



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

## **MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE NO<sub>2</sub> Y O<sub>3</sub> EN ZONAS RURALES Y SUBURBANAS DEL VALLE DE MÉXICO**

**ERNESTO RUIZ VILLAVICENCIO**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

**2019**



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

---

## INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

### CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, “Ernesto Ruiz Villavicencio”, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor “Doc. Miguel Ángel López López”, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “Modelación y Estimación de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en Zonas Rurales y Suburbanas del valle de México”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco, Estado de México, a 12 de febrero de 2019



Ernesto Ruiz Villavicencio

Firma y nombre del Alumno (a)



---

Vo. Bo. del Nombre Consejero

La presente tesis titulada: **“Modelación y Estimación de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en Zonas Rurales y Suburbanas del Valle de México”** realizada por el (la) alumno (a): “Ernesto Ruiz Villavicencio” bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A):

  
Dr. Miguel Ángel López López FOR

ASESOR (A) :

  
Dra. Martha Elva Ramírez Guzmán EST

ASESOR (A) :

  
Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá FOR

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2019

# MODELACIÓN Y ESTIMACIÓN DE NO<sub>2</sub> Y O<sub>3</sub> EN ZONAS RURALES y SUBURBANAS DEL VALLE DE MEXICO

Ruiz Villavicencio Ernesto  
Colegio de Postgraduados, 2019.

## RESUMEN

Las altas concentraciones de contaminantes en la atmosfera del Valle de México son producto de la actividad humana, principalmente y se depositan en reservas ecológicas, bosques naturales, áreas ganaderas y agrícolas a lo largo del Valle de México influyendo en la salud de plantas y animales.

El objetivo principal de este trabajo fue estimar las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de las estaciones de monitoreo Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán y Montecillo ubicadas dentro de zonas rurales y suburbanas, a partir de registros de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas (Temperatura, Humedad Relativa, Dirección y Velocidad de Vientos) registradas en otras estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico y la Red de Meteorología y Radiación Solar.

El periodo de estudio contempló datos del año 2010 al 2017, los registros utilizados se obtuvieron a partir de las bases de datos de la Secretaria de Medio Ambiente de la Ciudad de México. Los datos se analizaron mediante Regresión Lineal Múltiple en el programa estadístico SAS 9.4, a través de los procedimientos “GLM y Stepwise” para desarrollar modelos de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> y de NO<sub>2</sub>.

En total se desarrollaron 40 modelos de estimación, 20 modelos son para estimación de O<sub>3</sub> y 20 modelos para estimación NO<sub>2</sub>. Los resultados indican que los mejores modelos de estimación fueron aquellos que solo incluyen concentraciones ya sea de O<sub>3</sub> o NO<sub>2</sub>, seguidos de los modelos que integran O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

**Palabras clave:** Ozono, Dióxido de Nitrógeno, Variables Meteorológicas, Modelos de Estimación, Regresión Lineal Múltiple.

# MODELING AND ESTIMATION OF NO<sub>2</sub> AND O<sub>3</sub> IN RURAL AND SUBURBAN AREAS OF THE VALLEY OF MEXICO

Ruiz Villavicencio Ernesto  
Colegio de Postgraduados, 2019.

## ABSTRACT

The high concentrations of pollutants in the atmosphere of the Valley of Mexico are the product of human activity. These pollutants are deposited in ecological reserves, natural forests, livestock and agricultural areas along the valley of Mexico where they influence the health of plants and animals.

The main objective of this work was to estimate the concentrations of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> of the monitoring stations Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán and Montecillo located within rural and suburban areas, from records of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and meteorological variables (temperature, relative humidity, direction and wind velocity) registered in other monitoring stations of the automatic network of atmospheric monitoring and the network of Meteorology and Solar radiation.

The study period contemplated data from the year 2010 to 2017, the records used were obtained from the databases of the Secretary of the Environment of Mexico City. The data were analyzed by multiple linear regression in the statistical program SAS 9.4, through the procedures "GLM and Stepwise" to develop estimation models of the concentrations of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub>

In total 40 models of estimation were developed, 20 models are for estimation of O<sub>3</sub> and 20 models for estimation NO<sub>2</sub>. The results indicate that the best models of estimation were those that only include concentrations either of O<sub>3</sub> or NO<sub>2</sub>, followed by the models that integrate O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and meteorological variables.

**Key words:** Ozone, Nitrogen Dioxide, Meteorological Variables, Estimation Models, Multiple Linear Regression.

A mi familia:

Agradezco infinitamente el apoyo incondicional que día a día me brindan, gracias por su paciencia, por tantos buenos momentos y gracias por ser los grandiosos seres humanos que son.

Los amo con todo mi corazón: Carolina, José y Carina, muchas gracias por todo.

A mis perrijas:

Mina, Sora y kira.

A la familia Ruiz y familia Villavicencio:

Gracias por su compañía, por su apoyo y por los tantos buenos momentos juntos.

A mis amigos:

Víctor Hugo† y Julio Wong†, seguramente donde quiera que se encuentren continúan brillando intensamente, ya nos encontraremos.

A mis compañeros de Maestría:

Fabiola, Angy (Gordis), Diana, Luzma, Angy chiquita y Fili, por hacer esta aventura aún más emocionante.

A Mario:

Por ser mi amigo incondicional, cómplice de aventura y un hermano para mí.

A Nadia:

Por el apoyo brindado durante toda la Maestría.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados y de manera especial al Postgrado Forestal por darme la oportunidad de cumplir esta etapa académica.

A mi comité asesor por el tiempo y apoyo invertido para la planeación y realización de este proyecto, así como las correcciones y críticas constructivas para la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Miguel Ángel López López por todo su apoyo de principio a fin durante este proceso, así como, los consejos y conocimientos brindados.

A la Dra. Martha Elva Ramírez Guzmán por la infinita paciencia, consejos y apoyo que me otorgo durante toda la Maestría.

Al Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá por su apoyo, asesoría, y por su eterna disposición para apoyarme.

Al Dr. Carlos Ramírez Herrera por su tiempo, apoyo y consejos para mejorar este trabajo.

A todo el grupo de profesores y profesoras del Postgrado Forestal por sus valiosas enseñanzas.

A las secretarías del Postgrado Forestal por su apoyo incondicional y eterna amabilidad: Lupita, Rosy y Fanny.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| <b>RESUMEN GENERAL</b> .....   | iv |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | v  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....  | 1  |
| Ozono (O <sub>3</sub> ).....   | 1  |
| Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) .....  | 2  |
| Variables meteorológicas en el Valle de México .....   | 3  |
| Regresión lineal múltiple .....  | 3  |
| Coefficiente de determinación .....  | 4  |
| Raíz del error cuadrático medio.....   | 4  |
| Desviación estándar .....  | 4  |
| Procedimiento GLM (proc GLM).....  | 5  |
| Procedimiento “stepwise” (proc stepwise) .....   | 5  |
| <b>OBJETIVOS</b> .....   | 5  |
| Objetivo general.....  | 5  |
| Objetivos particulares .....   | 5  |
| <b>JUSTIFICACION</b> .....   | 7  |
| Problemática .....   | 8  |
| Alcance y delimitación de la investigación .....   | 9  |
| <b>HIPÓTESIS</b> .....   | 9  |
| <b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....  | 10 |
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....  | 14 |
| Área de estudio .....  | 14 |
| Zonas de vegetación natural y zonas agrícolas en el Valle de México.....                             | 14 |
| Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)..... | 14 |

|   |    |
|---|----|
| Elaboración de las bases de datos .....   | 16 |
| Análisis de regresión lineal múltiple en SAS .....  | 16 |
| Validación de los modelos de estimación .....   | 17 |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....   | 19 |
| Estimación de las concentraciones de O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con base en concentraciones de O <sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA .....  | 19 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en concentraciones de O <sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA .....   | 22 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con base en concentraciones de O <sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA.....  | 25 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con base en concentraciones de O <sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA .....   | 28 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con base en registros O <sub>3</sub> de la RAMA y variables meteorológicas la REDMET ..  | 31 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET ..... | 35 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET .....                     | 38 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET .....                     | 41 |
| Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de dos días, con base en registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA.....                                       | 45 |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> en otras estaciones de la RAMA .....  | 48 |

|  |           |
|--|-----------|
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> en otras estaciones de la RAMA.....  | 51        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> en otras estaciones de la RAMA.....  | 54        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> en otras estaciones de la rama.....  | 57        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con base en registros de la RAMA y la REDMET.....   | 60        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET .....   | 63        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico cuautitlán (CUT), con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET .....   | 66        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET .....  | 69        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de un día, con base en registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA.....   | 73        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de un día, con base en registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....  | 76        |
| Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de dos días, con base en registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....  | 79        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>82</b> |
| <b>LITERATURA CITADA .....</b>   | <b>85</b> |
| ANEXO I. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otras causas en las estaciones de monitoreo ubicadas en la Ciudad de México, durante el año 2016 (continua).....  | 93        |
| ANEXO II. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET..... | 95        |

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO III. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET ..... | 98  |
| ANEXO VI. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de un día, con base en registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....                     | 102 |
| ANEXO V. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco medio (AJM), con base en registros de la RAMA y la REDMET .....  | 105 |
| ANEXO VI. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con base en registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET .....                           | 108 |
| ANEXO VII. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de un día, con base en registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....                     | 112 |
| ANEXO VIII. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de un día, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....                  | 115 |
| ANEXO IX. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de un día, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....                    | 118 |
| ANEXO X. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con respecto a registros de la RAMA y la REDMET .....  | 121 |
| ANEXO XI. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de un día, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....                    | 124 |
| ANEXO XII. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de dos días, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....                 | 127 |

|  |     |
|--|-----|
| ANEXO XIII. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de dos días, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA.....     | 130 |
| ANEXO XIV. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con respecto a registros de la RAMA y la REDMET.....  | 133 |
| ANEXO XV. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de un día, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....       | 135 |
| ANEXO XVI. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de dos días, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA .....    | 138 |
| ANEXO XVII. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de dos días, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA.....    | 141 |
| ANEXO XVIII. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de dos días, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA..... | 144 |
| ANEXO XIX. Estimación de las concentraciones NO <sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con respecto a registros de la RAMA y la REDMET .....   | 147 |
| ANEXO XX. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de dos días, con respecto a registros NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> de la RAMA.....       | 151 |
| ANEXO XXI. Estimación de las concentraciones O <sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con respecto a registros de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET.....             | 154 |

## LISTA DE CUADROS

|                  |  |    |
|------------------|--|----|
| <b>Cuadro 1.</b> | Estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA y REDMET.....   | 15 |
| <b>Cuadro 2.</b> | Fechas seleccionadas para evaluación de los modelos de estimación de las concentraciones de O <sub>3</sub> y NO <sub>2</sub> . ....  | 18 |
| <b>Cuadro 3.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural AJM con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA. ....                           | 21 |
| <b>Cuadro 4.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural CUA con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA. ....                           | 24 |
| <b>Cuadro 5.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural CUT con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA. ....                           | 27 |
| <b>Cuadro 6.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural MON con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.....                            | 30 |
| <b>Cuadro 7.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural AJM con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas..... | 34 |
| <b>Cuadro 8.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural CUT con base en concentraciones de O <sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas..... | 37 |
| <b>Cuadro 9.</b> | Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural CUT con base en concentraciones de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> y variables meteorológicas. ....                         | 40 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro 10.</b> Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural MON con base en concentraciones de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> y variables meteorológicas. ....   | 44 |
| <b>Cuadro 11.</b> Validación del modelo de estimación de [O <sub>3</sub> ] de la estación rural AJM con desfase de dos días, con base en concentraciones de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> y variables meteorológicas. ....                                | 47 |
| <b>Cuadro 12.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural AJM con base en registros de NO <sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA. ....   | 50 |
| <b>Cuadro 13.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural CUA con base en registros de NO <sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA. ....   | 53 |
| <b>Cuadro 14.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural CUT con base en registros de NO <sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA. ....   | 56 |
| <b>Cuadro 15.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural MON con base en registros de NO <sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA. ....   | 59 |
| <b>Cuadro 16.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural CUA con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas. ....                              | 62 |
| <b>Cuadro 17.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural CUA con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET. .... | 65 |
| <b>Cuadro 18.</b> Validación del modelo de estimación de [NO <sub>2</sub> ] de la estación rural CUT con base en concentraciones de NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET. .... | 68 |

**Cuadro 19.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural MON con base en concentraciones de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET.....72

**Cuadro 20.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural AJM(desfase un día) con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.....75

**Cuadro 21.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUT(desfase un día) con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.....78

**Cuadro 22.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUA(desfase dos días) con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.....81

## GLOSARIO

|                  |   |
|------------------|---|
| ACOL             | Acolman   |
| AJU              | Ajusco  |
| AJM              | Ajusco Medio  |
| ATIZA            | Atizapán  |
| BJU              | Benito Juárez   |
| CAM              | Camarones   |
| CAME             | Comisión Ambiental de la Megalópolis                            |
| CDMX             | Ciudad de México  |
| CCA              | Centro de Ciencias de la Atmósfera                              |
| CHO              | Chalco  |
| CO               | Óxidos de carbono   |
| COV'S            | Compuestos Orgánicos Volátiles                                  |
| CUA              | Cuajimalpa  |
| CUT              | Cuautitlán  |
| DOF              | Diario oficial de la Nación                                     |
| Dv               | Dirección de vientos  |
| Edo. Mex.        | Estado de México  |
| EPA              | Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos           |
| FAC              | Facultad de Estudios Superiores Acatlán                         |
| GAM              | Gustavo A. Madero   |
| GEI's            | Gases de Efecto Invernadero                                     |
| HGM              | Hospital General de México                                      |
| H <sub>2</sub> S | Ácido sulfhídrico   |
| HO <sub>2</sub>  | Hidroxilperoxi  |
| HNO <sub>2</sub> | Ácido Nitroso   |
| Hr               | Humedad relativa  |
| INECC            | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático               |
| INEGI.           | Instituto Nacional de Estadística y Geografía                   |
| INN              | Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares                 |
| IZT              | Iztacalco   |
| LPR              | La Presa  |
| LLA              | Los Laureles  |
| MER              | Merced  |
| MGH              | Miguel Hidalgo  |
| MPA              | Milpa Alta  |
| MON              | Montecillo  |
| Nm               | Nanómetros  |
| NEZ              | Nezahualcóyotl  |
| NO <sub>2</sub>  | Dióxido de Nitrógeno  |
| NO <sub>x</sub>  | Óxidos de Nitrógeno   |
| O <sub>3</sub>   | Ozono   |
| OH               | Radicales hidroxilo   |
| PED              | Pedregal  |
| PAN              | Compuestos de peroxiacilnitratos                                |
| PM 2.5           | Material particulado menor a 25 micras                          |
| PM 10            | Material particulado menor a 10 micras                          |
| Ppb              | Partes por Billón   |
| Ppm              | Partes por millón   |
| PROAIRE          | Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México |

|                 |   |
|-----------------|---|
| RAMA            | Red Automática de Monitoreo Atmosférico               |
| REDMET          | Red de Meteorología y Radiación Solar                 |
| SAG             | San Agustín   |
| SEDEMA          | Secretaría del Medio Ambiente                         |
| SFE             | Santa Fe  |
| SIMAT           | Red de Monitoreo Ambiental                            |
| SO <sub>2</sub> | Dióxido de Azufre                                     |
| SO <sub>x</sub> | Óxidos de Azufre                                      |
| TLAH            | Tláhuac   |
| TLA             | Tlalnepantla  |
| TLI             | Tultitlán   |
| TPN             | Tlalpan   |
| Tem             | Temperatura   |
| UAX             | Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Xochimilco |
| UIZ             | Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa |
| VIF             | Villa de las Flores                                   |
| Vv              | Velocidad del viento                                  |
| XAL             | Xalostoc  |
| ZMVM            | Zona Metropolitana del Valle de México                |

## INTRODUCCIÓN

Se entiende por contaminación atmosférica la presencia en el aire de sustancias y formas de energía que alteran la calidad del mismo, de modo que implique riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza (Carnicer 2007). La contaminación atmosférica tiene origen natural y por actividades humanas como la industria, uso de combustibles fósiles, automóviles, etc. (SEDEMA 2017). Los compuestos químicos Ozono (O<sub>3</sub>) y Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) son parte de los contaminantes potenciales en los ecosistemas forestales (Smith 1990).

### Ozono (O<sub>3</sub>)

El O<sub>3</sub> es un gas fotoquímico secundario altamente oxidante. Proviene principalmente de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV's), en presencia de luz solar (Cano et al. 2016) y se usa la expresión: [O<sub>3</sub>] para denotar que se habla de sus concentraciones.

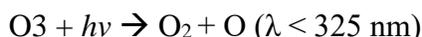
El ozono se produce por una reacción fotoquímica:



donde  $h\nu$  es un fotón de luz de energía absorbido



y se destruye:



Por otra parte, el ozono tiene un efecto sinérgico con otros parámetros meteorológicos como la temperatura, humedad relativa, radiación solar y los vientos (CEPA 1999). El ozono pertenece al grupo de los Gases de Efecto Invernadero (GEI's), causando daños a salud humana, bosques, plantaciones zonas de ganado y cultivo, generando reducción del crecimiento de bosques, cultivos,

plantaciones forestales y capacidad buffer de las plantas ante sequias o bajas temperaturas (WHO 2005).

En el Valle de México el comportamiento del  $O_3$  está influenciado por la fisiografía (SIMAT 2011). La velocidad de reacción de los  $O_3$  y  $NO_2$  está fuertemente relacionada con las altas temperaturas y la radiación solar, así como, a un bajo nivel de humedad y vientos favoreciendo el aumento de ambos contaminantes.

Al existir estabilidad atmosférica en las capas atmosféricas superiores, el intercambio vertical de las masas de aire es lento y la contaminación se acumula gradualmente al pie de las montañas provocando un incremento importante en la concentración de ozono (SIMAT 2011). Mientras que, el calentamiento del suelo por la tarde refuerza el movimiento horizontal y vertical del viento favoreciendo la rápida dispersión de la contaminación (SEDEMA 2017).

### **Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ )**

El  $NO_2$  es un contaminante atmosférico generado de manera natural y por el uso de combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural (García-Reynoso 2009). Los óxidos de nitrógeno experimentan reacciones fotoquímicas para formar ozono y están involucrados en la formación de aerosoles, generando enfermedades pulmonares (SEMARNAT 2013, EPA 2016).

Durante el día, la fotólisis del  $NO_2$  es la principal fuente de ozono troposférico, es por eso que su concentración disminuye significativamente durante las horas de máxima concentración de ozono (SIMAT 2011). Por la noche, la mayor parte de los  $NO_x$  se encuentra en forma de  $NO_2$  como resultado de la oxidación del  $NO$  remanente o emitido durante la noche. Sin embargo, la transformación del  $NO_2$  para formar otras especies nitrogenadas a través de diversos mecanismos de reacción, provoca una disminución en la concentración en el transcurso de la noche (SIMAT 2011) y se usa la expresión:  $[NO_2]$  para denotar que se habla de sus concentraciones.

## **Variables meteorológicas en el Valle de México**

Dentro del grupo de variables meteorológicas registradas en el valle de México se encuentran la temperatura, humedad relativa, dirección de vientos y velocidad de vientos. La temperatura media anual estimada en el Valle de México es de 16°C (Jáuregui 1993) . La temperatura máxima promedio se presentan entre los meses de marzo y mayo, es alrededor de 25°C (INEGI, 2018). En la (Figura 1a) se muestra la distribución espacial del promedio anual de la temperatura.

La humedad relativa es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta. El promedio anual de la humedad relativa en la en el Valle de México es de aproximadamente un 57 % (SEDEMA 2017).

El viento es determinante en el transporte, acumulación, transformación y dispersión de la contaminación dentro y fuera del Valle de México. La variabilidad del viento en el Valle de México es el resultado de las variaciones de corto plazo en el balance de calor (suelo/atmósfera), la humedad y de la interacción de las corrientes de viento de escalas local, regional y sinóptica, influenciadas por la fisiografía de la región (SEMARNAT 2016).

## **Regresión lineal múltiple**

El análisis de regresión lineal múltiple es una herramienta que permite establecer la relación producida entre una variable dependiente “Y” y un conjunto de variables independientes ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ ) (Marques et al. 2007). La regresión lineal múltiple se enfoca hacia situaciones complejas como los fenómenos naturales, los cuales deben ser explicados en la medida de lo posible por las variables independientes (De la Fuente 2011).

### *Estructura del modelo de regresión lineal múltiple*

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + E$$

Donde y es la variable dependiente a predecir;

$\beta$  es cada uno de los parámetros desconocidos a estimar;

E es el error que cometemos en la predicción de los parámetros.

### **Coefficiente de determinación**

El cuadrado del coeficiente de correlación conocido como coeficiente de determinación es la proporción de la variabilidad de  $Y$  explicada por el conjunto de las  $X_k$ , es decir, por el componente explicativo, conocido o determinista del modelo (De la Fuente 2011). Constituye la proporción de variación no explicada o residual atribuida al efecto de factores aleatorios y desconocidos, ajenos a las variables analizadas (Marques et al. 2007). La escala del coeficiente de determinación oscila entre 0-1 y, mientras más cercano a 1 sea el valor obtenido, mayor será el ajuste del modelo a la variable dependiente que se pretenda explicar (Martínez-Ortega et al. 2009). De manera inversa, mientras más cercano a 0 sea el valor obtenido, el modelo presentará un menor ajuste y, por tanto, el modelo será menos confiable (Marques et al. 2007).

### **Raíz del error cuadrático medio**

La Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (*Root Mean Squared Error*) es una medida de desempeño que se utiliza para realizar la evaluación de métodos de pronóstico, ya que la RMSE consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos (Corres et al. 2009). La RMSE amplía y penaliza con mayor fuerza los errores con mayor magnitud y se calcula mediante la siguiente formula (Villareal 2009):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

### **Desviación estándar ( $s$ )**

La desviación estándar muestral es la medida de dispersión usada con más frecuencia, señala cual es el nivel de dispersión de los datos con respecto a la media de los mismo, entre sea mayor el valor de la desviación estándar más grande será la dispersión de los datos y se denota mediante la letra ( $s$ )

y su variación aleatoria se presume normalmente como “ruido” (Cervantes- Hernández 2008). Esta medida de dispersión se usa para determinar un valor como punto de referencia el cual sirve de guía para estimar la dispersión de los datos de un proceso (Cervantes- Hernández 2008).

### **Procedimiento GLM (proc GLM)**

El proceso GLM se encarga de realizar análisis de regresión, analiza los datos en el marco de modelos lineales generales y relaciona una o varias variables confiables continuas con una o varias variables independientes (SAS 2008). Las variables independientes pueden ser variables de clasificación, que divide las observaciones en grupos discretos o variables continuas (SAS 2008).

### **Procedimiento “stepwise” (proc stepwise)**

Es un método secuencial de selección de variables independientes de una ecuación, en cada paso se introduce la variable independiente que no se encuentra ya en la ecuación y tenga la posibilidad para F más pequeñas (SAS 2008), las variables introducidas en la ecuación de regresión pueden ser eliminadas del modelo en caso de no ser influyentes, el método termina cuando ya no hay más variables candidatas a ser incluida o eliminadas (Ferrero, 2018).

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Determinar las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>, en zonas rurales y suburbanas del Valle de México, con base en las concentraciones de los mismos contaminantes y variables meteorológicas registradas en estaciones urbanas de la RAMA y REDMET.

### **Objetivos particulares**

- 1) Determinar la relación entre las concentraciones de O<sub>3</sub>, presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico: Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán, Montecillo

(cerca de zona rural), con base en concentraciones de  $O_3$  registrado en otras estaciones de la RAMA y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables.

- 2) Determinar la relación entre las concentraciones de  $O_3$ , presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico: Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán, Montecillo (cerca de zona rural), con base en concentraciones de  $O_3$  y variables meteorológicas y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables.
- 3) Determinar la relación entre las concentraciones de  $O_3$ , presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico: Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán, Montecillo (cerca de zona rural), con base en concentraciones de  $O_3$ ,  $NO_2$  y variables meteorológicas,
- 4) Determinar si existe relación entre concentraciones de  $O_3$  presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico: Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán y Montecillo apoyado por concentraciones de  $O_3$  y  $NO_2$ , considerando el desfase de uno y dos días y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables
- 5) Determinar si existe relación entre las concentraciones de  $NO_2$ , presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico: Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán, Montecillo (cerca de zona rural), considerando concentraciones de  $NO_2$  registrado en otras estaciones de la RAMA y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables.
- 6) Determinar si existe relación entre las concentraciones de  $NO_2$ , presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico en las estaciones antedichas, con base en concentraciones de  $NO_2$  y variables meteorológicas y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables.
- 7) Determinar si existe relación entre concentraciones de  $NO_2$  presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico nombradas previamente, con base en concentraciones de  $O_3$ ,  $NO_2$  y variables meteorológicas, considerando y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables.

- 8) Determinar si existe relación entre concentraciones de NO<sub>2</sub> presentes en zona urbana y las registradas en las estaciones de monitoreo atmosférico en las estaciones citadas apoyado por concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>, considerando el desfase de uno y dos días y, elaborar su modelo de estimación considerando las mismas variables.
- 9) Determinar factibilidad de estimar las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en zonas rurales del Valle de México, a partir de los registros de contaminantes de la RAMA y REDMET.

### **JUSTIFICACION**

El sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México tiene sin lugar a duda un papel fundamental respecto al registro de las concentraciones de contaminantes atmosféricos, con lo cual se han logrado generar diferentes herramientas para la disminución de la contaminación en el valle de México.

Una de ellas es la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y la Red de Meteorológica y Radiación Solar (REDMET), las cuales registran continuamente las concentraciones de varios contaminantes en diferentes puntos del Valle de México, debido a los daños a la salud y vegetación que generan los contaminantes atmosféricos.

En el Valle de México destaca la zona sur en donde existen bosques naturales, reservas ecológicas y zonas rurales las cuales se ven afectadas por los contaminantes atmosféricos de la región, lo cuales a su vez su comportamiento se ve influenciado por variables meteorológicas como la humedad relativa temperatura, dirección de vientos y velocidad de vientos (Ramos *et al.* 2010). En zonas rurales, el ozono afecta los cultivos agrícolas y al ganado y, como consecuencia ocasiona pérdidas económicas, así como, pérdida de biodiversidad (SEMARNAT, 2016).

A pesar del trabajo constante de la RAMA y REDMET, aún se presentan problemas con los equipos de monitoreo automáticos, ya que, es común encontrar datos faltantes en la información generada

por las estaciones de monitoreo (ANEXO I). Lo cual impide saber el comportamiento preciso de los contaminantes.

Ante este problema una herramienta efectiva son los modelos de estimación mediante regresión múltiple, los cuales son instrumentos que tratan de reproducir diversos fenómenos de la naturaleza, tratando de ser sencillos, pero al mismo tiempo lo más precisos posibles para brindar información confiable y que pueda ser utilizada para otros estudios de investigación.

Por lo anterior el presente trabajo contempla establecer si existe relación entre los registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>. Lo anterior se obtiene en base a registros de las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y a la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Valle de México.

## **Problemática**

Los O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> son dañinos para la salud del ser humano y para la vegetación y participan directamente en el proceso del calentamiento global (Caballero et al. 2007). De acuerdo a la SEMARNAT (2016) en la CDMX se registraron 212 días con concentraciones mayores al límite de O<sub>3</sub> para el promedio de una hora (95 ppb) y 202 días se superó el valor límite de 70 ppb para el promedio de 8 horas (SEDEMA, 2017). Recientemente, al ozono se le ha asociado con el aumento de la mortalidad a largo plazo, ya que el ozono puede contribuir significativamente al riesgo de mortalidad respiratoria y cardio vascular (Turner et al. 2016)

En el Valle de México, el transporte de contaminantes se lleva a cabo por los vientos dominantes de la región que van de norte a sur, de este a oeste y trasladado a zonas altas por efecto de inversión térmica, llevando consigo gases atmosféricos en alta concentración hacia las zonas altas de la ciudad, principalmente en la zona sur (Jáuregui, 1993) que es precisamente donde se encuentran las últimas áreas de conservación de la CDMX.

El panorama a corto, mediano e incluso largo plazo no son alentadores puesto que el cambio climático y el avance de la mancha urbana ponen en peligro a todos los ecosistemas existentes en el Valle de México, como ya se conoce la zona urbana es la zona que ocupa la mayor parte del

territorio, pero hacia la parte sur y sureste se encuentran zonas agrícolas, principalmente de temporal, donde se cultiva maíz, frijol, avena, cebada, papa, alfalfa, trigo, y guayaba entre otros, nopal entre otras, siendo importantes también las hortalizas y la floricultura (INEGI, 2018).

El nivel de impacto a la vegetación y posteriormente a la salud depende de un mejoramiento en la calidad del aire, regulación de temperatura, retención de humedad, alimento para seres humano y ganadería, así como: reducción de concentraciones de gases contaminantes, las cuales tiende al aumento en épocas de insolación con: bajo régimen de vientos, altas temperaturas e implementación de nuevas emisiones atmosféricas en el ambiente (Cruz-Grajales 2002, Percy et al., 2003). Es vital promover la protección de la vegetación presente en la zona urbana y en las zonas rurales del valle, ya que influyen directa en la calidad del ambiente, el bienestar humano, y de manera económica en zonas de cultivo y ganadería.

La declinación forestal presente en el Parque Nacional Desierto de los Leones y el cerro Tláloc se debe en parte al impacto de altas concentraciones de contaminantes atmosféricos como el O<sub>3</sub>, las cuales generan el deterioro de la salud y vitalidad de árboles como el Oyamel (González-Medina *et al.* 2010).

### **Alcance y delimitación de la investigación**

El estudio se limitará en elaborar modelos de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>, en función de las variables de concentración de los O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y de variables climatológicas (temperatura, humedad, velocidad y dirección de vientos) con base en las estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la RAMA y REDMET de la CDMX y Estado de México.

## **HIPÓTESIS**

**Ho:** Las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas por algunas estaciones de monitoreo atmosférico no tienen relación con los registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en otras estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA.

**Ha:** Las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas por algunas estaciones de monitoreo atmosférico si tienen relación con respecto a los registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en otras estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA.

**Ho:** La humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad de vientos no influyen en la relación entre estaciones de monitoreo atmosférico, en términos de las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>

**Ha:** La humedad relativa, temperatura, dirección y velocidad de vientos influyen en la relación entre estaciones de monitoreo atmosférico, en términos de las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>

## REVISIÓN DE LITERATURA

De acuerdo con Hernández-Tejeda y Bauer (1984) el ozono en México se presentó en altas concentraciones, en ese mismo año reportaron síntomas de declinación forestal en especies arbóreas en el Parque Nacional Desierto de los Leones, ubicado al oeste de la ciudad de México.

A partir de 1986 se inició el registro sistemático de los niveles de contaminación en la Ciudad de México, a través de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (González-Medina et al. 2010). En 1996 se crea el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México (PROAIRE) 1995-2000, enfocado en la reducción de las concentraciones pico y promedios de ozono, con la finalidad de disminuir riesgo a la salud, asociado con la exposición de corto y largo plazo al contaminante, tomando como medidas principales la reducción de emisiones de hidrocarburos como precursores principales del ozono (PROAIRE 2010, CAM 2002).

Céspedes (2005) reportó que los factores meteorológicos influyentes en las concentraciones de los contaminantes aéreos son el transporte y la dispersión, así como la turbulencia y las limitaciones de dispersión vertical por la inversión térmica. Por otro lado, menciona la importancia sobre la influencia de barreras de flujos de contaminantes y poca ventilación de algunas cuencas con una capa de mezcla reducida y vientos débiles. Asimismo, la presencia de núcleos urbanos influye en el movimiento de las masas de aire al disminuir su velocidad y generar la formación de turbulencias (Molina y Molina, 2005).

García et al. (1999) realizó un análisis de  $O_3$  y  $NO_x$  mediante técnicas de series de tiempo y regresión lineal múltiple en tres estaciones de monitoreo de los años 1986-1999. Mencionando que los precursores del  $O_3$  ( $NO_2$  y  $NO_x$ ) dependen en cierto modo de algunos elementos del tiempo (temperatura, humedad relativa, etc.). Por otra parte, García et al. (1999) reportó alta correlación del  $O_3$  con sus precursores ( $NO_x$  y  $NO_2$ ) y una baja correlación del  $O_3$  con relación a los parámetros meteorológicos. Los modelos desarrollados en este mismo trabajo compuestos por concentraciones de precursores y variables meteorológicas pueden estimar predecir eventos máximos de  $O_3$  con un día de anticipación, con base en valores de las variables mencionadas.

Bravo et al. (2000) realizó un estudio en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), mostrando que la radiación solar es más útil en la modelación del máximo diario de ozono que la temperatura. Mediante un análisis descriptivo comprobaron que, aunque ambas variables meteorológicas se correlacionan con el máximo diario de ozono. Sin embargo, no propuso un modelo de los niveles diarios de ozono en función de la radiación solar máxima. Aunque el modelo ajustado fue bastante bueno, se sugirió incluir variables meteorológicas en el análisis, con el propósito de eliminar su efecto en la variación del ozono y así evaluar mejor el impacto que las estrategias de control tienen sobre los datos de ozono observados (Jiménez 2002).

Jazcilevich et al. (2002) elaboró un modelo de los flujos de viento de la zona central de México, en el cual indica que las simulaciones del modelo muestran cómo diferentes áreas de la región central de México interactúan entre sí y cómo la disminución de emisiones contaminantes en una región puede reducir concentraciones en otra área y viceversa, mediante los flujos de aire.

Salazar et al. (2018) indicó que los problemas de contaminación atmosférica han generado la formulación de modelos estimación. Los cuales permiten representar de una manera práctica y manejable un gran número de fenómenos o comportamientos para ayudar a un mejor entendimiento y administración de los mismos, brindando un firme soporte para la toma de decisiones, y así manejar con cierto grado de certeza situaciones que gracias a su función como predictores, nos informan de manera anticipada la presentación de posibles eventos ya sean positivos, adversos o simplemente de carácter informativo (Salazar et al. 2018).

Ramos et al. (2010) empleó un análisis de regresión múltiple a los datos de las concentraciones de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) y Material particulado 10 (PM10) en la zona norte de Chiapas describiendo las concentraciones en función del tiempo y/o de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y dirección de los vientos, concluyendo que las variables meteorológicas describieron adecuadamente la concentración anual y mensual, pero no la concentración diaria. Además, reportó que la correlación de NO<sub>2</sub> con la humedad relativa y la altura de la capa de mezcla fue negativa; y positiva con la temperatura, la radiación solar y la velocidad escalar del viento.

Franco (2014) reportó que, bajo condiciones de altas temperaturas, bajo porcentaje de humedad relativa y condiciones estables por días soleados y vientos débiles, favorecieron las concentraciones de O<sub>3</sub> en el Distrito Federal y por lo tanto la temperatura, la humedad, altos índices de radiación solar y ultravioleta son las variables ambientales que condicionaron la concentraciones y distribución del O<sub>3</sub> en el bosque de conservación del Distrito Federal. En el caso de NO<sub>2</sub> las variables más significativas fueron la temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

Jaioun et al. (2014) desarrolló e implementó el uso de modelos de regresión lineal para el registro de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la ciudad de Chonburi, Tailandia. Indicando que modelo un adecuado puede generar la estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub>.

Novoa et al. (2014) realizaron un análisis de la dependencia mediante regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales de los contaminantes del aire y parámetros meteorológicos, encontrando fuerte correlación entre el ozono y la temperatura, en la estación Tlalnepantla en la Ciudad de México, evidenciando un aumento de O<sub>3</sub> cuando la temperatura es alta y existe baja humedad relativa.

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME 2017) revelo que en la década de los años 90's la NOM-023-SSA1-1993 (DOF, 1993) se excedió en un 10% de los días del año, la cual establece un límite máximo permisible de 0.0210 partes por billón (ppb). de NO<sub>2</sub>, pero a lo largo de las últimas décadas han ido disminuyendo.

Reyes et al. (2015), realizaron la modelación de la tendencia del O<sub>3</sub> en la CDMX, mediante el uso de máximos de ozono y modelos estadísticos espaciales y de efectos aleatorios semanales, solo en

meses calurosos. Sin embargo, destaca el uso de todas las estaciones de la Red de Monitoreo Ambiental (SIMAT), debido a datos faltantes. Reporta que existe evidencia donde se observa que los niveles máximos de ozono semanales tienen a disminuir basándose en ambas metodologías.

Capilla (2016) realizó un estudio en Valencia, España. Utilizó modelos de regresión lineal múltiple y variables climatológicas para elaborar sus modelos de predicción utilizando cuatro estaciones de monitoreo, logrando obtener modelos predictivos con alto nivel de precisión a corto plazo.

El monitoreo realizado por la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME 2017) muestra el incumplimiento de la NOM-021-SSA1-2014 (DOF, 2014), enfocada hacia las concentraciones de O<sub>3</sub>, la cual establece dos límites permisibles, el promedio horario donde las concentraciones de O<sub>3</sub> deben ser menores o igual a las 0.095 partes por millón (ppm), y el promedio móvil ocho horas, donde las concentraciones de O<sub>3</sub> deben ser menores o igual a las 0.07 ppm., de acuerdo con la CAME ambos límites normados fueron rebasados.

Lo anterior con base a los datos la norma porcentualmente se incumplió en un 86% de las estaciones que lo midieron. Asimismo, existe un porcentaje importante de estaciones de monitoreo en las que no se pudo evaluar el cumplimiento de la norma por insuficiencia de datos. De acuerdo con los años 2014 a 2016, los promedios anuales registrados en la ZMVM son entre 41% y 49% más altos que los registrados en la Zona metropolitana del Valle de Toluca (CAME 2017).

En el 2016 se registraron 212 días con concentraciones mayores al valor límite para el promedio de una hora (95 ppb), acumulando un total de 856 horas en toda el área metropolitana (SEDEMA 2017). Mientras que el valor máximo para el promedio de 8 horas fue de 152 ppb (la norma establece un límite de 70 ppb, para el promedio de 8 horas) (DOF 2014).

El valor límite para el promedio de 8 horas se superó 202 días y el mayor número de horas por encima del valor de la norma se observó en la estación de Ajusco Medio (AJM) con 479 horas (SEDEMA 2017); La concentración máxima para el promedio horario fue de 210 ppb y se presentó en la estación Cuajimalpa (CUA) el 14 de marzo, este valor activó la Fase I de Contingencia Ambiental Atmosférica (SEDEMA 2017).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El Valle de México es una cuenca hidrográfica endorreica situada en la porción central del país (19° 40' 00" N - 98° 52' 00" O) y en el extremo meridional de la provincia fisiográfica Altiplanicie Mexicana (Rzedowski y Rzedowski 1979). Se localiza a una altitud promedio de 2,240 m. y cuenta con una superficie aproximada de 9,560 km<sup>2</sup>; presenta zona de valles inter-montañosos, mesetas y cañadas, así como terrenos semiplanos, los que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco (Rzedowski y Rzedowski 1979). Asimismo, presenta bosque bajo manejo silvícola, bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, bosque de galería y bosque de mezquite, ocupando una superficie de 7,979 km<sup>2</sup> (INECC, 2016).

### Zonas de vegetación natural y zonas agrícolas en el Valle de México

Actualmente en el Valle de México continúa existiendo extensa superficie con vegetación natural y representan alto valor ambiental para todo el país (SEDEMA 2017). Dentro de estas áreas naturales se encuentran áreas naturales protegidas, en donde hay alta biodiversidad de especies vegetales y animales, así como ríos y lagos (SEMARNAT 2016). Por su parte, en zonas agrícolas se siembran y cosechan la mayoría de los alimentos consumidos por la población de la región, por lo que tanto las zonas de vegetación dominante como zonas agrícolas deben ser protegidas (SEMARNAT 2016).

### Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) y Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET)

Este trabajo se basa en registros de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> registrados en las estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA y registros de las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa, dirección de vientos y velocidad de los vientos registrados en la REDMET distribuidas en la ciudad de México y estado de México (Cuadro 1). Los periodos de registro de contaminantes y variables meteorológicas se realizan de manera habitual cada hora.

**Cuadro 1.** Estaciones de monitoreo atmosférico de la RAMA y REDMET.

| CLAVE | ESTACION                           | DELEGACION O MUNICIPIO  | ESTADO | LATITUD (DD) | LONGITUD (DD) | ALTITUD (m) |
|-------|------------------------------------|-------------------------|--------|--------------|---------------|-------------|
| ACOL  | Acolman                            | Acolman                 | EDOMEX | 19.635501    | -98.912003    | 2198 m      |
| AJU   | Ajusco                             | Tlalpan                 | CDMX   | 19.154674    | 19.2721       | 2953 m      |
| AJM   | Ajusco Medio                       | Tlalpan                 | CDMX   | 19.2721      | -99.207658    | 2619 m      |
| ATIZA | Atizapán                           | Atizapán de Zaragoza    | EDOMEX | 19.576963    | -99.254133    | 2341 m      |
| AZC   | Azcapotzalco                       | Azcapotzalco            | CDMX   | *            | *             | 2252m       |
| BJU   | Benito Juárez                      | Benito Juárez           | CDMX   | 19.371612    | -99.158969    | 2250 m      |
| CAM   | Camarones                          | Azcapotzalco            | CDMX   | 19.468404    | -99.169794    | 2233 m      |
| CCA   | Centro de Ciencias de la Atmósfera | Coyoacán                | CDMX   | 19.3262      | -99.1761      | 2280 m      |
| CHO   | Chalco                             | Chalco                  | EDOMEX | 19.266948    | -98.886088    | 2253 m      |
| COY   | Coyoacán                           | Coyoacán                | CDMX   | *            | *             | 2240 m      |
| CUA   | Cuajimalpa                         | Cuajimalpa de Morelos   | CDMX   | 19.365313    | -99.291705    | 2704 m      |
| CUT   | Cuautitlán                         | Tepotztlán              | EDOMEX | 19.722186    | -99.198602    | 2263 m      |
| FAC   | Fes Acatlán                        | Naucalpan de Juárez     | EDOMEX | 19.482473    | -99.243524    | 2299 m      |
| GAM   | Gustavo A. Madero                  | Gustavo A. Madero       | CDMX   | 19.4827      | -99.094517    | 2227 m      |
| HGM   | Hospital General de México         | Cuauhtémoc              | CDMX   | 19.411617    | -99.152207    | 2234 m      |
| INN   | Investigaciones Nucleares          | Ocoyoacac               | EDOMEX | 19.291968    | -99.38052     | 3082 m      |
| IZT   | Iztacalco                          | Iztacalco               | CDMX   | 19.384413    | -99.117641    | 2238 m      |
| LPR   | La Presa                           | Tlalnepantla de Baz     | EDOMEX | 19.534727    | -99.11772     | 2302 m      |
| LLA   | Los Laureles                       | Ecatepec de Morelos     | EDOMEX | 19.578792    | -99.039644    | 2230 m      |
| MPA   | Milpa alta                         | Milpa Alta              | CDMX   | 19.17688     | -98.990175    | 2592 m      |
| MER   | Merced                             | Venustiano Carranza     | CDMX   | 19.42461     | -99.119594    | 2245 m      |
| MGH   | Miguel Hidalgo                     | Miguel Hidalgo          | CDMX   | 19.40405     | -99.202603    | 2366 m      |
| MON   | Montecillo                         | Texcoco                 | EDOMEX | 19.460415    | -98.902853    | 2252 m      |
| NEZ   | Nezahualcóyotl                     | Nezahualcóyotl          | EDOMEX | 19.393734    | -99.028212    | 2235 m      |
| PED   | Pedregal                           | Álvaro Obregón          | CDMX   | 19.325146    | -99.204136    | 2326 m      |
| SAG   | San Agustín                        | Ecatepec de Morelos     | EDOMEX | 19.532968    | -99.030324    | 2241 m      |
| SFE   | Santa Fe                           | Cuajimalpa de Morelos   | CDMX   | 19.357357    | -99.262865    | 2599 m      |
| SJA   | San Juan de Aragón                 | Gustavo A. Madero       | CDMX   | *            | *             | 2450m       |
| SUR   | Santa Úrsula                       | Coyoacán                | CDMX   | *            | *             | 2250m       |
| TLAH  | Tláhuac                            | Xochimilco              | CDMX   | 19.246459    | -99.010564    | 2297 m      |
| TLA   | Tlalnepantla                       | Tlalnepantla de Baz     | EDOMEX | 19.529077    | -99.204597    | 2311 m      |
| TLI   | Tultitlán                          | Tultitlán               | EDOMEX | 19.602542    | -99.177173    | 2313 m      |
| UIZ   | UAM Iztapalapa                     | Iztapalapa              | CDMX   | 19.360794    | -99.07388     | 2221 m      |
| UAX   | UAM Xochimilco                     | Coyoacán                | CDMX   | 19.304441    | -99.103629    | 2246 m      |
| VIF   | Villa de las Flores                | Coacalco de Berriozábal | EDOMEX | 19.658223    | -99.09659     | 2242 m      |
| XAL   | Xalostoc                           | Ecatepec de Morelos     | EDOMEX | 19.525995    | -99.0824      | 2160 m      |

\*Estaciones de monitoreo atmosférico con ubicación no especificada.

## **Elaboración de las bases de datos**

Las bases de datos que fueron ocupadas en este trabajo, fueron obtenidas de la página oficial de la Secretaria de Medio Ambiente de la CDMX. Se descargaron las bases de datos de los años 2010 al 2017 con las variables: O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, Temperatura, Humedad Relativa, Dirección y Velocidad de vientos.

Los registros generados por las estaciones de monitoreo atmosférico se realizan cada hora del día, es decir 24 registros diarios. Para este trabajo se decidió utilizar promedios diarios. Es decir, tener 365 registros de cada viable por año, generando bases de datos con un total de 2920 registros promedios por cada una de las variables previamente mencionadas del año 2010 al año 2017. Dando un total de 17, 520 registros promedios para realizar este estudio. Las bases de datos finales se estructuraron de acuerdo a los objetivos de cada modelo de estimación.

