondicionado, almacenamiento de cilindros, infraestructura para el operario (Dirección General de Salud Ambiental [DIGESA], 2005).

Tabla 1. Características técnicas de los equipos de la estación meteorológica propuesta para la red de monitoreo de Santo Domingo, Ecuador.

VARIABLES	EQUIPOS
<i>Sensores meteorológicos</i>	
Velocidad del viento	Anemómetro de 3 copas y encoder para generación de pulsos de voltaje de frecuencia proporcional a la velocidad de viento / Clase II Marca: MetOne / 010C
Dirección del viento	Veleta y potenciómetro con señal de voltaje proporcional a la dirección de viento / Clase II. Marca: MetOne / 020C
Radiación solar global	Detector tipo termopila / Clase II Marca: Kipp & Zonen / CM3
Temperatura y Humedad relativa	Sensor Pt100 para temperatura y sensor capacitivo para HR / Clase II Marca: Thies Clima / 1.1005.54.161
Presión barométrica	Sensor capacitivo de silicio / Clase I Marca: Vaisala / PTB101B
Precipitación pluvial	Báscula oscilante / Clase II Marca: Thies Clima / 5.4032.007
<i>Analizadores automáticos de gases y partículas</i>	
Partículas sedimentables	Horno Thelco / Precision Balanza Sartorius / LA130S-F
Material particulado 10 (PM ₁₀)	Thermo Scientific/FH62C14
Material particulado 2,5 (PM _{2,5})	Thermo Andersen / FH62C14
Dioxido de nitrógeno (NO ₂)	THERMO 49C / 49i
Dióxido de azufre (SO ₂)	THERMO 43C / 43i
Monóxido de carbono (CO)	THERMO / 48C / 48i
Ozono (O ₃)	THERMO 49C / 49i
<i>Muestreadores activos semiautomáticos</i>	
PM ₁₀	Grasseby / ACU-VOL IP-10 Balanza Sartorius / LA130S-F
PM _{2,5}	Partisol / 2000
Partículas sedimentables	TEI / 600 Balanza Sartorius / LA130S-F
<i>Calibradores</i>	
Multicalibrador (SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃)	THERMO/ 146C / 146i

Basado en Díaz (2015).

- La estación se ubicará al menos a 10 m de obstáculos para asegurar el libre flujo del contaminante.
- Para evitar el sesgo en la medición de los contaminantes la estación estará ubicada al menos a 20 m de cualquier fuente de contaminación fija o móvil.

- La estación de monitoreo de la contaminación estará ubicada a 4 m de altura desde el suelo; la estación meteorológica, a 10 m de altura (DIGESA, 2005).
- La estación se ubicará en un lugar accesible para las visitas y el mantenimiento.
- La estación tendrá una fuente de energía de respaldo que se active automáticamente en caso de cortes de energía.

Monitoreo de los contaminantes atmosféricos

A continuación se presenta los métodos de muestreo que se emplearán para cada contaminante medido.

Tabla 2. Métodos o principio de operación para medir las variables de contaminación atmosférica en la red de monitoreo de Santo Domingo, Ecuador

Variables	Método o principio de operación
<i>Analizadores automáticos de gases y partículas</i>	
Partículas sedimentables	Muestreo por el método Bergerhoff y análisis gravimétrico según la norma ASTM D1739-98
Material particulado 10 (PM ₁₀)	Atenuación de rayos beta, método equivalente para PM ₁₀ , norma EPA No. EQPM-1102-150
Material particulado 2,5 (PM _{2,5})	Atenuación de rayos beta, método equivalente para PM _{2,5} , norma EPA No. EQPM-1102-150
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Quimiluminiscencia, método de referencia, norma EPA No. RFNA-1289-074
Dióxido de azufre (SO ₂)	Fluorescencia por pulsos de luz ultravioleta, método equivalente, norma EPA No. EQSA-0486-060
Monóxido de carbono (CO)	Absorción infrarroja no dispersiva, método de referencia, norma EPA No. RFCA- 0981-054
Ozono O ₃	Absorción de luz ultravioleta, método equivalente, norma EPA No. EQOA-0880-047
<i>Muestreadores activos semiautomáticos</i>	
PM ₁₀	Gravimétrico mediante muestreador de alto caudal, norma EPA 40CFR50
PM _{2,5}	Gravimétrico mediante muestreador de alto caudal, norma EPA 40CFR50
Partículas Sedimentables	Gravimétrico mediante muestreador de bajo caudal, norma EPA 40CFR50
<i>Calibradores</i>	
Multicalibrador (SO ₂ , NO ₂ , CO, O ₃)	Principio de operación: dilución de gases, aire cero con un material de referencia certificado (contaminante de concentración conocida)

Basado en Díaz (2015)

Las variables de contaminación se medirán según las siguientes frecuencias y periodos. Los monitores pasivos registrarán las concentraciones de NO₂ y SO₂, a una exposición de 30 días por mes; el O₃ a una exposición de 15 d por 2 veces al mes. Los muestreadores colectan las partículas sedimentables durante 30 d por mes y las muestras se analizan por gravimetría (peso) y métodos químicos para la determinación de sedimentos solubles, insolubles y pH.

Los promedios horarios, octohorarios, en 24 h y medias anuales se cubrirán al menos el 75% del período con registros válidos. El cálculo de las concentraciones medias diarias de las partículas se muestrearán por 22 h; las medias mensuales y anuales por al menos 2/3 del período total.

Los promedios mensuales y anuales de las partículas sedimentables, SO₂, O₃ y NO₂, se muestrearán al menos los 2/3 del período total. Cuando los registros no cumplen los criterios de cobertura temporal no se consideran válidos, debido a que comprometen su representatividad.

El centro de control monitoreará todos los contaminantes de gases y variables meteorológicas en los 365 d del año. La adquisición de datos se hará con computadores industriales, que están conectados con los analizadores de gases y sensores meteorológicos. La información se almacenará al menos cada 10 min. Las estaciones operan de manera permanente las 24 h y todos los días del año.

Análisis de los contaminantes

Los contaminantes medidos en la red de monitoreo se compararán con los límites máximos permisibles de concentración indicados por la NECA (MAE, 2011).

Tabla 3. Contaminantes y límites permisibles para la red de monitoreo de Santo Domingo, Ecuador

Contaminante	Límite máximo permisible ($\mu\text{g m}^{-3}$) ^a	Periodo de medición	Excedencia permitida
Partículas sedimentables	*1	Máxima concentración de una muestra colectada durante 30 d de forma continua	No se permite
PM ₁₀	50	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	No se permite
	100	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 24 h ^b	No se permite
PM _{2,5}	15	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	No se permite
	50	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 24 h ^c	No se permite
NO ₂	40	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	No se permite
	200	Concentración máxima en 1 h de todas las muestras colectadas	No se permite
SO ₂	60	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 1 año	No se permite
	125	Promedio aritmético de todas las muestras colectadas en 24 h	No se permite
	500	Concentración en un periodo de 10 min de todas las muestras colectadas	No se permite
CO	10	Concentración en 8 h consecutivos	No se permite
	30	Concentración máxima en 1 h	No se permite
O ₃	100	Concentración máxima en 8 h consecutivas	Una vez por año

Basado en MAE (2011)

* $1 \text{ mg cm}^{-2} [30 \text{ d}]^{-1}$

^a Temperatura de 25°C y 760 mm de mercurio de presión atmosférica.

^b La norma sobrepasa el PM₁₀ cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 h registradas durante un periodo anual en cualquier estación de monitoreo sea mayor o igual a $100 \mu\text{g m}^{-3}$.