## **Análisis de regresión lineal múltiple en SAS**

Para este estudio se utilizaron las bases de datos de las estaciones de monitoreo de la REDMET y de la RAMA del año 2010 al año 2017. Posteriormente las bases de datos fueron cargadas al paquete estadístico SAS 9.4 para realizar el análisis de regresión lineal múltiple. Se tomaron como variables dependientes las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en las estaciones de monitoreo Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán y Montecillo cercanas a zonas rurales del Valle de México y como variables independientes las concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de monitoreo para determinar su posible correlación. El procedimiento de análisis se llevó a cabo sobre los datos de todos los años (2010-2017) comparando las concentraciones del mismo día entre todas las estaciones de monitoreo.

También se llevaron a cabo análisis tomando en cuenta un desfase de uno y dos días entre las concentraciones de la variable dependiente y las concentraciones de las variables independientes. Lo anterior, con el objetivo de determinar si existe algún nivel de correlación incluso después de uno o dos días posterior a su emisión.

En cada una de las bases de datos analizadas se realizó el mismo procedimiento el cual consiste en la siguiente metodología:

1. Se eligió la variable dependiente ( $O_3$  y  $NO_2$ ) para generar su modelo de regresión.
2. Para asegurarse que las estaciones y sus variables presenten la menor variación entre del modelo y las estimaciones se utilizó procedimiento “STEPWISE” con el objetivo de seleccionar las estaciones y variables independientes ( $NO_2$ ,  $O_3$  y/o Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad de Vientos y Dirección de Vientos) que fuesen más significativas con la variable dependiente ya sea  $NO_2$  u  $O_3$ . Además, se consideraron los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para observar que porcentaje de la variación de la variable dependiente es explicada por las variables independientes.
3. La adición de cada variable al modelo de regresión está basada de acuerdo a su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) con respecto a las variables independientes ya sea  $O_3$ ,  $NO_2$  y/o variables meteorológicas dependiendo del modelo de estimación, buscando que cada una de las variables contribuya en alcanzar el mayor grado de  $R^2$  posible.
4. A través de la ejecución del comando “PROC GLM”, se compararon una por una todas las variables independientes y las variables dependientes ( $NO_2$ ,  $O_3$ ) de cada una de las estaciones de la REDMET y de la RAMA, excepto la variable dependiente.
5. Posterior a la obtención de las estaciones que mejor explicaron la variable dependiente, se prosiguió a la elaboración de los modelos de estimación, un modelo por estación.

### **Validación de los modelos de estimación**

1. Se asignó a cada una de las estaciones de los diferentes modelos de estimación las concentraciones promedio, ya sea  $O_3$ ,  $NO_2$  o variables meteorológicas registradas por la

RAMA o la REDMET. Sin embargo, ante la falta de registros de contaminantes o variables meteorológicas, se optó por el uso del promedio de la variable en cuestión para conformar en su totalidad los modelos de estimación.

2. Se eligieron 10 fechas de manera aleatoria entre los años 2010 y 2018 para determinar el comportamiento y confiabilidad de cada uno de los modelos (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Fechas seleccionadas para evaluación de los modelos de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>.

|                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 18 de febrero del 2010 | 7 de agosto del 2015  |
| 19 de marzo del 2011   | 6 de octubre del 2016 |
| 7 de abril del 2012    | 2 de julio del 2017   |
| 10 de mayo del 2013    | 10 de enero 2018      |
| 17 de junio del 2014   | 16 noviembre 2018     |

3. En el caso particular de los modelos con desfase de un día y dos días en donde solo participan las variables O<sub>3</sub> o NO<sub>2</sub>. Se les fueron asignadas las concentraciones de las mismas variables, las cuales fueron registradas uno o en su caso hasta dos días antes a partir de la fecha que se desea estimar.
4. Posterior a la obtención de todos los datos que contempla cada uno de los modelos, se procedió a la multiplicación de cada una de las estimaciones generadas en SAS contra las concentraciones promedio de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> o variable meteorológica presentes en cada una de las estaciones que integran los modelos.
5. Finalmente se realiza una suma o se resta de los valores generados para obtener el valor promedio diario de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> o variable ambiental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los modelos de estimación de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> que obtuvieron un ajuste adecuado, el resto de los modelos se encuentran en la sección de ANEXOS.

### **Estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con base en concentraciones de O<sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA**

Las principales estaciones que contribuyeron a la explicación de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación AJM fueron: [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]LPR y [O<sub>3</sub>]TLA. cuya correlación es significativa ( $\alpha < 0.05$ ). De igual manera, el elevado valor de R<sup>2</sup> es 0.9139 señala que la variación de O<sub>3</sub> en AJM es explicada en un 91% por la variabilidad del O<sub>3</sub> en las estaciones mencionadas. Por otro lado, el valor de la RMSE es 4.4289 y expone baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

#### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ AJM} = 0.4630 ([O_3] \text{ PED}) + 0.1887 ([O_3] \text{ AJU}) + 0.3304 ([O_3] \text{ SFE}) - 0.0540 ([O_3] \text{ COY}) + 0.3120 ([O_3] \text{ CHO}) - 0.0287 ([O_3] \text{ LPR}) - 0.0565 ([O_3] \text{ TLA})$$

Las estaciones [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]SFE y [O<sub>3</sub>]CHO, presentan una correlación directa con respecto [O<sub>3</sub>]AJM; es decir, que al incrementar las concentraciones de O<sub>3</sub> en estas estaciones, aumentan las concentraciones de [O<sub>3</sub>]AJM.

El comportamiento anterior puede ser un reflejo en algunos casos por la cercanía entre estaciones, tal es el caso de las estaciones [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]AJU y [O<sub>3</sub>]SFE, con respecto a MON donde existe una gran probabilidad de que las concentraciones de O<sub>3</sub> presenten concentraciones afines ya que todas estas estaciones se encuentran ubicadas en la zona sur del valle de México donde se ubican diversas zonas rurales en donde aún existen bosques, zonas de ganado y cultivo de avena, frijol, hortalizas y sorgo, todos ellos sensibles al O<sub>3</sub> que se deposita diariamente en esas regiones tal como lo reportó SEMARNAT (2016).

En el caso particular de la estación [O<sub>3</sub>]CHO, la correlación que existe con la estación AJM puede efecto del proceso de dispersión de O<sub>3</sub> por los vientos dominantes del Valle de México, el cual genera un arrastre de los contaminantes de la zona norte hasta la región sur del valle, y probablemente la dispersión de contaminantes presente cierta semejanza entre concentraciones de O<sub>3</sub> desplazadas debido a los vientos de valle que van más allá de las faldas del Ajusco principalmente por las tardes en donde dicho patrón de dispersión se asemejaría al reportado por Jáuregui (2000) y SEDEMA (2017).

Por su parte las estaciones de monitoreo [O<sub>3</sub>]LPR, [O<sub>3</sub>]COY y [O<sub>3</sub>]TLA presentan una relación inversa con respecto a las concentraciones registradas en la estación de monitoreo [O<sub>3</sub>]AJM. El comportamiento registrado en estas estaciones sería explicado por un desplazamiento de O<sub>3</sub> principalmente desde la zona norte hasta la zona sur del valle por los vientos dominantes del valle de México los cuales van del norte al sur tal como lo encontrado por Jáuregui (1993), propiciando que las concentraciones de O<sub>3</sub> en el norte del valle se dispersen y sufran una disminución en sus concentraciones y aumenten en el la región sur del valle, haciendo referencia que en algunos puntos de la ciudad las concentraciones de contaminantes atmosféricos aumentan y al mismo tiempo en otros sitios disminuyen sus concentraciones por influencia de los flujos de aire que se presentan de manera cotidiana en el valle de México señalado por Jazcilevich et al. (2002).

La validación del modelo de estimación [O<sub>3</sub>]AJM (Cuadro 3) obtuvo una media de 2.92 ppb. Por su parte, la desviación señala una elevada dispersión de los datos de  $\pm 10.13$ ppb con respecto a la media de los residuales que podría ser señalada como una alta dispersión, los valores obtenidos del R<sup>2</sup> y a la RMSE obtenidos inicialmente, generan la posibilidad de que el modelo obtenido no presenta un mal ajuste, por ello se puede considerar que el modelo genere estimaciones muy cercanas de las concentraciones de [O<sub>3</sub>]AJM, pese a su alta dispersión.

**(Cuadro 3).** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural AJM con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> PED | O <sub>3</sub> AJU | O <sub>3</sub> SFE | O <sub>3</sub> COY | O <sub>3</sub> CHO | O <sub>3</sub> LPR | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                   | Desviación de la estimación            |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 20.0158            | 6.5652             | 20.0158            | 5.9565             | 20.0158            | 20.0158            | 20.0158            | 21.3                                 | 20.0                                  | -1.3                                   |
| 19 marzo 2011     | 5.9565             | 29.3422            | 29.3422            | 28.5416            | 29.3422            | 29.3422            | 25.2083            | 23.3                                 | 29.3                                  | 6.0                                    |
| 7 abril 2012      | 30.4583            | 27.6694            | 33                 | 26.2083            | 19.6521            | 27.3333            | 29.3333            | 32.5                                 | 27.7                                  | -4.8                                   |
| 10 mayo 2013      | 63.4583            | 51.566             | 62.8333            | 45.875             | 57.8333            | 52.6666            | 43.9583            | 71.4                                 | 51.9                                  | -19.6                                  |
| 17 junio 2014     | 31.5599            | 34.9583            | 30.7916            | 31.5599            | 34.8333            | 31.5599            | 26.5416            | 38.1                                 | 31.6                                  | -6.6                                   |
| 7 agosto 2015     | 38.875             | 44.1666            | 41                 | 34.9640            | 30.25              | 28.875             | 30.875             | 44.8566                              | 54.7083                               | 9.8517                                 |
| 6 octubre 2016    | 24.7916            | 28.6666            | 23.6086            | 27.1666            | 7.2                | 24.2083            | 17.9583            | 23.7582                              | 32.5                                  | 8.7418                                 |
| 2 julio 2017      | 27.6               | 24.7               | 21.4166            | 21.5416            | 26.9583            | 26.5263            | 22                 | 29.8                                 | 33                                    | 3.2                                    |
| 10 enero 2018     | 42.9583            | 47.8333            | 45.125             | 32.5467            | 32.5467            | 30.875             | 19.7391            | 50.2                                 | 33.9090                               | -16.3                                  |
| 16 noviembre 2018 | 30.9166            | 28.75              | 25.375             | 22.0536            | 16.9583            | 19.875             | 21.45              | 30.4                                 | 22.1                                  | -8.4                                   |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | <b><math>\bar{x}</math>=36.6 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 33.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= -2.92 ppb</b> |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                                      |                                       | <b>s =±10.13 ppb</b>                   |

\*Concentraciones en partes por billón (ppb)

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en concentraciones de O<sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA**

Las estaciones de monitoreo que mayor relación con la estación AJM fueron las estaciones [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>] INN, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]ACOL, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]CUT. Al ejecutar el procedimiento GLM la salida de SAS señaló relación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) entre las variables independientes y la variable dependiente, es decir la estación CUA. Con la información mencionada se puede rechazar la hipótesis nula debido a la existencia de una entre estaciones.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9234 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en CUA es explicada en un 92% por la variación de O<sub>3</sub> en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 3.86 y sugiere un ajuste adecuado del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUA} = 0.1565 ([O_3] \text{ TLA}) - 0.1971 ([O_3] \text{ INN}) - 0.3048 ([O_3] \text{ CHO}) + 0.3501 ([O_3] \text{ ACOL}) + 0.3477 ([O_3] \text{ AJM}) + 0.1217 ([O_3] \text{ AJU}) + 0.2216 ([O_3] \text{ SFE}) + 0.1911 ([O_3] \text{ MER}) + 0.3656 ([O_3] \text{ FAC}) - 0.222 ([O_3] \text{ CUT})$$

Con base en los resultados obtenidos se observa que las estaciones [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]ACOL, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]SFE y [O<sub>3</sub>]MER, presentan una relación directa con respecto la estación CUA. En el caso de las correlaciones de las estaciones [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]AJU y [O<sub>3</sub>]SFE su variable explicativa es la cercanía entre estas estaciones con respecto a la estación CUA. Dicha variable genera una mínima diferencia entre las concentraciones registradas en todas las estaciones, puesto que ante cualquier cambio en las concentraciones de O<sub>3</sub> en la atmosfera, todas las estaciones presentan un patrón muy similar.

Por su parte, la correlación directa expresada por las estaciones [O<sub>3</sub>]ACOL, [O<sub>3</sub>]TLA y [O<sub>3</sub>]MR, puede derivarse por un efecto de dispersión de las de O<sub>3</sub> en prácticamente todo el Valle de México,

puesto que las estaciones [O<sub>3</sub>]ACOL y [O<sub>3</sub>]TLA se ubican al norte del valle, mientras que [O<sub>3</sub>]MER se ubica al centro y por último, la estación [O<sub>3</sub>]CUA se ubica en la región sur del valle. El efecto de dispersión del O<sub>3</sub> estaría estrechamente relacionado con el movimiento de los vientos dominantes del Valle de México, que desplazan principalmente del norte al sur del valle patrón similar a lo reportado por Jáuregui (1993).

En cuanto a las estaciones [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]CHO y [O<sub>3</sub>]FAC presentan una correlación inversa con respecto a la estación CUA. Este patrón de comportamiento es un reflejo del evidente movimiento constante de los contaminantes atmosféricos, lo que causa que las concentraciones de O<sub>3</sub> aumenten o disminuyan en ciertos puntos de la ciudad y las zonas rurales alrededor (Jazcilevich et al. 2002).

La validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>]CUA usado en diferentes periodos entre los años 2010 y 2018 (Cuadro 4) obtuvo una media de los residuales de 3.79 ppb y la desviación estándar obtuvo un valor de 5.77 ppb. Los resultados señalan que el modelo presenta una dispersión relativamente baja de  $\pm 5.77$  ppb con respecto con a su media aritmética y se puede considerar que el modelo presenta un ajuste adecuado para poder estimar las concentraciones de [O<sub>3</sub>]en la estación rural CUA.

**Cuadro 4.** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUA con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> CHO | O <sub>3</sub> ACOL | O <sub>3</sub> AJM | O <sub>3</sub> AJU | O <sub>3</sub> SFE | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> FAC | O <sub>3</sub> CUT | O <sub>3</sub> Modelo                 | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación           |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 20.0158            | 20.0158            | 20.0158            | 20.0158             | 20.0158            | 20.0158            | 20.0158            | 5.9565             | 7.5833             | 20.0158            | 13.4                                  | 16.9565                              | 3.6                                   |
| 19 marzo 2011     | 25.2083            | 29.3422            | 38.5               | 34.5833             | 29.3422            | 29.3422            | 29.3422            | 29.3422            | 23.4583            | 29.3422            | 27.5                                  | 39                                   | 11.5                                  |
| 7 abril 2012      | 29.3333            | 27.6694            | 19.6521            | 24.8333             | 27.6694            | 27.6694            | 33                 | 24.0833            | 30.0416            | 24.6694            | 32.3                                  | 28.9                                 | -3.4                                  |
| 10 mayo 2013      | 43.9583            | 51.866             | 57.8333            | 59.58333            | 51.866             | 51.866             | 62.8333            | 51                 | 51.7916            | 46.4586            | 56.5                                  | 69                                   | 12.5                                  |
| 17 junio 2014     | 26.5416            | 31.5599            | 30.7916            | 30.4583             | 31.5599            | 31.599             | 31.599             | 27.6086            | 33.6818            | 24.95              | 33.1                                  | 41                                   | 7.9                                   |
| 7 agosto 2015     | 30.875             | 34.964             | 30.25              | 32.0833             | 54.7083            | 44.1666            | 41                 | 31.4166            | 36.913             | 29.5833            | 46.4                                  | 44.2083                              | -2.1917                               |
| 6 octubre 2016    | 17.9583            | 29.125             | 7.2                | 22.9903             | 32.5               | 28.6666            | 23.6086            | 1.4285             | 23.4583            | 18.9583            | 27.6                                  | 27.2028                              | -0.3917                               |
| 2 julio 17        | 22                 | 25.2727            | 26.9583            | 25.7222             | 33                 | 24.7619            | 21.4166            | 21.625             | 26.2173            | 24.6363            | 26.7                                  | 26.4                                 | -0.4                                  |
| 10 enero 2018     | 19.7391            | 58.5416            | 32.5467            | 9.1666              | 33.909             | 47.8333            | 45.125             | 26.3333            | 25.9565            | 27.5               | 20.9                                  | 21.6666                              | 0.8                                   |
| 16 noviembre 2018 | 21.45              | 32.3333            | 16.9583            | 20.9583             | 22.0536            | 28.75              | 25.375             | 18.75              | 23.6842            | 29.8333            | 21.6                                  | 29.4583                              | -7.8583                               |
|                   |                    |                    |                    |                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    | <b><math>\bar{x}</math> =30.6 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=34.4 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 3.79 ppb</b> |
|                   |                    |                    |                    |                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                                       |                                      | <b>s = ±5.77 ppb</b>                  |

\*Concentraciones en partes por billón (ppb)

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con base en concentraciones de O<sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA**

El grupo de estaciones [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]MGH, [O<sub>3</sub>]TLI, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]VIF fueron la que mayor relación presentaron con la estación CUT, registraron una relación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con respecto a la variable dependiente.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8809 señalando que la variación de O<sub>3</sub> en CUT es explicada en un 88% por la variación de O<sub>3</sub> en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 3.47 lo que indica un ajuste óptimo del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre las observaciones y valores estimados. El modelo incluye los coeficiente de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ Cuautitlán} = 0.0405 ([O_3] \text{ MPA}) - 0.2101 ([O_3] \text{ CAM}) + 0.2424 ([O_3] \text{ TLA}) + 0.3347 ([O_3] \text{ MGH}) + 0.3575 ([O_3] \text{ TLI}) - 0.1136 ([O_3] \text{ CCA}) - 0.0617 ([O_3] \text{ AJM}) + 0.0927 ([O_3] \text{ MER}) + 0.2445 ([O_3] \text{ VIF})$$

Las estimaciones de las estaciones [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]MGH, [O<sub>3</sub>]TLI, [O<sub>3</sub>]MER, y [O<sub>3</sub>]VIF presentan una correlación directa con respecto CUT. En cuanto a la relación de las estaciones [O<sub>3</sub>]TLI y [O<sub>3</sub>]VIF el factor explicativo se sustenta por la cercanía entre estaciones y a la posibilidad de un mismo impacto sobre las concentraciones de O<sub>3</sub> en la región norte del Valle de México.

Por su parte, las estaciones [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]MGH y [O<sub>3</sub>]MER, establecen su relación basada por la posible presencia de concentraciones de O<sub>3</sub> de manera análoga en estas estaciones, lo cual infiere en parte la posibilidad de una dispersión análoga de los vientos (Jazcilevich et al. 2002), aunque ciertamente existe la posibilidad de que otras variables meteorológicas posean influencia sobre dicha relación.

Por último, las estaciones  $[O_3]$ CAM,  $[O_3]$ AJM y  $[O_3]$ CCA, presentan una correlación inversa. Su correlación se basaría principalmente al efecto de variables meteorológicas, debido a que ante la presencia de mayor o menor actividad de estas variables las concentraciones de  $O_3$  aumentan o disminuyen. Esta relación inversa, apuntaría a que en las estaciones CAM AJM y CC, se presenta una menor temperatura, mayor porcentaje de humedad y menos movimiento de los vientos, mientras que en la estación CUT se presentan condiciones totalmente inversas, es decir, mayores temperaturas, menores porcentajes de humedad y un mayor desplazamiento de los vientos como lo reportado por Novoa et al. (2014).

La validación del modelo de estimación de  $[O_3]$  (Cuadro 5) obtuvo una media residual de 9.11 ppb y una desviación estándar de  $\pm 7.96$  ppb. Los resultados previos señalan que existe una dispersión baja de los datos con respecto a su media. De manera que, con base a la desviación estándar y la RMSE se puede concluir que el modelo de estimación presentado tiene un ajuste adecuado para la estimación de las concentraciones de  $[O_3]$ CUT.

**Cuadro 5.** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUT con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> MPA | O <sub>3</sub> CAM | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> MGH | O <sub>3</sub> TLI | O <sub>3</sub> CCA | O <sub>3</sub> AJM | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> VIF | O <sub>3</sub> Modelo                 | O <sub>3</sub> RAMA                   | Desviación<br>de la<br>estimación     |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 20.0158            | 20.0158            | 12.3888            | 20.0158            | 20.0158            | 20.0158            | 20.0158            | 5.0833             | 20.0158            | 15.3                                  | 20.0                                  | 4.7                                   |
| 19 marzo 2011     | 29.3422            | 29.3422            | 25.2083            | 29.3422            | 29.3422            | 29.3422            | 29.3422            | 23.4583            | 29.3422            | 25.6                                  | 29.3                                  | 3.7                                   |
| 7 abril 2012      | 27.66947           | 26.0833            | 29.3333            | 27.66947           | 31.4166            | 27.66947           | 27.66947           | 24.0833            | 34.5               | 29.1                                  | 27.7                                  | -1.5                                  |
| 10 mayo 2013      | 51.866             | 47.4583            | 43.9583            | 51.866             | 49.2916            | 51.866             | 51.866             | 51                 | 51.2916            | 45.9                                  | 51.9                                  | 5.9                                   |
| 17 junio 2014     | 31.5599            | 30.625             | 26.5416            | 31.5599            | 28.16666           | 31.5599            | 31.5599            | 27.6087            | 23.0769            | 24.6                                  | 31.6                                  | 7.0                                   |
| 7 agosto 2015     | 34.964             | 31.625             | 30.875             | 31.4782            | 35.125             | 36.6666            | 54.7083            | 31.4166            | 37.7083            | 29.9                                  | 54.7                                  | 24.8                                  |
| 6 octubre 2016    | 33.4583            | 18.6666            | 17.9583            | 21.125             | 19.9583            | 26.125             | 28.6666            | 1.4285             | 21.9166            | 16.7                                  | 32.5                                  | 15.8                                  |
| 2 julio 2017      | 34.875             | 23.75              | 22                 | 20.7142            | 23.3043            | 26.5               | 33                 | 21.625             | 23.3478            | 19.7                                  | 33                                    | 13.3                                  |
| 10 enero 2018     | 58.8               | 32.5467            | 19.7391            | 27.625             | 00.7083            | 32.5467            | 33.9090            | 26.3333            | 20.25              | 18.9                                  | 33.9                                  | 15.3                                  |
| 16 noviembre 2018 | 38.9583            | 19.4583            | 21.45              | 20.4166            | 21.5416            | 21.5833            | 22.0536            | 18.75              | 19.625             | 19.9                                  | 22.1                                  | 2.1                                   |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    | <b><math>\bar{x}</math>= 24.6 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 33.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 9.11 ppb</b> |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                                       |                                       | <b>s= ±7.96 ppb</b>                   |

\*Concentraciones en partes por billón (ppb)

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con base en concentraciones de O<sub>3</sub> en otras estaciones de la RAMA**

Las estaciones con mayor relación con el O<sub>3</sub> registrado en la estación MON fueron las estaciones [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]ACOL fueron las que mejor se ajustaron para dar explicación sobre [O<sub>3</sub>]MON, ya que lograron establecer una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con [O<sub>3</sub>]MON. En otro aspecto, el valor de R<sup>2</sup> revela primeramente un ajuste adecuado del modelo. De igual manera el valor de RMSE señala un bajo porcentaje de dispersión entre los datos originales y los estimados, lo que apunta un buen ajuste del modelo [O<sub>3</sub>]MON.

El valor de R<sup>2</sup> es 0.8481 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en MON se explica en un 84% por la variación de O<sub>3</sub> en las estaciones citadas previamente, el valor de la RMSE es 3.35 señalando un ajuste adecuado del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre observaciones y valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ MON} = 0.0767 ([O_3] \text{ UAX}) - 0.077 ([O_3] \text{ BJU}) - 0.062 ([O_3] \text{ COY}) + 0.4410 ([O_3] \text{ NEZ}) - 0.039 ([O_3] \text{ SAG}) + 0.1999 ([O_3] \text{ CHO}) + 0.1043 ([O_3] \text{ MER}) + 0.2685 ([O_3] \text{ ACOL})$$

Las estaciones de monitoreo atmosférico [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]MER y [O<sub>3</sub>]ACOL, presentaron una correlación directa con respecto a la estación MON. El factor de proximidad entre estaciones podría ser la variable explicativa que justifica la incorporación de las estaciones [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]CHO y [O<sub>3</sub>]ACOL, donde es altamente probable que las concentraciones presentan un comportamiento muy similar. El efecto anterior se puede ligar a las variables meteorológicas debido al impacto generado por su influencia sobre concentraciones y distribución de O<sub>3</sub> principalmente cuando la temperatura es alta y la humedad relativa es baja como lo reportó Franco (2014).

En el caso de la correlación que presentan la estación [O<sub>3</sub>]ACOL ubicada al norte del valle y [O<sub>3</sub>]UAX ubicada entre la región centro y sur del valle, puede explicarse por la presencia de

concentraciones similares de O<sub>3</sub> en ambos los sitios con respecto a la estación MON, así como la posibilidad de una distribución análoga por dispersión de los vientos de las concentraciones de O<sub>3</sub> el mismo día de su registro en gran parte del Valle de México.

Contrariamente, la correlación inversa de las estaciones [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]COY y [O<sub>3</sub>]SAG se puede explicar por el aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> generado por la presencia y descomposición de NO<sub>2</sub> en la atmosfera. Al mismo tiempo en la estación MON se produce la disminución de O<sub>3</sub> debido en parte a su periodo de vida corta en la atmosfera y por otro lado al desplazamiento de las concentraciones de O<sub>3</sub> que se da de manera natural por efecto de los vientos locales tal como lo encontrado por Jazcilevich et al. (2002). El comportamiento anterior demuestra la existencia de un componente cíclico diario, en el cual primero se genera un aumento de O<sub>3</sub> en las estaciones BJU, COY y SAG y posteriormente se produce un aumento de O<sub>3</sub> en MON.

El proceso de validación modelo de estimación de [O<sub>3</sub>]MON (Cuadro 6), puntualizo una desviación estándar de  $\pm 10.27$  ppb lo cual quiere decir que existe dispersión media de los datos con respecto a la media residual con valor de 7.95ppb. Dicha afirmación, en conjunto con el valor de la RMSE concluye que el modelo presenta un ajuste óptimo con respecto a los datos observados y, por lo tanto, es un modelo confiable para la estimación de las concentraciones de [O<sub>3</sub>]MON.

**Cuadro 6.** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural MON con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> UAX | O <sub>3</sub> BJU | O <sub>3</sub> COY | O <sub>3</sub> NEZ | O <sub>3</sub> SAG | O <sub>3</sub> CHO | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> ACOL | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación                           |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 20.0158            | 20.0158            | 6.5652             | 20.0158            | 11.375             | 20.0158            | 5.0833             | 20.0416             | 17.9                                 | 20.0                                 | 2.1   |
| 19 marzo 2011     | 29.3422            | 29.3422            | 28.5416            | 29.3422            | 24.5416            | 38.5               | 23.4583            | 34.5833             | 29.6                                 | 29.3                                 | -0.3  |
| 7 abril 2012      | 27.6694            | 27.6694            | 26.2083            | 25.125             | 26.625             | 19.6215            | 24.0833            | 24.8333             | 21.5                                 | 21.3                                 | -0.2  |
| 10 mayo 2013      | 34.75              | 51.866             | 45.875             | 36.125             | 51.7916            | 57.8333            | 51                 | 59.5833             | 42.6                                 | 74.1                                 | 31.5  |
| 17 junio 2014     | 35.3913            | 31.3               | 34.9583            | 34.2083            | 31.8333            | 30.7916            | 27.6086            | 30.4583             | 29.8                                 | 36.2                                 | 7.0   |
| 7 agosto 2015     | 40.0               | 31.5909            | 34.964             | 26.1904            | 29.5               | 30.25              | 31.41666           | 32.0833             | 26.8                                 | 29.6                                 | 2.8   |
| 6 octubre 2016    | 26.7083            | 25.9583            | 27.1666            | 23.4166            | 20                 | 7.2                | 1.4285             | 22.9903             | 15.7                                 | 23.3                                 | 7.6   |
| 2 julio 2017      | 25.875             | 37.1875            | 21.5416            | 15.0833            | 21.9166            | 26.9583            | 21.625             | 25.7222             | 18.1                                 | 22.3                                 | 4.2   |
| 10 enero 2018     | 44.4166            | 36.625             | 32.5467            | 25                 | 29.5238            | 32.5467            | 26.3333            | 9.1666              | 20.2                                 | 41.1                                 | 20.9  |
| 16 noviembre 2018 | 22.7083            | 20.875             | 22.0536            | 20.9166            | 18.5416            | 16.9583            | 18.75              | 9.16666             | 18.2                                 | 22.1                                 | 3.8   |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                     | <b><math>\bar{x}</math>=24.0 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=31.9 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 7.95</b><br><b>S=± 10.27</b> |

\*Concentraciones en partes por billón (ppb)

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con base en registros O<sub>3</sub> de la RAMA y variables meteorológicas la REDMET**

El análisis realizado en SAS indicó que las estaciones de monitoreo y las variables meteorológicas [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]LPR, [O<sub>3</sub>]SFE, HrSFE, HrPED, TemSFE, DvSFE, VvSFE, presentaron mayor correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con las concentraciones de [O<sub>3</sub>]AJM.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9246 exponiendo que la variabilidad de NO<sub>2</sub> en la estación AJM es explicada en un 92% por la variación del O<sub>3</sub> y de las variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Mientras que, el valor de la RMSE es 4.0787 sugiere baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ AJM} = 0.4740 ([O_3] \text{ PED}) + 0.0722 ([O_3] \text{ COY}) + 0.2467 ([O_3] \text{ CHO}) + 0.0013 ([O_3] \text{ LPR}) + 0.2455 ([O_3] \text{ SFE}) - 0.4477 (\text{Hr SFE}) + 0.3917 (\text{Hr PED}) + 0.4680 (\text{Tem SFE}) + 0.0073 (\text{Dv SFE}) - 1.7587 (\text{Vv SFE})$$

Las estimaciones generadas por SAS señalan que las estaciones y variables meteorológicas [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]LPR y [O<sub>3</sub>]SFE, HrPED, TemSFE y DvSFE presentan una correlación directa con respecto a [O<sub>3</sub>]AJM.

La variable explicativa para la correlación que presentan estaciones [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]COY y [O<sub>3</sub>]SFE, es la variable vecindad ya que todas se ubican en la zona sur del Valle de México, donde es muy probable que las concentraciones de O<sub>3</sub> no presenten cambios drásticos incluida la estación AJM, y ante una posible variación de O<sub>3</sub> en la atmosfera las concentraciones en todas las estaciones manifiesten un patrón muy semejante.

Por otro lado, la relación directa expresada por las variables meteorológicas TemSFE y DvSFE podrían presentarse por la cercanía entre estaciones en donde las variables meteorológicas establecen un efecto sobre [O<sub>3</sub>]AJM en donde ante un aumento de temperatura mayor serán las concentraciones de [O<sub>3</sub>]AJM tal como lo reportaron López et al. (2008), Cano et al. (2016). Mientras que el aumento en los grados de la dirección de los vientos puede indicar que parte de las

concentraciones de O<sub>3</sub> registrada en SFE sean dirigidos hacia la estación AJM e incluso arrastrar O<sub>3</sub> proveniente de otros puntos del Valle de México, como lo pueden ser las estaciones CUA, MGH y FAC, ubicadas más hacia el norte.

La HrPED indica una relación positiva con [O<sub>3</sub>]AJM, la relación que se presenta en este caso se puede explicar por la presencia de mayor humedad relativa en la estación PED provocada por mayores concentraciones de nubosidad, precipitaciones y descensos de temperatura, mientras que en la zona de AJM se registran condiciones totalmente opuestas generando el aumento de O<sub>3</sub> debido a que se presentan las condiciones meteorológicas que generan una mayor formación de O<sub>3</sub> en la atmosfera comportamiento similar al señalado por Fernández et al. (2011).

En el caso de la correlación directa de las estaciones [O<sub>3</sub>]NEZ ubicada al este, [O<sub>3</sub>]CHO ubicada al sureste y [O<sub>3</sub>]LPR ubicada en la zona norte del Valle de México puede ser resultado de una dispersión relativamente homogénea de O<sub>3</sub>, en prácticamente todo el Valle de México, ante la presencia de esta variable explicativa se hablaría explícitamente de la participación de algunas variables meteorológicas principalmente de los vientos los cuales ejercen un efecto de dilución y dispersión del O<sub>3</sub> patrón de comportamiento similar al indicado por Cano et al. (2016).

De manera contraria las variables meteorológicas HrSFE y VvSFE presentan una correlación inversa con respecto a la estación AJM. En primer lugar, la humedad relativa en la estación SFE, establece que ante un aumento de humedad relativa en SFE, se produzca la disminución del [O<sub>3</sub>]AJM, esta conducta señala mayores episodios de precipitaciones y nubosidad en SFE en comparación con la estación AJM, esta posibilidad estaría probablemente relacionada en parte al movimiento de los vientos, pero también existe la posibilidad que el factor altitud sea un factor que genere una mayor o menor presencia de nubes en cada una de las estaciones de monitoreo.

Por su parte VvSFE indica que ante el aumento en la velocidad de los vientos en SFE, el O<sub>3</sub> en AJM se dispersan hacia otros puntos del Valle de México, dicha afirmación se sustenta que ante el aumento del movimiento de los vientos se genera dispersión de los contaminantes atmosféricos tal como lo presentado por Jazcilevich et al. (2002).

Los resultados de validación del modelo [O<sub>3</sub>]AJM (Cuadro 7), muestran una media residual de -0.73 ppb y una desviación estándar de ±9.62 ppb, este valor podría señalar la existencia de una

dispersión relativamente alta. Sin embargo, las medias del modelo y de las observaciones presentan mínimas diferencias por lo que el modelo se considera confiable para estimar las concentraciones de [O<sub>3</sub>]AJM.

**Cuadro 7.** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural AJM con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | O <sub>3</sub> PED | O <sub>3</sub> COY | O <sub>3</sub> CHO | O <sub>3</sub> LPR | O <sub>3</sub> SFE | HrSFE   | HrPED   | TemSFE  | DvSFE    | VvSFE  | O <sub>3</sub> Modelo               | O <sub>3</sub> RAMA                   | Desviación de la estimación            |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|----------|--------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 5.9565             | 6.5652             | 10.7821            | 10.7821            | 10.7821            | 85.8083 | 85.8083 | 9.7741  | 189.6333 | 1.3908 | 7.3                                 | 10.8                                  | 3.5                                    |
| 19 marzo 2011     | 35.4166            | 28.5416            | 38.5               | 29.3422            | 29.3422            | 23.5833 | 15.875  | 16.9962 | 188.7673 | 2.0526 | 37.0                                | 29.3                                  | -7.6                                   |
| 7 abril 2012      | 30.4583            | 26.2083            | 19.6521            | 27.3333            | 33                 | 25      | 25.3333 | 16.7166 | 202.25   | 2.9208 | 32.2                                | 27.7                                  | -4.5                                   |
| 10 mayo 2013      | 63.4583            | 45.875             | 57.8333            | 52.6666            | 62.8333            | 21.4166 | 26.3333 | 19.625  | 195.875  | 3.4    | 68.5                                | 51.9                                  | -16.6                                  |
| 17 junio 2014     | 34.8333            | 34.9583            | 30.7916            | 31.3               | 31.1               | 77.9166 | 65.0416 | 16.1708 | 169      | 1.9541 | 30.3                                | 31.3                                  | 1.0                                    |
| 7 agosto 2015     | 38.875             | 34.9640            | 30.25              | 28.875             | 41                 | 66.6666 | 64.5416 | 16.1333 | 187.875  | 2.3541 | 38.7                                | 54.7                                  | 16.0                                   |
| 6 octubre 2016    | 24.7916            | 27.1666            | 24.2083            | 7.2                | 24.2083            | 85.875  | 82.4166 | 17.0291 | 134.7083 | 2.3458 | 24.3                                | 32.5                                  | 8.2                                    |
| 2 julio 2017      | 27.625             | 21.5416            | 26.9583            | 26.5263            | 21.4166            | 75.9583 | 73.9583 | 15.2375 | 194.5    | 1.8458 | 26.9                                | 33.0                                  | 6.1                                    |
| 10 enero 2018     | 42.9583            | 32.5467            | 32.5467            | 30.875             | 45.125             | 30.083  | 30.75   | 13.7583 | 174.75   | 2.5041 | 43.7                                | 33.9                                  | -9.8                                   |
| 16 noviembre 2018 | 30.9166            | 22.0536            | 16.9583            | 19.875             | 25.375             | 57.0169 | 54.9166 | 10.85   | 167.125  | 1.9791 | 25.5                                | 22.1                                  | -3.4                                   |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |         |         |         |          |        | <b><math>\bar{x}</math>=33.4ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 32.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=- 0.73 ppb</b> |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |         |         |         |          |        |                                     |                                       | <b>s=±9.62 ppb</b>                     |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET**

Las estaciones y variables meteorológicas [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]SJA, HrMER, TemCUA, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]TLI y [O<sub>3</sub>]CAM revelan la existencia de una relación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con la variable dependiente. Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8156 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en la estación CUT es explicada en un 81% por la variación de O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 3.82 y señala un ajuste una baja dispersión entre los datos observados y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUT} = 0.034 ([O_3] \text{ SFE}) - 0.0417 ([O_3] \text{ MER}) + 0.1240 ([O_3] \text{ FAC}) - 0.0121 ([O_3] \text{ SJA}) - 0.0347 (\text{Hr MER}) + 0.3301 (\text{Tem CUA}) + 0.049 ([O_3] \text{ INN}) + 0.1385 ([O_3] \text{ XAL}) + 0.3528 ([O_3] \text{ TLI}) + 0.1474 ([O_3] \text{ CAM})$$

El modelo de estimación de la concentración de O<sub>3</sub> de la estación CUT indica que las estaciones, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>] INN, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]TLI, [O<sub>3</sub>]CAM, y TemCUA presentan una relación directa con respecto a la estación CUT.

La relación mostrada por la estación [O<sub>3</sub>]TLI se puede explicar esencialmente por la cercanía que presenta la estación TLI con la estación CUT, en donde ante cualquier aumento de O<sub>3</sub> en la región norte donde se ubica la estación TLI y la estación CUT ocurre un efecto similar sobre las concentraciones de O<sub>3</sub>.

Por otro lado, la relación positiva de las estaciones [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>] INN, [O<sub>3</sub>]XAL y [O<sub>3</sub>]CAM indicaría que en gran parte del Valle de México el comportamiento de las concentraciones de O<sub>3</sub> presenta una conducta homóloga, en donde no se descarta influencia de variables meteorológicas sobre la dispersión del O<sub>3</sub> tal como lo reportado por Franco (2014).

La correlación de TemCUA genera la teoría de que, tanto en la zona sur como el valle de México, la temperatura se comporta de manera muy similar, ya que ante un aumento de CUT ubicada al norte del valle, se presenta una elevación de temperatura en la estación CUA, este patrón puede estar altamente correlacionado con algún efecto provocado por otras variables meteorológicas como los vientos y la humedad relativa del ambiente.

Por otro lado, HrMER señala una correlación inversa con  $[O_3]_{CUT}$ , lo cual sugiere que al generarse una disminución de humedad relativa en MER de las concentraciones de  $O_3$  en CUT aumenten, probablemente porque en CUT se presentan condiciones meteorológicas adecuadas para un aumento de  $O_3$  en esa zona. Mientras que en la estación MER se produzca una reducción de  $O_3$  debido a que la humedad relativa participa en procesos de destrucción del  $O_3$  como lo indican Fernández et al. (2011).

La estación  $[O_3]_{SJA}$  también presenta una correlación inversa, está señala que ante la disminución de  $O_3$  en la estación SJA, se genere un aumento del mismo contaminante en la estación CUT, por lo que se podría pensar que este efecto es resultado de la dispersión de contaminantes que generan los vientos dominantes de la región, recalando la posibilidad de que al algunos puntos del valle ciertas concentraciones de contaminantes atmosféricos aumentan y en otros puntos disminuyen por efecto de los vientos tal como lo encontrado por Jazcilevich et al. (2002).

El modelo de estimación de  $[O_3]_{CUT}$  en su proceso de validación (Cuadro 8), obtuvo una media de los residuales de 2.11ppb y una desviación estándar de  $\pm 3.54$  ppb, lo cual sugiere baja dispersión entre las estimaciones del modelo y los datos observados, idea apoyada por la mínima RMSE obtenida inicialmente y por lo tanto, se puede concluir que el modelo tiene un ajuste adecuado y es por ello es confiable para la estimación de las concentraciones de  $[O_3]_{CUT}$ .

**Cuadro 8.** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUT con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | O <sub>3</sub> SFE | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> FAC | O <sub>3</sub> SJA | HrMER   | TemCUA  | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> XAL | O <sub>3</sub> TLI | O <sub>3</sub> CAM | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación           |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 10.7821            | 5.0833             | 7.5833             | 10.7821            | 87.2916 | 9.7741  | 10.7821            | 10.7821            | 10.7821            | 10.7821            | 8.6                                  | 10.8                                 | 2.2                                   |
| 19 marzo 2011     | 29.3422            | 23.4583            | 30.625             | 29.3422            | 27.2916 | 15.4    | 29.3422            | 17.875             | 29.3422            | 29.3422            | 26.2                                 | 29.3                                 | 3.2                                   |
| 7 abril 2012      | 33.0               | 24.0833            | 30.0416            | 26.3333            | 28.7083 | 15.6625 | 27.6694            | 27.9166            | 31.4166            | 26.0833            | 27.8                                 | 27.7                                 | -0.2                                  |
| 10 mayo 2013      | 62.8333            | 51                 | 51.7916            | 48.1666            | 21.9166 | 17.65   | 51.8333            | 46.333             | 49.2916            | 47.4583            | 44.3                                 | 46.5                                 | 2.2                                   |
| 17 junio 2014     | 31.3               | 27.6086            | 33.6181            | 30.9565            | 65.8235 | 15.7125 | 31.3               | 28.8636            | 28.1666            | 30.625             | 26.6                                 | 25.0                                 | -1.7                                  |
| 7 agosto 2015     | 41                 | 31.4166            | 36.9130            | 35.3333            | 55.4782 | 15.3125 | 34.9640            | 26.5               | 35.125             | 31.125             | 29.8                                 | 29.6                                 | -0.2                                  |
| 6 octubre 2016    | 23.6086            | 1.4285             | 23.4583            | 22.8333            | 80.375  | 16.35   | 29.125             | 20.625             | 19.9583            | 18.6666            | 20.1                                 | 19.0                                 | -1.1                                  |
| 2 julio 2017      | 21.4166            | 21.625             | 26.2173            | 23.125             | 71.7083 | 14.075  | 25.2727            | 20.375             | 23.3043            | 23.75              | 20.7                                 | 24.6                                 | 3.9                                   |
| 10 enero 2018     | 45.125             | 26.3333            | 25.9565            | 32.5467            | 32.8333 | 13.1791 | 58.5416            | 28.375             | 20.7083            | 32.5467            | 25.4                                 | 27.5                                 | 2.1                                   |
| 16 noviembre 2018 | 25.375             | 18.875             | 23.6842            | 22.0536            | 55.4166 | 10.6291 | 32.3333            | 17.1666            | 21.5416            | 19.4583            | 18.8                                 | 29.5                                 | 10.7                                  |
|                   |                    |                    |                    |                    |         |         |                    |                    |                    |                    | <b><math>\bar{x}</math>=24.8 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=26.9 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 2.11 ppb</b> |
|                   |                    |                    |                    |                    |         |         |                    |                    |                    |                    |                                      |                                      | <b>s= ±3.54 ppb</b>                   |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s)-.

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET**

Para la estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación de monitoreo atmosférico CUT el programa SAS indico que las estaciones y variables meteorológicas los con mayor correlación son la estaciones [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>]SJA, [O<sub>3</sub>]SJA, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]COY, TemCUA, VvCUT, [O<sub>3</sub>]INN, confirmando una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) entre las variables independientes y la dependiente. Su R<sup>2</sup> y la RMSE indican buen ajuste del modelo y una baja desviación entre los estimadores y valores originales respectivamente (Figura 10).

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8309 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en CUA es explicada en un 83% por la variación de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas de las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 3.79 y sugiere un ajuste adecuado del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUT} = 0.0771 ([O_3] \text{ SFE}) + 0.0947 ([O_3] \text{ MER}) + 0.2969 ([O_3] \text{ FAC}) + 0.2430 ([NO_2] \text{ SJA}) + 0.2178 ([O_3] \text{ SJA}) - 0.0099 ([NO_2] \text{ SFE}) - 0.1972 ([NO_2] \text{ COY}) + 1.4225 (\text{Vv CUT}) + 0.4494 (\text{Tem CUA}) + 0.0648 ([O_3] \text{ INN})$$

Los resultados brindados por la salida de SAS, señalaron que las estaciones, [O<sub>3</sub>] SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>] FAC, [NO<sub>2</sub>] SJA, [O<sub>3</sub>] SJA, VvCUT, Tem CUA, [O<sub>3</sub>] INN presentan una relación directa con respecto a CUT. La relación directa registrada por las estaciones [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]SJA y [O<sub>3</sub>]INN, es indicativo que ante un aumento de O<sub>3</sub> en cualquiera de estas estaciones se produce un comportamiento similar sobre el O<sub>3</sub> en CUT, comportamiento en el cual no se descartar participación de variables meteorológicas como la temperatura y la humedad relativa debido al

impacto que registran sobre la formación, mientras que los vientos promueven su dispersión tal como lo reportó Rivera (2011).

La relación de las concentraciones de  $O_3$  con respecto al  $[NO_2]$  SJA podrían ser en primera instancia debido al efecto precursor del  $NO_2$  sobre el  $O_3$ , lo cual estaría ligado a un transporte de  $NO_2$  desde la estación SJA hasta la estación CUT, este comportamiento estaría estrechamente relacionado con los vientos locales del Valle de México.

Las variables meteorológicas  $Tem_{CUA}$  y  $Vv_{CUT}$  también presentan una relación positiva con respecto a la estación CUT, la cual puede ser producto del impacto que tiene la temperatura sobre la formación de  $O_3$  tal como lo señalan López et al. (2008) y Oookaa et al. (2011), mostrando en cierta medida un comportamiento homogéneo de la temperatura tanto en el norte como en el sur del Valle de México.

Por otra parte,  $Vv_{CUT}$  el comportamiento de los vientos en la misma estación CUT, presenta una conducta poco común debido a que ante una a mayor velocidad de los vientos en la estación CUT, las concentraciones de  $O_3$  aumenta. Esta conducta podría ser explicada a la probabilidad del movimiento de  $O_3$  proveniente desde otros puntos del Valle de México y se registren en la misma estación CUT.

Contrariamente  $[NO_2]$  SFE y  $[NO_2]$  COY, indican una relación inversa con el  $O_3$  de CUT. El comportamiento del  $NO_2$  relacionado por su papel como precursor mediante la reacción fotoquímica que genera el  $O_3$  tal como lo encontrado por Ballester (2005), es decir que ante la oxidación del  $NO_2$  en SFE y COY aumenta el  $O_3$  en CUT, lo que en parte podría generar la idea del movimiento de ciertas cantidades de  $NO_2$  desde SFE y COY hasta CUT donde se transforman en  $O_3$ , el resto del  $NO_2$  puede transformarse o trasladarse a otros puntos del Valle de México.

La validación del modelo  $[O_3]_{CUT}$  (Cuadro 9) indico tener una media residual de -4.60 ppb y una desviación estándar de  $\pm 3.88$  ppb. La información señala que existe poca dispersión entre los datos observados y los valores estimados y por ello se concluye que el modelo presenta un ajuste óptimo para poder estimar las concentraciones de  $[O_3]$  en la estación rural CUT.

**Cuadro 9.** Validación del modelo de estimación [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUT con base en concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

|                   | O <sub>3</sub> SFE | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> FAC | NO <sub>2</sub> SJA | O <sub>3</sub> SJA | NO <sub>2</sub> SFE | NO <sub>2</sub> COY | VvCUT  | TemCUA  | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> Modelo | O <sub>3</sub> RAMA | Desviación de la estimación |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------|---------|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|
| 18 febrero 2010   | 10.7821            | 5.0833             | 7.5833             | 30.7884             | 10.7821            | 30.7884             | 30.7884             | 1.3908 | 9.7741  | 10.7821            | 14.1                  | 10.8                | -3.3                        |
| 19 marzo 2011     | 29.3422            | 23.4583            | 30.625             | 30.7397             | 29.3422            | 30.7397             | 30.7397             | 2.0526 | 15.4    | 29.3422            | 32.8                  | 29.3                | -3.5                        |
| 7 abril 2012      | 33                 | 24.0833            | 30.0416            | 24.6666             | 26.3333            | 12.5652             | 21.9583             | 1.6958 | 15.6625 | 27.6694            | 32.3                  | 27.7                | -4.6                        |
| 10 mayo 2013      | 62.8333            | 51                 | 51.7916            | 50.4583             | 48.1666            | 22.875              | 46.5                | 1.6541 | 17.65   | 51.8660            | 52.1                  | 46.5                | -5.6                        |
| 17 junio 2014     | 31.3               | 27.6086            | 33.6818            | 23.5217             | 30.9565            | 21.3913             | 19.8613             | 1.7625 | 15.7125 | 31.3               | 35.0                  | 25.0                | -10.0                       |
| 7 agosto 2015     | 41                 | 31.4166            | 36.9130            | 24.6311             | 35.3333            | 24.6311             | 28.6666             | 1.4956 | 15.3125 | 34.9640            | 36.2                  | 29.6                | -6.6                        |
| 6 octubre 2016    | 23.6086            | 1.4285             | 23.4583            | 19.75               | 22.8333            | 20.7391             | 26.5416             | 2.2024 | 16.35   | 29.125             | 25.6                  | 19.0                | -6.7                        |
| 2 julio 2017      | 21.4166            | 21.625             | 26.2173            | 24.0833             | 23.125             | 14.0416             | 21.6956             | 1.6875 | 14.075  | 25.2727            | 28.3                  | 24.6                | -3.7                        |
| 10 enero 2018     | 45.125             | 26.3333            | 25.9565            | 45.8301             | 32.5467            | 35.5416             | 45.8301             | 1.5315 | 13.1791 | 58.5416            | 34.4                  | 27.5                | -6.9                        |
| 16 noviembre 2018 | 25.375             | 18.75              | 23.6842            | 32.2340             | 22.0536            | 32.2340             | 32.2340             | 1.025  | 10.6291 | 32.3333            | 25.1                  | 29.8                | 4.8                         |
|                   |                    |                    |                    |                     |                    |                     |                     |        |         |                    | $\bar{x}=31.6$ ppb    | $\bar{x}=27.0$ ppb  | $\bar{x}=-4.60$ ppb         |
|                   |                    |                    |                    |                     |                    |                     |                     |        |         |                    |                       |                     | $s=\pm 3.88$ ppb            |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET**

Con base en los resultados expuestos por SAS y el PROC GLM, las estaciones y variables meteorológicas [NO<sub>2</sub>]SJA [NO<sub>2</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]NEZ, HrHGM, HrMON, TemFAC, TemNED, TemPED, VvMON, expresan una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) entre las variables independientes y la dependiente. Además, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8367 exponiendo que la variación de O<sub>3</sub> en la estación MON es explicada en un 92% por la variación de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Asimismo, el valor de la RMSE es 4.2468 el cual indica baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ MON} = 0.0225 ([NO_2] \text{ ATIZA}) - 0.0106 ([NO_2] \text{ SJA}) + 0.3878 ([O_3] \text{ SAG}) - 0.0637 ([O_3] \text{ TLA}) + 0.5839 ([O_3] \text{ NEZ}) + 0.1162 (\text{Hr HGM}) - 0.1239 (\text{Hr MON}) + 0.3170 (\text{Tem FAC}) + 0.8314 (\text{Tem NEZ}) - 0.8378 (\text{Tem PED}) + 0.7780 (\text{Vv MON})$$

El modelo de estimación de la concentración de O<sub>3</sub> de la estación MON indica que las estaciones, [O<sub>3</sub>] SAG y [O<sub>3</sub>] NEZ, presentan una relación directa. Su comportamiento podría ser derivada de la cercanía que existe entre estas estaciones con respecto a MON en donde es muy probable que las concentraciones de O<sub>3</sub> sean similares.

La correlación entre las concentraciones de [NO<sub>2</sub>]ATIZA con respecto a la estación MON señala que ante el aumento de NO<sub>2</sub> en la atmosfera en la estación ATIZA, el O<sub>3</sub> de MON aumenta, comportamiento explicado en gran parte por la acción precursora del NO<sub>2</sub> que al descomponerse se forma O<sub>3</sub> comportamiento reportado por Musso et al. (2002). Sin embargo, el argumento anterior señala una correlación inversa entre ambos contaminantes, por lo que en este caso la correlación también puede atribuirse a la distancia que existe entre estaciones, ya que ATIZA se ubica al oeste mientras que MON se ubica al este del valle de México, por lo que pudiesen presentarse condiciones meteorológicas diferentes y por ello la correlación se presente de manera poco habitual.

Las variables meteorológicas HrHGM, TemFAC, TemNEZ y VvMON presentan relación positiva con respecto a la estación MON. La cual puede ser resultado del fuerte impacto que tienen las variables meteorológicas con respecto a la formación y dispersión del O<sub>3</sub> el cual se asemejaría al reportado por Franco (2014). Particularmente la Temperatura registrada en FAC y NEZ son indicativos de que ante el aumento de temperatura se produce un aumento de O<sub>3</sub> en MON, propiciado por una elevación similar en gran parte del Valle de México, especialmente se hablaría de la zona norte y este del valle.

Por otra parte, HrHGM, señalaría que en HGM existe mayores eventos de nubosidad y precipitación en comparación con los registrados en la estación MON, lo cual explicaría que ante un aumento en la humedad relativa en HGM se generen cielos más despejados en MON aumentando la actividad fotoquímica generadora de O<sub>3</sub>. Por su parte, los vientos registrados en la misma estación MON indicarían probablemente la procedencia de O<sub>3</sub> de otros puntos del valle de México los cuales posteriormente se registren y reacción en la misma estación MON debido al efecto de dispersión de los contaminantes el cual se presenta principalmente por las tardes tal como lo indicó por SEDEMA (2017).

Contrariamente [NO<sub>2</sub>] SJA, [O<sub>3</sub>] TLA, HrMON y Tem PED, indican una relación inversa con el O<sub>3</sub> de MON. Particularmente el comportamiento del NO<sub>2</sub> se puede explicar por su acción como precursor en donde mediante una reacción fotoquímica se oxida para dar origen al O<sub>3</sub> patrón similar al encontrado por Ballester (2005), señalando particularmente la posibilidad de un movimiento de contaminantes atmosféricos desde la zona de la estación SJA, hasta la región de MON, lo cual explicaría que ante el movimiento de NO<sub>2</sub> en SJA aumente el O<sub>3</sub> en MON.

En cuanto a la HrMON, indicaría perfectamente que a menos Hr se generan mayores concentraciones de O<sub>3</sub> y que de manera inversa el aumento de humedad disminuye la velocidad de formación del O<sub>3</sub> debido a la falta de radiación solar, altas temperatura y bajos niveles de humedad, requeridos para la formación de O<sub>3</sub> tal como lo indicaron Fernández et al. (2011).

Por último, el comportamiento de temperatura en la estación PED señalaría un comportamiento inverso sobre la temperatura en la región sur y este del Valle de México, el cual probablemente se da en ciertos periodos de tiempo, lo que explicaría el comportamiento inverso entre la estación PED y la estación MON.

La validación del modelo de estimación de  $[O_3]_{MON}$  (Cuadro 10) muestra una media residual de 1.83 ppb. y una desviación estándar de  $\pm 10.14$  ppb. Estos resultados obtenidos sugieren una alta dispersión de los datos. Sin embargo, la media del modelo y de los valores observados son muy semejantes por lo cual, se puede concluir que el modelo presenta un ajuste adecuado para la estimación de  $O_3$  en la zona rural MON.

**(Cuadro 10).** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural MON con base en concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

|                   | NO <sub>2</sub> ATIZA | NO <sub>2</sub> SJA | O <sub>3</sub> SAG | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> NEZ | HrHGM   | HrMON   | TemFAC  | TemNEZ  | TemPED  | VvMON  | O <sub>3</sub> Modelo | O <sub>3</sub> RAMA | Desviación de la estimación              |
|-------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-----------------------|---------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 28.25                 | 30.7884             | 11.375             | 12.3888            | 10.7821            | 85.8083 | 85.8083 | 10.775  | 9.7741  | 9.7741  | 1.3908 | 14.0                  | 10.8                | 3.2                                      |
| 19 marzo 2011     | 20.9166               | 30.7397             | 24.5416            | 25.2083            | 29.3422            | 23.5833 | 23.5833 | 16.2333 | 16.9962 | 16.5958 | 2.0526 | 32.0                  | 29.3                | 2.6                                      |
| 7 abril 2012      | 14.0833               | 24.6666             | 26.625             | 29.3333            | 25.125             | 28.7391 | 31.5327 | 18.2416 | 19.1541 | 18.1333 | 1.9291 | 30.6                  | 21.3                | 9.3                                      |
| 10 mayo 2013      | 32.7727               | 50.4583             | 51.7916            | 43.9583            | 36.125             | 21.3636 | 25.1904 | 19.8541 | 22.5041 | 20.1333 | 2.635  | 48.1                  | 74.1                | -26.0                                    |
| 17 junio 2014     | 13.7916               | 23.5217             | 31.8333            | 26.5416            | 34.2083            | 68.3    | 74.05   | 19.8666 | 17.55   | 16.5125 | 1.32   | 37.5                  | 36.2                | 1.1                                      |
| 7 agosto 2015     | 22.5833               | 24.6311             | 29.5               | 30.875             | 26.1904            | 52.9583 | 59.0416 | 19.0208 | 18.7    | 18.3541 | 2.5083 | 32.0                  | 29.6                | 2.4                                      |
| 6 octubre 2016    | 16.75                 | 19.75               | 20                 | 17.9583            | 23.4166            | 73.8333 | 81.7916 | 19.5333 | 19.0083 | 19.3971 | 2.024  | 26.4                  | 23.3                | 3.1                                      |
| 2 julio 2017      | 18.9875               | 24.0833             | 21.9166            | 22                 | 15.0833            | 65.1666 | 72.5833 | 18.2953 | 17.1041 | 16.9291 | 1.3    | 21.5                  | 22.3                | -0.8                                     |
| 10 enero 2018     | 45.8301               | 45.8301             | 29.5238            | 19.7391            | 25                 | 25.875  | 39.125  | 13.0166 | 13.3333 | 14.1458 | 1.9458 | 28.4                  | 41.1                | -12.7                                    |
| 16 noviembre 2018 | 23.5384               | 32.2340             | 18.5416            | 21.45              | 20.9166            | 46.875  | 56.1666 | 11.9631 | 11.9291 | 12.6583 | 1.9708 | 21.4                  | 22.1                | -0.7                                     |
|                   |                       |                     |                    |                    |                    |         |         |         |         |         |        | $\bar{x}=29.2$ ppb    | $\bar{x}= 31.0$ ppb | $\bar{x}= 1.83$ ppb<br>$s=\pm 10.14$ ppb |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de dos días, con base en registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

El grupo de estaciones [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]TLI, [O<sub>3</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]LLA y [NO<sub>2</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>]TLI, [NO<sub>2</sub>]NEZ confirman la existencia de una correlación significativa entre las variables independientes y la dependiente ( $\alpha < 0.05$ ). Asimismo, el coeficiente de determinación señala que el modelo propuesto presenta un valor de 0.7832 señalando que la variabilidad del O<sub>3</sub> en la estación AJM se puede explicar en un 78% debido a la variación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> registradas dos días antes en las estaciones mencionadas previamente. El valor de la RMSE es 6.6551 e indica alta dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3]_{AJM} \text{ (desfase dos días)} = 0.5646 ([O_3]_{MPA}) - 1.3600 ([O_3]_{TLI}) + 0.6677 ([O_3]_{TLA}) + 2.0543 ([NO_2]_{LLA}) - 0.2935 ([NO_2]_{FAC}) - 0.7156 ([NO_2]_{TLI}) - 0.3766 ([NO_2]_{NEZ})$$

El modelo de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> de la estación AJM<sub>(desfase dos días)</sub> indica que las estaciones, [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]TLI y [NO<sub>2</sub>]LLA, presentan una correlación directa con respecto a AJM, la cual puede ser explicada por la existencia de concentraciones similares de O<sub>3</sub> pese a la distancia entre estaciones y que dicho comportamiento puede presentar periodos de hasta dos días de diferencia a partir de su registro en cada estación en donde probablemente las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> sean afectadas por las variables meteorológicas que influyen sobre el comportamiento, formación y dispersión de O<sub>3</sub> tal como lo reportado por López et al. (2008).

Por otro lado, las estaciones [O<sub>3</sub>]TLI, [NO<sub>2</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>]TLI y [NO<sub>2</sub>]NEZ, indican una relación inversa con el O<sub>3</sub> de AJM<sub>(desfase dos días)</sub>, este relación registra un retardo de dos días, partir de su registro en cada una de las estaciones correspondientes, esta proceder de cada una de las estaciones puede ser influenciadas de agentes meteorológicos, los cuales influyen sobre el comportamiento del NO<sub>2</sub> como precursor del O<sub>3</sub> y sobre el mismo O<sub>3</sub> comportamiento señalado por CEPA (1999), indicando que ante disminución de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en cada una de las estaciones citadas, afectan en cierta medida las concentraciones de O<sub>3</sub> en AJM, por periodos máximos de hasta dos días.

Los resultados de la validación del modelo de estimación de  $[O_3]_{AJM_{(desfase\ dos\ días)}}$  (Cuadro 11) obtuvo un valor de la media de  $-2.0479$  ppb y una desviación de  $\pm 15.74$  ppb, manifestando que el modelo presenta una alta dispersión de los datos con respecto a su media aritmética. Sin embargo, comparando las medias de los datos observados y las del modelo no existe mucha diferencia entre ambas por lo cual se sugiere que el modelo presenta buen ajuste para estimar las concentraciones de  $[O_3]$  en la estación rural  $AJM_{(desfase\ dos\ días)}$ .

**(Cuadro 11).** Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural AJM<sub>(desfase dos días)</sub> con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> MPA | O <sub>3</sub> TLI | O <sub>3</sub> TLA | NO <sub>2</sub> LLA | NO <sub>2</sub> FAC | NO <sub>2</sub> TLI | NO <sub>2</sub> NEZ | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación                                  |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 16.001             | 16.001             | 26.1538            | 28.0012             | 27.1482             | 32.25               | 28.0012             | 36.6                                 | 20.0                                 | -16.6  |
| 19 marzo 2011     | 30.8941            | 30.8941            | 26.5652            | 28.8091             | 30.3913             | 25.6666             | 28.8091             | 32.1                                 | 29.3                                 | -2.7   |
| 7 abril 2012      | 27.8425            | 28.9166            | 26.2083            | 34.6086             | 31.2608             | 31.75               | 29.9166             | 40.2                                 | 27.7                                 | -12.5  |
| 10 mayo 2013      | 32.1540            | 32.8333            | 358421             | 38.125              | 41.9166             | 38.4583             | 34.9411             | 47.4                                 | 51.9                                 | 4.5  |
| 17 junio 2014     | 37.5883            | 28.5416            | 32.2608            | 17.875              | 20.7083             | 18.9583             | 22.75               | 24.6                                 | 31.6                                 | 6.9  |
| 7 agosto 2015     | 28.0138            | 25.2083            | 21.5               | 23.6812             | 23.25               | 18.9583             | 30.5416             | 26.3                                 | 54.7                                 | 28.7   |
| 6 octubre 2016    | 41                 | 22.6666            | 19.9583            | 22.9498             | 21.7083             | 18.7916             | 23.0416             | 37.0                                 | 32.5                                 | -4.5   |
| 2 julio 2017      | 25.7083            | 25.7083            | 21.625             | 23.2567             | 35.5                | 23.2567             | 22.75               | 24.0                                 | 33.0                                 | 9.0  |
| 10 enero 2018     | 25.8333            | 18.4583            | 26.3357            | 34.9166             | 31                  | 35.125              | 37                  | 62.1                                 | 33.9                                 | -27.3  |
| 16 noviembre 2018 | 3.2562             | 3.2562             | 1.6190             | 25.9397             | 24.2857             | 26.6190             | 25.9396             | 27.9                                 | 22.1                                 | -5.9   |
|                   |                    |                    |                    |                     |                     |                     |                     | <b><math>\bar{x}</math>=35.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=33.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=-2.08 ppb</b><br><b>s=±15.74 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con base en concentraciones de NO<sub>2</sub> en otras estaciones de la RAMA**

Con base en los resultados del programa estadístico SAS, las estaciones [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]COY, [NO<sub>2</sub>]UAX, [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]CAM, [NO<sub>2</sub>]MON, dan la mayor explicación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación AJM debido a la relación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) mostrada por PRC GLM y PROC Stepwise.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8664 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada en un 86% por la variación de NO<sub>2</sub> en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 1.99 y sugiere un ajuste bastante adecuado del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ AJM} = 0.0589 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) + 0.7123 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) - 0.2121 ([\text{NO}_2] \text{ SAG}) - 0.0832 ([\text{NO}_2] \text{ COY}) + 0.3457 ([\text{NO}_2] \text{ UAX}) - 0.1041 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.0389 ([\text{NO}_2] \text{ CAM}) - 0.1532 ([\text{NO}_2] \text{ MON})$$

Los resultados obtenidos señalaron que las estaciones [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]UAX y [NO<sub>2</sub>]CAM presentan una relación directa con respecto a AJM. El anterior comportamiento se puede basar ante la posibilidad de la presencia de concentraciones similares a puntos aledaños a la estación AJM, tal es el caso de las estaciones [NO<sub>2</sub>]CCA y [NO<sub>2</sub>]PED, donde es altamente probable que exista una mínima variación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la zona sur del Valle de México, región en donde se ubican las estaciones mencionadas incluida AJM.

En el caso particular de [NO<sub>2</sub>]UAX y [NO<sub>2</sub>]CAM la relación que existe podría ser resultado de la formación y dispersión de las concentraciones de NO<sub>2</sub> de manera similar, tanto en la región norte y sur del Valle de México, dispersión sustentada por efecto de los vientos de valle que van incluso más allá de las faldas del Ajusco tal como lo reportado por Jáuregui (2000).

Por último, las estaciones [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]COY, [NO<sub>2</sub>]UIZ y [NO<sub>2</sub>]MON presentan una relación inversa con respecto a la estación AJM, la cual puede ser explicada debido a presentarse que en esas estaciones se presentan condiciones en primer lugar de menos formación de NO<sub>2</sub> por y en segundo lugar existe la posibilidad de que las condiciones meteorológicas como la temperatura y los vientos generen una menor formación de NO<sub>2</sub> en cada una de las estaciones (Ramos et al. 2010), mientras que en la estación AJM se presentan condiciones totalmente opuestas y eso derive en el aumento del NO<sub>2</sub> en sus registros. Este comportamiento indica que en algunos puntos de la ciudad las concentraciones de contaminantes atmosféricos aumentan y en otros disminuyen debido a los flujos de aire tal como lo encontrado por Jazcilevich et al. (2002).

El proceso de validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>]AJM (Cuadro 12) dio como resultado una media de los residuales de 6.95 ppb y una desviación estándar de  $\pm 7.34$  ppb indicando una dispersión media de las estimaciones generadas por el modelo con respecto a la media de los residuales, sugiriendo que el modelo generado presenta un ajuste relativamente adecuado para estimar las concentraciones de [NO<sub>2</sub>]en la estación rural AJM.

**Cuadro 12.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural AJM con base en registros de NO<sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA.

|                   | NO <sub>2</sub> CCA | NO <sub>2</sub> PED | NO <sub>2</sub> SAG | NO <sub>2</sub> COY | NO <sub>2</sub> UAX | NO <sub>2</sub> UIZ | NO <sub>2</sub> CAM | NO <sub>2</sub> MON | NO <sub>2</sub> Modelo                | NO <sub>2</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación                                 |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 30.7884             | 27.6086             | 25                  | 30.7884             | 30.7884             | 28.9583             | 30.7884             | 30.7884             | 17.7                                  | 30.8                                  | 13.1  |
| 19 marzo 2011     | 30.7397             | 26.125              | 29.3333             | 30.7397             | 30.7397             | 36.1666             | 30.7397             | 30.7397             | 15.0                                  | 30.7                                  | 15.8  |
| 7 abril 2012      | 19.0892             | 14.2916             | 22.7083             | 21.9583             | 19.0892             | 22.1666             | 22.0833             | 14.4166             | 7.6                                   | 19.1                                  | 11.5  |
| 10 mayo 2013      | 37.2832             | 33.25               | 43.1666             | 46.5                | 36                  | 41.9583             | 46.041              | 17                  | 20.1                                  | 37.3                                  | 17.2  |
| 17 junio 2014     | 19.8613             | 17.875              | 18.25               | 19.8613             | 23.1304             | 25.3333             | 23.4166             | 11.0833             | 13.0                                  | 19.9                                  | 6.9   |
| 7 agosto 2015     | 23.5416             | 21.1666             | 22.3333             | 28.6666             | 20.0833             | 25.5                | 35.7916             | 17.83333            | 12.3                                  | 14.8                                  | 2.5   |
| 6 octubre 2016    | 17.1666             | 24                  | 16.875              | 26.5416             | 20.1666             | 22.2916             | 28.1428             | 12                  | 16.2                                  | 20.5                                  | 4.3   |
| 2 julio 2017      | 18.875              | 16.125              | 19.5                | 21.6956             | 22.5                | 25.9583             | 21.3333             | 15                  | 10.3                                  | 11.5                                  | 1.2   |
| 10 enero 2018     | 47.8333             | 40                  | 43.5714             | 45.8301             | 35.75               | 47.1904             | 45.8301             | 30                  | 22.9167                               | 16.7                                  | -6.2  |
| 16 noviembre 2018 | 32.25               | 29.0833             | 27.0416             | 32.2340             | 24.0833             | 29.9                | 43.4166             | 32.2341             | 16.2                                  | 19.5                                  | 3.3   |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     | <b><math>\bar{x}</math>=15.13 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=22.08 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=6.95 ppb</b><br><b>s=± 7.34 ppb</b> |

\*Concentraciones de NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con base en concentraciones de NO<sub>2</sub> en otras estaciones de la RAMA**

Las estaciones con mayor contribución a la explicación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación AJM son: [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]LPR, [NO<sub>2</sub>]SAG, presentan una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9902 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada en un 99% por la variación de NO<sub>2</sub> en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 1.5998 e indica un ajuste óptimo del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUA} = 1.1977 ([\text{NO}_2] \text{ SFE}) + 0.0347 ([\text{NO}_2] \text{ TLA}) - 0.1169 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) - 0.0698 ([\text{NO}_2] \text{ MER}) - 0.1689 ([\text{NO}_2] \text{ LPR}) + 0.0027 ([\text{NO}_2] \text{ SAG})$$

Los resultados obtenidos en SAS revelaron que las estaciones [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]MON y [NO<sub>2</sub>]SAG presentan una correlación directa, la cual tendría como primer sustento en algunos casos la proximidad entre estaciones, como lo es el caso de la estación [NO<sub>2</sub>]SFE, en cuyo sitio probablemente las variaciones de las concentraciones de NO<sub>2</sub> son mínimas al igual que en la estación de estudio CUA.

En el caso particular de [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]MON y [NO<sub>2</sub>]SAG su correlación directa estaría estrechamente relacionada a la posibilidad de un efecto en donde el NO<sub>2</sub> tanto al norte como al este del Valle de México sufran un aumento paralelo de NO<sub>2</sub>. Esta similitud sobre el comportamiento de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en todas las estaciones incluidas la estación CUA, se puede atribuir en gran medida a todas las actividades humanas que se realizan en prácticamente todo el valle de México, como la industria y el uso de vehículos automotores y en menor medida a incendios forestales, entre otros., tal como lo reportado por SEDEMA (2018).

Por otro lado, las estaciones  $[\text{NO}_2]\text{CCA}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{MER}$  y  $[\text{NO}_2]\text{LPR}$  presentan una correlación inversa con respecto a la estación AJM. La conducta mencionada se podría explicar en todos los casos por presentarse condiciones de bajas emisiones de contaminantes de industria y automóviles, en esas estaciones propiciando disminución del  $\text{NO}_2$  comportamiento que podría presentarse en los días que no hay actividades laborales. Contrariamente en la estación CUA se produce un aumento de  $\text{NO}_2$  el cual puede explicarse por presentarse una mayor concentración de  $\text{NO}_2$ , el cual puede ser emitido en el mismo sitio o proveniente de otros sitios del Valle de México trasladado por acción de los vientos tal como lo reportado por García-Reynoso (2009).

El modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]\text{CUA}$  (Cuadro 13) obtuvo una media residual de -6.64 ppb y una desviación estándar de  $\pm 3.99$  ppb, esto indica una baja dispersión de los datos. De la misma manera la baja RMSE obtenida inicialmente permite concluir que el modelo presenta un ajuste adecuado para poder estimar las concentraciones de  $[\text{NO}_2]$  en la estación rural CUA.

**Cuadro 13.** Validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUA con base en registros de NO<sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA.

|                   | NO <sub>2</sub> SFE | NO <sub>2</sub> TLA | NO <sub>2</sub> CCA | NO <sub>2</sub> MER | NO <sub>2</sub> LPR | NO <sub>2</sub> SAG | NO <sub>2</sub> Modelo               | NO <sub>2</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación           |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 30.7884             | 33.875              | 30.7884             | 36.5833             | 30.7884             | 25                  | 37.3                                 | 30.8                                  | -6.6                                  |
| 19 marzo 2011     | 30.7397             | 32.0833             | 30.7397             | 39.6666             | 30.7397             | 29.3333             | 36.5                                 | 30.7                                  | -5.7                                  |
| 7 abril 2012      | 12.5652             | 24.6666             | 19.0892             | 27.5416             | 24.2916             | 22.7083             | 15.4                                 | 13.3                                  | -2.1                                  |
| 10 mayo 2013      | 22.875              | 47.25               | 37.2832             | 54.25               | 48.1666             | 43.1666             | 27.6                                 | 14.4                                  | -13.3                                 |
| 17 junio 2014     | 21.3913             | 22.0434             | 19.8613             | 25.6086             | 19.8613             | 18.25               | 25.9                                 | 21.7                                  | -4.2                                  |
| 7 agosto 2015     | 24.6311             | 33.8260             | 23.5416             | 34.625              | 24.6311             | 22.3333             | 32.0                                 | 25.0                                  | -7.0                                  |
| 6 octubre 2016    | 20.7391             | 26.9166             | 17.1666             | 32.8571             | 20.07340            | 16.875              | 26.4                                 | 17.9                                  | -8.5                                  |
| 2 julio 2017      | 14.0416             | 21                  | 18.875              | 26.0416             | 18.9875             | 19.5                | 16.9                                 | 16.2                                  | -0.7                                  |
| 10 enero 2018     | 35.5416             | 71.6666             | 47.8333             | 67.625              | 45.8301             | 45.5714             | 49.5                                 | 39.8                                  | -9.8                                  |
| 16 noviembre 2018 | 32.2340             | 44.875              | 32.25               | 42.7916             | 32.2340             | 27.0416             | 42.1                                 | 30.5                                  | -11.6                                 |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |                     | <b><math>\bar{x}</math>=31.0 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 24.0 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=-6.94 ppb</b> |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                                      |                                       | <b><math>s</math>=±3.99 ppb</b>       |

\*Concentraciones de NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con base en concentraciones de NO<sub>2</sub> en otras estaciones de la RAMA**

De acuerdo a los resultados obtenidos, las estaciones de monitoreo atmosférico que contribuyeron fundamentalmente a la explicación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación AJM son: [NO<sub>2</sub>]VIF, [NO<sub>2</sub>]CHO, [NO<sub>2</sub>]CAM, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]IZT, [NO<sub>2</sub>]ATIZA y [NO<sub>2</sub>]UAX, los mismos resultados confirman una relación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) entre las estaciones mencionadas. Asimismo, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8870 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUT es atribuida en un 92% por la variación de NO<sub>2</sub> en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 1.91098 demostrando un ajuste adecuado del modelo ante la presencia de una baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y las concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUT} = 0.4679 ([\text{NO}_2] \text{ VIF}) - 0.0494 ([\text{NO}_2] \text{ CHO}) + 0.1265 ([\text{NO}_2] \text{ CAM}) - 0.0422 ([\text{NO}_2] \text{ NEZ}) - 0.0065 ([\text{NO}_2] \text{ IZT}) + 0.2152 ([\text{NO}_2] \text{ ATIZA}) - 0.0173 ([\text{NO}_2] \text{ UAX})$$

Con base en los resultados obtenido y las estimaciones generadas por SAS se obtuvo que las estaciones [NO<sub>2</sub>]VIF, [NO<sub>2</sub>]CAM y [NO<sub>2</sub>]ATIZA demuestran una correlación directa con respecto CUT, dicho comportamiento puede ser atribuido en algunos casos a la baja separación en distancia entre algunas de las estaciones de monitoreo como es el ejemplo de las estaciones [NO<sub>2</sub>]VIF y [NO<sub>2</sub>]ATIZA, donde existe la gran posibilidad de que las concentraciones de NO<sub>2</sub> presenten un patrón similar en su comportamiento.

Por otro lado, la correlación registrada por la estación [NO<sub>2</sub>]CAM con respecto a CUT señala condiciones similares sobre el comportamiento de NO<sub>2</sub>, en donde dicha conducta se atribuye a condiciones similares de emisión del NO<sub>2</sub> ya que ambas zonas se encuentran relativamente cercanas a los complejos industriales en la zona norte del valle y también por condiciones meteorológicas afines las cuales también pueden influir sobre el comportamiento del NO<sub>2</sub> en la región norte del valle.

Por otro lado, las estaciones [NO<sub>2</sub>]CHO, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]IZT y [NO<sub>2</sub>]UAX presentan una relación inversa con respecto a la estación CUT. Esta conducta manifiesta disminuciones de NO<sub>2</sub> en las estaciones inicialmente mencionadas muy probablemente por la reducción de actividades humanas ligadas en parte a horarios laborales y en parte a condiciones meteorológicas poco favorecedoras para la formación del NO<sub>2</sub> mientras tanto en la estación CUT se presenta genera aumento de NO<sub>2</sub> ya sea por actividades humanas como la industria como lo reportó SEMARNAT (2017), la cual se presenta principalmente al norte del valle, misma que en muchos casos no reduce su emisión durante todo el día.

La validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>]CUT (Cuadro 14) manifestó una media de los residuales de 5.20 ppb y una desviación estándar de ±6.36 ppb, los valores demuestran una baja dispersión de los datos con respecto a la media de los residuales, por lo cual el modelo presenta un ajuste adecuado sobre las estimaciones de [NO<sub>2</sub>]en la estación rural CUT.

**Cuadro 14.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUT con base en registros de NO<sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA.

|                   | NO <sub>2</sub> VIF | NO <sub>2</sub> CHO | NO <sub>2</sub> CAM | NO <sub>2</sub> NEZ | NO <sub>2</sub> IZT | NO <sub>2</sub> ATIZA | NO <sub>2</sub> UAX | NO <sub>2</sub> Modelo | NO <sub>2</sub> RAMA | Desviación de la estimación |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 18 febrero 2010   | 27.3333             | 30.7884             | 30.7884             | 30.7884             | 30.7884             | 28.25                 | 30.7884             | 20.3                   | 30.8                 | 10.5                        |
| 19 marzo 2011     | 16.75               | 30.7397             | 30.7397             | 30.7397             | 39.3043             | 20.9166               | 30.7397             | 13.7                   | 30.7                 | 17.1                        |
| 7 abril 2012      | 16.25               | 14.7391             | 22.0833             | 22.7083             | 24.0416             | 14.0833               | 19.0892             | 11.9                   | 16.0                 | 4.1                         |
| 10 mayo 2013      | 31.4166             | 22.75               | 31.4166             | 43.7                | 48.1666             | 32.7727               | 36                  | 24.9                   | 27.1                 | 2.2                         |
| 17 junio 2014     | 19.8613             | 19.8613             | 23.4166             | 25.2083             | 25.2083             | 13.7916               | 23.1304             | 13.4                   | 8.7                  | -4.8                        |
| 7 agosto 2015     | 17.125              | 24.6311             | 35.7916             | 24.8095             | 32.2916             | 22.5833               | 20.0833             | 15.3                   | 20.8                 | 5.5                         |
| 6 octubre 2016    | 14.3333             | 20.7340             | 28.1428             | 18                  | 20.7340             | 16.75                 | 20.16666            | 12.3                   | 12.9                 | 0.6                         |
| 2 julio 2017      | 12.625              | 18.9875             | 21.3333             | 24.9130             | 25.375              | 18.9875               | 22.5                | 10.9                   | 10.0                 | -0.9                        |
| 10 enero 2018     | 46.4583             | 45.8301             | 45.8301             | 47.4583             | 45.8301             | 45.8301               | 35.75               | 33.5                   | 41.5                 | 8.1                         |
| 16 noviembre 2018 | 26.375              | 22.9166             | 43.4166             | 28.625              | 38.3333             | 23.5384               | 24.0833             | 20.7                   | 30.3                 | 9.6                         |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |                       |                     | $\bar{x}=17.7$ ppb     | $\bar{x}=22.9$ ppb   | $\bar{x}=5.20$ ppb          |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |                       |                     |                        |                      | $s=\pm 6.36$ ppb            |

\*Concentraciones de NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb),

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con base en concentraciones de NO<sub>2</sub> en otras estaciones de la rama**

Las estaciones [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]CHO, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]ATIZA, [NO<sub>2</sub>]LPR, [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]VIF y [NO<sub>2</sub>]FAC brindan una explicación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación MON, presentan una estrecha correlación con la variable dependiente ( $\alpha < 0.05$ ). En el mismo sentido, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8463 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada en un 84% por la variación de NO<sub>2</sub> en las estaciones mencionadas.

Por otra parte, el valor de la RMSE es 2.0611 e indica que modelo presenta un ajuste adecuado del modelo, el cual presenta los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo, así como, las concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ MON} = 0.0701 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.1986 ([\text{NO}_2] \text{ ACOL}) + 0.2642 ([\text{NO}_2] \text{ CHO}) + 0.0179 ([\text{NO}_2] \text{ XAL}) + 0.0894 ([\text{NO}_2] \text{ NEZ}) - 0.0847 ([\text{NO}_2] \text{ ATIZA}) + 0.1793 ([\text{NO}_2] \text{ LPR}) - 0.0734 ([\text{NO}_2] \text{ SAG}) - 0.0880 ([\text{NO}_2] \text{ VIF}) + 0.0858 ([\text{NO}_2] \text{ FAC})$$

Ante los resultados obtenidos para el modelo de estimación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> de la estación MON las estaciones: [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]CHO, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]LPR, [NO<sub>2</sub>]FAC indican tener una correlación directa con respecto MON. Dicho proceder de las estaciones puede estar explicado por la cercanía entre estaciones como por ejemplo las estaciones [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]ACOL y [NO<sub>2</sub>]CHO, donde muy probablemente las concentraciones de NO<sub>2</sub> son afines debido quizás a la influencia de variables meteorológicas, las cuales han demostrado tener impacto sobre las concentraciones NO<sub>2</sub> de acuerdo a lo reportado por Galán y Fernández (2006).

En el caso particular de la correlación exhibida por las estaciones [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]LPR y [NO<sub>2</sub>]FAC postularía la existencia de efecto similar de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en zona norte y la zona este del Valle de México, sustentado condiciones meteorológicas y orográficas análogas en esos sitios.

Finalmente, las estaciones  $[\text{NO}_2]\text{SAG}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{VIF}$  y  $[\text{NO}_2]\text{ATIZA}$  exponen una correlación inversa con respecto a la estación MON. Dicha conducta se atribuye a una menor emisión de  $\text{NO}_2$  y a una mayor descomposición del mismo contaminante en esos sitios. Por otro lado, las condiciones potencialmente favorecedoras en la formación de  $\text{NO}_2$  se presentan con mayor constancia en MON, es decir, mayor emisión de  $\text{NO}_2$  y un comportamiento de variables meteorológicas adecuadas para el aumento de  $\text{NO}_2$  en la atmosfera.

El modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]\text{MON}$  en su proceso de validación (Cuadro 15) dio como resultado una media de los residuales de 5.54 ppb, así como una desviación estándar de  $\pm 4.97$  ppb, mostrando una baja dispersión con respecto a la media de los residuales y se concluye que el modelo propuesto es adecuado para estimar las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en la estación rural MON.

**Cuadro 15.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural MON con base en registros de NO<sub>2</sub> de otras estaciones de la RAMA.

|                   | NO <sub>2</sub> UIZ | NO <sub>2</sub> ACOL | NO <sub>2</sub> CHO | NO <sub>2</sub> XAL | NO <sub>2</sub> NEZ | NO <sub>2</sub> ATIZA | NO <sub>2</sub> LPR | NO <sub>2</sub> SAG | NO <sub>2</sub> VIF | NO <sub>2</sub> FAC | NO <sub>2</sub> Modelo               | NO <sub>2</sub> RAMA                 | Desviación de la estimación          |
|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 28.9583             | 30.7884              | 30.7884             | 30.7884             | 30.7884             | 28.25                 | 30.7884             | 25                  | 27.3333             | 32.5416             | 19.7                                 | 30.8                                 | 11.1                                 |
| 19 marzo 2011     | 36.1666             | 30.7397              | 30.7397             | 46                  | 30.7397             | 20.9166               | 30.7397             | 29.333              | 16.75               | 26.5833             | 20.8                                 | 30.7                                 | 9.9                                  |
| 7 abril 2012      | 21.1666             | 13.5                 | 14.7391             | 22.4166             | 22.7083             | 14.0833               | 24.2916             | 22.7083             | 22.7083             | 19                  | 10.5                                 | 14.1                                 | 3.9                                  |
| 10 mayo 2013      | 41.9583             | 23.7916              | 22.75               | 57.7916             | 43.7                | 32.7727               | 48.1666             | 43.1666             | 314166              | 44.7916             | 20.2                                 | 27.1                                 | 7.0                                  |
| 17 junio 2014     | 25.3333             | 10.625               | 19.8613             | 21.9545             | 25.2083             | 13.7916               | 19.8613             | 18.25               | 19.8613             | 20.9545             | 11.5                                 | 11.1                                 | -0.5                                 |
| 7 agosto 2015     | 25.5                | 12.6666              | 24.6311             | 30.6666             | 24.8095             | 22.5833               | 24.6311             | 22.3333             | 17.125              | 26.4347             | 13.8                                 | 17.8                                 | 4.0                                  |
| 6 octubre 2016    | 22.2916             | 20.7340              | 20.7340             | 22.625              | 18                  | 16.75                 | 20.7340             | 16.875              | 14.3333             | 18.5                | 13.4                                 | 12.0                                 | -1.4                                 |
| 2 julio 2017      | 25.9583             | 13.7916              | 18.9875             | 25.25               | 24.91329.90         | 18.9875               | 18.9875             | 19.5                | 12.625              | 14.2916             | 11.4                                 | 15.0                                 | 3.6                                  |
| 10 enero 2018     | 47.1904             | 29.625               | 45.8301             | 56.625              | 47.4583             | 45.8301               | 45.8301             | 43.5714             | 46.4566             | 61.6956             | 26.4                                 | 30.0                                 | 3.6                                  |
| 16 noviembre 2018 | 29.9                | 18                   | 22.9166             | 35.625              | 28.625              | 23.5384               | 32.23               | 27.0416             | 26.375              | 38.2631             | 16.1                                 | 30.2                                 | 14.1                                 |
|                   |                     |                      |                     |                     |                     |                       |                     |                     |                     |                     | <b><math>\bar{x}</math>=16.4 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=21.9 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=5.54 ppb</b> |
|                   |                     |                      |                     |                     |                     |                       |                     |                     |                     |                     |                                      |                                      | <b>s=±4.97ppb</b>                    |

\*Concentraciones de NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con base en registros de la RAMA y la REDMET**

Las estaciones y variables atmosféricas [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]LPR, TemMER, DvSFE, y DvMER contribuyeron a un mejor entendimiento de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación CUA. La correlación entre las variables independientes y la dependiente es significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Además, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9919 señalando la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada en un 99% por la variación de NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas en las estaciones mencionadas.

Asimismo, el valor de la RMSE es 1.5645 y propone un adecuado ajuste del modelo ante la presencia de una baja dispersión. El modelo se compone de los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUA} = 1.1539 ([\text{NO}_2] \text{ SFE}) - 0.0398 ([\text{NO}_2] \text{ TLA}) - 0.0858 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) + 0.0861([\text{NO}_2] \text{ MER}) + 0.3879 ([\text{NO}_2] \text{ MON}) - 0.1822 ([\text{NO}_2] \text{ LPR}) - 0.4386 (\text{Tem MER}) + 0.0281 (\text{Dv SFE}) - 0.0138 * \text{Dv MER}$$

Las estimaciones generadas por SAS demuestran que las estaciones [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]MON y DvSFE presentan una relación directa con respecto CUA, y que en algunos sucesos pueden ser explicados por la relativa cercanía entre algunas estaciones como es el caso de la estación [NO<sub>2</sub>]SFE y DvSFE, donde la variación de concentraciones de NO<sub>2</sub> podrían ser mínimas. Mientras que la correlación DvSFE nos revela que, ante un aumento en los grados de la dirección de los vientos, las concentraciones de NO<sub>2</sub> en CUA aumentan, lo que podría en su momento indicar el desplazamiento de NO<sub>2</sub> desde SFE hasta CUA, ambas estaciones situadas al sur del Valle de México.

La relación directa expresada por las estaciones: [NO<sub>2</sub>]MER y [NO<sub>2</sub>]MON, ubicadas lejos de la estación CUA, puede estar relacionada por la existencia de factores meteorológicos como la temperatura y los vientos los cuales podrían propiciar un comportamiento homogéneo en gran parte

del Valle de México tal como lo reportado por García-Reynoso (2009), principalmente en la zona norte, este y sur donde se encuentran estas estaciones.

Por otra parte, las estaciones [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]LPR, presentan una relación inversa con respecto a la estación CUA. La relación mostrada por los resultados del programa estadístico SAS indicarían que posiblemente parte de las concentraciones de cada una de las estaciones, se distribuye hacia otros puntos del Valle de México, mientras en CUA el NO<sub>2</sub> se acumula ya sea proveniente de otros sitios o incluso el generado en el mismo lugar debido a la acción de actividades humanas, como el uso de automóviles y presencia de industria la cuales afectan las zonas rurales como lo señala SEDEMA (2017), algunas muy cercanas a CUA, como son los bosques naturales, reservas ecológicas, ganado y cultivo (SEMARNAT, 2016).

La correlación inversa de TemMER revelaría un comportamiento atípico entre la temperatura y el NO<sub>2</sub>. Ya que la temperatura propicia aumento de NO<sub>2</sub> en la atmosfera. Sin embargo, el factor distancia entre estaciones justificaría este comportamiento ya que se pueden presentar otros factores como las actividades humanas y propicien una modificación en el patrón que generalmente se presenta entre estas dos variables.

Finalmente, la correlación de la variable meteorológica DvMER testificaría que, ante cualquier disminución en los grados de la dirección de vientos en esa estación, las concentraciones de NO<sub>2</sub> en CUA aumentan. Generando la idea de que a pesar de la distancia entre estas dos estaciones existe la posibilidad de que el NO<sub>2</sub> de ambos sitios mantenga interacción con el NO<sub>2</sub> por efecto de los vientos dominantes descritos por Jáuregui (1993).