^c La norma sobrepasa el PM_{2,5} cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 h registradas durante un período anual en cualquier estación de monitoreo sea mayor o igual a $50 \mu\text{g m}^{-3}$.

Mantenimiento de la Red de Monitoreo

El mantenimiento de las estaciones consiste en operaciones de cambio de filtros, verificación del funcionamiento de los equipos de muestreo y monitoreo automático,

verificación de las instalaciones y de la toma de muestras pro los equipos. Además, los equipos serán reemplazados según su vida útil. Las actividades del operador serán registradas. La frecuencia de mantenimiento será semanal (Díaz, 2015).

2.4. Plan para las pruebas técnicas

Para asegurar que los resultados obtenidos de las propuestas cumplan su objetivo se tomarán en cuenta las siguientes medidas:

2.4.1 Seguimiento a la aplicación de medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire

Seguimiento de las estrategias aplicadas a la industria

La medida que se utilizará para conocer la implementación de tecnología limpia en las empresas, el uso de energía renovable y la aplicación del Plan de Manejo Ambiental dentro de las empresas, será una auditoría ambiental. Esta auditoría evaluará el cumplimiento de la empresa con respecto a la estrategia aplicada, a la generación de cambios en los procesos, y la reducción del impacto ambiental en los entornos, y el cumplimiento de los sub-planes mencionados (Guerrero, 2014).

La auditoría se realizará cada año y el alcance será para todas las actividades que generan contaminación ambiental dentro de la empresa. Las empresas tendrán un plan de control y seguimiento interno para la verificación del cumplimiento de las estrategias propuestas.

Seguimiento de las estrategias aplicadas a los vehículos

La evaluación de las estrategias para reducir la contaminación por vehículos consistirá en evaluar la implementación de los catalizadores con los siguientes pasos (MAE, 2011):

- 1) Evaluación del reporte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas sobre el número de unidades de uso colectivo que se han establecido en Santo Domingo, las cuales cuentan con el ensamblaje de convertidores catalíticos.

- 2) La disminución de las emisiones y concentraciones de contaminantes como monóxido de carbono y material particulado se evaluará con el reporte de datos de la estación de monitoreo atmosférico de Santo Domingo. Estos valores se compararán con la Normas Ecuatoriana de Calidad del Aire.

Seguimiento de las estrategias aplicadas a la contaminación por erosión

El cumplimiento de la pavimentación de vías o carreteras y la construcción de ciclo vías se evaluará de la siguiente forma:

- 1) Análisis del buen o mal estado de las vías secundarias y terciarias de la ciudad, mediante los informes emitidos por el MTOP. Se analizará el material usado en la construcción y que cumpla las normas indicadas por las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes (MTOP, 2002).
- 2) También se revisará los reportes generados de la estación de monitoreo de Santo Domingo para evaluar el material sedimentable del aire y comparar con las normas indicadas por la NECA (MAE, 2011).

2.4.2 Seguimiento a la red de monitoreo atmosférica

Todos los equipos serán calibrados una vez instalados y cada 6 meses, antes de retirar o trasladar un equipo y después de una reparación. Los equipos que se repongan se calibrarán cada 3 meses para asegurar la estabilidad de las mediciones. Las calibraciones se harán por flujos, por concentraciones, por cero y *span* y por multipunto (DIGESA, 2005).

Se calibrará para las variables de contaminación indicadas en la Tabla 3 para todos los equipos involucrados.

2.5. Análisis económico

2.5.1 Análisis económico a las medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire

Se indica costos referenciales de la implementación de las medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire (Tabla 4) y para instalar la red de monitoreo (Tabla 5).