Los resultados de validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>]CUA (Cuadro 16) obtuvieron una media de -1.69 ppb y una desviación  $\pm 4.66$  ppb, esta baja dispersión entre la desviación estándar con respecto a la media residual muestra que el modelo formulado es adecuado para estimar las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación rural CUA.

**Cuadro 16.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUA con base en concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | NO <sub>2</sub> SFE | NO <sub>2</sub> TLA | NO <sub>2</sub> CCA | NO <sub>2</sub> MER | NO <sub>2</sub> MON | NO <sub>2</sub> LPR | TemMER  | DvSFE     | DvMER    | NO <sub>2</sub> Modelo               | NO <sub>2</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación                                  |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|-----------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 30.7884             | 30.7884             | 30.7884             | 36.5833             | 30.7884             | 330.7884            | 9.9791  | 189.6333  | 186.9166 | 39.5                                 | 30.8                                  | -8.7   |
| 19 marzo 2011     | 30.7397             | 32.0833             | 30.7397             | 39.6666             | 30.7397             | 30.7397             | 17.85   | 188.7673  | 217.3043 | 35.8                                 | 30.7                                  | -5.0   |
| 7 abril 2012      | 12.5652             | 24.6666             | 19.0892             | 27.5416             | 14.4166             | 24.2916             | 20.1916 | 202.25    | 204.4583 | 9.4                                  | 13.3                                  | 3.9  |
| 10 mayo 2013      | 22.875              | 47.25               | 37.2832             | 54.25               | 17                  | 48.1666             | 22.425  | 195.875   | 203.7083 | 16.7                                 | 14.4                                  | -2.3   |
| 17 junio 2014     | 21.3913             | 22.0434             | 19.8613             | 25.6086             | 11.0833             | 19.8613             | 18.1208 | 169       | 194.5416 | 19.1                                 | 21.7                                  | 2.6  |
| 7 agosto 2015     | 24.6311             | 33.8260             | 23.5416             | 34.625              | 17.8333             | 24.6311             | 19.8739 | 187.875   | 164.8260 | 24.8                                 | 25.0                                  | 0.2  |
| 6 octubre 2016    | 20.7391             | 26.9166             | 17.1666             | 32.8571             | 12                  | 20.7340             | 18.2545 | 1394.7083 | 169.2916 | 18.5                                 | 17.9                                  | -0.7   |
| 2 julio 2017      | 14.0416             | 21                  | 18.875              | 26.0416             | 15                  | 18.9875             | 17.4958 | 194.5     | 186.4583 | 13.6                                 | 16.2                                  | 2.6  |
| 10 enero 2018     | 35.5416             | 71.6666             | 47.8333             | 67.625              | 30                  | 45.8301             | 14.8375 | 174.75    | 120.625  | 39.9                                 | 39.8                                  | -0.2   |
| 16 noviembre 2018 | 32.2340             | 44.875              | 32.25               | 42.7916             | 32.2340             | 32.2340             | 13.4125 | 167.125   | 137.25   | 39.9                                 | 30.5                                  | -9.4   |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |                     |         |           |          | <b><math>\bar{x}</math>=25.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 24.0 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= -1.69 ppb</b><br><b>s=±4.66 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET**

A partir del análisis estadístico realizado, obtuvo una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) de las estaciones y variables atmosféricas [O<sub>3</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]LPR, VvCUA con respecto a las concentraciones de [NO<sub>2</sub>]CUA. Asimismo, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9524 revelando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada en un 95% por la variación de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas de las estaciones mencionadas.

Además, el valor de la RMSE es 2.0712 establece un ajuste adecuado del modelo el cual está comprendido por los coeficientes de regresión de las estaciones previamente mencionadas y las concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUA} = 0.0183 ([\text{O}_3] \text{ PED}) + 1.0604 ([\text{NO}_2] \text{ SFE}) - 0.1442 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) + 0.1297 ([\text{NO}_2] \text{ MON}) + 0.063 ([\text{NO}_2] \text{ LPR}) - 0.595 (\text{Vv CUA})$$

Con base a las estimaciones generadas por SAS, las estaciones [O<sub>3</sub>] PED y [NO<sub>2</sub>]SFE, presentan una relación directa con respecto la estación CUA, ambas ubicadas muy cerca de CUA por lo que la proximidad entre estaciones es la principal justificación de su correlación, ante la probabilidad de una conducta similar de las concentraciones de NO<sub>2</sub> y por parte de [O<sub>3</sub>] PED se podría establecer que ante el papel como precursor de O<sub>3</sub>, un aumento de NO<sub>2</sub> en CUA genere el aumento en la formación de O<sub>3</sub> en la estación PED, comportamiento poco habitual pues ante la oxidación del NO<sub>2</sub> en la atmosfera el O<sub>3</sub> aumenta tal como lo encontrado por De Souza et al. (2018). Sin embargo, la formación y destrucción de contaminantes se da de manera constante lo que podría explicar la el patrón señalado.

La relación positiva que presenta las estaciones [NO<sub>2</sub>]MON y [NO<sub>2</sub>]LPR ubicadas al este y norte del Valle de México respectivamente, pueden explicarse a través de la influencia de variables meteorológicas, particularmente las cuales tienen a modificar su concentración y dispersión con la

temperatura, humedad relativa y los vientos, lo que generaría patrones de comportamiento de aumento y disminución de  $\text{NO}_2$  similares en todo el valle similar a lo reportado por Jazcilevich et al. (2002).

La estación  $[\text{NO}_2]_{\text{CCA}}$  presenta una relación inversa con respecto a la estación CUA, la cual se podría derivar por la dispersión de  $\text{NO}_2$  que se promueve por los vientos el mismo día de su registro en donde los vientos se dirijan hacia las zonas más elevadas del valle por un proceso de inversión térmica y vientos de valle como lo encontrado por Jáuregui (2000), lo que implicaría el paso de  $\text{NO}_2$  por el sitio donde se ubica la estación CUA, una de las estaciones más elevadas altitudinalmente hablando.

Por último, la correlación inversa de  $V_v\text{CUA}$  indicaría que, a menor velocidad de los vientos en CUA, se produce un efecto de acumulación de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  similar a lo reportado por Martínez et al. 2008, lo cual tiene sentido ya que al reducirse el movimiento de los contaminantes se acumulan en la atmosfera aumentando sus concentraciones.

La validación del modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]_{\text{CUA}}$  (Cuadro 17) logró obtener una media de tan solo -1.42 ppb y una  $s$  de  $\pm 4.47$  ppb, estos resultados exponen baja dispersión de los datos con respecto a la media de los residuales y se puede concluir que el modelo para esta estación cumple con ajuste óptimo para estimar estimaciones de  $[\text{NO}_2]$  en la estación rural CUA.

**Cuadro 17.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUA con base en concentraciones de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET.

|                   | <b>O<sub>3</sub>PED</b> | <b>NO<sub>2</sub>SFE</b> | <b>NO<sub>2</sub>CCA</b> | <b>NO<sub>2</sub>MON</b> | <b>NO<sub>2</sub>LPR</b> | <b>VvCUA</b> | <b>NO<sub>2</sub>Modelo</b>          | <b>NO<sub>2</sub>RAMA</b>            | <b>Desviación de la estimación</b>     |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 5.9565                  | 30.7884                  | 30.7884                  | 30.7884                  | 30.7884                  | 1.3908       | 33.4                                 | 30.8                                 | -2.6                                   |
| 19 marzo 2011     | 35.4166                 | 30.7397                  | 30.7397                  | 30.7397                  | 30.7397                  | 1.95         | 33.6                                 | 30.7                                 | -2.8                                   |
| 7 abril 2012      | 30.4583                 | 12.5652                  | 19.0892                  | 14.4166                  | 14.4166                  | 2.85         | 12.2                                 | 19.1                                 | 6.9                                    |
| 10 mayo 2013      | 63.4583                 | 22.875                   | 37.2832                  | 17                       | 48.1666                  | 2.3363       | 23.9                                 | 14.4                                 | -9.5                                   |
| 17 junio 2014     | 34.8333                 | 21.3913                  | 19.8613                  | 11.0833                  | 19.8613                  | 1.8666       | 22.0                                 | 21.7                                 | -0.4                                   |
| 7 agosto 2015     | 38.875                  | 24.6311                  | 23.5416                  | 17.83                    | 24.6311                  | 1.9708       | 26.1                                 | 25.0                                 | -1.2                                   |
| 6 octubre 2016    | 24.7916                 | 20.7391                  | 17.1666                  | 12                       | 20.7340                  | 2.1          | 21.6                                 | 17.9                                 | -3.7                                   |
| 2 julio 2017      | 27.625                  | 14.0416                  | 18.875                   | 15                       | 18.9875                  | 1.5666       | 14.9                                 | 16.2                                 | 1.3                                    |
| 10 enero 2018     | 42.9583                 | 35.5416                  | 47.8333                  | 30                       | 45.8301                  | 2.0333       | 37.1                                 | 39.8                                 | 2.6                                    |
| 16 noviembre 2018 | 30.9166                 | 32.2340                  | 32.25                    | 32.2340                  | 32.2340                  | 1.6666       | 32.5                                 | 30.5                                 | -4.8                                   |
|                   |                         |                          |                          |                          |                          |              | <b><math>\bar{x}</math>=26.0 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=24.6 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= -1.42 ppb</b> |
|                   |                         |                          |                          |                          |                          |              |                                      |                                      | <b><math>s</math>=±4.47 ppb</b>        |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico cuautitlán (CUT), con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET**

El grupo de estaciones y variables atmosféricas: [NO<sub>2</sub>]VIF, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]INN, [NO<sub>2</sub>]FAC, HrHGM, HrINN, TemMON, DvMPA, DvFAC y VvUAX, establecieron correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con las concentraciones registradas en [NO<sub>2</sub>]CUT.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9475 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUT se puede explicar en un 94% por la variación de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en las estaciones mencionadas. La RMSE es 1.8381 y expone muy baja dispersión entre los valores observados y los estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2]\text{CUT} = 0.6677 ([\text{NO}_2]\text{VIF}) + 0.1340 ([\text{NO}_2]\text{XAL}) + 0.0775 ([\text{O}_3]\text{INN}) - 0.0468 ([\text{NO}_2]\text{FAC}) + 0.0567 (\text{Hr HGM}) - 0.0138 (\text{Hr INN}) - 0.0382 (\text{Tem MON}) + 0.0074 (\text{Dv MPA}) - 0.0126 (\text{Dv FAC}) + 2.1861 (\text{Vv UAX})$$

Con base en las estimaciones resultantes, las estaciones [NO<sub>2</sub>]VIF, [NO<sub>2</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]INN, HrHGM, DvMPA, VvUAX, presentan una correlación directa con respecto [NO<sub>2</sub>]CUT. En donde de manera inicial, la correlación de las estaciones [NO<sub>2</sub>]VIF y [NO<sub>2</sub>]XAL se atañe a directamente a la cercanía, donde es muy probable se registren concentraciones afines.

La correlación de [O<sub>3</sub>]INN apunta a la posibilidad de un aumento semejante de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> tanto en la zona norte como en la región sur del Valle, es decir una dispersión análoga de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, cuyo comportamiento es poco habitual, pues generalmente a menor NO<sub>2</sub> mayor presencia de O<sub>3</sub> en la atmosfera comportamiento reportado por Cortez et al. (1998).

La variable HrHGM demuestra un efecto sobre [NO<sub>2</sub>]CUT. Por su parte, el comportamiento de HrHGM tendría podría explicarse simplemente tomando en cuenta las distancias entre estaciones, las cuales propicien un comportamiento atípico entra la humedad relativa y el NO<sub>2</sub>, ya que generalmente humedad relativa presenta correlación negativa con respecto a NO<sub>2</sub>, debido a que ante

la presencia de porcentajes altos de humedad el  $\text{NO}_2$  regresa a su estado como ácido nitroso ( $\text{HNO}_2$ ) tal como lo indican Ramos et al. (2010).

Por su parte DvMPA, VvUAX muestran una correlación positiva, manifestándose la fuerte posibilidad de que los vientos provenientes de ambas estaciones arrastren  $\text{NO}_2$  hasta CUT, aumentando su presencia en la zona norte del valle con apoyo de vientos locales facilitando su dispersión.

Las estaciones  $[\text{O}_3]$ FAC, HrINN, TemMON y DvFAC presentan una relación inversa con respecto a la estación CUT. Particularmente la conducta de DvFAC y  $[\text{O}_3]$ FAC resulta congruente ya que De Souza et al. (2018) reportó que a menor presencia de  $\text{NO}_2$ , mayor serán las concentraciones de  $\text{O}_3$  en la atmósfera.

Mientras que TemMON y su conducta poco habitual ante concentraciones de  $\text{NO}_2$  estaría sin duda ligado a la lejanía entre estaciones. Lo anterior, sería un factor que podría generar este comportamiento atípico. Sin embargo, es altamente probable que dicho proceder este influenciado por las condiciones meteorológicas de cada sitio, así como, de las fuentes locales de  $\text{NO}_2$ .

Finalmente, la correlación inversa entre  $[\text{NO}_2]$ CUT y HrINN supondría la posibilidad un aumento de nubosidad o precipitaciones en la estación INN que es a la que mayor altitud se ubica y alejada del núcleo urbano. Al mismo tiempo que en  $[\text{NO}_2]$ CUT se presentan condiciones con mayor emisión de  $\text{NO}_2$ , cielos despejados, menor porcentaje de humedad y elevación de temperatura favoreciendo la formación aun más de  $\text{NO}_2$ .

Los resultados del proceso de validación del modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]$ CUT (Cuadro 18) manifestó una media de -2.98 ppb y una desviación de  $\pm 6.42$  ppb, estos resultados sugieren baja dispersión de los datos con respecto a la media residual. Los resultados sugieren que el modelo es adecuado para la estimación de  $\text{NO}_2$  en la estación CUT.

**(Cuadro 18).** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUT con base en concentraciones de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET.

|                   | NO <sub>2</sub> VIF | NO <sub>2</sub> XAL | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> FAC | HrHGM   | HrINN   | TemMON  | DvMPA    | DvFAC    | VvUAX  | NO <sub>2</sub> Modelo | NO <sub>2</sub> RAMA | Desviación de la estimación |
|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|----------|----------|--------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 18 febrero 2010   | 27.3333             | 34.2083             | 10.7821            | 7.5833             | 85.8083 | 85.8083 | 9.7741  | 189.6333 | 184.9166 | 1.3908 | 28.7                   | 30.8                 | 2.1                         |
| 19 marzo 2011     | 16.75               | 46                  | 29.3422            | 30.625             | 23.5833 | 23.5833 | 16.9962 | 188.7673 | 225.1304 | 2.0526 | 21.6                   | 30.7                 | 9.1                         |
| 7 abril 2012      | 22.7083             | 22.4166             | 27.6694            | 30.0416            | 28.7391 | 31.5327 | 18.0378 | 180.8776 | 197.2916 | 2.2648 | 23.2                   | 16.0                 | -7.2                        |
| 10 mayo 2013      | 31.4166             | 57.7916             | 51.8660            | 51.7916            | 21.3636 | 23.9648 | 20.5399 | 183.3436 | 182.9583 | 2.3363 | 34.6                   | 27.1                 | -7.4                        |
| 17 junio 2014     | 19.8613             | 21.9545             | 31.1               | 33.6818            | 68.3    | 71.0768 | 16.655  | 185.7294 | 224.75   | 1.8899 | 22.0                   | 8.7                  | -13.3                       |
| 7 agosto 2015     | 17.125              | 30.6666             | 34.9640            | 36.9130            | 52.9583 | 61.3245 | 19.4291 | 177.7022 | 227.625  | 1.9708 | 20.7                   | 20.8                 | 0.1                         |
| 6 octubre 2016    | 14.3333             | 22.625              | 29.125             | 23.4583            | 73.8333 | 88.5833 | 18.2545 | 207.2916 | 288.5833 | 2.0875 | 18.5                   | 12.9                 | -5.6                        |
| 2 julio 2017      | 12.625              | 25.25               | 25.2727            | 26.2173            | 65.1666 | 84.5833 | 17.3166 | 180.9778 | 215.9583 | 1.4125 | 16.1                   | 10.0                 | -6.1                        |
| 10 enero 2018     | 46.4583             | 56.625              | 58.5416            | 25.9565            | 27.5416 | 44.875  | 12.7333 | 182.2916 | 156.25   | 1.6125 | 45.3                   | 41.5                 | -3.7                        |
| 16 noviembre 2018 | 26.375              | 35.625              | 32.3333            | 23.6842            | 47.9583 | 52.375  | 14.9916 | 198.2916 | 177.6315 | 1.6208 | 28.0                   | 30.3                 | 2.3                         |
|                   |                     |                     |                    |                    |         |         |         |          |          |        | $\bar{x}=25.9$ ppb     | $\bar{x}= 22.9$ ppb  | $\bar{x}=-2.98$ ppb         |
|                   |                     |                     |                    |                    |         |         |         |          |          |        |                        |                      | $s=\pm 6.42$ ppb            |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET**

Las estaciones y variables atmosféricas [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]GAM, HrHGM, HrMPA, DvINN, DvMER, VvCHO y VvHGM presentaron una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con la variable dependiente. En tanto que el R<sup>2</sup> es de 0.9441 exponiendo que la variabilidad de NO<sub>2</sub> en MON es explicada en un 92% por la variación de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas que integran al modelo. Por otra parte, la RMSE es de tan solo 1.8942 e indica baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ MON} = 0.2128 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.5542 ([\text{NO}_2] \text{ ACOL}) - 0.0618 ([\text{NO}_2] \text{ NEZ}) + 0.1398 ([\text{NO}_2] \text{ MER}) + 0.0815 ([\text{O}_3] \text{ INN}) - 0.09 ([\text{O}_3] \text{ GAM}) + 0.04 (\text{Hr HGM}) - 0.0067 (\text{Hr MPA}) + 0.0072 (\text{Dv INN}) - 0.0026 (\text{Dv MER}) - 1.3524 (\text{Vv CHO}) + 1.6751 (\text{Vv HGM})$$

Con base en los resultados obtenido por SAS, las estaciones [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]INN, HrHGM, DvINN y VvHGM, presentan una correlación directa [NO<sub>2</sub>]MON.

La estación [O<sub>3</sub>]INN manifiesta una conducta opuesta al comportamiento habitual entre O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>, en donde a menor presencia de NO<sub>2</sub>, mayor actividad fotoquímica de O<sub>3</sub> en la atmosfera. Sin embargo, el comportamiento es totalmente atribuible tanto a la distancia entre estaciones ubicadas en polos opuestos, como a factores meteorológicos y por el factor altitudinal ya que como se ha mencionado la estación INN es la estación que se ubica a una mayor altitud de toda la RAMA, aproximadamente a unos 3082 m.

La correlación que presentan las estaciones [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]ACOL y [NO<sub>2</sub>]MER con [NO<sub>2</sub>]MON señala que al presentarse un aumento de NO<sub>2</sub> este mismo comportamiento se genera en MON, dicha conducta estaría a su vez correlacionada con los efectos de las variables meteorológicas y a las actividades humanas que se producen con mayor intensidad los días laborales (SEMARNAT 2016), por lo cual podría establecer un comportamiento semanal entre estas estaciones.

Por otra parte, la presencia de las variables HrHGM, DvINN y VvHGM confirman el efecto sobre la formación y distribución del NO<sub>2</sub>. De manera particular HrHGM y VvHGM indican que ante un aumento de humedad relativa y la velocidad de los vientos en ese sitio las concentraciones de NO<sub>2</sub> en MON aumentan, estableciendo que existe interacción entre la humedad relativa y los vientos que se registran en la zona centro de la CDMX. Por su parte, DvINN manifiesta que, ante el aumento en los grados de la dirección de vientos, las concentraciones de NO<sub>2</sub> sufren un aumento proporcional, lo que sugiere que, ante al aumento en los cambios de DV en INN, se manifiesta menor dispersión de NO<sub>2</sub> en MON y, por lo tanto, un aumento en las concentraciones de NO<sub>2</sub> en su región oeste.

Las estaciones [O<sub>3</sub>]GAM, HrMPA, DvMER y VvCHO presentan una correlación inversa con respecto a [NO<sub>2</sub>]MON. En primer lugar [O<sub>3</sub>]GAM demuestra que ante la reducción de O<sub>3</sub> en la atmosfera las concentraciones de NO<sub>2</sub> aumentan y en el caso particular entre GAM y MON su conducta estrechamente ligada a la dirección y velocidad de los vientos, los cuales presentarían traslados desde el centro de la CDMX hacia la región de Texcoco contradiciendo en cierta medida al comportamiento de los vientos dominantes reportados por Jáuregui (1993).

HrMPA señala que la disminución de la humedad relativa registrada en MPA no se limita solo a la región sureste del Valle de México, sino que se extiende por lo menos hasta la región del municipio de Texcoco, donde se presentan mejores condiciones para la formación de NO<sub>2</sub>. La variable meteorológica DvMER sin lugar a dudas reflejaría la correlación entre los NO<sub>2</sub> y los vientos generados desde el centro de la CDMX, los cuales ejercen baja dispersión sobre el NO<sub>2</sub> formado en la misma estación MON, comportamiento similar que presenta el O<sub>3</sub> tal como lo encontrado por Rivera (2011).

En la estación VvCHO localizada relativamente cerca de MON establece una conducta mediante la cual ante bajo desplazamiento de los vientos en la estación CHO aumenta el NO<sub>2</sub> de MON, por lo que se hablaría de la existencia de vientos locales provenientes de la zona sureste o de manera inversa, vientos que ejercen un efecto sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub> sobre la región este del valle de México.

Finalmente, [NO<sub>2</sub>]NEZ cercana a MON y con registro de correlación inversa entre estaciones, sugiere un deslizamiento de NO<sub>2</sub> de la estación NEZ hacia MON. El patrón anterior dependerá

totalmente de la dirección de los vientos en ciertos momentos del día, que de manera precisa indicaría vientos que se dirigen de la región oeste al este del Valle de México.

La validación del modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]_{\text{MON}}$  (Cuadro 19) obtuvo una media de -3.10 ppb y una desviación de  $\pm 5.79$  ppb estos valores revelan baja dispersión de los valores estimados con respecto a los datos observados e infiere un ajuste propicio para estimar el  $\text{NO}_2$  en la estación MON.

**Cuadro 19.** Validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>] de la estación rural MON con base en concentraciones de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET.

|                   | NO <sub>2</sub> UIZ | NO <sub>2</sub> ACOL | NO <sub>2</sub> NEZ | NO <sub>2</sub> MER | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> GAM | HrHGM   | HrMPA   | DvINN    | DvMER    | VvCHO  | VvHGM  | NO <sub>2</sub> Modelo | NO <sub>2</sub> RAMA | Desviación de la estimación |
|-------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|----------|----------|--------|--------|------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 18 febrero 2010   | 28.9583             | 30.7884              | 30.7841             | 36.5833             | 10.7821            | 10.7821            | 85.8083 | 85.8033 | 189.6333 | 186.9166 | 1.3908 | 1.3908 | 30.5                   | 30.8                 | 0.3                         |
| 19 marzo 2011     | 36.1666             | 30.7397              | 30.7397             | 39.6666             | 29.3422            | 29.3422            | 23.5833 | 23.5833 | 188.7673 | 217.3043 | 2.0526 | 2.0526 | 30.4                   | 30.7                 | 0.4                         |
| 7 abril 2012      | 22.1666             | 13.5                 | 22.7083             | 27.5441             | 27.6694            | 27.6694            | 28.7391 | 31.5327 | 180.8776 | 204.4583 | 2.4125 | 1.9333 | 16.1                   | 14.4                 | -1.7                        |
| 10 mayo 2013      | 41.9583             | 23.7916              | 43.7                | 54.25               | 51.8660            | 513.8660           | 21.3636 | 23.9648 | 183.3436 | 203.7083 | 2.8791 | 1.7152 | 27.0                   | 17.0                 | -10.0                       |
| 17 junio 2014     | 25.3333             | 10.625               | 25.22083            | 25.6086             | 31.3               | 31.3               | 68.3    | 71.0768 | 185.7294 | 194.5416 | 1.7916 | 1.76   | 16.6                   | 11.1                 | -5.6                        |
| 7 agosto 2015     | 25.5                | 12.6666              | 24.8095             | 34.625              | 34.9640            | 34.9640            | 52.9583 | 61.3245 | 177.7022 | 164.8260 | 1.7208 | 1.6541 | 18.5                   | 17.8                 | -0.6                        |
| 6 octubre 2016    | 22.2916             | 20.7340              | 18                  | 32.8571             | 29.125             | 24.45              | 73.8333 | 87.25   | 90.4583  | 169.2916 | 1.4    | 1.9541 | 23.8                   | 12.0                 | -11.8                       |
| 2 julio 2017      | 25.9583             | 13.7916              | 24.9130             | 26.0416             | 25.2727            | 15.75              | 65.1666 | 71.2833 | 145.2916 | 186.4583 | 1.2125 | 1.1541 | 18.9                   | 15.0                 | -3.9                        |
| 10 enero 2018     | 47.1904             | 29.625               | 47.4583             | 67.625              | 58.5416            | 32.9166            | 27.5416 | 27.0416 | 181.2083 | 120.625  | 1.625  | 1.075  | 36.3                   | 30.0                 | -6.3                        |
| 16 noviembre 2018 | 29.9                | 18                   | 28.625              | 42.7916             | 32.3333            | 19.25              | 47.9583 | 60.5833 | 212.7333 | 137.25   | 1.5708 | 1.1666 | 24.0                   | 32.2                 | 8.3                         |
|                   |                     |                      |                     |                     |                    |                    |         |         |          |          |        |        | $\bar{x}=24.2$ ppb     | $\bar{x}=21.1$       | $\bar{x}= -3.10$ ppb        |
|                   |                     |                      |                     |                     |                    |                    |         |         |          |          |        |        |                        |                      | $s=\pm 5.79$ ppb            |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de un día, con base en registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Las estaciones [NO<sub>2</sub>]COY, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]CUA, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]UIZ, [O<sub>3</sub>]TLA registraron una relación significativa con [NO<sub>2</sub>]AJM<sub>(desfase un día)</sub>, generando el rechazo de la hipótesis nula planteada inicialmente en este estudio. Al mismo tiempo, el coeficiente de determinación con valor 0.8994 expone que la variación del NO<sub>2</sub> en la estación AJM se explica en un 89% por la variación tanto de NO<sub>2</sub> como de O<sub>3</sub> registrado en las estaciones citadas previamente. Por su parte, la RMSE expone un valor de 2.10253 y manifiesta baja dispersión entre los valores observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ AJM}_{(\text{desfase un día})} = 0.8576 ([\text{NO}_2] \text{ COY}) - 1.5291 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) - 0.3721 ([\text{NO}_2] \text{ SAG}) + 0.2367 ([\text{NO}_2] \text{ SFE}) + 1.0246 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) + 0.1707 ([\text{O}_3] \text{ CUA}) - 1.2793 ([\text{O}_3] \text{ COY}) + 0.2577 ([\text{O}_3] \text{ AJM}) - 0.2864 ([\text{O}_3] \text{ INN}) + 0.1243 ([\text{O}_3] \text{ CHO}) + 0.7261 ([\text{O}_3] \text{ NEZ}) + 0.1291 ([\text{O}_3] \text{ MER}) + 0.3895 ([\text{O}_3] \text{ CAM}) + 0.4796 ([\text{O}_3] \text{ UIZ}) - 0.1845([\text{O}_3] \text{ TLA})$$

Las estimaciones generadas por SAS indican que las estaciones [NO<sub>2</sub>]COY, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]CUA, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]UIZ, presentan una correlación directa con respecto a la estación AJM<sub>(desfase un día)</sub>.

En el caso de las estaciones [NO<sub>2</sub>]COY, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]PED, la correlación estaría sustentada fuertemente por la proximidad entre estas estaciones con respecto a la estación AJM<sub>(desfase un día)</sub> las cuales presentarían patrones similares sobre el comportamiento de NO<sub>2</sub> en la región sur del Valle de México donde se ubican todas ellas y en donde los cambios en las concentraciones de NO<sub>2</sub> serían mínimos contemplando retardo de un día.

Las estaciones [O<sub>3</sub>]CUA, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]UIZ sustentarían su correlación con AJM<sub>(desfase un día)</sub> ante la existencia de un patrón cíclico en donde en primera instancia se genera un aumento de O<sub>3</sub> en las estaciones citadas y, posteriormente

ocurre el incremento de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en AJM un día después, sin asegurar que se ocurra en cierto momento una disminución sobre las concentraciones de  $\text{O}_3$  durante este proceso.

Por su parte,  $[\text{NO}_2]\text{CCA}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{SAG}$ ,  $[\text{O}_3]\text{COY}$ ,  $[\text{O}_3]\text{INN}$ ,  $[\text{O}_3]\text{TLA}$  indicaron poseer una correlación inversa con el  $[\text{NO}_2]\text{AJM}_{(\text{desfase un día})}$ . Las estaciones  $[\text{NO}_2]\text{CCA}$  y  $[\text{NO}_2]\text{SAG}$  podrían estar señalando un movimiento parcial de  $\text{NO}_2$  generando disminución de  $\text{NO}_2$  en ambas estaciones hasta AJM, el cual se manifiesta al día siguiente, en donde se produce el aumento en los registros del  $\text{NO}_2$  en AJM patrón coadyuvado por los vientos dominantes de la región.

Finalmente, las estaciones  $[\text{O}_3]\text{COY}$ ,  $[\text{O}_3]\text{INN}$  y  $[\text{O}_3]\text{TLA}$  probarían nuevamente la existencia de un comportamiento cíclico con retardo de un día, el cual genera en primer lugar la disminución de las concentraciones de  $\text{O}_3$  en las estaciones mencionadas por el tiempo de vida corta del  $\text{O}_3$ , mientras al día siguiente las concentraciones de  $\text{NO}_2$  aumentan en la estación  $\text{AJM}_{(\text{desfase un día})}$  muy probablemente por su emisión diaria principalmente por actividades humanas como lo reporta SEDEMA (2017).

El proceso de validación del modelo  $[\text{O}_3]\text{AJM}_{(\text{desfase un día})}$  (Cuadro 20) obtuvo una media de 6.2 ppb y una desviación estándar de  $\pm 10.29$  ppb, si bien la desviación señala una dispersión grande de los datos, tanto el  $R^2$  como la RMSE señalan que el modelo presenta un ajuste adecuado, por lo cual es muy probable que el modelo de aun mejores estimaciones en otros periodos, por lo cual ante su uso se recomienda tener cierta precaución sobre las concentraciones estimadas de  $[\text{O}_3]\text{AJM}_{(\text{desfase un día})}$ .



## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de un día, con base en registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Con base en los resultados obtenidos por SAS y los procedimientos GLM y Stepwise las estaciones [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]SAG, generaron una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con [NO<sub>2</sub>]CUT<sub>(desfase un día)</sub>, propiciando el rechazo de la hipótesis nula. Asimismo, el valor de R<sup>2</sup> es 0.5529 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUT tan solo es explicada en un 55% por la variación de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de las estaciones mencionadas. Por otra parte, el valor de la RMSE es 4.6479 y sugiere baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo y se deben incluir las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{CUT}_{(\text{desfase un día})} = 0.1192 ([\text{O}_3] \text{CUT}) - 0.0135 ([\text{O}_3] \text{VIF}) - 0.1072 ([\text{O}_3] \text{MPA}) + 0.2201 ([\text{O}_3] \text{INN}) - 0.1523 ([\text{O}_3] \text{TLA}) - 0.0607([\text{O}_3] \text{MON}) + 0.0652 ([\text{O}_3] \text{SFE}) + 0.5485 [\text{NO}_2] \text{SAG}$$

Las estaciones [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]SAG exhibieron una correlación directa con respecto a la estación CUT<sub>(desfase un día)</sub>. En el caso de las estaciones [O<sub>3</sub>]CUT y [NO<sub>2</sub>]SAG, relación está fuertemente atribuida a la proximidad entre estaciones. Pero también, al efecto precursor del NO<sub>2</sub> con respecto a la formación del O<sub>3</sub> tal como lo reportado por Cano et al. (2016).

Por su parte, la relación expuesta por la misma estación CUT con las variables O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> refleja un comportamiento en donde inicialmente se registran elevaciones de O<sub>3</sub> y al día siguiente se produce el aumento de NO<sub>2</sub>, donde tal comportamiento entre estos dos contaminantes se presenta con retardo de un día. Mientras que la correlación con [NO<sub>2</sub>]SAG alude a la existencia de un deslizamiento de NO<sub>2</sub> desde SAG hasta CUT con retardo de un día en su registro en la estación CUT<sub>(desfase un día)</sub>.

La relación que presentan la estaciones [O<sub>3</sub>]INN y [O<sub>3</sub>]SFE puede ser resultado de condiciones meteorológicas favorables para la formación de O<sub>3</sub> en ambas estaciones, mientras al día siguiente el norte del Valle de México se presentan condiciones favorables para el aumento en la formación del NO<sub>2</sub>.

Contrariamente las estaciones [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>] MPA, [O<sub>3</sub>]TLA y [O<sub>3</sub>]MON, indican la existencia de una relación inversa con el [NO<sub>2</sub>]CUT<sub>(desfase un día)</sub>. Por su parte la relación inversa que registran las estaciones [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>] MPA, y [O<sub>3</sub>]TLA postula disminución del O<sub>3</sub> por el tiempo de vida corta que registra el O<sub>3</sub> en la atmosfera, previo al aumento de NO<sub>2</sub> principalmente por emisión del mismo contaminante derivado de la industria y el uso de automotores a base de gasolina y diesel.

Los resultados de la validación del modelo [NO<sub>2</sub>] CUT<sub>(desfase un día)</sub> (Cuadro 21) obtuvieron una media de 6.56 ppb y una desviación de  $\pm 8.39$  ppb, esto indica baja dispersión con respecto a la media residual y por lo tanto la obtención de un buen modelo relativamente adecuado para estimar las estimaciones de [NO<sub>2</sub>] en la estación rural CUT<sub>(desfase un día)</sub>.

**Cuadro 21.** Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUT<sub>(desfase un día)</sub> con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA

|                   | O <sub>3</sub> CUT | O <sub>3</sub> VIF | O <sub>3</sub> MPA | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> MON | O <sub>3</sub> SFE | NO <sub>2</sub> SAG | O <sub>2</sub> Modelo                 | O <sub>2</sub> RAMA                   | Desviación de la estimación                                |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 7.9027             | 7.9027             | 7.9027             | 7.9027             | 6.8333             | 9.625              | 7.9027             | 25.875              | 14.8                                  | 30.8                                  | 16.0   |
| 19 marzo 2011     | 28.0511            | 28.0511            | 28.0511            | 28.0511            | 22.7391            | 28.0511            | 28.0511            | 30.5416             | 19.5                                  | 30.7                                  | 11.2   |
| 7 abril 2012      | 22.6014            | 24.375             | 22.6014            | 22.6014            | 21.9545            | 22.9583            | 23.0833            | 18.9523             | 12.1                                  | 16.0                                  | 4.0  |
| 10 mayo 2013      | 29.6666            | 34                 | 32.4794            | 32.4794            | 28.375             | 34.1428            | 39.5416            | 34.75               | 22.0                                  | 27.1                                  | 5.1  |
| 17 junio 2014     | 29.2916            | 33.9166            | 34.2050            | 34.2050            | 31.7727            | 32.6666            | 34.2050            | 25.7083             | 16.3                                  | 8.7                                   | -7.8   |
| 7 agosto 2015     | 24.7083            | 29.2083            | 33.7211            | 33.7211            | 27.25              | 29.5416            | 46                 | 21.1578             | 15.0                                  | 20.8                                  | 5.8  |
| 6 octubre 2016    | 17.7916            | 19.75              | 32.2916            | 26.9166            | 16.6666            | 21.7916            | 16.4736            | 18.9565             | 11.9                                  | 12.9                                  | 0.9  |
| 2 julio 2017      | 22.2740            | 26.125             | 25.7083            | 21.9545            | 21.625             | 23.5652            | 20.4583            | 19.625              | 11.8                                  | 10.0                                  | -1.7   |
| 10 enero 2018     | 18.0952            | 19                 | 45.7083            | 41.6666            | 22.7956            | 27.9166            | 23.6666            | 34.9565             | 21.7                                  | 41.5                                  | 19.8   |
| 16 noviembre 2018 | 27                 | 16                 | 40                 | 28.3333            | 14.9583            | 17.3209            | 16.8333            | 27.8333             | 18.0                                  | 30.3                                  | 12.3   |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                     | <b><math>\bar{x}</math>= 16.3 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 22.9 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=6.56 ppb</b><br><b>s=±8.39 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de dos días, con base en registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Los resultados obtenidos revelaron que las estaciones [O<sub>3</sub>]BJU, [NO<sub>2</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]UIZ y [NO<sub>2</sub>]VIF registran una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con la variable dependiente [NO<sub>2</sub>]CUA<sub>(desfase dos días)</sub>. Asimismo el R<sup>2</sup>, señala una correlación relativamente baja del modelo. Una postura similar se presenta por RMSE al presentar una ligera dispersión entre los valores observados y los generados por el modelo de estimación.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.4416 indicando que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada tan solo en un 44% por la variación de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> que se registran dos días antes en las estaciones nombradas previamente. Mientras que el valor de la RMSE es 7.9124 manifiesta elevada dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUA}_{(\text{desfase dos días})} = 2.2205 ([\text{O}_3] \text{ BJU}) - 0.0277 ([\text{NO}_2] \text{ CUT}) + 0.5081 ([\text{O}_3] \text{ AJM}) - 1.3141 ([\text{O}_3] \text{ CCA}) - 0.6232 ([\text{O}_3] \text{ TLA}) - 0.4107 ([\text{O}_3] \text{ INN}) - 0.04721 ([\text{NO}_2] \text{ SAG}) - 0.4465 ([\text{O}_3] \text{ NEZ}) + 0.4271 ([\text{O}_3] \text{ MON}) + 0.8961 ([\text{O}_3] \text{ XAL}) - 1.4985 ([\text{O}_3] \text{ MER}) - 0.066 ([\text{O}_3] \text{ SAG}) + 0.0997 ([\text{O}_3] \text{ ACOL}) + 0.1291 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.2115 ([\text{NO}_2] \text{ VIF})$$

Las estaciones [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]UIZ y [NO<sub>2</sub>]VIF presentan una relación directa con respecto a [NO<sub>2</sub>]CUA<sub>(desfase dos días)</sub>, cuya correlación puntualiza la existencia de un componente periódico con diferencia de dos días a partir del registro de O<sub>3</sub> o NO<sub>2</sub> en las estaciones mencionadas, el cual se caracteriza por el aumento de O<sub>3</sub> o NO<sub>2</sub> en cualquiera de las estaciones citadas, y dos días después se produce el aumento NO<sub>2</sub> en la estación CUA.

Contrariamente las estaciones [NO<sub>2</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]SAG presentan una relación inversa con el NO<sub>2</sub> de CUA<sub>(desfase dos días)</sub>.

La correlación inversa de este grupo de estaciones estaría sustentada en principio al papel precursor de NO<sub>2</sub> sobre la formación del O<sub>3</sub> y, en segundo término, a un componente cíclico con retardo de dos días, comenzando el día de registro del NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en alguna de las estaciones, reflejándose dos días después sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación CUA las cuales disminuyen, comportamiento que podría estar atribuido en parte a variables meteorológicas.

Los resultados obtenidos en el proceso de validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>]CUA<sub>(desfase dos días)</sub> (Cuadro 22) obtuvo una media de los residuales de -5.37 ppb y una alta desviación de ± 24.58 ppb. Esta información podría sugerir que el modelo es adecuado para la estimación de [NO<sub>2</sub>]CUA<sub>(desfase dos días)</sub>. Sin embargo, ante su uso se recomienda tener precaución con los resultados obtenidos debido a que en algunos valores de estimación se presentaron desviaciones elevadas generando estimaciones poco precisas.

**(Cuadro 22).** Validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUA<sub>(desfase dos días)</sub> con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>BJU | NO <sub>2</sub><br>CUT | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>INN | NO <sub>2</sub><br>SAG | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>XAL | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>SAG | O <sub>3</sub><br>ACOL | NO <sub>2</sub><br>UIZ | NO <sub>2</sub><br>VIF | NO <sub>2</sub> Modelo              | NO <sub>2</sub> RAMA                 | Desviación<br>de la<br>estimación     |                    |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 28.001                 | 16.001                | 16.001                | 26.1538               | 16.001                | 23.2608                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 12.625                | 16.4782               | 19.5833                | 24.375                 | 21.75                  | 19.9                                | 30.8                                 | 10.9                                  |                    |
| 19 marzo<br>2011        | 30.8941               | 28.8091                | 30.8941               | 30.8941               | 47.5833               | 30.8941               | 29.0865                | 30.8941               | 30.8941               | 12.3333               | 26.25                 | 26.4347               | 33.9166                | 30.4090                | 17.0416                | 11.6                                | 30.7                                 | 19.2                                  |                    |
| 7 abril<br>2012         | 27.8425               | 26.125                 | 27.8425               | 27.8425               | 26.2083               | 27.8425               | 33.25                  | 27.5416               | 27.0833               | 30.2777               | 22.0833               | 24.0833               | 27.6524                | 33.75                  | 28.6666                | 40.3                                | 13.3                                 | -26.9                                 |                    |
| 10 mayo<br>2013         | 32.1540040            | 30.5416                | 32.1540               | 32.1540               | 35.8421               | 32.1540               | 35.375                 | 25.9523               | 33.75                 | 27.8333               | 27.5                  | 31.25                 | 35.5416                | 27.8636                | 21.5833                | 39.2                                | 14.4                                 | -24.8                                 |                    |
| 17 junio<br>2014        | 37.5883               | 14                     | 37.5883               | 37.5883               | 32.2608               | 37.5883               | 23.5416                | 39.5                  | 43.125                | 33.8333               | 29.4166               | 31.75                 | 34.4782                | 21.8333                | 14.375                 | 43.2                                | 21.7                                 | -21.5                                 |                    |
| 7 agosto<br>2015        | 26.7083               | 24.5416                | 48.1304               | 30.375                | 21.5                  | 28.0138               | 22.2083                | 32.3                  | 28.3                  | 19.3333               | 6                     | 29                    | 28.8333                | 32.0416                | 12.375                 | 58.1                                | 25.0                                 | -33.1                                 |                    |
| 6 octubre<br>2016       | 27.5146               | 15.25                  | 35.3333               | 26.375                | 19.9583               | 22.2083               | 18.6666                | 28.875                | 20                    | 25.25                 | 20.6956               | 26.6666               | 25.9658                | 27.8333                | 14.7083                | 38.4                                | 17.9                                 | -20.5                                 |                    |
| 2 julio<br>2017         | 19.75                 | 23.2567                | 27.6666               | 23.7916               | 21.625                | 21.9545               | 19.625                 | 20.2083               | 23.5652               | 21                    | 17                    | 23.5833               | 27.4583                | 25.2916                | 19.0416                | 31.1                                | 16.2                                 | -14.9                                 |                    |
| 10 enero<br>2018        | 24.5416               | 24.3333                | 44.0833               | 26.3357               | 26.3357               | 54.1666               | 33.8333                | 15.25                 | 21.0952               | 16.7391               | 20.375                | 20.7916               | 10.2916                | 41.4166                | 26.4166                | 8.8                                 | 39.8                                 | 31.0                                  |                    |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 2.0952                | 36.4285                | 3.2562                | 1.7142                | 1.6190                | 17.95                 | 22.1428                | 3.2562                | 3.2562                | 1.1                   | 1.5238                | 2.1428                | 3.1428                 | 24                     | 23.0952                | 3.4                                 | 30.5                                 | 27.1                                  |                    |
|                         |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        |                        | <b><math>\bar{x}</math>=29.4ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=24.03ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=-5.37 ppb</b> |                    |
|                         |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        |                        |                                     |                                      |                                       | <b>s=±24.58ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## CONCLUSIONES

El análisis realizado en este trabajo indica que existe correlación entre las estaciones de la RAMA y sus registros de NO<sub>2</sub> y de O<sub>3</sub>, manifestando la posibilidad de determinar las concentraciones O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en zonas rurales del Valle de México. De igual manera se confirmó la existencia de una relación entre las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad de los vientos) registradas en la REDMET, con base en las concentraciones de registrados en la RAMA.

Los mejores modelos de estimación de O<sub>3</sub> fueron aquellos en donde solamente se toman en cuenta concentraciones de O<sub>3</sub> registrado en otras estaciones de la RAMA y en segundo término los modelos que integran concentraciones tanto de O<sub>3</sub> como NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

Los mejores modelos para la estimación de NO<sub>2</sub> son los modelos de estimación integrados únicamente por concentraciones de NO<sub>2</sub> registrado en otras estaciones de la RAMA y en segundo término los modelos de estimación los modelos que incorporan concentraciones tanto de O<sub>3</sub> como NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

Las concentraciones de NO<sub>2</sub> y de O<sub>3</sub> presentan patrones de comportamiento, algunos de ellos se manifiestan el mismo día de su observación y otros se expresan con retardos de uno y dos días. Esta información el conocimiento sobre el comportamiento de ambos contaminantes en la atmosfera del Valle de México.

Las variables meteorológicas tienen fuerte influencia sobre la formación y dispersión de las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, su impacto se puede manifestarse de manera contemporánea y en otras ocasiones se pueden presentar con retardo de uno y hasta dos días de diferencia. Lo anterior, brinda un conocimiento más preciso sobre el nivel de impacto de las variables meteorológicas sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en el Valle de México.

Los modelos de estimación obtenidos en este trabajo son una herramienta adicional ante la falta de registros en ciertos periodos de tiempo por parte de las estaciones de la RAMA dentro del periodo 2010 al 2017 para estimar las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en las estaciones Ajusco Medio, Cuajimalpa, Cuautitlán y Montecillo, información con la cual se puede conocer con mayor exactitud

el continuo depósito de ambos contaminantes en zonas rurales, agrícolas, ganaderas, bosques naturales y reservas ecológicas.



## LITERATURA CITADA

Ballester, F. 2005. Contaminación Atmosférica, Cambio climático y salud. Unidad de epidemiología y Estadística Escuela Valenciana de Estudios para la salud. Rev Esp Salud Pública 2005; 79 (2): 159-175.

Bravo, J.L., Nava, M.M., Muhlia, A. 2000. Relaciones entre la magnitud del valor máximo de ozono, la radiación solar y la temperatura ambiente en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Contaminación Ambiental 16(2): 45-44.

Caballero, M., Lozano, S., Ortega, B. 2007. Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Revista Digital Universitaria 8 (10) 1-12.

Capilla, C. 2016. Prediction of hourly ozone concentrations with multiple regression and multilayer perceptron models. Polytechnic University of Valencia, Spain. Int J Sustain Dev Plan 11(4):558-565.

CAM.2002. Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. [en línea]. [http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire\\_2002-2010.pdf](http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/gestion-ambiental-aire-memoria-documental-2001-2006/descargas/proaire_2002-2010.pdf) 15/11/18

CAME.2017. Programa de Gestión Federal para Mejorar la Calidad del Aire de la Megalópolis. PROAIRE de la Megalópolis 2017-2030. Secretaria de Medio Ambiente Y Recursos Naturales. 332 pp.

Cano, B. Y., Agustín Morales, M. J., Sánchez, C.L., Colina R. M., Torres, P. J. 2016. Evaluación de los niveles de ozono en la Ciudad de Maracaibo, Estado Zulia Venezuela. Facultad Experimental de Ciencias, Universidad de Zulia. Venezuela. Rev. Int. Contam. Ambie. 32 (1) 25-34.

Carnicer J.M. 2007. Contaminación Atmosférica. Modulo I: Contaminación Ambiental. Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua 2007/2008. Escuela de Negocios. España. [en línea] <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/20198/contaminacion-atmosferica> 10/01/19

CEPA, 1999. National ambient air quality objectives for ground-level zone. Federal-Provincial Working Group on Air Quality Objectives and Guidelines. Canadian Environmental Protection Act Health Canada & Environment Canada. [en línea] <http://publications.gc.ca/collections/Collection/En42-17-7-2-1999E.pdf> 10/10/18

Cervantes- Hernández P., Media, varianza y desviación estándar. Rev. .Ciencia y Mar 12 (34) 29-36

Céspedes, R. 2005. Impacto de la contaminación en la salud (ICAS). Proyecto Aire Limpio: Evaluación del efecto de la contaminación atmosférica en la salud de la población del Municipio Cercado Cochabamba - Bolivia. 4-25 pp.

Corres, G.A, Esteban, A., García J.C., Zárate, C. 2009. Análisis de series temporales. Revista ingeniería Industrial 8 (1), 21-33

Cortez, L.M., Mercado G. A., Hernández, A. M., Meneses, G. F., Palazuelos, R.E. 1998. Evaluación de la calidad del aire interior y exterior en un jardín de niños de la Ciudad de México. Centro de investigación en Salud poblacional. Instituto Nacional de Salud Pública. American British Cowdray Hospital. México. Secretaria del Medio Ambiente. Salud Pública de México. 40 (5): 415-420.

Cruz-Grajales, C. 2002. Comportamiento del sotobosque en respuesta al ozono. Tesis de Maestría en Ciencias. Postgrado en Ciencias Forestales. Colegio de Postgraduados, México.

De la Fuente, F. 2011. Regresión múltiple. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad Autónoma de Madrid, España. [en línea] [http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/MULTIVARIANTE/REGRE\\_MULTIPLE/regresion-multiple.pdf](http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/MULTIVARIANTE/REGRE_MULTIPLE/regresion-multiple.pdf) 25/11/18

De Souza A., Ikefut, V. P., García A., Santos S.D., De Oliveira S. S. 2018. Análise da relação entre O<sub>3</sub>, NO e NO<sub>2</sub> usando técnicas de regressão linear múltipla. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Niterói, Universidade Federal Fluminense. GEOgraphia 20(43) mai./ago.124 – 135 .

Diario Oficial de la Federación (DOF). 1993. Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. [en línea]. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/023ssa13.html> 12/02/18

Diario Oficial de la Federación (DOF). 2014. Norma Oficial Mexicana. “Salud ambiental. Valor permisible para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. NOM-020-SSA1-2014. Secretaria de Salud- Diario Oficial de la Federación. México. [en línea]. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5451/SALUD/SALUD.html> 25/03/18

EPA.2016. Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria Final Report (2016). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-15/068. 137 pp.

Fernández M., Gallego M., García J., Acero F. 2011. A study of surface ozone variability over the Iberian Peninsula during the last fifty years. Atmos. Environ. 45 (2001), 1946-1959 .

Ferrero, R. 2015. Selección paso a paso e importancia de los predictores. [en línea]. <https://www.maximaformacion.es/blog-dat/seleccion-paso-a-paso-e-importancia-de-los-predictores/> 12/04/18

Franco-Islas Y. 2014. Distribución espacial e impacto de aeropoluantes en la salud del bosque de conservación del Distrito Federal. Colegio de Postgraduados. Postgrado en Ciencias Forestales. Montecillo, Estado de México. 87 pp.

Galán M.D., Fernández P.R. 2006. Implicación de los NO<sub>x</sub> en la Química Atmosférica. Instituto de Salud Carlos III. Centro Nacional de Sanidad Ambiental. Área de Contaminación Atmosférica. M+A Revista Electrónica de Medioambiente 2: 90-103 .

García C.A., Muñoz C.R., García, C.G. 1999. Análisis de ozono y Óxidos de Nitrógeno mediante Técnicas de Series de Tiempo y Regresión Lineal. Secretaria del Medio Ambiente. Dirección

General de Prevención y Control de la Contaminación. [en línea]  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliaire/mexicon/R-0188.pdf> 07/11/17

García-Reynoso., J. 2009. Influencia de la meteorología en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. Revista especializada en ciencias Químico-Biológicas, 12(2):83-86.

González-Medina, R., Mendoza-Briseño, M., Alvarado-Rosales, D. 2010. Exposición a ozono en relación a vitalidad en un bosque de Oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham). Madera y Bosques 16 (4), 7-19.

González, O. M.A., Torres, M. C.L. 2015. Incidencia de las variables meteorológicas en el comportamiento de la concentración de PM10 y NO<sub>x</sub>. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Tecnología en Saneamiento Ambiental. 63 pp.

Hernández, T. T. Bauer, L. I. (1984). *Evolución del Daño por Gases Oxidantes en Pinus Hartwegii y Pinus Montezumae var. Lindleyi en el Ajusco, D. F.* Agrocienza, 56, 183-194.

Hernández G. L. 2009. Modelado atmosférico para determinar niveles máximos diarios de ozono en la ciudad de Guadalajara. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Depto. 73 pp.

INECC. 2016. Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas atmosféricas de México: informe final. SEMARNAT. 72 pp.

INEGI, 2018. [en línea] <http://www.inegi.org.mx/> 04/05/18

Jaioun, K., Saithanu, K., Mekpariyup, J. 2014. Departamento f Mathematics Faculty of science, Burapha university 169 Muang, Chonburi, Thailand. Iinternational Journal of Applied Environmental Sciences. Volume 9, number 4 (2014), 1305- 1308 pp.

Jazcilevich, D. A., García, R., A., Ruiz, S. G. 2002. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. UNAM- CCA. Atmospheric Environment 37 (2003) 183–193 pp.

Jáuregui-Ostos E. 1993. Algunas consideraciones del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización. UNAM. Rev. Int. Contam. Ambient, 9 (3): pp. 12-24, Ciudad de México, México.

Jáuregui-Ostos E. 2000. El clima de la Ciudad de México. Instituto de Geografía . UNAM. Ed. Plaza y Valdes S.A. de C.V. México. 131 pp.

Jiménez, J. CH. 2002. Análisis de valores extremos de la concentración de ozono en la ciudad de México Tesis profesional. UJAT División Académica de Ciencias Básicas Cunduacán Tabasco 95p.

López E., García M., Peral N., Ballester F. e Iñiguez C. 2008. Caracterización del ambiente atmosférico en Las Palmas de Gran Canaria y Santa Cruz de Tenerife. Revista Española Salud Pública 82, 493-507.

Marques D.M, Galindo, M., Cervantes, S. 2007. Análisis de regresión un enfoque práctico. División de Ciencias Químico Biológicas. Academia de estadística y computo científico. FEZ Zaragoza. UNAM. [en línea] [https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/ecocuan/ecocuan\\_reg\\_manual.pdf](https://www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/biologia/ecocuan/ecocuan_reg_manual.pdf) 20/02/18

Martínez O.R., Tuya, P.L., Martínez O.M., Pérez A.A., Cánovas A.M. 2009. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. Rev. Haban cienc méd La Habana 8 (2), 1-20.

Martínez, V.M., García R.R., Molina, E.E., Fernández A. A. 2008. Partículas en suspensión totales en el periodo 2004-2006 (La Habana, Cuba). Hig. Sanid. Ambient. 8: 343 – 347 pp.

Molina, L. T., Molina, M, J. 2005. La calidad del aire en la megaciudad de México. Un enfoque integral. Fondo de Cultura Económica. México. 463 pp.

Musso H., Boemo, A., Avila, G., Farfán, R. 2002. Concentración de ozono y dióxido de nitrógeno en la troposfera de Salta (Capital). Facultad de Ciencias Exactas. Universidad de Salta. Buenos Aires. Argentina. 6 pp.

Novoa, J., Parra, D., S., Orrego, D., Becerra, M. 2014. Análisis de dependencia usando regresión lineal múltiple y regresión de componentes principales en contaminantes del aire y parámetros meteorológicos: caso de estudio. Rev. Quid., (23), 13-20.

Oooka R., Khiemb M., Hayamic H., Yoshikadod H., Huange H. y Kawamoto Y. 2011. Influence of meteorological conditions on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan. Procedia Environ. Sci. Urb. Environ. Pollut. 4, 138-150.

Percy-E K., A Legge., S. Krupa. 2003, 'Tropospheric ozone: A continuing threat to global forests? Air Pollution, Global Change and Forests in the New Millennium', Elsevier, UK.

PROAIRE 2010. Programa para Mejorar la Calidad del Aire Jalisco 2011- 2020. Inventario de emisiones, año base 2005. 231 pp.

Reyes, H.C., Rodríguez, R., Huerta, H. 2015. Aprendiendo a modelar la tendencia del ozono en la Ciudad de México. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad de Puebla. XX simposio internacional de Estadística 2015. 1-4 pp.

Ramos, H.S., Bautista, M.R., Valdez, M.A. 2010. Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. Universidad y Ciencia Trópico Húmedo. División Académica de Ciencias Biológicas. Villahermosa. Tabasco. 16pp

Rivera, G.A., 2011. Impacto de las variables meteorológicas en la formación de ozono en la cuenca de Santiago. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de geofísica. Santiago de Chile. 93 pp.

Smith, W.H., 1990, Air pollution and forests: Interactions between Air Contaminants and Forest Ecosystems. Springer-Verlag. 2<sup>nd</sup>. New York, USA. 369 pp.

Salazar, L., Nicolis, O., Ruggeri, F., Kisel'ák, J., Stehlík, M. 2018. Predicting hourly ozone concentrations using wavelets and ARIMA models. *Neural Comput & Applic* 2018. [en línea]. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3345-0>. 15/03/18

SAS. SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT® 9.2 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc.[en línea].<https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugglmselect/61792/PDF/default/statugglmselect.pdf> 11/11/17

SEDEMA. 2017. Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico. Ciudad de México. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Noviembre, 2017.

SEDEMA. 2018. <http://www.aire.df.gob.mx/default.php?ref=Y2I=>

SEMARNAT. 2013. Calidad del aire: una práctica de vida. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>

SEMARNAT. 2016. Diagnóstico sobre la calidad del aire en cuencas Atmosféricas de México. Contaminación y Salud Ambiental. Centro de Ciencias de la Atmosfera. UNAM.[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208883/Informe\\_Final\\_AECAME\\_20161230.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/208883/Informe_Final_AECAME_20161230.pdf)

SIMAT. 2001. Influencia de la fisiografía del Valle de México en el comportamiento del ozono (O<sub>3</sub>). Sistema de Monitoreo Atmosférico. [en línea] <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/simat-cartel-comportamiento-o3.pdf> 18/08/18

Turner, M. C., Jerrett, M., Pope III, C. A., Krewski, D., Gapstur, S. M., Diver, W. R., Burnett, R. T. 2016. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study. *American journal of respiratory and critical care medicine* 193(10), 1134-1142.

Villareal, F. 2016. Introducción a los Modelos de Pronósticos. Departamento de Matemática. Universidad Nacional del Sur. [en línea]. [http://www.matematica.uns.edu.ar/uma2016/material/Introduccion\\_a\\_los\\_Modelos\\_de\\_Pronosticos.pdf](http://www.matematica.uns.edu.ar/uma2016/material/Introduccion_a_los_Modelos_de_Pronosticos.pdf) 16/06/18

WHO. 2005. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005. Summary of risk assessment. World Health Organization. [en línea]. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf?sequence=1) 20/12/18

## ANEXOS

### ANEXO I. Periodos con falta de datos por mantenimiento u otras causas en las estaciones de monitoreo ubicadas en la Ciudad de México, durante el año 2016 (continua).

| Delegación          | Estación                           | Clave | Subred   | Parámetro   | Inicio                               | Hora       | Fin        | Hora   | Motivo   |  |
|---------------------|------------------------------------|-------|--|---|--------------------------------------|------------|------------|--|--|--|
| Álvaro Obregón      | Pedregal                           | PED   | RAMA   | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>co</sub> | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Falla del equipo   |  |
|                     |                                    |       | REDMET   | UVB   | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Se retira el sensor para mantenimiento en el laboratorio       |  |
| Azacapatzalco       | Camaronas                          | CAM   | RAMA   | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>co</sub> | 15/09/2016                           | 9.00       | 10/10/2016 | 24.00  | Falla del equipo   |  |
| Benito Juárez       | Benito Juárez                      | BJU   | RAMA   | SO <sub>2</sub>   | 01/01/2016                           | 1.00       | 25/01/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
|                     |                                    |       |  | NOx, NO <sub>2</sub> , NO                               | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 242.00   | Retiro para mantenimiento en laboratorio, falta de suministros |  |
| Coyoacán            | Centro de Ciencias de la Atmósfera | CCA   | RAMA   | NOx, NO <sub>2</sub> , NO                               | 23/02/2016                           | 15.00      | 06/04/2016 | 24.00  | Retiro para mantenimiento en laboratorio                       |  |
|                     | Cuajimalpa                         | CUA   | RAMA   | SO <sub>2</sub>   | 01/01/2016                           | 1.00       | 24/05/2016 | 24.00  | Retiro para mantenimiento en laboratorio, falta de suministros |  |
| Cuajimalpa          | Santa Fe                           | SFE   | RAMA   | CO, O <sub>3</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , NO          | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/03/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
|                     |                                    |       |  | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>co</sub> | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
|                     |                                    |       | SO <sub>2</sub>  | 01/01/2016  | 1.00                                 | 01/04/2016 | 24.00      | Fuera de línea temporal por falta de suministros |  |  |
|                     |                                    |       | O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NOx, NO <sub>2</sub> , NO | 26/10/2016  | 12.00                                | 10/11/2016 | 24.00      | Retiro para mantenimiento en laboratorio         |  |  |
|                     |                                    |       | REDMET   | UVA, UVB  | 06/08/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio            |  |
| Cuauhtémoc          | Hospital General de México         | HGM   | RAMA   | RH, TMP, WSP, WDR, Pba                                  | 04/04/2016                           | 12.00      | 23/06/2016 | 24.00  | Retiro de los sensores para mantenimiento en laboratorio       |  |
| Gustavo A. Madero   | Gustavo A. Madero                  | GAM   | RAMA   | PM <sub>2.5</sub>                                       | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Falla del equipo, falta de suministros para su reparación.     |  |
|                     | Laboratorio de Análisis            | LAA   | REDMET   | RH, TMP   | 24/10/2016                           | 20.00      | 11/11/2016 | 24.00  | Falla del sensor   |  |
|                     |                                    |       |  | WSP, WDR  | 24/05/2016                           | 20.00      | 26/06/2016 | 24.00  | Falla del sensor   |  |
|                     |                                    |       |  |   | SO <sub>2</sub> , CO, O <sub>3</sub> | 01/01/2016 | 1.00       | 12/05/2016                                       | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros |
|                     | San Juan de Aragón                 | SJA   | RAMA   | NOx, NO <sub>2</sub> , NO                               | 01/01/2016                           | 1.00       | 13/06/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
|                     |                                    |       |  | PM <sub>2.5</sub>                                       | 01/01/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
| Iztacalco           | Iztacalco                          | IZT   | RAMA   | PM <sub>10</sub>  | 17/02/2016                           | 24.00      | 15/03/2016 | 24.00  | Trabajo de remodelación en sitio                               |  |
| Iztapalapa          | UAM Iztapalapa                     | UIZ   | RAMA   | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>co</sub> | 05/08/2016                           | 10.00      | 31/12/2016 | 24.00  | Fuera de línea por falta de suministros                        |  |
| Miguel Hidalgo      | Miguel Hidalgo                     | MGH   | RAMA   | NOx, NO <sub>2</sub> , NO                               | 17/11/2016                           | 1.00       | 01/12/2016 | 24.00  | Retiro para mantenimiento en laboratorio                       |  |
|                     |                                    |       | REDMET   | TMP   | 01/05/2016                           | 1.00       | 13/07/2016 | 24.00  | Falla del sensor   |  |
| Milpa Alta          | Milpa Alta                         | MPA   | RAMA   | SO <sub>2</sub>   | 20/01/2016                           | 1.00       | 25/04/2016 | 24.00  | Mantenimiento  |  |
|                     | Ajusco Medio                       | AJM   | RAMA   | CO  | 14/03/2016                           | 13.00      | 24/03/2016 | 24.00  | Retiro para mantenimiento en laboratorio                       |  |
| Tlalpan             | Ajusco                             | AJU   | RAMA   | PM <sub>2.5</sub>                                       | 22/02/2016                           | 11.00      | 20/03/2016 | 24.00  | Impacto de obra cercana a la estación                          |  |
|                     |                                    |       | REDMET   | WSP, WDR  | 09/06/2016                           | 23.00      | 04/07/2016 | 24.00  | Retiro para mantenimiento en laboratorio                       |  |
| Venustiano Carranza | Merced                             | MER   | REDMET   | UVA, UVB  | 06/06/2016                           | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Retiro del sensor para mantenimiento en laboratorio            |  |
|                     |                                    |       |  | Pba   | 18/07/2016                           | 1.00       | 11/08/2016 | 24.00  | Falla en el sensor   |  |
|                     |                                    |       |  | WSP, WDR  | 28/08/2016                           | 17.00      | 06/10/2016 | 24.00  | Falla en el sensor   |  |
|                     |                                    |       |  | CO, O <sub>3</sub>                                      | 01/01/2016                           | 1.00       | 14/03/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
| Xochimilco          | Tláhuac                            | TAH   | RAMA   | NOx, NO <sub>2</sub> , NO                               | 01/01/2016                           | 1.00       | 05/04/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros               |  |
|                     |                                    |       |  | O <sub>3</sub>  | 14/06/2016                           | 10.00      | 12/07/2016 | 24.00  | Falla del equipo   |  |
|                     |                                    |       |  | SO <sub>2</sub>   | 28/06/2016                           | 13.00      | 12/07/2016 | 24.00  | Retiro para mantenimiento en laboratorio                       |  |

| Municipio      | Estación                  | Clave | Subred         | Parámetro   | Inido      | Hora       | Fin        | Hora   | Motivo   |
|----------------|---------------------------|-------|----------------|---|------------|------------|------------|--|--|
| Acolman        | Acolman                   | ACO   | RAMA           | O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO | 01/01/2016 | 1.00       | 03/03/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, PM <sub>10</sub> | 20/09/2016 | 12.00      | 31/10/2016 | 23.00  | Problemas eléctricos en la estación                      |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 20/09/2016 | 1.00       | 06/11/2016 | 03.00  | Problemas eléctricos en la estación e falta de datos     |
|                |                           |       |                | CO  | 25/11/2016 | 11.00      | 06/12/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       | REDMET         | RH,TMP,WSP,WDR  | 20/09/2016 | 12.00      | 31/10/2016 | 23.00  | Mantenimiento a la torre meteorológica                   |
| Atizapán       | Atizapán                  | ATI   | RAMA           | O <sub>3</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO                   | 01/01/2016 | 1.00       | 14/03/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 01/01/2016 | 1.00       | 15/03/2016 | 05.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 16/08/2016 | 09.00      | 05/09/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       |                | NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO  | 14/12/2016 | 17.00      | 31/12/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
| Chalco         | Chalco                    | CHO   | RAMA           | NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO  | 01/01/2016 | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 11/04/2016 | 11.00      | 10/05/2016 | 4.00   | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       | REDMET         | UVA   | 01/01/2016 | 1.00       | 12/05/2016 | 24.00  | Falla del sensor   |
|                |                           |       |                | UVB   | 01/01/2016 | 1.00       | 31/05/2016 | 24.00  | Falla del sensor   |
|                |                           |       |                | UVA, UVB  | 26/08/2016 | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Falla del sensor   |
| Coacalco       | Villa de las Flores       | VIF   | RAMA           | O <sub>3</sub> , PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>co</sub>      | 01/01/2016 | 1.00       | 11/03/2016 | 3.00   | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | CO  | 01/01/2016 | 1.00       | 15/03/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 01/01/2016 | 1.00       | 18/03/2016 | 13.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
| Ecatepec       | Los Laureles              | LLA   | RAMA           | NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO  | 01/01/2016 | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Fuera de línea temporal por falta de suministros         |
|                |                           |       |                | O <sub>3</sub>  | 18/03/2016 | 11.00      | 11/04/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 18/03/2016 | 11.00      | 19/04/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           | SAG   | RAMA           | NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO  | 07/06/2016 | 1.00       | 31/12/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       | REDMET         | UVA, UVB  | 18/11/2016 | 1.00       | 16/12/2016 | 24.00  | Retro para mantenimiento en laboratorio                  |
| Naucalpan      | FES-Acatlán               | FAC   | RAMA           | PM <sub>10</sub>  | 25/02/2016 | 24.00      | 17/06/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub>   | 17/03/2016 | 9.00       | 06/04/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       |                | NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO  | 17/03/2016 | 9.00       | 08/04/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       |                | PM <sub>10</sub>  | 14/09/2016 | 13.00      | 14/10/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
|                |                           |       | REDMET         | UVA, UVB  | 01/01/2016 | 1.00       | 13/05/2016 | 24.00  | Falla en el sensor                                       |
|                |                           |       |                | RH,TMP,WSP,WDR  | 14/09/2016 | 12.00      | 29/09/2016 | 24.00  | Mantenimiento a la torre meteorológica                   |
| Nezahualcóyotl | Nezahualcóyotl            | NEZ   | RAMA           | NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> , NO  | 27/01/2016 | 1.00       | 18/02/2016 | 24.00  | Se retira el equipo para mantenimiento en el laboratorio |
| Ocoyoacac      | Investigaciones Nucleares | INN   | RAMA           | PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>co</sub>                       | 08/03/2016 | 10.00      | 14/05/2016 | 8.00   | Falla del equipo por problemas eléctricos en la estación |
|                |                           |       |                | SO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>  | 08/03/2016 | 11.00      | 05/04/2016 | 24.00  | Falla del equipo por problemas eléctricos en la estación |
|                |                           |       | REDMET         | RH,TMP,WSP,WDR  | 01/01/2016 | 1.00       | 21/01/2016 | 24.00  | Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación |
|                |                           |       |                | Pba   | 01/01/2016 | 1.00       | 05/04/2016 | 24.00  | Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación |
|                |                           |       |                | RH,TMP  | 04/03/2016 | 17.00      | 06/04/2016 | 8.00   | Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación |
|                |                           |       | WSP,WDR        | 04/03/2016  | 17.00      | 05/04/2016 | 24.00      | Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación |  |
|                |                           |       | RH,TMP,WSP,WDR | 14/10/2016  | 18.00      | 31/12/2016 | 24.00      | Falla del sensor por problemas eléctricos en la estación |  |

## **ANEXO II. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET**

Los resultados obtenidos del análisis de regresión lineal múltiple de la estación [O<sub>3</sub>] CUA, indicó que las estaciones de monitoreo atmosférico y variables meteorológicas que presentaron correlación la cual fue significativa ( $\alpha < 0.05$ ) fueron las estaciones [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]FAC, HrMER, HrCHO, VvAJM TemAJM.

Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8629 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en CUA es explicada en un 92% por la variación de NO<sub>2</sub> y de las variables meteorológicas registradas en las estaciones mencionadas. Asimismo, el valor de la RMSE es 4.5084 una relativa baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUA} = 0.0146 ([O_3] \text{ PED}) + 0.4994 ([O_3] \text{ SFE}) + 0.2450 ([O_3] \text{ MER}) + 0.2347 ([O_3] \text{ FAC}) + 0.0809 (\text{Hr MER}) + 0.1232 (\text{Hr CHO}) + 0.7876 (\text{Vv AJM}) + 1.1901 (\text{Tem AJM})$$

En este modelo de estimación se presentaron solo relaciones directas con respecto a las concentraciones registradas en la estación de monitoreo [O<sub>3</sub>]CUA. La relación que presentan las estaciones [O<sub>3</sub>]MER y [O<sub>3</sub>]FAC señalan un patrón análogo en donde ante un aumento de O<sub>3</sub> en estas estaciones, las concentraciones de O<sub>3</sub> en CUA aumentan, este efecto puede resultado de concentraciones homogéneas de O<sub>3</sub> propiciadas tanto por la orografía del valle de México, así como, por influencia de las variables meteorológicas principalmente por efecto de los vientos.

Las variables meteorológicas HrMER, HrCHO, VvAJM y TemAJM también presentan una correlación directa con respecto a la estación CUA, lo cual quiere decir que ante el aumento del porcentaje de húmeda relativa en el ambiente, aumento en la velocidad de los vientos y un aumento en la temperatura en estas estaciones se genera un efecto similar sobre las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación CUA. Particularmente el comportamiento de TemAJM estaría sustentado ante el

favorecimiento de la temperatura sobre las reacciones fotoquímicas que conducen a la formación de  $O_3$  tal como lo encontrado por López et al. (2008), Cano et al. (2016). Sin embargo, la sola presencia de variables meteorológicas integrando el modelo expone el impacto que ejercen las variables meteorológicas sobre las concentraciones de  $O_3$  en CUA.

El proceso de validación del modelo de estimación de  $[O_3]_{CUA}$  obtuvo tanto una media de -2.92 ppb y una  $s$  de  $\pm 5.27$ , si bien no es una dispersión elevada, la diferencia entre las medias del modelo y los datos observados señala una diferencia considerable confirmando que el modelo obtenido no presenta un ajuste adecuado para la estimación de las concentraciones de  $[O_3]_{CUA}$ .

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUA con base en concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | O <sub>3</sub> PED | O <sub>3</sub> SFE | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> FAC | HrMER   | HrCHO   | VvAJM  | TemAJM  | O <sub>3</sub> Modelo                 | O <sub>3</sub> RAMA                   | Desviación de la estimación                                   |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|--------|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 5.9565             | 10.7821            | 5.0833             | 7.5833             | 87.2916 | 85.8083 | 1.3908 | 9.7741  | 38.9                                  | 17.0                                  | -21.9   |
| 19 marzo 2011     | 35.4166            | 29.3422            | 23.4583            | 30.625             | 27.2916 | 23.5833 | 2.0526 | 16.9962 | 55.1                                  | 29.3                                  | -25.7   |
| 7 abril 2012      | 30.4583            | 33                 | 24.0833            | 30.0416            | 28.7083 | 29.0416 | 2.2648 | 18.0378 | 59.0                                  | 28.9                                  | -30.2   |
| 10 mayo 2013      | 63.4583            | 62.8333            | 51                 | 51.7916            | 21.9166 | 23.9648 | 2.3363 | 20.5399 | 88.0                                  | 69.0                                  | -19.0   |
| 17 junio 2014     | 34.8333            | 31.3               | 27.6086            | 33.6818            | 65.8235 | 69.625  | 1.8899 | 17.6575 | 67.2                                  | 41.0                                  | -26.2   |
| 7 agosto 2015     | 38.875             | 41                 | 31.4166            | 36.9130            | 55.4782 | 61.875  | 2.8125 | 17.5291 | 72.6                                  | 44.2                                  | -28.4   |
| 6 octubre 2016    | 24.7916            | 23.6086            | 1.4285             | 23.4583            | 80.375  | 82.2083 | 2.5708 | 18.5166 | 58.7                                  | 27.2                                  | -31.5   |
| 2 julio 2017      | 27.625             | 21.4166            | 21.625             | 26.2173            | 71.7083 | 73.6666 | 1.9142 | 15.7958 | 57.7                                  | 26.4                                  | -31.4   |
| 10 enero 2018     | 42.9583            | 45.125             | 26.3333            | 25.9565            | 32.8333 | 40.0833 | 1.5636 | 11.1    | 57.7                                  | 21.7                                  | -36.1   |
| 16 noviembre 2018 | 30.9166            | 25.375             | 18.75              | 23.6842            | 55.4166 | 62.5416 | 2.3476 | 11.95   | 51.5                                  | 29.5                                  | -22.1   |
|                   |                    |                    |                    |                    |         |         |        |         | <b><math>\bar{x}</math>= 60.6 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 33.4 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= -27.24 ppb</b><br><b>s=±5.27 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

### **ANEXO III. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA), con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y variables meteorológicas de la REDMET**

Con base en los resultados que el programa SAS en su versión 9.4 expuso, las principales estaciones y variables meteorológicas que colaboran con la estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación CUA fueron [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MGH, HrMPA, HrBJU, TemSAG, TemPED, DvACOL y VvHGM, cuya existente correlación con [NO<sub>2</sub>]CUT es significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Además, el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y el (RMSE) indican de manera inicial que existe un buen ajuste del modelo, debido a un porcentaje bajo dispersión entre los datos originales y los estimados.

Además, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9750 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en CUA es explicada en un 97% por la variación de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas registradas las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 5.1305 señalando una baja entre las observaciones y los valores estimados. El modelo incluye los coeficientes de regresión generado por SAS y las concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas por cada estación que integran el modelo.

#### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUA} = 0.0658 ([NO_2] \text{ XAL}) - 0.0490 ([NO_2] \text{ ATIZA}) + 0.7177 ([O_3] \text{ SFE}) + 0.3032 ([O_3] \text{ MGH}) + 0.0258 (\text{Hr MPA}) + 0.1044 (\text{Hr BJU}) + 0.3921 (\text{Tem SAG}) + 0.2898 (\text{Tem PED}) + 0.0096 (\text{Dv ACOL}) + 1.4137 (\text{Vv HGM})$$

El estudio realizado en SAS concluyó que las estaciones [NO<sub>2</sub>] XAL, [O<sub>3</sub>] SFE, [O<sub>3</sub>] MGH, HrMPA, HrBJU, TemSAG, TemPED, DvACOL y VvHGM manifiestan una relación directa con respecto a el O<sub>3</sub> presente en la estación CUA. Este comportamiento puede ser explicado en unos casos por las cortas distancias entre algunas estaciones, como es el caso de la estación [O<sub>3</sub>] SFE, donde la proximidad entre SFE y CUA propicie la presencia de concentraciones de O<sub>3</sub> afines que ante el aumento de [O<sub>3</sub>]SFE se genere un aumento de [O<sub>3</sub>] en la estación CUA.

En el mismo sentido, la relación directa expuesta por la estación [NO<sub>2</sub>] XAL ubicada al norte del valle, muy cercana a los límites de la CDMX y el Estado de México estaría altamente relacionada al papel del NO<sub>2</sub> como precursor de las concentraciones de O<sub>3</sub>, es decir, que ante un aumento de [NO<sub>2</sub>] XAL, existe un aumento de O<sub>3</sub> en CUA, ante este comportamiento se estaría hablando de manera indirecta de la participación de variables meteorológicas principalmente de altas temperaturas y bajos porcentajes de humedad, ya que de ellas depende en gran medida la formación de O<sub>3</sub>, así como del grado de mezcla entre contaminantes precursores desde que son emitidos tal como lo encontrado por Oookaa et al. (2011).

Por otra parte, la correlación con estación [O<sub>3</sub>] MGH ubicada en la zona centro de la CDMX hace referencia a un patrón similar entre las concentraciones de O<sub>3</sub> de MHG y CUA, en donde ambas sufren cambios en sus registros de manera afín, sugiriendo la participación de un efecto producido por el aumento de la temperatura y la velocidad de los vientos, mientras que la dirección de los vientos sugiere que puede existir un intercambio directo de O<sub>3</sub> entre ambas concentraciones por el cruce de los vientos de la región.

Al Igual que las estaciones atmosféricas previamente mencionadas, las variables meteorológicas HrMPA, HrBJU, TemSAG, TemPED, DvACOL y VvHGM presentan una relación directa con respecto a la concentración de O<sub>3</sub> en la estación CUA. En primera instancia la correlación con HrMPA y HrBJU señalan la posibilidad de un aumento de nubosidad o precipitación pluvial en ambas estaciones generando una disminución sobre la velocidad de formación de O<sub>3</sub> en esos mismos sitios, mientras que en la estación CUA, los cielos se encuentren más despejados y también se presenten menos eventos de precipitación o una menor cantidad de lluvia en la región de la estación CUA aumentando el O<sub>3</sub> en esa estación.

Mientras que la correlación expuesta con la estación Tem PED revela la posibilidad de un aumento sobre la temperatura de la región sur oeste del Valle de México, región en donde se ubican tanto la estación PED como la estación CUA, sugiriendo que ante el aumento de temperatura en esa zona se acrecientan las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación CUA.

Asimismo, la correlación manifestada por  $Dv$  ACOL y  $Vv$ HGM sugiere que a pesar de la distancia entre las estaciones nombradas y la estación CUT, cualquier cambio en la dirección de los vientos en la estación  $Dv$ ACOL y el aumento en la velocidad de  $Vv$ HGM, las concentraciones de  $O_3$  en CUA tiendan a un aumento debido probablemente al intercambio de  $O_3$  entre estas estaciones, modificando sus condiciones de concentración y distribución del  $O_3$  tal como lo reportado por Franco (2014).

Contrariamente la correlación inversa con la estación  $[NO_2]$  ATIZA infiere en primera instancia la destrucción de moléculas de  $O_3$  en CUA y por otro lado la formación de  $NO_2$  en ATIZA. Mientras que de manera inversa, se genere el cambio de estructural de  $NO_2$  a  $O_3$  en la estación ATIZA debido su acción como agente precursor de  $O_3$  y el cual se genera a partir de la su emisión por la actividad de vehículos, industria y otras fuentes, lo anterior sucede mientras en la estación CUA se genera un aumento en las concentraciones de  $O_3$  inclusive provenientes de la zona noroeste del Valle de México en donde se ubica la estación ATIZA.

La validación del modelo de estimación de  $[O_3]$ CUA obtuvo una media residual 30.73 ppb y una desviación estándar de  $\pm 16.29$  ppb, los resultados señalan que el modelo presenta una alta dispersión de sus estimaciones generadas con respecto a su media residual, por lo que el modelo no es adecuado para estimar concentraciones de  $O_3$  en la estación rural CUA.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUA con base en concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

|                   | NO <sub>2</sub> XAL | NO <sub>2</sub> ATIZA | O <sub>3</sub> SFE | O <sub>3</sub> MGH | HrMPA   | HrBJU   | TemSAG  | TempED  | DvACOL   | VvHGM  | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación                                   |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|----------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 34.2083             | 28.25                 | 10.7821            | 10.7821            | 85.8083 | 85.8083 | 8.9916  | 9.7741  | 189.6333 | 1.3908 | 33.2                                 | 17.0                                 | 16.2  |
| 19 marzo 2011     | 46                  | 20.9166               | 29.3422            | 29.3422            | 23.5833 | 23.5833 | 18.0583 | 16.5958 | 188.7673 | 2.0526 | 51.6                                 | 29.3                                 | 29.3  |
| 7 abril 2012      | 22.4166             | 14.0833               | 33                 | 27.6694            | 31.5327 | 31.5327 | 19.8666 | 18.1333 | 188.4166 | 1.9333 | 54.6                                 | 13.3                                 | 41.2  |
| 10 mayo 2013      | 57.7916             | 32.7727               | 62.8333            | 51.8660            | 23.9648 | 23.9648 | 17.4    | 20.1333 | 219.2083 | 1.7142 | 83.3                                 | 14.4                                 | 68.9  |
| 7 junio 2014      | 21.9545             | 13.7916               | 31.3               | 31.3               | 71.0768 | 71.0768 | 18.35   | 16.5125 | 188.375  | 1.76   | 58.3                                 | 21.7                                 | 36.6  |
| 7 agosto 2015     | 30.6666             | 22.5833               | 41                 | 31.4782            | 61.3245 | 64.6363 | 20.7583 | 18.3541 | 127.9166 | 1.6541 | 62.5                                 | 44.2                                 | 21.0  |
| 6 octubre 2016    | 22.625              | 16.75                 | 23.6086            | 21.125             | 87.25   | 79.5416 | 20.3416 | 19.3791 | 169.2916 | 1.9541 | 52.6                                 | 27.2                                 | 25.3  |
| 2 julio 2017      | 25.25               | 18.9875               | 21.4166            | 20.7142            | 71.2833 | 72.4166 | 18.7416 | 16.9291 | 131.1666 | 1.1541 | 46.9                                 | 26.4                                 | 20.6  |
| 18 enero 2018     | 56.625              | 45.8301               | 45.125             | 27.625             | 27.0416 | 33.7916 | 15.4791 | 14.1458 | 249.5833 | 1.075  | 60.6                                 | 21.7                                 | 38.9  |
| 16 noviembre 2018 | 35.625              | 23.5384               | 25.375             | 20.4166            | 55.125  | 54.9166 | 14.1    | 12.6583 | 221.25   | 1.1666 | 45.7                                 | 29.5                                 | 16.3  |
|                   |                     |                       |                    |                    |         |         |         |         |          |        | <b><math>\bar{x}</math>=52.5 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=24.5 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 30.73 ppb</b><br><b>s=±16.29 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **ANEXO VI. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de un día, con base en registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Los resultados indica que las estaciones [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, NO<sub>2</sub>VIF, NO<sub>2</sub>SAG, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]ACOL, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]IZT presentan mayor correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con [O<sub>3</sub>]AJM. El coeficiente de determinación adquirió un valor de 0.6424, exponiendo que la variación del O<sub>3</sub> en AJM se explica en un 64% por la variación del O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registrada en las estaciones mencionadas. Además, el valor de la RMSE es 7.9691 e indica alta dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ AJM}_{(\text{desfase un día})} = 0.6744 ([O_3] \text{ SFE}) - 1.3160 ([O_3] \text{ MER}) - 0.6079 ([O_3] \text{ HGM}) - 1.0072 ([O_3] \text{ TLA}) - 0.3030 ([O_3] \text{ CCA}) - 0.6966 ([O_3] \text{ CAM}) - 0.4107 ([O_3] \text{ SAG}) + 0.4877 ([O_3] \text{ AJU}) - 0.2041 ([O_3] \text{ MON}) + 1.8694 ([O_3] \text{ XAL}) + 1.5884 ([O_3] \text{ ACOL}) - 1.0820 ([O_3] \text{ CHO}) + 0.0462 ([O_3] \text{ NEZ}) - 0.9687 ([O_3] \text{ COY}) + 1.7256 ([O_3] \text{ IZT}) - 0.3210 ([NO_2] \text{ VIF})$$

De acuerdo con los resultados obtenido en SAS el modelo de estimación de la concentración de O<sub>3</sub> de la estación AJM<sub>(desfase un día)</sub> indica que las estaciones, [O<sub>3</sub>] SFE, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]ACOL, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]IZT presentan una correlación directa con respecto a las concentraciones registradas en la estación AJM en donde muy probablemente comportamiento sea resultado a la proximidad que presentan algunas estaciones con respecto a la estación AJM como es el caso de [O<sub>3</sub>]SFE y [O<sub>3</sub>]AJU en donde es altamente probable una mínima variación de O<sub>3</sub> incluso con un día de retardo a partir de sus registros.

La correlación directa de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto a las estaciones: [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]ACOL, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]IZT puede ser también resultado de concentraciones similares de O<sub>3</sub> un día antes, aun a pesar de que estas estaciones no se encuentran cercanas a AJM. Sin embargo, es posible que las concentraciones de O<sub>3</sub> se mantengan en la atmosfera del Valle de México y se

dispersen de manera homogénea incluso hasta un día después donde muy probablemente las variables meteorológicas generan fuerte influencia debido a su impacto sobre la formación y dispersión de O<sub>3</sub> en el valle de México a través de los vientos comportamiento reportado por CEPA, (1999).

Contrariamente [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]CAM [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]CHO y [O<sub>3</sub>]COY, indican una correlación inversa con el O<sub>3</sub> de AJM<sub>(desfase un día)</sub>. Este comportamiento presenta un retardo de día, el cual se puede ser explicado por intervención de variables meteorológicas, quizás principalmente al impacto generado por los vientos de la región los cuales influyen en el aumento y disminución de contaminantes como lo sugiere Jazcilevich et al. (2002), los cuales propician la dispersión de las concentraciones de O<sub>3</sub> por todo el valle de México, así como de las variables meteorológicas que mantienen al O<sub>3</sub> y a sus precursores de manera latente en la atmosfera.

La correlación de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto al [NO<sub>2</sub>] VIF son producto de la acción como precursor del NO<sub>2</sub>, es decir, la acción del NO<sub>2</sub> de VIF la cual se expresa con retardo de un en AJM, probablemente influida por acción de variables meteorológicas sobre el O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> tal como lo menciona Oookaa et al. (2011).

La validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>]AJM<sub>(desfase un día)</sub> aplicado en diferentes periodos entre los años 2010 y 2018 obtuvo una media residual de 48.43 ppb y la desviación estándar de ±14.72 ppb, la cual se considera una alta dispersión de los datos, aunado a los valores negativos que el mismo modelo estimo en cada una de las fechas de validación. Por lo tanto, el modelo no tiene un ajuste óptimo para poder estimar las concentraciones de [O<sub>3</sub>]en la estación rural AJM<sub>(desfase un día)</sub>.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural AJM (desfase un día) con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA

|                         | O <sub>3</sub><br>SFE | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>HGM | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub><br>CAM | O <sub>3</sub><br>AJU | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>XAL | O <sub>3</sub><br>ACOL | O <sub>3</sub><br>CHO | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>COY | O <sub>3</sub><br>IZT | O <sub>3</sub><br>SAG | NO <sub>2</sub><br>VIF | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                   | Desviación<br>de la<br>estimación     |                    |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 7.9027                | 4.9116                | 7.9027                | 7.9027                | 7.9027                | 7.9027                | 8.25                  | 7.9027                | 9.625                 | 4.625                  | 9.625                 | 7.9027                | 7.9027                | 7.4583                | .3478                 | 25.5                   | -8.6                                 | 20.0                                  | 28.6                                  |                    |
| 19 marzo<br>2011        | 28.0511               | 24.7916               | 28.0511               | 22.7391               | 28.0511               | 28.0511               | 26.4166               | 28.0511               | 28.0511               | 18.3333                | 31.7916               | 27.2857               | 28.0511               | 31.9166               | 20.7619               | 18.8333                | -29.2                                | 29.3                                  | 58.5                                  |                    |
| 7 abril 2012            | 23.0833               | 19.625                | 22.6666               | 21.9545               | 22.6014               | 20.5833               | 22.4285               | 22.60                 | 22.9583               | 21.4166                | 20                    | 22.6043               | 22.1666               | 22.95                 | 20.4583               | 16.5                   | 13.7                                 | 27.7                                  | 41.4                                  |                    |
| 10 mayo<br>2013         | 39.5416               | 26.875                | 29.5217               | 28.375                | 32.4794               | 31.8333               | 25.8                  | 32.4794               | 34.1428               | 29.5833                | 36.875                | 40.2                  | 29.9565               | 28.4347               | 30.4583               | 33.5                   | -2.9                                 | 51.9                                  | 54.8                                  |                    |
| 17 junio<br>2014        | 34.2050               | 28.875                | 32.85                 | 31.7727               | 34.2050               | 32.875                | 29.7916               | 34.2050               | 32.6666               | 27.3478                | 32.4090               | 35.0416               | 31.4166               | 37.3333               | 34.1363               | 12.2916                | -17.5                                | 31.6                                  | 49.0                                  |                    |
| 7 agosto<br>2015        | 46                    | 33.7211               | 34.0416               | 27.25                 | 38.9166               | 30.4166               | 18.6315               | 46.2083               | 29.5416               | 22.7916                | 28.7916               | 36.4166               | 33.7211               | 33.7211               | 31.75                 | 13.75                  | -18.1                                | 54.7                                  | 72.8                                  |                    |
| 6 octubre<br>2016       | 16.4736               | 17.8333               | 21.625                | 16.6666               | 22.5                  | 16.4583               | 18.1304               | 25.5833               | 21.7916               | 19.7916                | 21.7267               | 29.125                | 20.6521               | 23.125                | 21.7267               | 15.3333                | -8.9                                 | 32.5                                  | 41.4                                  |                    |
| 2 julio 2017            | 19.2916               | 19.5833               | 22.5833               | 21.0416               | 26.4166               | 21.125                | 21.125                | 30.1666               | 20.4583               | 20.2916                | 19.9166               | 19.5416               | 23.4583               | 26                    | 21.9583               | 14.6666                | -11.0                                | 33.0                                  | 44.0                                  |                    |
| 10 enero<br>2018        | 23.6666               | 18.2916               | 22.7956               | 22.7956               | 22.7956               | 22.7956               | 20.0856               | 23.5833               | 27.9166               | 18.5416                | 12.2916               | 22.7956               | 18.875                | 22.7956               | 22.7956               | 28.5416                | -31.7                                | 33.9                                  | 65.6                                  |                    |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 16.8333               | 15.8333               | 16.0416               | 14.9583               | 18.1666               | 15.2083               | 14.25                 | 18.5416               | 17.3209               | 15.0416                | 18.75                 | 14.7391               | 17.75                 | 17.3209               | 16.5416               | 31.0416                | -6.2                                 | 22.1                                  | 28.2                                  |                    |
|                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                        | <b><math>\bar{x}</math>=-14.8ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 33.7 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=48.43 ppb</b> | <b>s=±14.72ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **ANEXO V. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco medio (AJM), con base en registros de la RAMA y la REDMET**

A partir de los resultados obtenidos por SAS las principales estaciones y variables atmosféricas que apoyaron la explicación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación AJM fueron: [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]COY, [NO<sub>2</sub>]UIZ, TemUAX, TemSAG, DvUIZ y VvPED confirmando una correlación la cual es significativa ( $\alpha < 0.05$ ). En el mismo sentido, el valor de R<sup>2</sup> es 0.8437 esto indica que la variación de NO<sub>2</sub> en la estación AJM es manifestada en un 92% por la variación de NO<sub>2</sub> en las estaciones mencionadas.