Tabla 4. Análisis económico de la aplicación de medidas preventivas y correctivas para mejorar la calidad del aire de Santo Domingo, Ecuador

Fuentes de emisión	Costo referencial del plan
Industrias	
Incentivos fiscales	Reducción del 25 % por pago de impuestos
Educación ambiental	Costo de un plan de manejo ambiental: \$ 20 000
Vehículos	Convertidor catalítico de tres vías con aire de inyección, vehículos alta extracción de hidrocarburos y CO: \$ 20 000
	Un convertidor catalítico de oxidación para autos de diésel: \$ 5 000
	Convertidor catalítico de tres vías autos nuevos de gasolina: \$ 8 000
Erosión eólica	Un kilómetro de pavimento asfaltado: \$ 300 000
	Un kilómetro de pavimentado de concreto: \$ 700 000
	Un metro cuadrado de pavimento de adoquines de hormigón: \$11 m ²

2.5.2 Análisis económico para la red de monitoreo

El costo referencial de la red de monitoreo del aire contaminado de Santo Domingo se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Costo de la red de monitoreo atmosférica en Santo Domingo, Ecuador

Etapas	Costo referencial (\$)
Costo de diseño e implementación del proyecto	43 200
Costo de equipamiento	101 174,4
Caseta de albergue	9 170
Conexión externa - caseta de albergue	3 000
Sistema central de cómputo	25 931
Equipos analizadores de gases CO, NO ₂ , SO ₂ , O ₃	64 800
Equipos analizadores de partículas	15 300
Muestreadores activos semiautomáticos	12 000
Equipos de calibración de gases	3 360
<i>Dataloggers</i>	6 655,6
<i>Manifolds</i>	2 700
Equipos meteorológicos	15 936
Monitoreo automático	20 000
Costo de instalación	46 000
Costo de operación y mantenimiento (1 año)	40 000
Calibración de <i>dataloggers</i>	8 640
Total aproximado por una estación de monitoreo	417 867
Total por las nueve estaciones	3 760 803

Basado en Chávez (2001)

III. CONCLUSIONES

En la ciudad de Santo Domingo, Ecuador, existe únicamente una estación de monitoreo de la contaminación atmosférica que mide únicamente el material particulado (PM_{10}).

La concentración de PM_{10} de la ciudad sobrepasa el nivel máximo permitido por la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA) durante todo el año 2012. Se considera que las causas de la mayor concentración de PM_{10} fueron: *a)* circulación vehicular de unidades colectivas antiguas y en mal estado que generan alta contaminación, *b)* resuspensión de material particulado por vías sin pavimentar dentro de la ciudad y *c)* construcción de carreteras principales y secundarias. Además, los resultados muestran que en los años 2011, 2012 y 2013 se sobrepasó el nivel máximo indicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). La calidad de aire en Santo Domingo, considerando únicamente los niveles de concentración de PM_{10} es óptimo siempre y cuando no sobrepasen los límites máximos permisibles de la NECA y la OMS.

La precipitación no incide directamente en la variación de la concentración de PM_{10} de la ciudad de Santo Domingo.

Todas las ciudades analizadas presentan concentraciones promedio de PM_{10} por debajo del límite permisible indicado por la NECA; sin embargo las ciudades de Manta, Cuenca, Riobamba, Quito, Latacunga, Portoviejo, Guayaquil, Quevedo, Ambato, Babahoyo sobrepasan los límites permisibles indicados por la OMS.

La propuesta de control de la contaminación atmosférica de la ciudad de Santo Domingo se basa en un plan de aplicación de medidas correctivas y preventivas para mejorar la calidad del aire y la instalación de una red de monitoreo atmosférica. Las medidas correctivas se aplicará mediante políticas ambientales enfocadas en tres fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos: industrias, vehículos y erosión eólica. La red de monitoreo medirá los siguientes contaminantes criterio: PM_{10} , $PM_{2,5}$, partícula sedimentables, monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y ozono (O_3).

REFERENCIAS

- Aguilar-Barojas, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco 11(1-2):333-338*.
- Cooper, E. (2012). *Emisiones de Escape de Autobuses de Transporte Público: Combustibles y vehículos para transporte urbano sostenible*. Washington, Analista de investigación EMBARQ Global. Disponible en: <http://www.wrirosscities.org/sites/default/files/Spanish-Exhaust-Emissions-Transit-Buses-EMBARQ.pdf>
- CORPAIRE. (2004). *Índice Quiteño de la Calidad del Aire. Quito, Corporación para el mejoramiento del Aire de Quito*. Disponible en: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca.pdf
- Chávez, J. (2001). *Red de Monitoreo de la Calidad del Aire para Lima y Callao*. Lima, II Taller de Aire Limpio para Lima Callao y III Encuentro Latinoamericano sobre Calidad del Aire y Salud. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsci/e/fulltext/3encuent/narciso2.pdf>
- Díaz, V. (2015). *Informe de Calidad del Aire del Distrito Metropolitano de Quito 2014. Quito, Secretaría de Ambiente*. Disponible en: http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca_2014.pdf
- Di Renzo, J.A., A.W. Guzman, y F. Casanoves. (2002). A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Stastistics*, 7(2):129-142.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, Y. C. (2016). *InfoStat versión 2016*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en <http://www.infostat.com.ar>.
- DIGESA. (2005). *Protocolo de Monitoreo de La Calidad del Aire y Gestión de Los datos. Lima. Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad*. Disponible en: http://www.digesa.sld.pe/norma_consulta/protocolo_calidad_de_aire.pdf

- Green, J. (2012). *La Calidad del Aire en América Latina 2012: Una Visión Panorámica*. Washington D.C., Clean Air Institute. Disponible en: <http://www.cleanairinstitute.org/calidaddelaireamericalatina/cai-report-spanish.pdf>
- Guerrero, L. (2014). *Auditoría Ambiental de Cumplimiento, Plásticos Panamericanos S.A. PLAPASA*. Guayaquil. Disponible en: <https://www.plapasa.com/default/resources/Plapasa-Auditoria-Ambiental-De-Cumplimiento.pdf>
- IGM. (2004). *Instituciones Iboamericanas: Ecuador*. Quito, Instituto Geográfico Militar. Disponible en: http://www.geoinstitutos.com/ecuador/inicio_ecu.asp
- INAMHI. (2014). *Anuario Meteorológico*. Quito, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Disponible en: <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202011.pdf>
- INEC. (2010). *Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en Ecuador: Fascículo Provincial Santo Domingo de los Tsáchilas*. Quito, Instituto Nacional de Estadística y Censos. Disponible en: http://www.ecuadorencifras.gob.ec/wp-content/descargas/Manu-lateral/Resultados-provinciales/santo_domingo.pdf
- Instituto Nacional de Ecología. (2010). *Manual 3. Redes estaciones y equipos de medición de la calidad del aire*. 1ª ed. México. Disponible en <http://docplayer.es/10376747-Manual-3-redes-estaciones-y-equipos-de-medicion-de-la-calidad-del-aire.html>
- Jiménez, H. (1980). *Anatomía de clasificación del sistema de Holdrige*. CATIE: Turrialba, Costa Rica.
- MAE. (2011). *Norma de la Calidad del Aire Ambiente o nivel de Inmisión, publicada en el Registro Oficial N°464 de 7 Junio del 2011*. República del Ecuador. Quito, Ministerio del Ambiente del Ecuador
- MAE. (2014). *Inventario Preliminar de las Emisiones de Contaminantes del Aire, de los cantones Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro*. Quito, Ministerio del Ambiente del Ecuador. Disponible en: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/Libro-Resumen-Inventario-13-02-2014-prensa.pdf>