Por otra parte, el valor de la RMSE es 2.3586 sugiriendo que el modelo presenta una baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados. La estructura del modelo está conformada por los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo generado por SAS y se deben incluir las concentraciones de NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ AJM} = 0.0660 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) + 0.7349 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) - 0.2725 ([\text{NO}_2] \text{ SAG}) - 0.0506 ([\text{NO}_2] \text{ COY}) + 0.1015 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.6324 (\text{Tem UAX}) - 0.9332 (\text{Tem SAG}) - 0.0131 (\text{Dv UIZ}) - 0.1120 (\text{Vv PED})$$

Los resultados obtenidos indican que las estaciones: [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]UIZ y TemUAX presentan una relación directa con respecto AJM, comportamiento que en el caso de las estaciones [NO<sub>2</sub>]CCA y [NO<sub>2</sub>]PED se justificaría por la proximidad entre estas estaciones con la estación AJM y, que debido a ello la variación de concentraciones de NO<sub>2</sub> son mínimas.

En el caso particular de la correlación expresada por la TemUAX, puede ser resultado del impacto que ejerce la temperatura sobre las reacciones químicas del NO<sub>2</sub>, ante ellos se asume un comportamiento similar de la temperatura en la estación UAX y AJM, esto indicaría una relación de la temperatura similar con el O<sub>3</sub> tal como lo encontrado por López et al. (2008).

La correlación positiva que presenta la estación [NO<sub>2</sub>]UIZ, señala la posibilidad de un patrón similar de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la región centro y sur del Valle de México ante la presencia de condiciones meteorológicas y de concentraciones similares en ambas estaciones.

De manera contradictoria las estaciones [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]COY, TemSAG, DvUIZ, VvPED presentan una relación inversa con respecto a la estación AJM.

En primera instancia la correlación de [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]COY señalarían una disminución de NO<sub>2</sub> en las dos estaciones mencionadas, lo cual refiere que en la zona norte y sur del valle de México se genera una disminución paralela. Sin embargo, la idea antes mencionada no explicaría el aumento de NO<sub>2</sub> en la estación AJM, por lo que para dar explicación a esta correlación se integraría la participación de variables meteorológicas e incluso la variable de altitud, que en conjunto pudiesen generar condiciones diferentes a las que se registran en zonas menos elevadas del valle de México.

Por otro lado, la correlación de TemSAG presenta un patrón poco habitual, ya que generalmente la temperatura y el [NO<sub>2</sub>] presentan una correlación positiva. Sin embargo, en este caso la correlación podría ser resultado en gran medida a la distancia entre estaciones, al factor altitudinal y condiciones meteorológicas totalmente opuestas

Finalmente, DvUIZ, indica que ante cualquier disminución en los grados de la dirección de vientos en UIZ, las concentraciones de NO<sub>2</sub> en AJM aumentan, dicho efecto señala una probable disminución de la actividad de los vientos en la zona centro y sur del valle de México tal como lo reportado por Rivera (2011).

Los resultados de validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>]AJM obtuvieron una media de 15.61 ppb y una  $s$  de  $\pm 7.65$  ppb, los resultados indican que el modelo presenta baja dispersión con respecto a la media de los residuales, estableciendo un adecuado ajuste para estimar las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación rural AJM, pese a presentar algunas estimaciones negativas.

Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural AJM con base en concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | NO <sub>2</sub> CCA | NO <sub>2</sub> PED | NO <sub>2</sub> SAG | NO <sub>2</sub> COY | NO <sub>2</sub> UIZ | TemUAX  | TemSAG  | DvUIZ      | VvPED  | NO <sub>2</sub> Modelo               | NO <sub>2</sub> RAMA                 | Desviación de la estimación           |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|---------|------------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 30.7884             | 27.6086             | 25                  | 30.7884             | 28.9583             | 9.7741  | 8.9916  | 189.6333   | 1.3908 | 12.0                                 | 30.8                                 | 18.7                                  |
| 19 marzo 2011     | 30.7397             | 26.125              | 29.3333             | 30.7397             | 36.1666             | 16.9962 | 18.0583 | 188.7673   | 2.1583 | 6.5                                  | 30.7                                 | 24.2                                  |
| 7 abril 2012      | 19.0892             | 14.2916             | 22.7083             | 21.9583             | 22.1666             | 18.0378 | 19.8666 | 180.8776   | 2.2958 | -3.0                                 | 19.7                                 | 22.1                                  |
| 10 mayo 2013      | 37.2832             | 33.25               | 43.1666             | 46.5                | 41.9583             | 20.5399 | 17.4    | 183.3436   | 2.4458 | 11.1                                 | 37.3                                 | 26.2                                  |
| 17 junio 2014     | 19.8613             | 17.875              | 18.25               | 19.8613             | 25.3333             | 17.6575 | 18.35   | 185.729412 | 1.7875 | 2.4                                  | 19.9                                 | 17.4                                  |
| 7 agosto 2015     | 23.5416             | 21.1666             | 22.3333             | 28.6666             | 25.5                | 19.0083 | 20.7583 | 193.75     | 1.9    | 2.1                                  | 14.8                                 | 12.7                                  |
| 6 octubre 2016    | 17.6666             | 24                  | 16.875              | 26.5416             | 22.2916             | 20.4583 | 20.3416 | 94         | 2.0583 | 7.6                                  | 20.5                                 | 13.0                                  |
| 2 julio 2017      | 18.875              | 16.125              | 19.5                | 21.6956             | 25.9583             | 16.4583 | 18.7416 | 182.7083   | 1.5783 | -0.3                                 | 11.5                                 | 11.8                                  |
| 10 enero 2018     | 47.8333             | 40                  | 43.5714             | 45.8301             | 47.1904             | 14.35   | 15.4791 | 151.25     | 1.3458 | 15.6                                 | 16.7                                 | 1.1                                   |
| 16 noviembre 2018 | 32.25               | 29.0833             | 27.0416             | 32.2340             | 29.9                | 13.2083 | 14.1    | 151.75     | 1.6416 | 10.6                                 | 19.5                                 | 8.9                                   |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |         |         |            |        | <b><math>\bar{x}</math>=6.25 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=22.1 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=15.61 ppb</b> |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |         |         |            |        |                                      |                                      | <b>s=±7.65 ppb</b>                    |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **ANEXO VI. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con base en registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET**

Con base en el análisis realizado las estaciones y variables atmosféricas que dan explicación sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación AJM son: [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]PED, HrAJU, HrAJM, TemINN, TemSFE, DvCUT, DvHGM, VvPED y VvHGM, cuya correlación es significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Mientras el R<sup>2</sup> obtuvo un valor de 0.9920 señalando que la variación de NO<sub>2</sub> en AJM se explica en un 99% por la variación de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en las estaciones previamente citadas. Asimismo, la RMSE presentó un valor de 1.1104 señalando baja dispersión entre los valores estimados y los observados inicialmente.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ AJM} = -0.0185 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) + 0.7485 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) - 0.4071 ([\text{O}_3] \text{ AJM}) + 0.4188 ([\text{O}_3] \text{ PED}) + 0.0128 (\text{Hr AJU}) + 0.1034 (\text{Hr AJM}) + 1.4711 (\text{Tem INN}) - 0.6877 (\text{Tem SFE}) + 0.0136 (\text{Dv CUT}) + 0.0092 (\text{Dv HMG}) - 6.5843 (\text{Vv PED}) + 4.6553 (\text{VvHGM})$$

Derivado de los resultados obtenidos, las estaciones [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]PED, HrAJU, HrAJM, TemINN, DvCUT, DvHMG y VvHGM ostentan una relación directa con respecto a la estación MON, la cual sin duda puede estar sujeta en algunas ocasiones a la vecindad entre estaciones de monitoreo cercanas a AJM, como lo son [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]PED, HrAJU, HrAJM y TemINN.

Particularmente la estación [NO<sub>2</sub>]PED generaría la idea de concentraciones afines con respecto a la estación AJM. Mientras que la correlación con [O<sub>3</sub>]PED estaría ligada a la facultad precursora que tiene el NO<sub>2</sub> con respecto al O<sub>3</sub>, y que ante un aumento de NO<sub>2</sub> en AJM se produce aumento de O<sub>3</sub> en PED debido a la transformación de NO<sub>2</sub> a O<sub>3</sub>, efecto que se refleja en ambas estaciones debido a su cercanía.

Por otro lado, HrAJU, HrAJM demuestran que las variables meteorológicas demuestran influencia también sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub>, que de manera precisa tanto HrAJU como HrAJM

presentan un comportamiento poco habitual de acuerdo a estudios donde se reporta que la humedad relativa, presenta generalmente una relación negativa, ya que ante la presencia de porcentajes altos de humedad al NO<sub>2</sub> regresa a su estado como ácido nitroso (HNO<sub>2</sub>) tal como lo reportaron Ramos et al. (2010), por lo que este comportamiento podría ser sustentado con base en la influencia aun mayor de otras variables meteorológicas como la temperatura la cual tiene fuerte impacto sobre las formación del NO<sub>2</sub>.

Por su parte, la correlación de TemINN confirmaría la participación de la temperatura sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub>. En este caso en particular se estaría hablando que a mayor temperatura en la región de INN existiría un aumento en las concentraciones de NO<sub>2</sub>, lo cual estaría ligado a la posibilidad de un aumento parcial en la zona oeste y sur del Valle de México donde se ubican INN y AJM respectivamente. como ya se ha mencionado anteriormente la temperatura presenta una relación positiva con el NO<sub>2</sub>. Mientras que la humedad relativa había presentado en otros estudios

La correlación positiva que presentan las estaciones DvCUT, DvHMG y VvHGM, ubicadas en el norte y centro del Valle de México respectivamente, sin duda están relacionadas ante la posibilidad de un comportamiento semejante por todo el Valle de México. Lo anterior sería posible a la dispersión homogénea de NO<sub>2</sub> debido a la misma acción de los vientos dominantes del valle, los cuales al aumentar y desplazarse modifican la concentración y distribución del NO<sub>2</sub> principalmente por las tardes cuando se genera la dispersión de contaminantes tanto de manera vertical como horizontal en toda la región valle de México como lo indicó SEDEMA (2017).

Por otra parte, las estaciones [NO<sub>2</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]PED, HrAJU, HrAJM, TemINN, TemSFE, DvCUT, DvHMG, VvPED y VvHGM presentan una relación inversa con respecto a la estación MON.

[NO<sub>2</sub>]CCA indicaría que parte de las concentraciones presentes en CCA son dirigidas hacia AJM o hacia otras partes del valle, y de manera contraria en ciertos momentos del día el NO<sub>2</sub> registrado en AJM se dirige hacia zonas más bajas como lo es la región de la estación CCA, comportamiento que podría darse principalmente por las tardes.

Por su parte,  $[O_3]_{AJM}$  y  $[O_3]_{PED}$  indican que ante el aumento de  $NO_2$  en AJM se genera disminución en la presencia de  $O_3$  en AJM y PED, comportamiento sustentado por el tiempo medio de vida corta que presenta el  $O_3$  en la atmosfera por actividades humanas principalmente en zonas urbanas. Mientras que de manera inversa la disminución de por descomposición de  $NO_2$  genera aumento de  $O_3$  en la atmosfera local del Valle de México.

Asimismo, las estaciones y variables meteorológicas HrAJU, HrAJM señalan que, ante mayor humedad relativa se presente en la zona sur del valle, menor será la presencia de  $NO_2$  en la atmosfera, comportamiento que estaría sustentado por un efecto de la humedad relativa sobre la velocidad de formación del  $NO_2$ .

Mientras que TemINN y TemSFE demuestran un comportamiento contrario a la correlación positiva que generalmente presenta con respecto a  $NO_2$  Ramos et al. (2010), por lo que dicha conducta estaría sujeta a la posibilidad del efecto de otras variables meteorológicas como la humedad y los vientos en la zona sur oeste del Valle de México, alterando de fuerte manera la correlación entre la temperatura y el  $NO_2$ .

Por último, DvCUT, DvHMG, VvPED y VvHGM el comportamiento de estas estaciones señala que ante una disminución sobre los grados de la dirección de los vientos como en la velocidad de los vientos en estas estaciones, se genera la mayor concentración de  $NO_2$  en AJM, probablemente como resultado de la constante emisión de contaminantes a la atmosfera generada por la población del valle de México.

La validación del modelo de estimación de  $[NO_2]_{AJM}$  puntualizo una media de -14.83 ppb y una  $s$  de  $\pm 7.66$  ppb, estos valores obtenidos demuestran una dispersión considerable de los datos con respecto a la media de los residuales, que en conclusión se determinó que el modelo no tiene el ajuste adecuado para estimar las estimaciones de  $[NO_2]$  en la estación rural AJM.

Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural AJM con base en concentraciones de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y variables meteorológicas registradas en otras estaciones de la RAMA y la REDMET.

|                         | NO <sub>2</sub><br>CCA | NO <sub>2</sub><br>PED | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>PED | Hr<br>AJU | Hr<br>AJM | Tem<br>INN | Tem<br>SFE | Dv<br>CUT | Dv<br>HGM | Vv<br>PED | Vv<br>HGM | NO <sub>2</sub><br>Modelo | NO <sub>2</sub><br>RAMA | Desviación de<br>la estimación |
|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 38.7884                | 27.6086                | 10.7821               | 5.9565                | 85.8083   | 85.8083   | 9.7741     | 9.7741     | 189.6333  | 189.6333  | 1.3908    | 1.3908    | 35.7                      | 30.8                    | -6.7                           |
| 19 marzo<br>2011        | 30.7397                | 26.125                 | 29.3422               | 35.4166               | 23.5833   | 23.5833   | 16.9962    | 16.9962    | 188.7673  | 188.7673  | 2.1583    | 2.0526    | 37.6                      | 30.7                    | -6.8                           |
| 7 abril<br>2012         | 19.0892                | 14.2916                | 27.6694               | 30.4583               | 31.5327   | 31.5327   | 18.0378    | 16.7166    | 164.4166  | 205.8333  | 2.9558    | 1.9333    | 28.6                      | 19.1                    | -9.5                           |
| 10 mayo<br>2013         | 37.2832                | 33.25                  | 51.8660               | 63.4583               | 23.9648   | 23.9648   | 20.5399    | 19.625     | 198       | 172.7727  | 2.4458    | 1.7142    | 45.3                      | 37.3                    | -8.0                           |
| 17 junio<br>2014        | 19.8613                | 17.875                 | 31.3                  | 34.8333               | 71.0768   | 71.0768   | 17.6575    | 16.1708    | 75.5833   | 250.1     | 1.7875    | 1.76      | 37.7                      | 19.9                    | -17.9                          |
| 7 agosto<br>2015        | 23.5416                | 21.1666                | 54.7083               | 38.875                | 83.625    | 57.625    | 18.3737    | 16.1333    | 155.33043 | 185.7083  | 1.9       | 1.8166    | 32.1                      | 14.8                    | -17.4                          |
| 6 octubre<br>2016       | 17.1666                | 24                     | 32.5                  | 24.7916               | 94.7916   | 83.75     | 12.4875    | 17.0291    | 169.2916  | 226.3333  | 2.0583    | 2.1708    | 32.3                      | 20.5                    | -11.7                          |
| 2 julio<br>2017         | 18.875                 | 16.125                 | 33                    | 27.625                | 64.8333   | 70.5      | 16.8282    | 15.2375    | 65.0833   | 212.5     | 1.5708    | 1.1541    | 30.1                      | 11.5                    | -18.6                          |
| 10 enero<br>2018        | 47.8333                | 40                     | 33.9090               | 42.9583               | 52.75     | 25.4545   | 13.366     | 13.7583    | 154.2568  | 94.375    | 1.3458    | 1.1666    | 47.1                      | 16.7                    | -30.3                          |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 32.25                  | 29.0833                | 22.0536               | 30.9166               | 79.0416   | 50.7083   | 12.4707    | 10.85      | 201.375   | 128.0833  | 1.6416    | 1.1666    | 40.8                      | 19.5                    | -21.3                          |
|                         |                        |                        |                       |                       |           |           |            |            |           |           |           |           | $\bar{x}$ =36.9ppb        | $\bar{x}$ =22.1ppb      | $\bar{x}$ =-14.83 ppb          |
|                         |                        |                        |                       |                       |           |           |            |            |           |           |           |           | $s$ =±7.66 ppb            |                         |                                |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## ANEXO VII. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de un día, con base en registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA

El conjunto de estaciones de monitoreo atmosférico [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]ATIZA, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]CUT, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]TLI, [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]UIZ [O<sub>3</sub>]IZT, [O<sub>3</sub>]COY tiene una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con [NO<sub>2</sub>]CUA. Mientras que el valor de R<sup>2</sup> es de 0.7922 esto muestra que la variabilidad del NO<sub>2</sub> en la estación CUA es explicada en un 79% por la variación tanto del NO<sub>2</sub> como del O<sub>3</sub> registrados un día antes en las estaciones mencionadas previamente. Asimismo, la RMSE obtuvo un valor de 3.57 y manifiesta baja dispersión entre los datos observados y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUA}_{(\text{desfase un día})} = 0.6329 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) - 0.2433 ([\text{NO}_2] \text{ ATIZA}) - 1.0544 ([\text{NO}_2] \text{ MER}) - 0.2541 ([\text{NO}_2] \text{ MON}) - 0.2370 ([\text{NO}_2] \text{ FAC}) + 0.6126 ([\text{NO}_2] \text{ SAG}) - 0.1571 ([\text{NO}_2] \text{ CUT}) - 0.2123 ([\text{NO}_2] \text{ SFE}) - 0.0615 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) + 0.0235 ([\text{O}_3] \text{ TLI}) + 0.7724 ([\text{O}_3] \text{ BJU}) - 0.9117 ([\text{O}_3] \text{ MER}) + 0.9024 ([\text{O}_3] \text{ SAG}) - 0.0394 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.8324 ([\text{O}_3] \text{ IZT}) - 0.3676 ([\text{O}_3] \text{ COY})$$

Los resultados señalan que las estaciones [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>] SAG, [O<sub>3</sub>] TLI, [O<sub>3</sub>] BJU, [O<sub>3</sub>] SAG y [O<sub>3</sub>]IZT presentan una correlación directa con respecto a la estación CUA. La correlación de [NO<sub>2</sub>]CCA con CUA apunta a ser explicada por la vecindad que existe entre ambas estaciones, la cual se ve reflejada con retardo de un día. Mientras que la correlación de [NO<sub>2</sub>] SAG con CUA<sub>(desfase un día)</sub> advertiría de un desplazamiento de NO<sub>2</sub> proveniente de otros puntos del Valle de México, los cuales primero se registran en SAG y al día siguiente en CUA mediante el aumento de NO<sub>2</sub>.

Por otro lado, la correlación de las estaciones [O<sub>3</sub>] TLI, [O<sub>3</sub>] BJU, [O<sub>3</sub>] SAG y [O<sub>3</sub>]IZT puede ser reflejo en primera instancia al desempeño del NO<sub>2</sub> como precursor del O<sub>3</sub>, en donde en primera instancia ante un aumento de O<sub>3</sub> en alguna de estas estaciones al día siguiente se produce también el aumento de NO<sub>2</sub> en CUA, debido a condiciones meteorológicas favorables, un comportamiento con retardo de un día entre estas estaciones de monitoreo ubicadas en la zona norte y centro del Valle de México. En cuanto a las correlaciones de las estaciones [O<sub>3</sub>]CUA y [O<sub>3</sub>]AJM, estarían en

primer lugar ligadas al factor de la cercanía, y en segundo término al mismo patrón adjudicado en el párrafo anterior a las estaciones [O<sub>3</sub>] TLI, [O<sub>3</sub>] BJU, [O<sub>3</sub>] SAG y [O<sub>3</sub>] IZT.

Contrariamente las estaciones [NO<sub>2</sub>] ATIZA, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>] CUT, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>] PED, [O<sub>3</sub>] MER, [NO<sub>2</sub>] UIZ, y [O<sub>3</sub>]COY indican la existencia de una relación inversa con el NO<sub>2</sub> de CUA<sub>(desfase un día)</sub>.

En el caso de las correlaciones de las estaciones [NO<sub>2</sub>] ATIZA, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>] CUT, [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>] PED y [NO<sub>2</sub>] UIZ se podría estar hablando que el día previo al registro de NO<sub>2</sub> en CUA, las concentraciones de NO<sub>2</sub> en gran parte del Valle de México disminuyen y al día siguiente se presente un aumento de NO<sub>2</sub> en la estación rural CUA, patrón que establece en primera instancia una dispersión parcial del NO<sub>2</sub> hacia la estación CUA, y por otra parte, la descomposición del NO<sub>2</sub> las estaciones mencionadas reflejada con un día de retardo.

Finalmente, la correlación inversa de [O<sub>3</sub>] MER y [O<sub>3</sub>]COY postularía un patrón cíclico con retardo de un día en donde en primera instancia se produce elevación en las concentraciones O<sub>3</sub> en ambas estaciones un día antes de presentarse una disminución de NO<sub>2</sub> en CUA, conducta similar reportada por De Souza et al. (2018) en donde al oxidarse NO<sub>2</sub> aumentan las concentraciones de O<sub>3</sub>.

La validación del modelo para la estimación [NO<sub>2</sub>]CUA reportó una media de -8.94 ppb y una alta desviación estándar de ±35.29 ppb. Asimismo, el modelo registró algunos valores negativos de NO<sub>2</sub>, dichas concentraciones no se presentan en la atmosfera, por lo cual el modelo no es el más indicado para la estimación de [NO<sub>2</sub>]en la estación rural CUT

Validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUA<sub>(desfase un día)</sub> con base en concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | NO <sub>2</sub><br>CCA | NO <sub>2</sub><br>ATIZA | NO <sub>2</sub><br>MER | NO <sub>2</sub><br>MON | NO <sub>2</sub><br>FAC | NO <sub>2</sub><br>SAG | NO <sub>2</sub><br>CUT | NO <sub>2</sub><br>SFE | NO <sub>2</sub><br>PED | O <sub>3</sub><br>TLI | O <sub>3</sub><br>BJU | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>SAG | NO <sub>2</sub><br>UIZ | O <sub>3</sub><br>IZT | O <sub>3</sub><br>COY | NO <sub>2</sub> Modelo             | NO <sub>2</sub> RAMA                | Desviación de<br>la estimación        |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 30.8243                | 30.45                    | 34.66                  | 30.8243                | 30.4166                | 25.875                 | 30.8243                | 30.8243                | 25.6363                | 7.9027                | 7.9027                | 4.9166                | 8.25                  | 30.9166                | 8.3478                | 7.4583                | -15.4                              | 30.8                                | 46.2                                  |
| 19 marzo<br>2011        | 31.6351                | 21.2916                  | 38.7916                | 31.6351                | 27.2631                | 30.5416                | 31.6351                | 31.6354                | 26.0434                | 28.0511               | 28.0511               | 24.7916               | 26.4166               | 37.250                 | 20.7619               | 31.9166               | 37.7                               | 30.7                                | -7.0                                  |
| 7 abril<br>2012         | 15.1093                | 10.5                     | 22.375                 | 12.25                  | 12.875                 | 18.9523                | 14.625                 | 8.125                  | 8.7083                 | 21.9583               | 22.6014               | 19.625                | 22.4285               | 16                     | 20.4583               | 22.9565               | 48.4                               | 13.3                                | -35.1                                 |
| 10 mayo<br>2013         | 35.05                  | 26.375                   | 56.5                   | 15.75                  | 42.7916                | 34.75                  | 30.125                 | 27.2916                | 33.0416                | 32.875                | 32.4794               | 32.4794               | 25.8                  | 35.8333                | 30.4583               | 28.4347               | 43.0                               | 14.4                                | -28.6                                 |
| 17 junio<br>2014        | 22.5123                | 17.4583                  | 28.25                  | 14.75                  | 26.1739                | 25.7083                | 14.41                  | 21.2631                | 22.5123                | 28.3333               | 34.2050               | 28.875                | 29.7916               | 26.3333                | 34.1363               | 37.3333               | 71.8                               | 21.87                               | -50.1                                 |
| 7 agosto<br>2015        | 21.75                  | 16.4583                  | 21.3764                | 14.9583                | 25                     | 21.1578                | 13                     | 21.3764                | 19                     | 26.4166               | 36.2916               | 33.7211               | 18.6315               | 23.3333                | 31.375                | 33.7211               | 71.7                               | 25.0                                | -46.8                                 |
| 6 octubre<br>2016       | 20.7083                | 14.5                     | 30.9583                | 16.4583                | 19.5833                | 18.9565                | 13.6666                | 16.9473                | 19.625                 | 16.625                | 22.375                | 17.83333              | 18.1304               | 29.5416                | 21.7267               | 23.125                | 31.5                               | 17.9                                | -13.6                                 |
| 2 julio<br>2017         | 21.125                 | 21.7499                  | 27.25                  | 13.9166                | 21                     | 21.375                 | 16.0416                | 22.8333                | 20.9166                | 22.7916               | 24.1666               | 19.5833               | 21.125                | 22.875                 | 21.9583               | 26                    | 39.2                               | 16.2                                | -23.0                                 |
| 10 enero<br>2018        | 39.3333                | 38.3468                  | 55.1666                | 31.4583                | 39                     | 34.9565                | 25.2857                | 36.25                  | 37.1666                | 15.5833               | 21.4583               | 18.2916               | 20.0869               | 52.2083                | 22.7956               | 22.7956               | 7.9                                | 39.8                                | 31.8                                  |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 27.2916                | 31.3613                  | 38.375                 | 31.3613                | 35.6666                | 27.8333                | 43                     | 31.3613                | 26.7083                | 18.2916               | 8.4210                | 14.25                 | 14.25                 | 29.3333                | 16.5416               | 17.3209               | -6.2                               | 30.5                                | 36.7                                  |
|                         |                        |                          |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       | <b><math>\bar{x}</math>=33 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 24 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=-8.94 ppb</b> |
|                         |                        |                          |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       |                                    |                                     | <b>s=±35.29 ppb</b>                   |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **ANEXO VIII. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de un día, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

En este caso los resultados indican que las estaciones [O<sub>3</sub>] CUT, [O<sub>3</sub>] INN, [NO<sub>2</sub>]CUT, [NO<sub>2</sub>]ATIZA, [NO<sub>2</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]UIZ, [O<sub>3</sub>] NEZ, [O<sub>3</sub>] MON, [O<sub>3</sub>] AJM, explican con mayor exactitud el comportamiento de [O<sub>3</sub>]CUA, ya que presentan una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ), así como, un coeficiente de determinación que manifiesta un valor de 0.6347 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en CUA es explicada en un 63% por la variación del O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registrado un día antes en las estaciones mencionadas. El valor de la RMSE es 9.1324 y sugiere alta dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUA}_{(\text{desfase un día})} = -0.2707 ([O_3] \text{ CUT}) + 0.8061 ([O_3] \text{ INN}) - 0.7641 ([NO_2] \text{ CUT}) + 0.7340 ([NO_2] \text{ ATIZA}) + 1.4956 ([NO_2] \text{ ACOL}) + 0.2801 ([NO_2] \text{ SAG}) + 0.2788 ([NO_2] \text{ PED}) - 1.0701 ([NO_2] \text{ UIZ}) + 0.2925 ([O_3] \text{ NEZ}) + 0.2822 ([O_3] \text{ MON}) - 0.4571 ([O_3] \text{ (AJM)})$$

El modelo de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> de la estación CUA<sub>(desfase un día)</sub> mostró que las estaciones, [O<sub>3</sub>] INN, [O<sub>3</sub>] NEZ y [O<sub>3</sub>] MON tienen una correlación directa con respecto a CUA. Un factor siempre a considerar para una posible explicación sobre la correlación entre estaciones es la proximidad, tal es el caso que existe entre [O<sub>3</sub>] INN con respecto a CUA, y cuya variación de O<sub>3</sub> podría ser mínima inclusive ante un retardo de un día de diferencia a partir de su registro en cada estación.

La correlación directa de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto a las estaciones: [O<sub>3</sub>] NEZ y [O<sub>3</sub>] MON puede ser resultado de la dispersión uniforme de las concentraciones O<sub>3</sub> y esta se vea reflejada inclusive un día antes a su registro en la estación CUA, pese a no estar cerca en donde es muy probable la participación de variables meteorológicas principalmente de los vientos.

El resto de las estaciones con registro de correlación directa son las estaciones: [NO<sub>2</sub>] ATIZA, [NO<sub>2</sub>] ACOL, [NO<sub>2</sub>] SAG, [NO<sub>2</sub>] PED, en donde dicha correlación es sin lugar a duda en primera instancia

al papel del  $\text{NO}_2$  como precursor de  $\text{O}_3$  como lo señaló Musso et al. (2002), por lo que la oxidación del  $\text{NO}_2$  un día antes en estas estaciones genera correlación con el  $\text{O}_3$  presente en CUA al día siguiente distribuido principalmente por los vientos dominantes del Valle de México.

Las estaciones  $[\text{O}_3]$  CUT,  $[\text{NO}_2]$  CUT,  $[\text{NO}_2]$  UIZ y  $[\text{O}_3]$  AJM indican una relación inversa con el  $\text{O}_3$  de  $\text{AJM}_{(\text{desfase un día})}$ . Este comportamiento que se presenta con retardo de un día y podría ser explicado por el movimiento de  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_2$  desde cada una de las estaciones mencionadas hasta la estación CUA, en donde se registra un aumento de  $\text{O}_3$  y  $\text{NO}_2$  debido a la acumulación teniendo como procedencia concentraciones de los mismos contaminantes de cada una de las estaciones citadas, fenómeno que estaría estrechamente relacionado a las variables meteorológicas ante su efecto sobre la formación y la dispersión del  $\text{O}_3$  como lo encontrado por López et al. (2008).

EL proceso de validación del modelo de estimación de  $[\text{O}_3]_{\text{CUA}}_{(\text{desfase un día})}$  obtuvo una media de los residuos de -17.90 ppb y una desviación estándar de  $\pm 15.80$  ppb, la cual es tomada en cuenta como una alta dispersión de los datos y permiten concluir que el modelo obtenido no es el más adecuado para la estimación de las concentraciones de  $[\text{O}_3]$  en la estación rural CUA  $_{(\text{desfase un día})}$ .

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUA<sub>(desfase un día)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub><br>CUT | O <sub>3</sub><br>INN | NO <sub>2</sub><br>CUT | NO <sub>2</sub><br>ATIZA | NO <sub>2</sub><br>ACOL | NO <sub>2</sub><br>SAG | NO <sub>2</sub><br>PED | NO <sub>2</sub><br>UIZ | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación<br>de la<br>estimación                             |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 7.9027                | 7.9027                | 30.8243                | 30.45                    | 30.8243                 | 25.875                 | 30.8243                | 30.9166                | 7.9027                | 9.625                 | 7.9027                | 40.5                                 | 29.5                                 | 11.1  |
| 19 marzo 2011     | 28.0511               | 28.0511               | 31.6351                | 21.2916                  | 31.6351                 | 30.5416                | 26.0434                | 37.25                  | 28.0511               | 28.0511               | 28.0511               | 58.7                                 | 41.0                                 | 17.7  |
| 7 abril 2012      | 22.6014               | 22.6014               | 14.625                 | 10.5                     | 14.6956                 | 18.9523                | 8.7083                 | 16                     | 22.1666               | 22.9583               | 22.6014               | 44.5                                 | 44.2                                 | 0.3   |
| 10 mayo 2013      | 29.6666               | 32.4794               | 30.125                 | 26.375                   | 20.4210                 | 34.75                  | 33.0416                | 35.8333                | 29.9565               | 34.1428               | 32.4794               | 58.9                                 | 27.2                                 | 31.7  |
| 17 junio 2014     | 29.2916               | 34.2050               | 14.4166                | 17.4583                  | 9.1818                  | 25.7083                | 22.5123                | 26.3333                | 31.4166               | 32.6666               | 34.2050               | 54.5                                 | 21.7                                 | 32.8  |
| 7 agosto 2015     | 24.7083               | 33.7211               | 13                     | 16.4583                  | 11.0416                 | 21.1578                | 19                     | 23.3333                | 33.7211               | 29.5416               | 46.2083               | 64.7                                 | 17.0                                 | 47.8  |
| 6 octubre 2016    | 17.7916               | 26.9166               | 13.6666                | 14.5                     | 21.2663                 | 18.9565                | 19.625                 | 29.5416                | 20.6521               | 21.7916               | 25.8533               | 51.9                                 | 39.0                                 | 12.9  |
| 2 julio 2017      | 22.2916               | 21.7916               | 16.0416                | 21.7499                  | 14.625                  | 21.375                 | 20.9166                | 22.875                 | 23.4583               | 20.4583               | 28.2916               | 50.0                                 | 28.9                                 | 21.2  |
| 10 enero 2018     | 18.0952               | 41.6666               | 25.2857                | 38.3468                  | 24.4583                 | 34.9565                | 37.1666                | 52.2083                | 18.875                | 27.9166               | 33.1666               | 66.9                                 | 69.0                                 | -2.1  |
| 16 noviembre 2018 | 27.0                  | 28.3333               | 43                     | 28                       | 18                      | 27.8333                | 26.7083                | 29.3333                | 17.75                 | 17.3209               | 17.3209               | 32.0                                 | 26.4                                 | 5.6   |
|                   |                       |                       |                        |                          |                         |                        |                        |                        |                       |                       |                       | <b><math>\bar{x}</math>=52.3 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=34.4 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=-17.90 ppb</b><br><b>s=±15.80 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **ANEXO IX. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de un día, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Para el establecimiento del modelo de estimación de O<sub>3</sub> de CUT<sub>(desfase un día)</sub>, puntualizó que las estaciones [O<sub>3</sub>]LPR, [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]ATIZA, [NO<sub>2</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]PED, NO<sub>2</sub>SFE, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]SJA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]UIZ, brindan la mayor explicación de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación CUT y que su correlación es significativa con un  $\alpha < 0.05$ . El coeficiente de determinación es de 0.7226 exponiendo la variación de O<sub>3</sub> en CUT la cual se explica en un 72% por la variación de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registrado un día antes en las estaciones mencionadas. Por su parte, el valor de la RMSE es 4.8059 e insinúa relativa baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUT}_{(\text{desfase un día})} = 0.842 ([O_3] \text{ LPR}) - 0.2745 ([O_3] \text{ VIF}) - 0.4614 ([O_3] \text{ NEZ}) + 0.3159 ([O_3] \text{ ATIZA}) + 0.2378 ([NO_2] \text{ COY}) - 0.8049 ([O_3] \text{ TLA}) + 0.0098 ([O_3] \text{ PED}) + 0.2698 ([NO_2] \text{ SFE}) + 0.4585 ([O_3] \text{ CCA}) + 0.9052 ([O_3] \text{ SJA}) + 0.1540 ([O_3] \text{ CAM}) + 0.8123 ([O_3] \text{ FAC}) - 1.116 ([O_3] \text{ BJU}) - 0.5666 ([O_3] \text{ UIZ})$$

De acuerdo a los resultados obtenidos para este modelo de estimación las estaciones, [O<sub>3</sub>] LPR, [O<sub>3</sub>] ATIZA, [O<sub>3</sub>] PED, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]SJA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]FAC, exhibieron una correlación directa con respecto a CUA.

Por lo anterior, el factor cercanía en el caso de la estación [O<sub>3</sub>] ATIZA no se descartaría debido a la posibilidad de una mínima variación de O<sub>3</sub> incluso con un día de diferencia entre registros, probablemente ante un mínimo movimiento de corrientes de aire en esa zona.

La correlación directa de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto a las estaciones: [O<sub>3</sub>] LPR, [O<sub>3</sub>] PED, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]SJA, [O<sub>3</sub>]CAM y [O<sub>3</sub>]FAC, es resultado considerablemente afines de O<sub>3</sub> pese a no estar cerca de CUT incluso con un día de diferencia en estas estaciones, en donde eventualmente las concentraciones de O<sub>3</sub> sean afectadas por las variables meteorológicas de la región impactando

sobre la formación y dispersión de  $O_3$  tal como lo indicaron Cano et al. (2016), señalando de manera particular el movimiento parcial de  $O_3$  desde cada una de las estaciones aludidas hasta la estación CUT, movimiento de contaminantes que se genera desde un día antes a partir de su registro en la estación CUT.

El resto de las estaciones con correlación directa de las concentraciones de  $O_3$  son las estaciones  $[NO_2]COY$  y  $[NO_2]SFE$ , la cual puede presentarse por el efecto precursor del  $NO_2$  (Musso et al. 2002), por lo que a mayor presencia de  $NO_2$  en la atmosfera muy probablemente mayor presencia de  $O_3$  y los cuales de registran incluso un día después a partir de su registro, es decir que la presencia del  $NO_2$  se mantiene por periodos mínimos de 24 horas y se dispersara durante todo el día, principalmente por las tardes como lo señaló SEDEMA (2017).

Contrariamente  $[O_3]VIF$ ,  $[O_3]NEZ$ ,  $[O_3]TLA$ ,  $[O_3]BJU$  y  $[O_3]UIZ$ , indican una correlación inversa con el  $O_3$  de CUT (desfase un día), manifestando la iniciativa de un desplazamiento de  $O_3$  por los vientos de la región desde cada una de las estaciones, hasta la estación CUT y este se ve reflejado con retardo de un día.

Los resultados obtenidos en el proceso de validación del modelo de estimación  $[O_3]CUT_{(desfase\ un\ día)}$  muestran una media de 52 ppb y una desviación estándar de  $\pm 24.79$  ppb. Estos resultados exponen que el modelo propuesto no presenta un ajuste adecuado para estimar las concentraciones de  $[O_3]$  en la estación rural  $CUA_{(desfase\ un\ día)}$ , debido a la alta dispersión de los datos observados y los estimados.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>]de la estación rural CUT (desfase un día) con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> LPR | O <sub>3</sub> VIF | O <sub>3</sub> NEZ | O <sub>3</sub> ATIZA | NO <sub>2</sub> COY | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> PED | NO <sub>2</sub> SFE | O <sub>3</sub> CCA | O <sub>3</sub> SJA | O <sub>3</sub> CAM | O <sub>3</sub> FAC | O <sub>3</sub> BJU | O <sub>3</sub> UIZ | O <sub>3</sub> Modelo               | O <sub>3</sub> RAMA                 | Desviación de la estimación                             |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 7.9027             | 7.3027             | 7.9027             | 7.9027               | 30.8243             | 608333             | 6.9090             | 30.8243             | 7.9027             | 7.9027             | 7.9027             | 7.4166             | 7.9027             | 8.375              | 40.5                                | 20.0                                | -20.5   |
| 19 marzo 2011     | 28.0511            | 28.0511            | 28.0511            | 20.7619              | 31.6351             | 22.7391            | 37.26.08           | 37.25               | 28.0511            | 28.0511            | 28.0511            | 24.2105            | 28.0511            | 25.125             | 84.9                                | 29.3                                | -55.6   |
| 7 abril 2012      | 25.125             | 24.375             | 22.1666            | 22.6014              | 15.8595             | 21.9545            | 25.3333            | 8.7083              | 22.6014            | 22.375             | 20.588             | 23.75              | 22.6014            | 25.375             | 77.8                                | 27.7                                | -50.1   |
| 10 mayo 2013      | 21.75              | 34                 | 29.9565            | 30.04166             | 37.0416             | 28.375             | 35.0416            | 33.0416             | 32.4794            | 25.6666            | 31.8333            | 32.4794            | 32.4794            | 31.3043            | 110.3                               | 51.9                                | -58.5   |
| 17 junio 2014     | 324.2050           | 33.9166            | 31.4166            | 39.5                 | 22.5123             | 31.7727            | 34.2050            | 22.5123             | 34.2050            | 29.9166            | 32.875             | 40.3478            | 34.2050            | 29.4583            | 141.7                               | 31.6                                | -110.1  |
| 7 agosto 2015     | 26.1666            | 29.2083            | 33.7211            | 32.4166              | 24.0416             | 27.25              | 33.7211            | 19                  | 38.9166            | 32.375             | 30.4166            | 22.125             | 36.2916            | 34.5               | 108                                 | 54.7                                | -54.1   |
| 6 octubre 2016    | 20.8333            | 19.75              | 20.6521            | 19.9583              | 23.2916             | 16.6666            | 21.625             | 19.625              | 22.5               | 20.3333            | 16.4583            | 20.5833            | 22.375             | 25.5416            | 71.8                                | 32.5                                | -39.3   |
| 2 julio 2017      | 24.3333            | 26.125             | 20.2083            | 24.9166              | 25                  | 21.625             | 26.375             | 19.5833             | 23.7916            | 16.7083            | 18.1666            | 23.5416            | 19.75              | 21.5833            | 90.5                                | 33.0                                | -57.5   |
| 10 enero 2018     | 19.25              | 19                 | 18.875             | 21.75                | 38.3468             | 22.7956            | 26.7083            | 37.1666             | 22.7962            | 22.7962            | 22.7962            | 19.5416            | 21.4583            | 21.5416            | 86.4                                | 33.9                                | -52.5   |
| 16 noviembre 2018 | 18.0416            | 16                 | 17.75              | 5.0416               | 31.3613             | 14.9583            | 20.3333            | 26.7083             | 18.1666            | 17.3209            | 15.2083            | 16.625             | 8.4210             | 13.75              | 44.0                                | 22.1                                | -22.0   |
|                   |                    |                    |                    |                      |                     |                    |                    |                     |                    |                    |                    |                    |                    |                    | <b><math>\bar{x}</math>=85.7ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=33.7ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=52ppb</b><br><b>s=±24.79ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **ANEXO X. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con respecto a registros de la RAMA y la REDMET**

Los resultados indican que las principales estaciones y variables meteorológicas que mejor se correlacionaron con las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación MON fueron: [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]NEZ, HrACOL, TemUAX, TemSAG y VvSAG. En conjunto el grupo de estaciones registraron una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Por otra parte, el valor obtenido de R<sup>2</sup> es 0.7843 exponiendo que la variación de O<sub>3</sub> en MON es explicada en un 78% por la variación de O<sub>3</sub> y variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Asimismo, el valor de la RMSE es de 4.0153 y sugiere baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{O}_3] \text{ MON} = 0.0103 ([\text{O}_3] \text{ BJU}) + 0.1999 ([\text{O}_3] \text{ UAX}) + 0.1192 ([\text{O}_3] \text{ COY}) + 0.5090 ([\text{O}_3] \text{ NEZ}) - 0.0443 (\text{Hr ACOL}) - 0.7877 (\text{Tem UAX}) + 0.3755 (\text{Tem SAG}) - 0.4700 (\text{Vv SAG})$$

El modelo señaló que las estaciones, [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]NEZ y TemSAG presentan una relación directa con respecto a MON. En el caso particular de la correlación con [O<sub>3</sub>]NEZ se atribuye principalmente a la cercanía entre estaciones, denotando que ante cualquier aumento de [O<sub>3</sub>] en NEZ, se presenta un efecto semejante en la estación MON.

Por otro lado, la relación directa de las estaciones: [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]COY, ubicadas en la zona centro y sur del valle demuestra que a pesar de ubicarse en diferentes puntos del Valle de México, el aumento del O<sub>3</sub> se presenta prácticamente de manera análoga en gran parte del valle, ya que a pesar encontrarse en la zona de Texcoco Estado de México, la estación MON registra un patrón de comportamiento muy similar con las estaciones ubicadas dentro de la CDMX. Este patrón de comportamiento puede estar sujeto a cierta influencia de variables meteorológicas como lo indicaron Oookaa et al. (2011), debido a la distancia entre estaciones, variables que propician concentraciones similares por ejercer condiciones meteorológicas muy afines en el gran parte del Valle de México.

La TemSAG presenta una correlación positiva, indicando que ante la elevación de la temperatura en la estación SAG, el O<sub>3</sub> de la estación MON presenta un incremento. Esta conducta se puede atribuir debido a que la estación SAG se encuentra ubicada en la zona noreste del valle, relativamente cercana a la estación MON, lo cual podría indicar la existencia de temperaturas afines entre ambas estaciones y que ante un aumento de temperatura en SAG, también se produce un aumento de temperatura en la estación MON y por lo tanto, un aumento en las concentraciones de O<sub>3</sub> en la atmosfera debido al efecto que tiene la temperatura sobre la formación del O<sub>3</sub> señalado por Novoa et al. (2014).

Contrariamente las estaciones HrACOL, TemUAX y VvSAG indican una relación inversa con el O<sub>3</sub> de MON, lo infiere que, ante una disminución en las concentraciones de estas variables meteorológicas se genera un aumento en las concentraciones de O<sub>3</sub> en MON, exhibiendo en primer lugar el impacto que generan las variables meteorológicas sobre el O<sub>3</sub>. En cuanto a la conducta de la humedad relativa se explica debido a que, a menor porcentaje de humedad en el ambiente, mayor concentración de O<sub>3</sub> en la atmosfera, mientras que a menor velocidad de vientos menos dispersión de contaminantes y mayor acumulación de O<sub>3</sub>. Sin embargo, la temperatura presenta generalmente una correlación positiva, ya que comúnmente favorece la formación de O<sub>3</sub>, por lo que en esta ocasión su comportamiento se puede atribuir a la distancia entre estaciones y al posible efecto de otras variables meteorológicas sobre las concentraciones de O<sub>3</sub>.