- MAE. (2016). *Indicador: Concentración de Material Particulado PM₁₀ en el aire*. Plataforma del Sistema Único de Información Ambiental. Quito, Ministerio del Ambiente del Ecuador. Disponible en: <http://snia.ambiente.gob.ec:8090/indicadoresambientales>
- Martínez, A. y Romieu, I. (1997). *Introducción al monitoreo atmosférico*. México, Departamento del distrito federal. Biblioteca Virtual MINAM. Disponible en <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap2.pdf>
- Montgomery C., D., E.A. Peck, y G.G. Vining. (2006). *Introducción al análisis de regresión lineal*. 3ra ed. CECSA, México.
- Morales, M. (2011). *Propuesta de un Plan De Manejo Ambiental aplicado a la Empresa de Balanceados Avimentos para reducir su Impacto Ambiental*. (Tesis de grado) Ambato, Universidad Técnica de Ambato. Disponible en: <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/1788/1/MSc.17.pdf>
- MTOP. (2002). *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes, publicada en el Informe MOP-001-F-2002*. República del Ecuador. Quito, Ministerio de Transporte y obras públicas. Disponible en: http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/01-07-2013_ConcursoPublico_StoDomingo-Esmeraldas-Especificaciones-Tecnicas.pdf
- MTOP. (2011). *Red Vial Estatal Nacional*. Quito, Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Disponible en: http://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/06-07-2011_Especial_MTOP_82_anios.pdf
- OMS. (2005). *Guía de la calidad del aire 2005: relativas al material particulado, el ozono y el dióxido de azufre*. Ginebra, Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2016). *Informe de la Calidad del Aire y Salud 2016: PM₁₀ y PM_{2.5}*. Chile, Organización Mundial de la Salud. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Ormazabal, E. J. y Larrañaga, E. (1998). *Investigación de la contaminación del suelo. Guía metodológica. Estudio histórico y diseño de muestreo*. Sociedad pública de gestión ambiental IHOBE. Gobierno Vasco, Lankopi S. A.
- Palacios, J. (2014). *Análisis de las condiciones climáticas registradas en el Ecuador continental en el año 2013 y su impacto en el sector agrícola*. Quito, Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Disponible en:

- <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/2014/01/Informe2014SNGR.pdf>
- Parra, B. (2013). *Informe Ampliación Vía Aloag- Santo Domingo*. Quito, Gobierno de Pichincha. Disponible en: http://www.pichincha.gob.ec/phocadownload/aloagsantodomingo/aloag_ampliacion_enero_2013.pdf
- PDOT. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Santo Domingo, Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal*
- Rodríguez, M. y Espinoza, G. (2002). *Gestión Ambiental en América Latina y el Caribe: evolución tendencia y principales prácticas*. Bogotá, Banco Interamericano de Desarrollo, Departamento de Desarrollo Sostenible División de Medio Ambiente. Disponible en <http://cebem.org/cmsfiles/publicaciones/gestionambientalLACaribe.pdf>
- SINAGAP. (2015). *Boletín de Precipitación y Temperatura: Zona 4. Quito, Coordinación General del Sistema de Información Nacional, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca*. Disponible en: http://sinagap.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/tematicos_zonales/precipitacion_temperatura/2015/ag-z4-sep-15.pdf
- Sorgato, V. (2016). *Seis urbes en Ecuador se exceden en contaminación ambiental, según OMS (2016, 10 Junio)*. El comercio. Disponible en: <http://www.elcomercio.com/tendencias/ciudades-ecuador-polucion-enfermedades-contaminacion.html>.
- Spiegel, J., y Maystre, L. (1998). Control de la contaminación ambiental. En J. Mager (Ed.) *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. Vol II. Chantal Dufresne: Madrid.
- SRI. (2011). *Código de Producción, Comercio e Inversiones: Impuesto a la Renta*. Publicada en la Disposición reformativa segunda 2.2 de 31 de Diciembre del 2010. República del Ecuador. Quito, Servicios de Rentas Internas. Disponible en: <http://www.sri.gob.ec/de/366>
- The R Core Team. (2016). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Consultado el 12 de enero de 2016. Disponible en: <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/fullrefman.pdf>