Los resultados del proceso de validación del modelo de estimación [O<sub>3</sub>]MON tiene una media de 14.52ppb y una *s* de ±13.71 ppb, estos datos sugieren una alta dispersión de las estimaciones generadas por el modelo con respecto a los valores observados inicialmente, por lo que se puede concluir que el modelo obtenido no es un modelo confiable para la estimación de las concentraciones de [O<sub>3</sub>]MON.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural MON con base a concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | O <sub>3</sub> BJU | O <sub>3</sub> UAX | O <sub>3</sub> COY | O <sub>3</sub> NEZ | HrACOL  | TemUAX  | TemSAG  | VvSAG  | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación            |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| 18 febrero 2010   | 10.7821            | 10.7821            | 6.5652             | 10.7821            | 85.2083 | 9.7741  | 8.9916  | 1.6833 | 7.2                                  | 18.3                                 | 11.1                                   |
| 19 marzo 2011     | 29.3422            | 29.3422            | 28.5416            | 29.3422            | 23.5833 | 16.9962 | 18.0583 | 2.125  | 17.9                                 | 29.3                                 | 11.4                                   |
| 7 abril 2012      | 27.6694            | 27.6694            | 26.2083            | 25.125             | 38.9166 | 18.0378 | 19.8666 | 1.8666 | 15.8                                 | 21.3                                 | 5.5                                    |
| 10 mayo 2013      | 51.5660            | 34.75              | 45.875             | 36.125             | 26.7083 | 20.5399 | 17.4    | 1.6125 | 22.1                                 | 74.1                                 | 52.0                                   |
| 17 junio 2014     | 31.3               | 35.3913            | 34.9583            | 34.2083            | 72.0833 | 17.6575 | 18.35   | 1.6208 | 24.4                                 | 36.2                                 | 11.8                                   |
| 7 agosto 2015     | 31.5909            | 40                 | 34.9640            | 26.1904            | 64.375  | 19.0083 | 20.7583 | 1.7458 | 20.7                                 | 29.6                                 | 9.0                                    |
| 6 octubre 2016    | 25.9583            | 26.7083            | 27.1666            | 23.4166            | 80.375  | 20.4583 | 20.3416 | 1.9333 | 14.9                                 | 23.3                                 | 8.4                                    |
| 2 julio 2017      | 37.1875            | 25.875             | 21.5416            | 15.0833            | 69.4583 | 16.4583 | 18.7416 | 1.3916 | 12.3                                 | 22.3                                 | 10.0                                   |
| 10 enero 2018     | 36.625             | 44.4166            | 32.5467            | 25                 | 33.4166 | 14.35   | 15.4791 | 0.7708 | 21.5                                 | 41.1                                 | 19.6                                   |
| 16 noviembre 2018 | 20.875             | 22.7083            | 22.0536            | 20.9166            | 63.3333 | 13.2083 | 14.1    | 0.8208 | 15.3                                 | 22.1                                 | 6.7                                    |
|                   |                    |                    |                    |                    |         |         |         |        | <b><math>\bar{x}</math>=17.2 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=31.8 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 14.54 ppb</b> |
|                   |                    |                    |                    |                    |         |         |         |        |                                      |                                      | <b>s= ±13.71 ppb</b>                   |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **ANEXO XI. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de un día, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Ante los resultados obtenidos para la estimación de O<sub>3</sub> en la estación MON, el programa SAS señaló que las estaciones con mayor correlación sobre las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación MON son: [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]CHO, la correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) descubierta entre estas variables, generó el rechazo la hipótesis nula propuesta inicialmente. Al mismo tiempo, el coeficiente de determinación alcanzó un valor de 0.8066, demostrando que la variación de O<sub>3</sub> en MON es explicada en un 80% por la variación de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> registrado un día antes en las estaciones mencionadas. Por su parte, el valor de la RMSE es 3.40 y expone baja dispersión entre las observaciones y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ MON}_{(\text{desfase un día})} = -0.0430 ([O_3] \text{ TLA}) + 0.0870 ([O_3] \text{ INN}) + 0.0142 ([O_3] \text{ PED}) + 0.0312 ([O_3] \text{ SAG}) - 0.1033 ([O_3] \text{ MER}) + 0.2223 ([O_3] \text{ ATIZA}) + 0.3969 ([O_3] \text{ NEZ}) + 0.0093 ([O_3] \text{ CUT}) + 0.2686 ([O_3] \text{ CHO})$$

A partir de los resultados obtenidos, el modelo de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> de la estación CUT<sub>(desfase un día)</sub> indica que las estaciones [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]CUT y [O<sub>3</sub>]CHO presentan una relación directa con respecto a CUA. Por lo anterior, el factor de proximidad que existe entre las estaciones [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]SAG y [O<sub>3</sub>]CHO con respecto a MON no se descarta. Debido a una mínima variación de O<sub>3</sub> inclusive registrado un día antes, donde la variable de temperatura y vientos estarían estrechamente relacionados por su papel en la formación y dispersión de los contaminantes atmosféricos.

Por otro lado, la correlación directa de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto a las estaciones [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]ATIZA y [O<sub>3</sub>]CUT estaría aclarada por la presencia de concentraciones similares de O<sub>3</sub> por todo el Valle de México, las cuales se mantienen en la atmósfera por al menos un periodo de 24 hrs., periodo en el cual una fracción de O<sub>3</sub> puede ser dispersado hasta la estación MON.

Contrariamente las estaciones  $[O_3]$  TLA y  $[O_3]$ MER, indican una relación inversa con el  $O_3$  de  $MON_{(desfase\ un\ día)}$ , conducta que enunciaría la posibilidad de un desplazamiento parcial de  $O_3$  con retardo de un día desde cada una de las estaciones mencionadas hasta la estación MON, mientras que el resto podría mantenerse y reaccionar en sus mismos sitios de registro o trasladarse a otras regiones del Valle de México.

La validación del modelo de estimación de  $[O_3]$  $MON_{(desfase\ un\ día)}$  adquirió un valor de la media de 10.17 ppb y una desviación estándar de  $\pm 13.82$  ppb, manifestando una alta dispersión de sus estimaciones generadas con respecto a su media residual. La información anterior indica que el modelo no presenta un ajuste óptimo para poder estimar las concentraciones de  $[O_3]$  en la estación rural  $MON_{(desfase\ un\ día)}$ .

Validación del modelo de estimación [O<sub>3</sub>] de la estación rural MON<sub>(desfase un día)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                   | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub> INN | O <sub>3</sub> PED | O <sub>3</sub> SAG | O <sub>3</sub> MER | O <sub>3</sub> ATIZA | O <sub>3</sub> NEZ | O <sub>3</sub> CUT | O <sub>3</sub> CHO | O <sub>3</sub> Modelo                | O <sub>3</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación   |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 18 febrero 2010   | 7.8027             | 7.9027             | 6.9090             | 8.25               | 4.9166             | 7.9027               | 7.9027             | 7.9027             | 7.9027             | 7.3                                  | 30.2                                 | 12.7  |
| 19 marzo 2011     | 22.7391            | 28.0511            | 32.2608            | 26.4166            | 24.7916            | 28.0511              | 28.0511            | 28.0511            | 27.2857            | 25.2                                 | 29.3                                 | 4.1   |
| 7 abril 2012      | 21.9545            | 22.6014            | 25.3333            | 22.428571          | 19.625             | 22.6014              | 22.1666            | 22.6014            | 22.3043            | 20.1                                 | 21.3                                 | 1.3   |
| 10 mayo 2013      | 28.375             | 32.4794            | 35.0416            | 25.8               | 35.0416            | 30.4166              | 29.9565            | 29.6666            | 40.2               | 29.0                                 | 74.1                                 | 45.1  |
| 17 junio 2014     | 31.7727            | 34.2050            | 34.2050            | 29.7916            | 28.875             | 39.5                 | 31.4166            | 29.2916            | 35.0416            | 31.0                                 | 36.2                                 | 5.2   |
| 7 agosto 2015     | 27.25              | 33.7211            | 31.5               | 18.6315            | 33.7211            | 32.4166              | 33.7211            | 24.7083            | 36.4166            | 29.9                                 | 29.6                                 | -0.3  |
| 6 octubre 2016    | 16.6666            | 26.9166            | 21.625             | 18.1304            | 17.8333            | 19.9583              | 20.6521            | 17.7916            | 29.125             | 21.3                                 | 23.3                                 | 2.0   |
| 2 julio 17        | 21.625             | 21.9545            | 26.375             | 23.5833            | 17                 | 24.9166              | 20.2740            | 22.2740            | 22.0833            | 30.0                                 | 22.3                                 | 2.3   |
| 10 enero 2018     | 22.7956            | 41.6666            | 26.7083            | 20.0869            | 18.2916            | 21.75                | 18.875             | 18.0952            | 22.7956            | 20.4                                 | 41.1                                 | 20.7  |
| 16 noviembre 2018 | 14.9583            | 28.3333            | 20.3333            | 14.25              | 14.25              | 5.0416               | 17.75              | 27                 | 14.7391            | 13.5                                 | 22.1                                 | 8.6   |
|                   |                    |                    |                    |                    |                    |                      |                    |                    |                    | <b><math>\bar{x}</math>=21.8 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=31.9 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=10.17 ppb<br/><math>s</math>=±13.82 ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **ANEXO XII. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de dos días, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Las principales estaciones y variables atmosféricas que participan a estimar las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación CUT<sub>(desfase dos días)</sub> son [O<sub>3</sub>] VIF, [O<sub>3</sub>] NEZ, [O<sub>3</sub>] ATIZA, [O<sub>3</sub>] TLA, [O<sub>3</sub>] CCA, [O<sub>3</sub>] CAM, [O<sub>3</sub>] FAC, [O<sub>3</sub>]UIZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]COY, cuya correlación es significativa con un  $\alpha < 0.05$ . El coeficiente de determinación alcanzó un valor de 0.9784, expresando que la variación de O<sub>3</sub> en CUT es explicada en un 97% por la variación del NO<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub> registrado dos días antes en las estaciones mencionadas, el valor de la RMSE es 2.1983 expone una baja dispersión entre los datos observados y los estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUT}_{(\text{desfase dos días})} = 0.4036 ([O_3] \text{ VIF}) - 0.8867 ([O_3] \text{ NEZ}) - 0.2480 ([O_3] \text{ ATIZA}) + 0.2581 ([O_3] \text{ TLA}) - 2.3443 ([O_3] \text{ CCA}) - 0.6220 ([O_3] \text{ CAM}) - 0.6404 ([O_3] \text{ FAC}) + 0.4891 ([O_3] \text{ UIZ}) + 0.6155 ([O_3] \text{ MON}) - 0.4313 ([O_3] \text{ AJM}) + 0.0666 ([O_3] \text{ UAX}) - 0.02104 ([O_3] \text{ CHO}) + 0.5684 ([O_3] \text{ INN}) - 0.2317 ([O_3] \text{ MER}) + 2.6953 ([O_3] \text{ COY})$$

Los resultados del modelo de estimación de las concentraciones de O<sub>3</sub> de la estación CUT<sub>(desfase dos días)</sub> indicaron que las estaciones [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]UIZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>] UAX, [O<sub>3</sub>] INN y [O<sub>3</sub>]COY tienen una correlación directa con respecto a CUT, la cual en los casos de las estaciones [O<sub>3</sub>]VIF, y [O<sub>3</sub>] TLA el principal factor es su proximidad, en donde las concentraciones de O<sub>3</sub> se vean mínimamente afectadas con un retardo de dos días.

Por su parte, la correlación directa de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto a las estaciones [O<sub>3</sub>]UIZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>] UAX, [O<sub>3</sub>] INN y [O<sub>3</sub>]COY puede ser resultado de un comportamiento regional en todo el Valle de México, el cual indicaría que ante un aumento de O<sub>3</sub> en las estaciones previamente aludidas, se genere un deslizamiento de O<sub>3</sub> hasta la estación CUT y este deslizamiento presente el retardo de dos días a partir de su registro en cada una de las estaciones de monitoreo, en donde probablemente las concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> son afectadas por variables meteorológicas

las cuales influyen en modificando las concentraciones y dispersión del O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> tal como lo señalaron Ookaa et al. (2011).

Por otro lado, las estaciones [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CHO y [O<sub>3</sub>] MER, indican una relación inversa con el O<sub>3</sub> de CUT, dicha conducta señalaría el factible movimiento de O<sub>3</sub> desde cada una de las estaciones mencionadas hasta la estación CUT, y que dicha dispersión se manifestarse en la estación CUT con un retardo de dos días, lo que indicaría la actividad constante de los vientos en el transporte de los contaminantes atmosféricos.

Los resultados obtenido en el proceso de validación del modelo de estimación [O<sub>3</sub>]CUT<sub>(desfase dos días)</sub> muestran una media de 37.24 ppb, mientras que la desviación estándar señaló un valor de ±19.17 ppb, indicando una alta dispersión de las estimaciones generadas las cuales en muchos gansos mostraron valores negativos por lo que el modelo no es óptimo para poder estimar las concentraciones de [O<sub>3</sub>]en la estación rural CUT<sub>(desfase dos días)</sub>.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUT<sub>(desfase dos días)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>VIF | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>ATIZA | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub><br>CAM | O <sub>3</sub><br>FAC | O <sub>3</sub><br>UIZ | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>UAX | O <sub>3</sub><br>CHO | O <sub>3</sub><br>INN | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>COY | O <sub>3</sub> Modelo              | O <sub>3</sub> RAMA                 | Desviación<br>de la<br>estimación                          |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 16.001                | 16.001                  | 26.1538               | 16.001                | 16.001                | 109047                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 12.625                | 17.5                  | 5.4                                | 20.0                                | 14.6   |
| 19 marzo<br>2011        | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941                 | 26.5652               | 30.8941               | 30.8941               | 29.2608               | 47.5833               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 26.25                 | 34.125                | 7.7                                | 29.3                                | 21.6   |
| 7 abril<br>2012         | 29.5416               | 27.5416               | 27.8425                 | 26.2083               | 27.8425               | 26.8333               | 25.6956               | 29.3333               | 27.0833               | 27.8425               | 30.6956               | 23.3913               | 27.8425               | 22.0833               | 25.7083               | -10.5                              | 27.7                                | 38.2   |
| 10 mayo<br>2013         | 36.5833               | 25.9523               | 30.4583                 | 35.8421               | 32.1540               | 30.2083               | 32.1540               | 29.2916               | 33.75                 | 32.1540               | 31.875                | 32.1540               | 32.1540               | 27.5                  | 29.6086               | -6.9                               | 51.9                                | 58.8   |
| 17 junio<br>2014        | 33.7083               | 39.5                  | 36.625                  | 32.2686               | 37.5883               | 33.4583               | 36                    | 37.2916               | 43.125                | 37.5883               | 42.5883               | 47                    | 37.5883               | 29.4166               | 38.4583               | -5.5                               | 31.6                                | 37.1   |
| 7 agosto<br>2015        | 30.2083               | 32.3                  | 29.375                  | 21.5                  | 30.375                | 22.0416               | 27.5833               | 27.5                  | 28.3333               | 48.1304               | 31.7083               | 31.2083               | 28.0138               | 6                     | 28.0138               | -19.1                              | 54.7                                | 73.8   |
| 6 octubre<br>2016       | 24.9166               | 28.875                | 18.5652                 | 19.9583               | 26.375                | 20.625                | 23.5416               | 32.625                | 20                    | 35.3333               | 25.8095               | 32.91666              | 22.2083               | 20.6595               | 27.0434               | -10.0                              | 32.5                                | 42.5   |
| 2 julio 17              | 26.125                | 20.2083               | 24.9166                 | 21.625                | 23.7916               | 18.1666               | 23.5416               | 21.5833               | 23.5652               | 27.6666               | 21.625                | 22.0833               | 21.9545               | 17                    | 22.4583               | -6.9                               | 33.0                                | 39.9   |
| 10 enero<br>2018        | 207916                | 15.25                 | 30.0416                 | 26.3357               | 26.3357               | 26.3357               | 30.8333               | 20.6666               | 21.0952               | 44.0833               | 26.3357               | 26.3357               | 54.1666               | 20.375                | 26.3357               | -1.3                               | 33.9                                | 35.2   |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 3.1904                | 3.2562                | 0.8571                  | 1.619                 | 1.7142                | 3.2562                | 2.3333                | 2.0476                | 3.2562                | 3.2562                | 2.1904                | 2.3333                | 17.95                 | 1.5238                | 3.2562                | 11.4                               | 22.1                                | 10.7   |
|                         |                       |                       |                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       | <b><math>\bar{x}</math>=3.6ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=33.7ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>=37.24ppb</b><br><b>s=±19.17ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

### **ANEXO XIII. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de dos días, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Los resultados obtenidos señalan que las estaciones de monitoreo [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]IZT, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]UAX, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]COY dan explicación de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación MON<sub>(desfase dos días)</sub>, confirmando la existencia de una relación significativa entre estas variables. Su coeficiente de determinación con valor 0.9067 demuestra que la variación del O<sub>3</sub> en CUA es explicada en un 92% por la variación del NO<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub> registrados dos días antes en las estaciones mencionadas. en el mismo sentido, el valor de la RMSE es 3.3865 y expone la existencia de una baja dispersión entre valores observados y valores estimados.

#### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ MON}_{(\text{desfase dos días})} = 1.1413 ([O_3] \text{ VIF}) + 2.3620 ([O_3] \text{ NEZ}) - 0.4953 ([O_3] \text{ ATIZA}) + 0.6209 ([O_3] \text{ TLA}) + 2.3915 ([O_3] \text{ CCA}) + 1.5285 ([O_3] \text{ CAM}) - 1.0935 ([O_3] \text{ FAC}) + 0.002 ([O_3] \text{ UIZ}) + 1.0669 ([NO_2] \text{ COY}) - 1.4522 ([O_3] \text{ IZT}) - 1.0143 ([O_3] \text{ AJM}) - 1.6435 ([O_3] \text{ CHO}) - 0.4436 ([O_3] \text{ UAX}) + 0.2233 ([O_3] \text{ INN}) + 2.1787 ([O_3] \text{ MER}) - 3.3493 ([O_3] \text{ COY})$$

A partir de las estimaciones obtenidas para el modelo de la estación MON<sub>(desfase dos días)</sub> se puede observar que las estaciones, [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>] TLA, [O<sub>3</sub>] CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]INN y [O<sub>3</sub>]MER presentan una correlación directa con respecto al O<sub>3</sub> registrado en la estación MON.

La correlación anterior puede ser manifestada por la cercanía entre ciertas estaciones, tal es el ejemplo entre [O<sub>3</sub>]NEZ con respecto a MON y a que exista a una mínima variación de O<sub>3</sub>, así como a un mínimo movimiento de los vientos por periodos de hasta dos días, de esta manera se estaría explicando la similitud en el comportamiento de ambas estaciones.

Por su parte, la correlación que registran las estaciones [O<sub>3</sub>]VIF, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>] CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]COY, [O<sub>3</sub>]INN y [O<sub>3</sub>]MER señalarían que existe la probabilidad de un traslado de

O<sub>3</sub> con retardo de dos días desde cada una de las estaciones aludidas, y que mediante la actividad de los vientos ciertas concentraciones de O<sub>3</sub> se dirijan hasta la región de la estación MON, en donde se expresan con dos día de diferencia a partir de su registro en cada una de las estaciones, dicho comportamiento sin duda alguna estaría estrechamente relacionado a las variables meteorológicas de la región

Por otro lado, las estaciones [O<sub>3</sub>]ATIZA, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]IZT, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CHO, [O<sub>3</sub>]UAX y [O<sub>3</sub>]COY exhiben una correlación inversa con retardo de dos días , la cual podría indicar la existencia del movimiento de O<sub>3</sub> a partir de cada una de las estaciones mencionadas, generando su disminución en cada una de ellas y, que a su vez, parte de estas concentraciones de O<sub>3</sub> sean trasladadas hasta MON en donde se genera un aumento en sus registros de O<sub>3</sub>.

La validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>]MON<sub>(desfase dos días)</sub> registró una media de 2.93 ppb y una desviación estándar de ±30.58 ppb, señalando muy alta dispersión de los residuales con respecto a su media. Además, el modelo registro dos estimaciones negativas por lo que se confirma que no es óptimo para estimar las concentraciones de [O<sub>3</sub>]en la estación rural MON<sub>(desfase dos días)</sub>.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural MON<sub>(desfase dos días)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>VIF | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>ATIZA | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub><br>CAM | O <sub>3</sub><br>FAC | O <sub>3</sub><br>UIZ | NO <sub>2</sub><br>COY | O <sub>3</sub><br>IZT | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>CHO | O <sub>3</sub><br>UAX | O <sub>3</sub><br>INN | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>COY | O <sub>3</sub><br>Modelo | O <sub>3</sub> RAMA    | Desviación de<br>la estimación |   |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------|---|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 16.001                | 16.001                  | 26.1538               | 16.001                | 16.001                | 10.9047               | 19.9166               | 28.001                 | 18.5                  | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 12.625                | 17.5                  | 41.1                     | 20.2                   | -21.0                          |   |
| 19 marzo<br>2011        | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941                 | 26.5652               | 30.8941               | 30.8941               | 29.2608               | 47.5833               | 28.8091                | 23.8636               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 26.25                 | 34.125                | 48.7                     | 29.3                   | -19.3                          |   |
| 7 abril<br>2012         | 29.5416               | 27.5416               | 27.8425                 | 26.2083               | 27.8425               | 26.8333               | 25.6956               | 29.3333               | 32.375                 | 21                    | 27.8425               | 23.3913               | 30.6956               | 27.8425               | 22.0833               | 25.7083               | 72.8                     | 21.3                   | -51.4                          |   |
| 10 mayo<br>2013         | 36.58333              | 25.9523               | 30.4583                 | 35.83                 | 32.1540               | 30.2083               | 32.1540               | 29.2916               | 33.5                   | 38.6470               | 32.1540               | 32.1540               | 31.875                | 32.1540               | 27.5                  | 29.6086               | 46.1                     | 74.1                   | 28.0                           |   |
| 17 junio<br>2014        | 33.7083               | 39.5                  | 33.7083                 | 36.625                | 32.2608               | 37.5883               | 33.4583               | 36                    | 19.1140                | 36.0434               | 37.5883               | 47                    | 42.5833               | 37.5883               | 29.4166               | 38.4583               | 13.4                     | 36.2                   | 22.8                           |   |
| 7 agosto<br>2015        | 30.2083               | 32.3                  | 29.375                  | 21.5                  | 30.375                | 22.0416               | 27.5833               | 27.5                  | 29.5833                | 26.875                | 48.1304               | 31.2083               | 31.7083               | 28.0138               | 6                     | 28.0138               | -10.3                    | 29.6                   | 40.0                           |   |
| 6 octubre<br>2016       | 24.9166               | 28.875                | 18.5621                 | 19.59583              | 26.375                | 20.625                | 23.5416               | 32.625                | 26.4545                | 26.9658               | 35.3333               | 32.9166               | 25.8095               | 22.2083               | 20.6956               | 27.0434               | 17.4                     | 23.3                   | 5.9                            |   |
| 2 julio 17              | 26.125                | 20.2083               | 24.9166                 | 21.625                | 23.7916               | 18.1666               | 23.5416               | 21.5833               | 25                     | 16.7826               | 27.666                | 22.0833               | 21.625                | 21.9545               | 17                    | 22.4583               | 32.7                     | 22.3                   | -10.4                          |   |
| 10 enero<br>2018        | 30.7916               | 15.25                 | 30.0416                 | 26.3357               | 26.3357               | 26.3357               | 30.8333               | 20.6666               | 33.9192                | 26.357                | 44.0833               | 26.3357               | 26.3357               | 54.166                | 20.375                | 26.3357               | -2.7                     | 41.1                   | 43.8                           |   |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 3.1904                | 3.2562                | 0.8571                  | 1.6190                | 1.7142                | 3.2562                | 2.3333                | 3.2562                | 25.9397                | 2.3333                | 3.2562                | 2.3333                | 2.1904                | 17.95                 | 1.5238                | 3.2562                | 31.0                     | 22.1                   | -9.0                           |   |
|                         |                       |                       |                         |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                          | $\bar{x}=29\text{ppb}$ | $\bar{x}=31.9\text{ppb}$       | $\bar{x}=2.93\text{ ppb}$<br>$s=\pm 30.58\text{ ppb}$ |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **ANEXO XIV. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT), con respecto a registros de la RAMA y la REDMET**

*En este modelo ninguna variable meteorológica fue significativa, por lo que únicamente se tomó en cuenta el NO<sub>2</sub> registrado en otras estaciones de la RAMA.*

Las únicas estaciones que ayudaron a la explicación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación CUT fueron: [NO<sub>2</sub>]IZT y [NO<sub>2</sub>]ATIZA, su correlación significativa pese a no tener contemplada ninguna variable meteorológica. Presentó un bajo R<sup>2</sup> de 0.2558 exponiendo que la variación del NO<sub>2</sub> en la estación CUT es explicada tan solo en un 25% por la variación del NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registrados en las estaciones mencionadas. Mientras que el valor de la RMSE es de 8.1898 y sugiere una elevada dispersión entre observaciones y valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ CUT} = 0.3788 ([\text{NO}_2] \text{ IZT}) + 0.2055 ([\text{NO}_2] \text{ ATIZA})$$

Los resultados obtenidos indican que las estaciones: [NO<sub>2</sub>]IZT y [NO<sub>2</sub>]ATIZA presentan una relación directa con respecto CUT.

La correlación que registra [NO<sub>2</sub>]ATIZA se atribuye principalmente por la cercanía entre estaciones. Mientras que la correlación directa de la estación [NO<sub>2</sub>]IZT se adjudica ante la posibilidad de la existencia de un efecto similar sobre las concentraciones NO<sub>2</sub> en la zona centro y norte del Valle de México donde se ubican respectivamente las estaciones IZT y CUT.

El modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>]CUT en su proceso de validación obtuvo una media de 5.47 ppb y una desviación de ±6.75 ppb, señalando una baja dispersión de los datos con respecto a la media de los residuales. Estos resultados inicialmente indicarían la presencia de un buen modelo de estimación. Sin embargo, el modelo no cumple la integración de variables meteorológicas por lo que a pesar de los resultados obtenido se concluye que el modelo no es adecuado para la estimación de [NO<sub>2</sub>]en la estación rural CUT.

Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUT con base a concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | NO <sub>2</sub> IZT | NO <sub>2</sub> ATIZA | NO <sub>2</sub> Modelo               | NO <sub>2</sub> RAMA                  | Desviación de la estimación           |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 18 febrero 2010   | 31.25               | 28.25                 | 17.6                                 | 30.8                                  | 13.1                                  |
| 19 marzo 2011     | 39.3043             | 20.9166               | 19.2                                 | 30.7                                  | 11.6                                  |
| 7 abril 2012      | 24.0416             | 14.0833               | 12.0                                 | 16.0                                  | 4.0                                   |
| 10 mayo 2013      | 48.1666             | 32.7727               | 25.0                                 | 27.1                                  | 2.1                                   |
| 17 junio 2014     | 25.5833             | 13.7916               | 12.5                                 | 8.7                                   | -3.9                                  |
| 7 agosto 2015     | 32.2916             | 22.5833               | 16.9                                 | 20.8                                  | 3.9                                   |
| 6 octubre 2016    | 20.7340             | 16.75                 | 11.3                                 | 12.9                                  | 1.6                                   |
| 2 julio 2017      | 25.375              | 18.9875               | 13.5                                 | 10.0                                  | -3.5                                  |
| 10 enero 2018     | 45.8301             | 45.8301               | 26.8                                 | 41.5                                  | 14.8                                  |
| 16 noviembre 2018 | 38.3333             | 23.5384               | 19.4                                 | 30.3                                  | 10.9                                  |
|                   |                     |                       | <b><math>\bar{x}</math>=17.4 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 22.9 ppb</b> | <b><math>\bar{x}</math>= 5.47 ppb</b> |
|                   |                     |                       |                                      |                                       | <b>s=±6.75 ppb</b>                    |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **ANEXO XV. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de un día, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

El conjunto de las estaciones [O<sub>3</sub>]VIF, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, NO<sub>2</sub>PED, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]BJU, [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MON [O<sub>3</sub>]LPR [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]UIZ revelan una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con [NO<sub>2</sub>]MON<sub>(desfase un día)</sub>. El coeficiente de determinación obtuvo un valor de 0.6992 esto puntualiza que la variación del NO<sub>2</sub> en la estación MON es explicada solo en un 69% por la variación tanto del NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y las variables meteorológicas de las estaciones que integran el modelo. En el mismo sentido, el valor de la RMSE de 3.44 expone mínima dispersión entre los valores observados y los valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ MON}_{(\text{desfase un día})} = 0.0294 ([\text{O}_3] \text{ VIF}) + 0.1659 ([\text{NO}_2] \text{ XAL}) - 0.091 ([\text{NO}_2] \text{ FAC}) + 1.0603 ([\text{O}_3] \text{ TLA}) + 0.2511 ([\text{O}_3] \text{ INN}) + 0.4213 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) - 0.145 ([\text{O}_3] \text{ SFE}) - 1.1039 ([\text{O}_3] \text{ BJU}) - 0.6089 ([\text{O}_3] \text{ CUT}) + 0.1629 ([\text{O}_3] \text{ FAC}) - 0.5051 ([\text{O}_3] \text{ MPA}) + 0.3804 ([\text{O}_3] \text{ NEZ}) + 0.0805 ([\text{O}_3] \text{ MON}) + 0.025 ([\text{O}_3] \text{ LPR}) + 0.3233 ([\text{O}_3] \text{ HGM}) + 0.0122 ([\text{O}_3] \text{ CAM}) + 0.4310 ([\text{O}_3] \text{ UIZ})$$

Las estaciones con registro de correlación directa fueron [O<sub>3</sub>] VIF, [O<sub>3</sub>] XAL, [O<sub>3</sub>] TLA, [O<sub>3</sub>] INN, [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]LPR, [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]CAM y [O<sub>3</sub>]UIZ. La cercanía entre estaciones aplica en las estaciones [O<sub>3</sub>]NEZ y [O<sub>3</sub>]MON, sugiriendo que las concentraciones de O<sub>3</sub> registradas previamente al NO<sub>2</sub> MON, manifiesta un impacto positivo sobre el NO<sub>2</sub> con retardo de un día, comportamiento atípico que podría estar explicado por la influencia de variables meteorológicas locales de la región del este del Valle de Mexico, donde se ubican NEZ y MON. Por su parte, la correlación que presenta la estación [NO<sub>2</sub>]PED advertiría del aumento de NO<sub>2</sub> en PED previo al aumento en las concentraciones de NO<sub>2</sub> en MON, dicho comportamiento con retardo de un día podría estar basado en la actividad de los vientos de la región los cuales propician dilución y dispersión de NO<sub>2</sub> a diferentes partes del valle de México como lo reportaron Ramos et al. (2010).

La correlación directa que presentan las estaciones [O<sub>3</sub>] VIF, [O<sub>3</sub>] XAL, [O<sub>3</sub>] TLA, [O<sub>3</sub>] INN, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]LPR, [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]CAM y [O<sub>3</sub>]UIZ sería resultado en primer lugar a la capacidad

precursora del  $\text{NO}_2$  con respecto al  $\text{O}_3$  y en segundo lugar a un esquema de comportamiento con retardo de un día en donde primero se genera un aumento de  $\text{O}_3$  en prácticamente todo el Valle de México, y al día siguiente se promueve la elevación de  $\text{NO}_2$  por lo menos en la estación MON, aunque muy probablemente este aumento de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  se presente de manera homogénea en todo el valle.

Contrariamente la correlación de las estaciones  $[\text{NO}_2]$  FAC,  $[\text{O}_3]$ SFE,  $[\text{O}_3]$ BJU,  $[\text{O}_3]$ CUT y  $[\text{O}_3]$ MPA indican la existencia de una relación inversa con el  $\text{NO}_2$  de  $\text{MON}_{(\text{desfase un día})}$ . Este comportamiento se presenta con retardo de un día de diferencia partir de su registro en cada una de las estaciones. En el caso particular de la estación  $[\text{NO}_2]$  FAC señalaría la dispersión de una porción de  $\text{NO}_2$  registrado el primer día en FAC hacia MON el cual registra las concentraciones propias del sitio, así como las trasladadas desde FAC.

Por su parte la correlación inversa que registran las estaciones  $[\text{O}_3]$ SFE,  $[\text{O}_3]$ BJU,  $[\text{O}_3]$ CUT y  $[\text{O}_3]$ MPA se deriva por la acción precursora del  $\text{NO}_2$  sobre el  $\text{O}_3$  y por otro lado, a la existencia de un comportamiento en donde el primer día se producen las condiciones meteorológicas para la disminución de  $\text{O}_3$  en la atmósfera, el cual por su vida corta que presentan se ve reduciendo en concentración particularmente en horarios diurnos, mientras que el día siguiente el  $\text{NO}_2$  obtiene las condiciones físico-químicas óptimas para aumentar sus concentraciones.

Los resultados de validación del modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]$   $\text{MON}_{(\text{desfase un día})}$  muestra una media de 14.11 ppb y una desviación estándar relativamente alta de  $\pm 7.34$  ppb, estos resultados indican que el modelo no presenta un ajuste adecuado para estimar las concentraciones de  $[\text{NO}_2]$   $\text{MON}_{(\text{desfase un día})}$ .

Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural MON<sub>(desfase un día)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA

|                         | O <sub>3</sub><br>VIF | NO <sub>2</sub><br>XAL | NO <sub>2</sub><br>FAC | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>INN | NO <sub>2</sub><br>PED | O <sub>3</sub><br>SFE | O <sub>3</sub><br>BJU | O <sub>3</sub><br>CUT | O <sub>3</sub><br>FAC | O <sub>3</sub><br>MPA | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>LPR | O <sub>3</sub><br>HGM | O <sub>3</sub><br>CAM | O <sub>3</sub><br>UIZ | NO <sub>2</sub><br>Modelo | NO <sub>2</sub><br>RAMA | Desviación<br>de la<br>estimación |                   |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 7.9027                | 34.625                 | 30.4166                | 6.8333                | 7.9027                | 25.6363                | 7.9027                | 7.9027                | 7.9027                | 7.4166                | 7.9027                | 7.9027                | 9.625                 | 7.9027                | 7.9027                | 7.9027                | 8.375                 | 12.6                      | 30.8                    | 18.2                              |                   |
| 19 marzo<br>2011        | 28.0511               | 50.0416                | 27.2631                | 22.7391               | 28.0511               | 26.0434                | 28.0511               | 28.0511               | 28.0511               | 24.2105               | 28.0511               | 28.0511               | 28.0511               | 28.0511               | 28.0511               | 28.0511               | 25.125                | 8.6                       | 30.7                    | 22.1                              |                   |
| 7 abril<br>2012         | 24.375                | 21.2916                | 12.875                 | 21.9545               | 22.6014               | 8.7083                 | 23.083                | 22.6014               | 22.6014               | 23.75                 | 22.6014               | 22.1666               | 22.9583               | 25.125                | 22.6666               | 20.5833               | 25.375                | 4.1                       | 14.4                    | 10.3                              |                   |
| 10 mayo<br>2013         | 34                    | 54.5789                | 42.7916                | 28.375                | 32.4794               | 33.0416                | 39.5416               | 32.4794               | 26.6666               | 32.4794               | 32.4794               | 341428                | 29.9556               | 31.75                 | 29.5217               | 31.8333               | 31.3043               | 11.2                      | 27.1                    | 15.9                              |                   |
| 17 junio<br>2014        | 33.9166               | 28.0909                | 26.1739                | 31.7727               | 34.2050               | 22.5123                | 34.2050               | 34.2050               | 29.2916               | 40.3478               | 34.2050               | 31.4166               | 32.6666               | 34.2050               | 32.75                 | 34.2050               | 29.4583               | 9.7                       | 11.1                    | 1.4                               |                   |
| 7 agosto<br>2015        | 29.2083               | 29.125                 | 25                     | 27.25                 | 33.7211               | 19                     | 46                    | 36.2916               | 24.7083               | 33.125                | 33.7211               | 33.7211               | 29.5416               | 33.7211               | 34.0416               | 30.4166               | 34.5                  | 0.8                       | 17.8                    | 17.0                              |                   |
| 6 octubre<br>2016       | 19.75                 | 25.75                  | 19.5833                | 16.6666               | 29.9166               | 19.625                 | 16.4736               | 22.375                | 17.7916               | 20.5833               | 32.2916               | 20.6521               | 21.7916               | 20.83333              | 21.625                | 16.4583               | 25.5416               | 2.0                       | 12.0                    | 10.0                              |                   |
| 2 julio<br>2017         | 21                    | 23.2567                | 25.5                   | 21.625                | 21.9545               | 19.5833                | 20.45                 | 19.75                 | 22.2740               | 23.5416               | 25.7083               | 20.2083               | 23.5652               | 24.3333               | 19.75                 | 18.1666               | 21.5833               | 8.3                       | 15.0                    | 6.7                               |                   |
| 10 enero<br>2018        | 19                    | 43.2083                | 39                     | 22.7956               | 41.6666               | 37.1666                | 23.6666               | 21.4583               | 18.0952               | 19.5416               | 45.7083               | 18.875                | 27.9166               | 19.25                 | 22.79                 | 22.7956               | 21.5416               | 16.0                      | 30.0                    | 14.0                              |                   |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 16                    | 34.625                 | 35.6666                | 14.9583               | 28.3333               | 26.7083                | 16.83                 | 8.4210                | 27                    | 16.625                | 40                    | 17.75                 | 17.32                 | 18.0416               | 16.0416               | 15.2083               | 13.75                 | 4.7                       | 30.2                    | 25.5                              |                   |
|                         |                       |                        |                        |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       | <b>̄x=7.8ppb</b>          | <b>̄x=21.9ppb</b>       | <b>̄x=14.1ppb</b>                 | <b>s=±7.24ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **ANEXO XVI. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuautitlán (CUT) con desfase de dos días, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Las estaciones [O<sub>3</sub>]BJU, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]AJM, [NO<sub>2</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]VIF son las estaciones con mayor correlacionan con [NO<sub>2</sub>] CUT<sub>(desfase dos días)</sub>. El valor de la RMSE es de 4.8899 indicando baja dispersión de los datos observados con respecto a los valores estimados. Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.5825 demuestra que la variabilidad del NO<sub>2</sub> en la estación CUT se explica en un 58% por la variación del O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registrado dos días antes en las estaciones mencionadas.

### *Modelo de estimación*

$$\begin{aligned} [\text{NO}_2] \text{CUT}_{(\text{desfase dos días})} = & 0.6012 ([\text{O}_3] \text{BJU}) - 0.0653 ([\text{NO}_2] \text{NEZ}) - 0.0938 ([\text{NO}_2] \text{MON}) + 0.2334 \\ & ([\text{NO}_2] \text{AJM}) + 0.5608 ([\text{NO}_2] \text{FAC}) + 0.0181 ([\text{O}_3] \text{AJM}) - 0.4987 ([\text{O}_3] \text{CCA}) - 0.5009 ([\text{O}_3] \text{TLA}) \\ & + 0.4426 ([\text{O}_3] \text{INN}) + 0.2007 ([\text{NO}_2] \text{SAG}) - 0.5180 ([\text{O}_3] \text{NEZ}) + 0.2943 ([\text{O}_3] \text{MON}) + 0.4484 \\ & ([\text{O}_3] \text{XAL}) - 0.2017 ([\text{O}_3] \text{MER}) + 0.3345 ([\text{O}_3] \text{SAG}) - 0.6208 ([\text{O}_3] \text{ACOL}) - 0.1743 ([\text{NO}_2] \text{UIZ}) \\ & - 0.086 ([\text{NO}_2] \text{VIF}) \end{aligned}$$

El modelo de estimación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> de la estación CUT<sub>(desfase dos días)</sub> demostró que las estaciones [O<sub>3</sub>] BJU, [NO<sub>2</sub>]AJM [NO<sub>2</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]INN, [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]SAG tiene una correlación directa con respecto a la estación CUT<sub>(desfase dos días)</sub>.

En primera instancia las estaciones [O<sub>3</sub>] BJU, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]SAG revelan la existencia de un patrón cíclico comenzando por el aumento de O<sub>3</sub> en cualquiera de estas estaciones de monitoreo precedido probablemente por la descomposición del NO<sub>2</sub> principal agente precursor del O<sub>3</sub> y que, dos días después se presenta una acentuación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la zona del norte del Valle de México donde se ubica la estación [NO<sub>2</sub>]CUT<sub>(desfase dos días)</sub>.

Por su parte, la correlación con [NO<sub>2</sub>]AJM [NO<sub>2</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>]SAG, sugiere la existencia de un una conducta del NO<sub>2</sub> en el Valle de México con un retardo de dos días en dichas estaciones, en las que

el NO<sub>2</sub> se acrecienta y posteriormente este mismo comportamiento se presenta en la estación [NO<sub>2</sub>]CUT<sub>(desfase dos días)</sub> en donde no se podría descartar la participación de los vientos como principal variable de dispersión de contaminantes atmosféricos.

Las estaciones [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]UIZ y [NO<sub>2</sub>]VIF presentan una relación inversa con el NO<sub>2</sub> de CUT<sub>(desfase dos días)</sub>.

En el caso de [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]MON, [NO<sub>2</sub>]UIZ y [NO<sub>2</sub>]VIF, esta forma de proceder apunta a que en primer plano se manifiesta un aumento de NO<sub>2</sub> en estas estaciones probablemente por las actividades diarias principalmente de la industria y el uso de automóviles y dos días después este mismo aumento de NO<sub>2</sub> se haga presente en la zona en donde se ubica la estación CUT.

Por último, la relación inversa que registran las estaciones [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MER y [O<sub>3</sub>]ACOL. Dicha conducta de ambos contaminantes podría evidenciar que un ciclo en el que inicialmente se registre un aumento de NO<sub>2</sub>, que al reaccionar en la atmosfera disminuya en sus concentraciones dando paso al aumento O<sub>3</sub>, el mismo que se mantiene en la atmosfera aproximadamente por un día, para dar paso nuevamente a nuevo aumento de NO<sub>2</sub> como lo reportaron Musso et al. (2002).

Los resultados del proceso de validación del modelo [NO<sub>2</sub>] CUT<sub>(desfase dos días)</sub> presenta una desviación estándar de ±11.80 la cual se considera elevada con respecto a la media residual de 12.71ppb. Lo que determina en conclusión que el modelo formulado no es el mejor para estimar las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación rural CUT<sub>(desfase dos días)</sub>., ya que incluso reportó en una ocasión una estimación negativa de NO<sub>2</sub>.

Validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>] de la estación rural CUT<sub>(desfase dos días)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>BJU | NO <sub>2</sub><br>NEZ | NO <sub>2</sub><br>MON | NO <sub>2</sub><br>AJM | NO <sub>2</sub><br>FAC | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub> TLA | O <sub>3</sub><br>INN | NO <sub>2</sub><br>SAG | O <sub>3</sub> NEZ | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>XAL | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub> SAG | O <sub>3</sub><br>ACOL | NO <sub>2</sub><br>UIZ | O <sub>3</sub><br>VIF | NO <sub>2</sub><br>Modelo | NO <sub>2</sub><br>RAMA  | Desviación<br>de la<br>estimación |                           |
|-------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 28.001                 | 28.001                 | 28.001                 | 27.1428                | 16.001                | 16.001                | 26.1538            | 16.001                | 23.2608                | 16.001             | 16.001                | 12.3333               | 12.625                | 16.4782            | 19.5833                | 24.375                 | 12.75                 | 4.5                       | 30.8                     | -26.3                             |                           |
| 19 marzo<br>2011        | 30.8941               | 28.8091                | 28.8091                | 28.8091                | 30.3913                | 30.8941               | 30.8941               | 47.5833            | 30.8941               | 29.0869                | 30.8941            | 30.8941               | 12.3333               | 26.25                 | 26.4347            | 33.9166                | 32.4090                | 17.0416               | -7.4                      | 30.7                     | 38.1                              |                           |
| 7 abril<br>2012         | 27.8425               | 29.9166                | 20.7916                | 28.5116                | 31.2608                | 27.8425               | 27.8425               | 26.2083            | 27.8725               | 33.25                  | 27.5416            | 27.0833               | 30.2777               | 22.0833               | 24.0833            | 27.6521                | 33.75                  | 28.6666               | 14.9                      | 16.0                     | 1.1                               |                           |
| 10 mayo<br>2013         | 32.15540              | 34.9416                | 13.375                 | 41.9166                | 32.1765                | 32.1540               | 32.1540               | 35.8421            | 32.1540               | 35.375                 | 25.9523            | 33.75                 | 27.8333               | 27.5                  | 31.25              | 35.5416                | 27.8636                | 31.5833               | 15.8                      | 27.1                     | 11.3                              |                           |
| 17 junio<br>2014        | 37.5883               | 22.75                  | 10.2916                | 19.1140                | 20.7083                | 37.5883               | 37.5883               | 32.2608            | 37.5883               | 23.5416                | 39.5               | 43.125                | 33.8333               | 29.4166               | 31.75              | 34.4782                | 21.8333                | 14.375                | 9.0                       | 8.7                      | -0.4                              |                           |
| 7 agosto<br>2015        | 26.7083               | 30.5416                | 18.6666                | 12.8695                | 23.25                  | 48.1304               | 30.375                | 21.5               | 28.0138               | 22.2083                | 32.3               | 28.3333               | 19.3333               | 6                     | 29                 | 28.8333                | 32.0416                | 12.375                | 4.4                       | 20.8                     | 16.4                              |                           |
| 6 octubre<br>2016       | 27.5416               | 23.0416                | 17.3684                | 19.7916                | 21.7083                | 35.3333               | 26.375                | 19.9583            | 22.2083               | 18.6666                | 28.875             | 20                    | 25.25                 | 20.6956               | 23.6666            | 25.9658                | 27.8333                | 14.7083               | 5.3                       | 12.9                     | 7.6                               |                           |
| 2 julio<br>2017         | 19.75                 | 22.75                  | 14.2173                | 15.5                   | 25.5                   | 27.6666               | 23.7916               | 21.625             | 21.9545               | 19.625                 | 20.2083            | 23.5652               | 21                    | 17                    | 23.5833            | 27.4583                | 25.2916                | 19.0416               | 5.7                       | 10.0                     | 4.4                               |                           |
| 10 enero<br>2018        | 24.5416               | 37                     | 25.7619                | 23.7916                | 31                     | 44.0833               | 26.3357               | 26.3357            | 54.1666               | 33.8333                | 15.25              | 21.0952               | 16.7391               | 20.375                | 20.7916            | 10.2916                | 41.4166                | 26.4166               | 30.9                      | 41.5                     | 10.7                              |                           |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 2.0952                | 28.9397                | 25.9397                | 22.9047                | 24.2857                | 3.2562                | 1.7142                | 1.6190             | 17.95                 | 22.1428                | 6.2562             | 3.2562                | 1.1                   | 1.5238                | 1.5238             | 3.1428                 | 24                     | 23.0952               | 18.7                      | 30.3                     | 11.6                              |                           |
|                         |                       |                        |                        |                        |                        |                       |                       |                    |                       |                        |                    |                       |                       |                       |                    |                        |                        |                       |                           | $\bar{x}=10.2\text{ppb}$ | $\bar{x}=22.9\text{ppb}$          | $\bar{x}=12.71\text{ppb}$ |
|                         |                       |                        |                        |                        |                        |                       |                       |                    |                       |                        |                    |                       |                       |                       |                    |                        |                        |                       |                           |                          |                                   | $s=\pm 11.80\text{ppb}$   |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **ANEXO XVII. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON) con desfase de dos días, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Las estaciones [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]ACOL, [NO<sub>2</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]VIF y [O<sub>3</sub>]LPR, presentan una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con respecto a [NO<sub>2</sub>]MON<sub>(desfase dos días)</sub>. El valor el valor de la RMSE es 4.92 y expresa que los valores generados por del modelo tienen baja dispersión con respecto a los valores observados. Por otra parte, el valor de R<sup>2</sup> es 0.465 indica que la variación de NO<sub>2</sub> en la estación MON es explicada en un 92% por la variación del NO<sub>2</sub> y del O<sub>3</sub> que se registraron dos días antes en las estaciones mencionadas.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ MON}_{(\text{desfase dos días})} = 0.1964 ([\text{O}_3] \text{ AJM}) - 0.2693 ([\text{O}_3] \text{ CCA}) - 0.2960 ([\text{O}_3] \text{ TLA}) + 0.0183 ([\text{O}_3] \text{ INN}) - 0.3281 ([\text{O}_3] \text{ NEZ}) + 0.6277 ([\text{O}_3] \text{ MON}) + 0.2833 ([\text{O}_3] \text{ XAL}) - 0.1542 ([\text{O}_3] \text{ MER}) + 0.0808 ([\text{O}_3] \text{ SAG}) - 0.7519 ([\text{O}_3] \text{ ACOL}) - 0.008 ([\text{NO}_2] \text{ UIZ}) + 0.2545 ([\text{NO}_2] \text{ VIF}) + 0.4301 ([\text{O}_3] \text{ LPR})$$

El modelo de estimación de las concentraciones de [NO<sub>2</sub>] MON<sub>(desfase dos días)</sub> demuestra que [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]SAG, [NO<sub>2</sub>]VIF y [O<sub>3</sub>]LPR presentan una correlación directa con respecto a la estación MON.

En primera instancia la relación con el O<sub>3</sub> se debe al efecto precursor del NO<sub>2</sub> según lo reportado por Ballester (2005), generalmente la correlación entre estos contaminantes suele ser inversa según lo encontrado por Musso et al. (2002). Sin embargo, la conducta expresada en este estudio puede sustentarse con el aumento de O<sub>3</sub> en la atmosfera, precedido por la elevación de NO<sub>2</sub>, y dicha elevación de NO<sub>2</sub> se registre en MON con retardo de dos días.

Por su parte, la relación con la estación [NO<sub>2</sub>]VIF se basa en el mismo patrón anteriormente mencionado, en donde las concentraciones de NO<sub>2</sub> están sujetas a un patrón con retardo de dos días en la atmosfera del Valle de México.

Las estaciones  $[O_3]_{CCA}$ ,  $[O_3]_{TLA}$ ,  $[O_3]_{NEZ}$ ,  $[O_3]_{MER}$ ,  $[O_3]_{ACOL}$  y  $[NO_2]_{UIZ}$  presentan una correlación inversa con el  $[NO_2]_{MON_{(desfase\ dos\ días)}}$ .

En el caso particular de la estación  $[NO_2]_{UIZ}$ , señalaría la posibilidad de presentarse fase periódica en donde el  $NO_2$  registrado en UIZ se incrementa y dos días posteriores a este suceso el  $[NO_2]_{CUT_{(desfase\ dos\ días)}}$  sufre disminución en sus concentraciones por descomposición y dispersión generada por los vientos y probablemente otras variables meteorológicas.

Por último, la correlación inversa que registran las estaciones  $[O_3]_{CCA}$ ,  $[O_3]_{TLA}$ ,  $[O_3]_{NEZ}$ ,  $[O_3]_{MER}$ , y  $[O_3]_{ACOL}$  puede ser anticipadamente por relación precursora del  $NO_2$  sobre la formación de  $O_3$ , en donde el comportamiento general indica que las concentraciones del  $NO_2$  disminuyen previo a un aumento de  $O_3$  por efecto de la temperatura y radiación solar como lo encontrado por De Souza et al. (2018), dicho comportamiento se presenta entre estas estaciones y  $[NO_2]_{MON}$  pero con un retardo de dos días, en los cuales moléculas de ambos compuestos continúan presentes en la atmósfera del Valle de México.

El modelo de estimación de  $[NO_2]_{MON_{(desfase\ dos\ días)}}$  obtuvo una media de 20.81 ppb y una  $s$  de  $\pm 11.32$  ppb, la cual se considera elevada y que en conjunto con estimaciones negativas que brindó el modelo se determina que el modelo no es adecuado para la estimación de  $[NO_2]_{MON_{(desfase\ dos\ días)}}$ .

Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural MON<sub>(desfase dos días)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>INN | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>XAL | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>SAG | O <sub>3</sub><br>ACOL | NO <sub>2</sub><br>UIZ | NO <sub>2</sub><br>VIF | O <sub>3</sub><br>LPR | NO <sub>2</sub><br>Modelo | NO <sub>2</sub><br>RAMA  | Desviación<br>de la<br>estimación |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 16.001                | 26.1538               | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 12.3333               | 12.625                | 16.4782               | 19.5833                | 24.375                 | 21.75                  | 16.001                | -3.4                      | 30.8                     | 34.1                              |
| 19 marzo<br>2011        | 30.8941               | 30.8941               | 47.5833               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 12.3333               | 26.25                 | 26.4347               | 33.9166                | 32.4090                | 17.0416                | 30.8941               | -13.0                     | 30.7                     | 43.7                              |
| 7 abril<br>2012         | 27.8425               | 27.8425               | 26.2083               | 27.8425               | 27.5416               | 27.0833               | 30.2777               | 22.0833               | 24.0833               | 27.6521                | 33.75                  | 28.6666                | 25.3333               | 3.0                       | 14.4                     | 11.4                              |
| 10 mayo<br>2013         | 32.1540               | 32.1540               | 35.8421               | 32.1540               | 25.9523               | 33.75                 | 27.8333               | 27.5                  | 31.25                 | 35.5416                | 27.8636                | 31.5833                | 30.5416               | 0.8                       | 27.1                     | 26.3                              |
| 17 junio<br>2014        | 37.5883               | 37.5883               | 32.2608               | 37.5883               | 39.5                  | 43.125                | 33.8333               | 29.4166               | 31.75                 | 34.4782                | 21.8333                | 14.375                 | 37.5883               | 3.9                       | 11.1                     | 7.2                               |
| 7 agosto<br>2015        | 48.1304               | 30.375                | 21.5                  | 28.0138               | 32.3                  | 28.3333               | 19.333                | 6                     | 29                    | 28.8333                | 32.0416                | 12.375                 | 20.6956               | -0.3                      | 17.8                     | 18.2                              |
| 6 octubre<br>2016       | 35.3333               | 26.375                | 19.95                 | 22.2083               | 28.875                | 20                    | 25.25                 | 20.6956               | 23.6666               | 25.9658                | 27.8333                | 14.7083                | 25.8333               | -1.5                      | 12.0                     | 13.5                              |
| 2 julio 17              | 27.6666               | 23.7916               | 21.625                | 21.9545               | 20.2083               | 23.5652               | 21                    | 17                    | 23.5833               | 27.4583                | 25.2916                | 19.0416                | 24.3333               | 1.0                       | 15.0                     | 14.0                              |
| 10 enero<br>2018        | 44.0833               | 26.3357               | 26.3357               | 54.1666               | 15.25                 | 21.0952               | 16.7391               | 20.375                | 20.7916               | 10.2916                | 41.4166                | 26.4166                | 22.0416               | 14.5                      | 30.0                     | 15.5                              |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 3.2562                | 1.7142                | 1.6190                | 17.95                 | 3.2562                | 3.2562                | 1.1                   | 1.5238                | 2.1428                | 3.1428                 | 24                     | 23.0952                | 3.2562                | 6.1                       | 30.2                     | 24.2                              |
|                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        |                        |                       | $\bar{x}=1.1\text{ppb}$   | $\bar{x}=21.9\text{ppb}$ | $\bar{x}= 20.81\text{ppb}$        |
|                         |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        |                        |                       |                           |                          | $s= \pm 11.32\text{ppb}$          |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb).

## **ANEXO XVIII. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM) con desfase de dos días, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Las estaciones [O<sub>3</sub>]IZT, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]TLA, [O<sub>3</sub>]INN, [NO<sub>2</sub>]PED, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]FAC, [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]MON, [O<sub>3</sub>]LPR, [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]CAM, [NO<sub>2</sub>]MON y [NO<sub>2</sub>]VIF fueron las estaciones con una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ) con la dependiente [NO<sub>2</sub>]AJM<sub>(desfase dos días)</sub>. El elevado R<sup>2</sup> revela con un valor de 0.9735 que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA se explica en un 97% por mediante la variación de NO<sub>2</sub> y el O<sub>3</sub> registrado dos días antes en las estaciones nombradas previamente. Por su parte, el valor de la RMSE de 1.437 expone mínima dispersión entre los datos observados y los estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ AJM}_{(\text{desfase dos días})} = 1.0962 * [\text{O}_3] \text{ IZT} + 0.7576 ([\text{O}_3] \text{ NEZ}) - 0.7643 ([\text{O}_3] \text{ TLA}) + 0.3239 ([\text{O}_3] \text{ INN}) - 0.3477([\text{NO}_2] \text{ PED}) - 0.2409 ([\text{O}_3] \text{ SFE}) + 0.2659 ([\text{O}_3] \text{ CUT}) + 0.5331 ([\text{O}_3] \text{ FAC}) - 0.0684 ([\text{O}_3] \text{ MPA}) - 0.5371 ([\text{O}_3] \text{ MON}) - 1.3168 ([\text{O}_3] \text{ LPR}) - 0.1695 ([\text{O}_3] \text{ HGM}) - 0.6483 ([\text{O}_3] \text{ CAM}) - 0.4709 ([\text{NO}_2] \text{ MON}) + 0.6155( [\text{NO}_2] \text{ VIF})$$

El modelo de estimación de las concentraciones de NO<sub>2</sub> de la estación AJM<sub>(desfase dos días)</sub> indica que las estaciones [O<sub>3</sub>]IZT, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]FAC, [NO<sub>2</sub>]VIF presentan una relación directa con respecto a la estación AJM<sub>(desfase dos días)</sub>.

Las estaciones [O<sub>3</sub>]IZT, [O<sub>3</sub>]NEZ, [O<sub>3</sub>]CUT, [O<sub>3</sub>]FAC y [O<sub>3</sub>]INN y su correlación directa están ligadas en primer lugar al efecto como precursor de NO<sub>2</sub> sobre el O<sub>3</sub> y en segundo término a la posibilidad de la existencia de un componente cíclico con retardo de dos días a partir del registro de O<sub>3</sub> en cada una de estas estaciones, en donde inicialmente ocurre la elevación de [O<sub>3</sub>] y dos días después el mismo efecto ocurre sobre [NO<sub>2</sub>] AJM<sub>(desfase dos días)</sub>. La correlación de [NO<sub>2</sub>]VIF manifiesta la presencia de un patrón asociado a un componente con retardo de dos días, en donde ante el aumento de NO<sub>2</sub> en la estación VIF, el mismo comportamiento se reporta en la estación AJM dos días después.

Contrariamente las estaciones  $[O_3]$ TLA,  $[NO_2]$ PED,  $[O_3]$ SFE,  $[O_3]$ MPA,  $[O_3]$ MON,  $[O_3]$ LPR,  $[O_3]$ HGM,  $[O_3]$ CAM,  $[NO_2]$ MON, indican poseer correlaciones inversas con  $[NO_2]$  AJM (desfase dos días).

En donde las estaciones  $[O_3]$ TLA,  $[NO_2]$ PED,  $[O_3]$ SFE,  $[O_3]$ MPA,  $[O_3]$ MON,  $[O_3]$ LPR,  $[O_3]$ HGM,  $[O_3]$ CAM,  $[NO_2]$ MON señalarían la probable existencia de componentes cíclicos asociados al retardo de dos días, es decir, que ante el aumento de  $O_3$  o  $NO_2$  en alguna de las estaciones mencionadas, las concentraciones de  $[NO_2]$  AJM (desfase dos días) aumentan dos días después, comportamiento asociado de manera inicial por influencia de los vientos presentes en el Valle de México los cuales puedan mantener un rumbo hacia la zona sur del Valle, y posteriormente por inversión térmica suban hasta la ubicación de la estación AJM, pero además debido a la constante emisión de  $NO_2$  que se presenta en la CDMX

El modelo de estimación de  $[NO_2]$  AJM(desfase dos días) en su proceso de validación obtuvo una media de los residuales de 46.48 ppb y desviación estándar de  $\pm 19.22$  ppb indican claramente una alta dispersión de los datos. Además el modelo genere estimaciones negativas en todas las fechas por lo se puede concluir que el modelo no es óptimo para estimar le  $[NO_2]$  en la estación rural AJM(desfase dos días).

Validación del modelo de estimación [NO<sub>2</sub>] de la estación rural AJM<sub>(desfase dos días)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>IZT | O <sub>3</sub><br>NEZ | O <sub>3</sub><br>TLA | O <sub>3</sub><br>INN | NO <sub>2</sub><br>PED | O <sub>3</sub><br>SFE | O <sub>3</sub><br>CUT | O <sub>3</sub><br>FAC | O <sub>3</sub><br>MPA | O <sub>3</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>LPR | O <sub>3</sub><br>HGM | O <sub>3</sub><br>CAM | NO <sub>2</sub><br>MON | NO <sub>2</sub><br>VIF | NO <sub>2</sub> Modelo | NO <sub>2</sub> RAMA | Desviación de<br>la estimación            |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|---|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 16.001                | 26.1538               | 16.001                | 23.5714                | 16.001                | 16.001                | 10.9247               | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 28.001                 | 21.75                  | -30.8                  | 30.8                 | 61.6                                      |
| 19 marzo<br>2011        | 23.8636               | 30.8941               | 47.5833               | 30.8941               | 26.0833                | 30.8941               | 30.8941               | 29.2608               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 28.2091                | 17.0416                | -57.2                  | 30.7                 | 88.0                                      |
| 7 abril<br>2012         | 21                    | 27.5416               | 26.2083               | 27.8425               | 24.1304                | 35.375                | 27.8425               | 25.6956               | 27.8425               | 27.0833               | 25.3333               | 20.9047               | 26.8333               | 20.7916                | 28.6666                | -25.2                  | 19.1                 | 44.9                                      |
| 10 mayo<br>2013         | 38.6470               | 29.9523               | 35.8421               | 32.1504               | 22.3594                | 35.875                | 35.2916               | 32.1540               | 32.1540               | 33.75                 | 30.5416               | 31.875                | 30.2083               | 13.375                 | 31.5833                | -17.2                  | 37.3                 | 54.2                                      |
| 17 junio<br>2014        | 36.0434               | 39.5                  | 32.2608               | 37.5883               | 19.1140                | 45.10526              | 29.2916               | 36                    | 37.5883               | 43.125                | 37.5883               | 31.875                | 33.4583               | 10.29                  | 14.375                 | -31.9                  | 19.9                 | 51.8                                      |
| 7 agosto<br>2015        | 26.875                | 32.3                  | 21.5                  | 28.0138               | 22.2916                | 36.7916               | 25.7083               | 27.5833               | 28.0138               | 28.3333               | 20.6956               | 12.7222               | 22.0416               | 18.6666                | 12.375                 | -10.5                  | 14.8                 | 25.3                                      |
| 6 octubre<br>2016       | 25.9658               | 28.875                | 19.958                | 22.2083               | 24.91                  | 24.8333               | 19.4583               | 23.5416               | 41                    | 20                    | 25.8333               | 26.95833              | 20.625                | 17.3684                | 14.7083                | -22.2                  | 20.5                 | 42.7                                      |
| 2 julio 17              | 16.7826               | 20.2083               | 21.625                | 21.9545               | 19.5833                | 20.4583               | 22.2740               | 23.5416               | 25.7083               | 23.5652               | 24.3333               | 19.75                 | 18.6666               | 14.2173                | 19.0416                | -25.5                  | 11.5                 | -37.0                                     |
| 10 enero<br>2018        | 26.3357               | 15.25                 | 26.3357               | 54.1666               | 35.3333                | 39.0416               | 23.5                  | 30.8333               | 47.8333               | 21.0952               | 22.0416               | 23.25                 | 26.3357               | 25.7619                | 26.4166                | -21.7                  | 16.7                 | 38.4                                      |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 2.3333                | 3.2562                | 1.6190                | 17.95                 | 24.0952                | 2.2380                | 13.0476               | 2.3333                | 3.2562                | 3.2562                | 3.2562                | 1.6190                | 3.2562                | 25.9397                | 23.0952                | -1.2                   | 19.5                 | 20.7                                      |
|                         |                       |                       |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        | <b>̄x=-24.4ppb</b>     | <b>̄x=22.1ppb</b>    | <b>̄x=46.48 ppb</b><br><b>s=±19.22ppb</b> |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **ANEXO XIX. Estimación de las concentraciones NO<sub>2</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Montecillo (MON), con respecto a registros de la RAMA y la REDMET**

Las estaciones de monitoreo [NO<sub>2</sub>]SFE, [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]MER, [NO<sub>2</sub>]LPR, TemMER, DvSFE, DvMER, NO<sub>2</sub>NEZ, [NO<sub>2</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]CUA son las principales estaciones en brindar una explicación sobre las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación MON, mostraron una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ).

Además, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9233 esto señala que la variación de NO<sub>2</sub> en CUA es explicada en un 92% por la variación de NO<sub>2</sub> y las variables meteorológicas registradas en las estaciones mencionadas. En ese mismo tenor, el valor de la RMSE es 2.1745 y establece que se obtuvo un ajuste adecuado del modelo, el cual se compone por los coeficientes de regresión de las estaciones que integran al modelo y las concentraciones de NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas registradas de cada estación que integran el modelo.

### *Modelo de estimación*

$$[\text{NO}_2] \text{ MON} = -1.0471 ([\text{NO}_2] \text{SFE}) - 0.2822 ([\text{NO}_2] \text{ TLA}) + 0.0381 ([\text{NO}_2] \text{ CCA}) - 0.2843 ([\text{NO}_2] \text{ MER}) + 0.5642 ([\text{NO}_2] \text{ LPR}) - 0.0121 (\text{Tem MER}) - 0.0445 (\text{Dv SFE}) + 0.0078 (\text{Dv MER}) + 0.1907 ([\text{NO}_2] \text{ NEZ}) + 0.1454 ([\text{NO}_2] \text{ PED}) + 0.9521 ([\text{NO}_2] \text{ CUA})$$

Ante las estimaciones obtenidas por el programa estadístico SAS en donde las estaciones [NO<sub>2</sub>]TLA, [NO<sub>2</sub>]CCA, [NO<sub>2</sub>]LPR, DvMER, [NO<sub>2</sub>]NEZ, [NO<sub>2</sub>]PED y [NO<sub>2</sub>]CUA presentan una relación directa con respecto la estación MON.

Su relación estaría altamente relacionada en algunos casos a la vecindad entre estaciones, tal el caso de la estación [NO<sub>2</sub>]NEZ, ambas están ubicadas en la zona este del Valle de México, por lo que no se descartaría la presencia de concentraciones similares de NO<sub>2</sub> en esa región tal como lo reportado por García-Reynoso (2009).

Por su parte, la relación que registran las estaciones  $[\text{NO}_2]\text{TLA}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{CCA}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{LPR}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{PED}$  y  $[\text{NO}_2]\text{CUA}$ , las cuales se encuentran alejadas de la estación MON, declararían que las actividades humanas como el uso de automóviles, industria, etc., generan una constante formación de  $\text{NO}_2$  en todo el valle, y debido a los vientos el  $\text{NO}_2$  se distribuya de manera homogénea.

De manera particular la correlación de  $Dv\text{MER}$  demostraría que muy probablemente los vientos presentes en la zona centro donde se ubica MER arrastran  $\text{NO}_2$  hasta la zona de MON, es decir que existen corrientes de vientos locales del centro al este del Valle de México.

Por otra parte, las estaciones  $[\text{NO}_2]\text{SFE}$ ,  $[\text{NO}_2]\text{MER}$ ,  $\text{TemMER}$  y  $Dv\text{SFE}$  presentan una relación inversa con respecto a la estación MON. La correlación de las estaciones  $[\text{NO}_2]\text{SFE}$  y  $[\text{NO}_2]\text{MER}$  estaría sujeta estrechamente a la influencia de los vientos del Valle de México, los cuales generarían un desplazamiento de  $\text{NO}_2$  desde cada una de las estaciones mencionadas hasta MON aumentando sus concentraciones, y de manera inversa, en ciertos periodos de tiempo la existencia de un traslado de  $\text{NO}_2$  de MON hasta las estaciones SFE y MER ubicadas al sur y norte del Valle de Mexico respectivamente.

En cuanto a  $\text{TemMER}$  su correlación inversa indica un comportamiento poco habitual ya que ante el aumento de temperatura el  $\text{NO}_2$  aumenta. Sin embargo, aparentemente este comportamiento no ocurre entre MER y MON, probablemente este patrón sea reflejo en primera instancia de la distancia entre estaciones y en segundo lugar a otros factores como las actividades humanas, y variables meteorológicas como la humedad relativa y los vientos influenciando cambios en las concentraciones y velocidad de formación del  $\text{NO}_2$ .

Finalmente, la estación  $Dv\text{SFE}$  y su correlación manifiesta que ante la disminución de grados en la dirección de los vientos y por ende menor movimiento de contaminantes, se generan mayores concentraciones de  $\text{NO}_2$  en MON, debido al bajo movimiento de  $\text{NO}_2$  en la atmosfera algo similar a lo reportado por Jazcilevich et al. (2002).

El proceso de validación del modelo de estimación de  $[\text{NO}_2]\text{MON}$  obtuvo una media de los residuales de 24.86 ppb y su desviación estándar presento un valor de  $\pm 8.90$  ppb demuestran una dispersión considerable de los datos con respecto a la media de los residuales. Sin embargo, el

modelo de estimación obtuvo solo valores negativos por lo cual es absolutamente inadecuado para estimar las concentraciones de NO<sub>2</sub> en la estación rural MON.

Validación del modelo de estimación de [NO<sub>2</sub>] de la estación rural MON con base a concentraciones de NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA y variables meteorológicas.

|                   | NO <sub>2</sub> SFE | NO <sub>2</sub> TLA | NO <sub>2</sub> CCA | NO <sub>2</sub> MER | NO <sub>2</sub> LPR | TemMER  | DvSFE    | DvMER    | NO <sub>2</sub> NEZ | NO <sub>2</sub> PED | NO <sub>2</sub> CUA | NO <sub>2</sub> Modelo                 | NO <sub>2</sub> RAMA                   | Desviación de la estimación             |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------|----------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|--|--|---|
| 18 febrero 2010   | 30.7884             | 33.875              | 30.7884             | 36.5833             | 30.9.9791           | 9.9791  | 189.6333 | 186.9166 | 30.7884             | 27.6086             | 30.7884             | -1.6                                   | 30.8                                   | 32.3                                    |
| 19 marzo 2011     | 30.7397             | 32.0833             | 30.7397             | 39.6666             | 30.7397             | 17.85   | 188.7673 | 217.3043 | 30.7397             | 26.125              | 30.7397             | -2.0                                   | 30.7                                   | 32.7                                    |
| 7 abril 2012      | 12.5652             | 24.6666             | 19.0892             | 27.5416             | 24.2916             | 20.1916 | 202.4583 | 204.4583 | 22.70833            | 14.2916             | 13.3181             | -2.1                                   | 14.4                                   | 16.5                                    |
| 10 mayo 2013      | 22.875              | 47.25               | 37.2832             | 54.52               | 48.1666             | 22.425  | 1975.875 | 203.7083 | 43.7                | 33.25               | 14.375              | -4.7                                   | 17.0                                   | 21.7                                    |
| 17 junio 2014     | 21.3913             | 22.0434             | 19.8613             | 25.6086             | 19.8613             | 18.1203 | 169      | 194.5416 | 25.2083             | 17.875              | 21.6842             | -2.1                                   | 11.1                                   | 13.2                                    |
| 7 agosto 2015     | 24.6311             | 33.8260             | 23.5416             | 34.625              | 24.6311             | 19.8739 | 187.875  | 164.8260 | 24.8095             | 21.1666             | 24.9583             | -6.1                                   | 17.8                                   | 24.0                                    |
| 6 octubre 2016    | 20.7391             | 26.9166             | 17.1666             | 32.8571             | 20.7340             | 18.2545 | 134.7083 | 169.2916 | 18                  | 24                  | 17.875              | -7.3                                   | 12.0                                   | 19.3                                    |
| 2 julio 17        | 14.0416             | 21                  | 18.875              | 26.0416             | 18.9875             | 17.4958 | 194.5    | 186.4583 | 24.9130             | 16.125              | 16.2083             | -1.5                                   | 15.0                                   | 16.5                                    |
| 10 enero 2018     | 35.5416             | 71.6666             | 47.8333             | 67.625              | 45.8301             | 14.8375 | 174.75   | 120.625  | 47.4583             | 40                  | 39.75               | -3.3                                   | 30.0                                   | 33.3                                    |
| 16 noviembre 2018 | 32.2340             | 44.875              | 32.25               | 42.7916             | 32.2340             | 13.4125 | 167.25   | 137.25   | 28.625              | 29.08333            | 30.5                | -7.0                                   | 32.2                                   | 39.2                                    |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |         |          |          |                     |                     |                     | <b><math>\bar{x} = -3.8</math> ppb</b> | <b><math>\bar{x} = 21.1</math> ppb</b> | <b><math>\bar{x} = 24.86</math> ppb</b> |
|                   |                     |                     |                     |                     |                     |         |          |          |                     |                     |                     |  |  | <b><math>s = \pm 8.90</math> ppb</b>    |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

## **ANEXO XX. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Cuajimalpa (CUA) con desfase de dos días, con respecto a registros NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de la RAMA**

Por su parte los resultados del modelo de estimación de la estación CUAL<sub>(desfase dos días)</sub> señalaron que [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]UIZ, [O<sub>3</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]HGM, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, [NO<sub>2</sub>] VIF, [NO<sub>2</sub>] MON, [O<sub>3</sub>]XAL, [O<sub>3</sub>]ACOL y [O<sub>3</sub>]IZT, presentan en conjunto una correlación significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Mientras que el coeficiente de determinación ostenta haber obtenido un valor de 0.9021 esto indica que la variación del O<sub>3</sub> en la estación CUA se explica en un 90% por la variación de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> registrados dos días antes en las estaciones citadas. Por su parte, la RMSE es 4.3544 manifestando baja dispersión entre observaciones y valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3] \text{ CUA}_{(\text{desfase dos días})} = -0.5947 ([O_3] \text{ INN}) - 0.6194 ([O_3] \text{ UIZ}) + 4.0408 ([NO_2] \text{ SAG}) - 0.1760 ([O_3] \text{ SAG}) - 0.0464 ([O_3] \text{ AJU}) + 2.7315 ([O_3] \text{ AJM}) - 2.3613 ([O_3] \text{ SFE}) + 0.4404 ([O_3] \text{ MER}) - 1.5294 ([O_3] \text{ HGM}) + 1.7358 ([O_3] \text{ CCA}) + 2.7280 ([O_3] \text{ CAM}) - 3.7571 ([NO_2] \text{ VIF}) - 1.4666 ([NO_2] \text{ MON}) + 1.6572 ([O_3] \text{ XAL}) + 1.3967 ([O_3] \text{ ACOL}) - 4.0827([O_3] \text{ IZT})$$

A partir del modelo conseguido se reveló que las estaciones, [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]AJM, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]CCA, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]XAL y [O<sub>3</sub>]ACOL, presentan una relación directa con respecto a la estación CUA, en donde la cercanía y una baja dispersión del NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> está latente, por lo que daría explicación a la influencia de cada una de las estaciones a ejercer influencia sobre las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación CUA, inclusive hasta en un periodo de dos días de diferencia a partir de su registro .

La correlación directa de las concentraciones de O<sub>3</sub> con respecto a las estaciones: [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]MER, [O<sub>3</sub>]CAM, [O<sub>3</sub>]XAL y [O<sub>3</sub>]ACOL puede ser resultado de la formación y dispersión de concentraciones similares de O<sub>3</sub> a pesar de la distancia entre estaciones, y que dicha dispersión se manifieste con dos días de retardo en cada estación, por lo que no se descarta un movimiento de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> desde la zona norte y centro del Valle de México en donde se ubican las estaciones mencionadas, hasta la zona sur en donde se ubica la estación CUA.

Por el contrario, las estaciones [O<sub>3</sub>]INN, [O<sub>3</sub>]UIZ, [NO<sub>2</sub>]SAG, [O<sub>3</sub>]AJU, [O<sub>3</sub>]SFE, [O<sub>3</sub>]HGM, [NO<sub>2</sub>]VIF, [NO<sub>2</sub>]MON y [O<sub>3</sub>]IZT, indican una relación inversa con el O<sub>3</sub> de CUA. Tal comportamiento revela la probabilidad de que ciertas cantidades de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> sea desplazadas hacia otros puntos del valle de México como lo es la zona de la estación CUA en donde se acumulen, mientras que en las estaciones citadas sus concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> disminuyan, señalando que dicho desplazamiento de contaminantes presenta un retardo de dos días.

El proceso de validación de [O<sub>3</sub>]CUA<sub>(desfase dos días)</sub> presentó una media de 10.47 ppb y una s de ±42.05 ppb. Los resultados señalan que el modelo presenta una dispersión muy elevada de los datos. Además, el modelo presento en dos ocasiones estimaciones negativas, valores que no son posibles encontrar en la atmosfera. Por lo anterior, el modelo no es el más adecuado para estimar las concentraciones de [O<sub>3</sub>] CUA<sub>(desfase dos días)</sub>.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural CUA<sub>(desfase dos días)</sub> con base a concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> registradas en otras estaciones de la RAMA.

|                         | O <sub>3</sub><br>INN | O <sub>3</sub><br>UIZ | NO <sub>2</sub><br>SAG | O <sub>3</sub><br>SAG | O <sub>3</sub><br>AJU | O <sub>3</sub><br>AJM | O <sub>3</sub><br>SFE | O <sub>3</sub><br>MER | O <sub>3</sub><br>HGM | O <sub>3</sub><br>CCA | O <sub>3</sub><br>CAM | NO <sub>2</sub><br>VIF | NO <sub>2</sub><br>MON | O <sub>3</sub><br>XAL | O <sub>3</sub><br>ACOL | O <sub>3</sub><br>IZT | O <sub>3</sub> Modelo | O <sub>3</sub> RAMA | Desviación<br>de la<br>estimación |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 18 febrero<br>2010      | 16.001                | 19.9166               | 23.2608                | 16.4782               | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 12.625                | 16.001                | 16.001                | 16.001                | 21.75                  | 28.0012                | 12.33                 | 19.5833                | 18.5                  | -23.295               | 29.5                | 53.0                              |
| 19 marzo<br>2011        | 30.8941               | 47.5833               | 29.0869                | 26.4347               | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 26.25                 | 30.8941               | 30.8941               | 30.8941               | 17.0416                | 28.8091                | 12.33                 | 33.9166                | 23.8636               | 41.4                  | 41.0                | -0.4                              |
| 7 abril<br>2012         | 27.8425               | 29.3333               | 33.25                  | 24.0833               | 27.8425               | 27.8425               | 35.375                | 22.0833               | 27.8425               | 27.8425               | 26.8333               | 28.6666                | 20.7916                | 30.2777               | 27.6521                | 21                    | 40.2                  | 44.2                | 4.1                               |
| 10 mayo<br>2013         | 32.1540               | 29.2916               | 35.375                 | 31.25                 | 32.1540               | 32.1540               | 35.875                | 27.5                  | 31.875                | 32.1540               | 30.2083               | 31.5833                | 13.375                 | 27.8333               | 35.5416                | 38.6470               | 3.1                   | 27.2                | 24.1                              |
| 17 junio<br>2014        | 37.5883               | 37.2916               | 23.5416                | 31.75                 | 37.5883               | 37.5883               | 45.1052               | 29.4166               | 31.875                | 37.5883               | 33.4583               | 14.375                 | 10.2916                | 33.8333               | 34.4782                | 36.0434               | 47.2                  | 21.7                | -25.5                             |
| 7 agosto<br>2015        | 28.0138               | 27.5                  | 22.0283                | 29                    | 36.7083               | 48.1304               | 36.7916               | 6                     | 12.7222               | 30.375                | 22.0416               | 12.375                 | 18.6666                | 19.3333               | 28.8333                | 26.875                | 78.6                  | 17.0                | -61.6                             |
| 6 octubre<br>2016       | 22.2083               | 32.625                | 18.6666                | 23.6666               | 31.0416               | 35.3333               | 24.8333               | 20.6595               | 26.9583               | 26.375                | 20.625                | 14.7083                | 17.3684                | 25.25                 | 25.9658                | 25.9658               | 35.6                  | 39.0                | 3.4                               |
| 2 julio 17              | 23.5833               | 21.5833               | 19.625                 | 23.58333              | 27.9216               | 27.6666               | 20.4583               | 17                    | 19.75                 | 23.7916               | 18.1666               | 19.0416                | 14.2173                | 21                    | 27.4583                | 16.7826               | 54.1                  | 28.9                | -25.3                             |
| 10 enero<br>2018        | 54.1666               | 20.6666               | 33.8333                | 20.7916               | 35.91666              | 44.0833               | 39.0416               | 20.375                | 23.25                 | 26.3357               | 26.3357               | 26.416                 | 25.7619                | 16.7391               | 10.2916                | 26.3357               | 3.1                   | 69.0                | 65.9                              |
| 16<br>noviembre<br>2018 | 17.95                 | 2.0476                | 22.1428                | 2.1428                | 6.5                   | 3.2562                | 2.2380                | 15238                 | 1.6190                | 1.7142                | 3.2562                | 23.0952                | 25.9397                | 1.1                   | 3.1428                 | 2.3333                | -37.6                 | 26.4                | 64.0                              |
|                         |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        |                       |                        |                       | <b>̄x=24.2ppb</b>     | <b>̄x=34.4ppb</b>   | <b>̄x=10.47ppb</b>                |
|                         |                       |                       |                        |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                        |                        |                       |                        |                       |                       |                     | <b>s=±42.05ppb</b>                |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb)

## **ANEXO XXI. Estimación de las concentraciones O<sub>3</sub> de la estación rural de monitoreo atmosférico Ajusco Medio (AJM), con respecto a registros de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> de la RAMA y la REDMET**

Los resultados conseguidos en el análisis de la estación AJM señalan que las estaciones de monitoreo atmosférico y variables meteorológicas [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]UAX, HrMPA, TemINN, TemNEZ, DvAJU, DvPED, VvMPA VvBJU, cuya correlación es significativa ( $\alpha < 0.05$ ). Adicionalmente, el valor de R<sup>2</sup> es 0.9655 indicando que la variación de O<sub>3</sub> en AJM es explicada en un 96% por la variación de O<sub>3</sub> y variables meteorológicas en las estaciones mencionadas. Por su parte, el valor de la RMSE es 3.12 e indica baja dispersión entre las observaciones y valores estimados.

### *Modelo de estimación*

$$[O_3]_{AJM} = 0.2273 ([O_3]_{MPA}) + 0.7836 ([O_3]_{PED}) + 0.2302 ([NO_2]_{XAL}) + 0.0190 ([NO_2]_{UAX}) - 0.1359 (Hr_{SAG}) + (0.1179 (Hr_{MPA}) - 1.3063 (Tem_{INN}) + 2.1348 (Tem_{NEZ}) - 0.0247 (Dv_{AJU}) + 0.0171 (Dv_{PED}) + 0.6642 (Vv_{MPA}) - 5.9862 (Vv_{BJU}))$$

Con base en la salida generada por el programa estadístico SAS las estaciones de monitoreo atmosférico [O<sub>3</sub>]MPA, [O<sub>3</sub>]PED, [NO<sub>2</sub>]XAL, [NO<sub>2</sub>]UAX, HrMPA, TemNez, DvPED y VvMPA exhiben una relación directa con respecto a AJM.

En el caso de la relación de [O<sub>3</sub>]PED se explica por la proximidad entre estaciones PED y AJM donde es muy factible la existencia de concentraciones afines de O<sub>3</sub> y ante cualquier aumento de [O<sub>3</sub>]PED se genere un efecto similar sobre las concentraciones de O<sub>3</sub> en AJM.

En la relación registrada por la estación [O<sub>3</sub>]MPA se podría advertir también que ante un aumento de [O<sub>3</sub>]MPA se genera aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la estación AJM, lo anterior pese a existir una distancia considerable entre ambas estaciones. No obstante, esta correlación también puede estar justificada debido a la participación de variables meteorológicas como los vientos, los cuales pueden establecer dispersiones semejantes en toda la zona del valle, región donde se ubican

ambas estaciones en donde se ubican zonas rurales, sitios importantes para el desarrollo de cultivos y zonas de ganadería, afectadas por el depósito de O<sub>3</sub>.

Las estaciones [NO<sub>2</sub>] XAL y [NO<sub>2</sub>] UAX indican una correlación positiva altamente relacionada por la participación del NO<sub>2</sub> como precursor del O<sub>3</sub>. En este análisis en particular, la correlación indica que el mismo día de registro de ambos contaminantes en las diferentes estaciones de monitoreo se produce inicialmente un aumento de las concentraciones de NO<sub>2</sub> en XAL y UAX y, casi de manera similar se produce un aumento de O<sub>3</sub> en AJM, lo cual señalaría la descomposición de moléculas de NO<sub>2</sub> el mismo día de su registro para dar lugar al O<sub>3</sub>. Este comportamiento resulta ser habitual debido al papel del NO<sub>2</sub> como precursor del O<sub>3</sub>, el cual también este sujeto al efecto de variables meteorológicas las cuales intervienen en la formación de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> tal como lo reportado por Rivera (2011).

Por su parte, las variables meteorológicas HrMPA, TemNEZ, DvPED y VvMPA también mostraron una relación positiva. Es decir que, ante el aumento de cualquiera de estas variables, se produce un crecimiento de O<sub>3</sub> de manera simultánea. La relación de TemNEZ es sin duda reflejo de la influencia que tiene en gran medida la temperatura sobre la formación de O<sub>3</sub> en la atmosfera comportamiento reportado por López, et al. (2008). Otra posibilidad es la existencia de un aumento en la temperatura en todo el Valle de México, el cual genera presencia de O<sub>3</sub> en AJM.

La correlación de las estaciones DvPED y VvMPA está estrechamente relacionada a la dispersión y dilución de contaminantes generada por los mismos vientos. Esta correlación denota que a mayor presencia de vientos en PED y MPA, se produce un aumento de O<sub>3</sub> en AJM. Esta conducta podría ser aplicable en VvMPA por la distancia entre estaciones. Mientras que en DvPED cercana a la estación AJM señalaría que los vientos presentes en DvPED no se dirigen hacia donde se ubica la estación AJM.

En cuanto a HrMPA su correlación exhibe la posibilidad de un aumento de nubosidad o presencia de precipitación en HrMPA, al mismo tiempo que se genera aumento de [O<sub>3</sub>]AJM, condición que se explicarían por la presencia de condiciones favorables para la formación de O<sub>3</sub>, es decir, bajos porcentaje de humedad, altas temperaturas y alto índice de radiación solar.

De manera opuesta las estaciones HrSAG, TemINN, DvAJU y VvBJU indican una relación inversa con respecto a las concentraciones de O<sub>3</sub> registradas en AJM. Todas estas variables meteorológicas indican que, ante la disminución en sus concentraciones, se genera un efecto de acumulación de O<sub>3</sub> en AJM.

En primer lugar, la correlación de HrSAG puede indicar menor porcentaje de humedad en la zona norte del valle por presencia de baja nubosidad y menor porcentaje de precipitación, mientras que en AJM se puede presentar un aumento de temperatura, fuertes vientos y altos índice de radiación solar señalado por Fernández et al. (2011).

Por su cuenta, la correlación negativa de la temperatura en la estación INN señalaría que en ese punto del valle existen momentos de alta nubosidad reduciendo la temperatura en esa región, mientras que en AJM probablemente se presente poca condensación de nubes facilitando la formación de O<sub>3</sub>, este suceso podría estar estrechamente al factor de altitud y orográfica de cada uno de las estaciones mencionadas.

Mientras que la correlación inversa de DvAJU señala que los vientos que se presentan en la esa misma estación, no se dirigen con gran afluencia hacia donde se ubica la estación AJM, generando un aumento de O<sub>3</sub> en AJM. Finalmente, la correlación inversa que registró la estación VvBJU señala que ante la presencia de bajas velocidades de vientos en la estación BJU, se producirá un efecto de acumulación de O<sub>3</sub> en la estación AJM.

La validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>]CUT obtuvo una media de 11.91 ppb y una desviación de  $\pm 12.91$  ppb. esto demuestra una relativa dispersión de los valores estimados con respecto a los datos observados. por lo cual el modelo no es el más adecuado para la estimación de O<sub>3</sub> en la estación rural CUT.

Validación del modelo de estimación de [O<sub>3</sub>] de la estación rural AJM considerando concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas.

|                      | O <sub>3</sub><br>MPA | O <sub>3</sub><br>PED | NO <sub>2</sub><br>XAL | NO <sub>2</sub><br>UAX | Hr<br>SAG    | Hr<br>MPA | Tem<br>INN | Tem<br>NEZ | Dv<br>AJU | Dv<br>PED | Vv<br>MPA | Vv<br>BJU | O <sub>3</sub> Modelo | O <sub>3</sub> RAMA | Desviación<br>de la<br>estimación |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|--------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 18 febrero<br>2010   | 10.7821               | 5.9565                | 34.2083                | 30.7884                | 84.875       | 85.8033   | 9.7741     | 9.7741     | 189.6333  | 189.6333  | 1.3908    | 1.3908    | 13.4                  | 10.8                | -2.6                              |
| 19 marzo 2011        | 29.3422               | 35.4166               | 46                     | 30.7397                | 31.0416      | 23.5833   | 16.9962    | 16.9962    | 188.7673  | 168.7391  | 2.0526    | 2.0526    | 45.5                  | 29.3                | -29.3                             |
| 7 abril 2012         | 27.6694               | 30.4583               | 22.4166                | 19.0892                | 41.875       | 31.5327   | 18.0378    | 19.1541    | 180.8776  | 191.0416  | 2.2648    | 2.2648    | 37.8                  | 27.7                | -10.1                             |
| 10 mayo 2013         | 51.8660               | 63.4583               | 57.7916                | 36                     | 28.6666      | 23.9648   | 20.5399    | 22.5047    | 183.3436  | 157.0869  | 2.3363    | 2.3363    | 81.4                  | 51.9                | -29.5                             |
| 17 junio 2014        | 31.3                  | 34.8333               | 21.9545                | 23.1304                | 71.0768      | 71.0768   | 17.6575    | 17.55      | 185.7294  | 207.4166  | 1.8899    | 1.8899    | 41.9                  | 31.3                | -10.6                             |
| 7 agosto 2015        | 34.9640               | 38.875                | 30.6666                | 20.0833                | 5675         | 61.3245   | 18.3737    | 18.7       | 180.75    | 197.0833  | 2.1115    | 1.7739    | 51.0                  | 54.7                | 3.7                               |
| 6 octubre 2016       | 33.4583               | 24.7916               | 22.625                 | 20.1666                | 76.0833      | 87.25     | 12.4875    | 12.4575    | 122.7916  | 172.9166  | 2.625     | 1.825     | 33.7                  | 32.5                | -1.2                              |
| 2 julio 17           | 34.875                | 27.625                | 25.25                  | 22.5                   | 360.083<br>3 | 71.2833   | 16.8282    | 17.1041    | 214.5714  | 208.5416  | 1.6794    | 1.2916    | 42.2                  | 33.0                | -9.2                              |
| 10 enero 2018        | 58.8                  | 42.9583               | 56.625                 | 35.75                  | 22.375       | 27.0416   | 13.633     | 13.3333    | 149.1666  | 164.375   | 2.825     | 1.1083    | 66.3                  | 33.9                | -32.4                             |
| 16 noviembre<br>2018 | 38.9583               | 30.9166               | 35.625                 | 24.0833                | 57.0169      | 55.125    | 12.4707    | 11.9291    | 171.2916  | 161.25    | 3.25      | 1.2166    | 43.1                  | 22.1                | -21.0                             |
|                      |                       |                       |                        |                        |              |           |            |            |           |           |           |           | $\bar{x}=45.6$ ppb    | $\bar{x}=32.7$ ppb  | $\bar{x}=-12.91$ ppb              |
|                      |                       |                       |                        |                        |              |           |            |            |           |           |           |           |                       |                     | $s= \pm 11.91$<br>ppb             |

\*Concentraciones de O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> en partes por billón (ppb), Humedad relativa (%), Dirección de vientos (grados), Velocidad de vientos (m/s).

