

Valoración de pronósticos de contaminación del aire en Morelia, Michoacán

Armando Correa García
Dirección de Medio Ambiente. Secretaría
de Desarrollo Rural y Medio
Ambiente del Municipio de Morelia

Georgina Carbajal de la Torre
Ana Beatriz Martínez Valencia
Facultad de Ingeniería Mecánica.
Universidad Michoacana de San Nicolás
de Hidalgo

Enrique Rico Arzate
Escuela Superior de Ingeniería Química e
Industria Extractiva. ESIQIE.
Instituto Politécnico Nacional

Resumen

En este estudio, se cotejaron los pronósticos de los contaminantes del aire CO, NO₂, O₃, PM₁₀ y PM_{2.5} publicados en mayo del 2018, por la Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad (DMAS) adscrita a la Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura del Ayuntamiento de Morelia. Entre otros resultados, se reporta el descenso de la contaminación del aire por O₃ en la ciudad de Morelia. A pesar de esto, la concentración media anual de este contaminante se incrementó 11.1% en 2018 por cuarto año consecutivo; mientras que la expectativa para el año 2019, prevé otro aumento de O₃.

Debido a esta situación, las autoridades encargadas del medio ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán, podrían cambiar el programa de verificación vehicular en forma voluntaria, por uno de control obligatorio a partir del año 2019, bajo la hipótesis de que esta acción podría amortiguar el aumento actual de la contaminación por O₃. Pero este programa por sí solo, no reduciría la contaminación del aire en esta área urbana. En otro caso, conviene modernizar el transporte público urbano, para que la población deje su automóvil y utilice más el transporte urbano.

Palabras clave

Ozono, pronóstico, contaminación, transporte.

Abstract

In this study, the forecasts of air pollutants CO, NO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5} published in May 2018 by the Department of Environment and Sustainability of the City Council of Morelia are compared. Among other results, the decrease in air pollution by

O₃ is reported in the Morelia city. Despite this, the average annual concentration of this pollutant increased 11.1% in 2018 for the fourth consecutive year; while the expectation for 2019, predicts another increase in O₃.

Due to this situation, the authorities in charge of the environment of the Government of the State of Michoacán, could change the vehicle verification program on a voluntary basis, for one of mandatory control from the year 2019, under the hypothesis that this action could stop the current increase in O₃ contamination. But this program alone would not reduce air pollution in this urban area. In another case, it is convenient to modernize urban public transport, so that the population leaves their car and uses urban transport more.

Keywords

Ozone, forecast, pollution, transport.

Introducción

Las herramientas empleadas para predecir los cambios ambientales que pueden ocurrir en la atmósfera, debido a la presencia de contaminantes o bien, partículas en suspensión, es la formulación de modelos matemáticos, que consisten de supuestos y aproximaciones que reducen el problema físico real, a un problema idealizado de los procesos fisicoquímicos que se presentan en la atmósfera. Estos modelos se dividen en dos grupos; los que utilizan los principios fundamentales de la fisicoquímica, y los que se basan en la descripción estadística de los datos (Ruiz-Santoyo y Cruz-Núñez, 1991).

Los modelos de pronóstico que se basan en el principio de la fisicoquímica son más exigentes en requerimientos compu-

tacionales, debido a que estos contemplan tres aspectos del problema; simulación física y fotoquímica, así como la formación de aerosoles. Actualmente, se han desarrollado programas computacionales que permiten el tratamiento simultáneo de los aspectos ya mencionados. En los modelos de predicción a partir del análisis estadístico de los datos, se han utilizado los máximos diarios de ozono, usando series de tiempo, suponiendo que los errores siguen una distribución log normal o alguna de la familia de los valores extremos (Nakamura *et al.* 1993).

Aparte de esto, en la práctica no es común evaluar la eficiencia de los modelos de pronóstico. Por ejemplo, la comparación de los valores reportados por (Correa-García, 2002) con la información del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), de la ciudad de México, demostró que el modelo propuesto para explicar la formación de O_3 a partir de los cambios en las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2) fue aceptable (Tabla, 1). Otro trabajo similar, se basó en la dispersión de los contaminantes por el viento (Correa-García y Zavala-Hurtado 2002). Esta hipótesis de la propagación del ozono, fue comprobada de nueva cuenta por Rico *et al.*, (2002) quienes pronosticaron un incremento de O_3 para el año 2002; incluso, el aumento esperado del 50 % coincidió con la Contingencia Ambiental aplicada el 18 de septiembre del 2002 en la ZMVM.

En otro estudio Correa-García, (2016) reportó para la ciudad de Morelia un incremento del promedio anual de O_3 para el año 2016. Después, la Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad (DMAS, 2016) perteneciente a la Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura (SDMI) del Ayuntamiento de Morelia, ratificó el ascenso de O_3 en 17 % con respecto al 2015.

Enseguida la DMAS, (2016) con base en un modelo matemático tipo polinomio de orden n , advirtió que este contaminante seguiría aumentando por arriba de los 0.030ppm; evento, que fue confirmado en 2017 con otro incremento de O_3 en 8 % según informó la DMAS, (2018), debido a esta situación la actual Dirección de Medio Ambiente (DMA, 2019) ahora adscrita a la Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente (SEDRUMA) del Ayuntamiento de Morelia.

Presentó un nuevo pronóstico para el año 2019 de O_3 , con el fin de tener una guía sobre la persistencia o no al aumento de este contaminante, así como para los otros contaminantes NO_2 , CO , PM_{10} y $PM_{2.5}$ que son medidos en esta zona urbana. En este trabajo se analizan los valores de los diferentes contaminantes atmosféricos que se registraron a partir de abril del 2018 en la estación de monitoreo de Morelia, ubicada en la terraza de Palacio Municipal a una altura de 15 metros sobre el nivel del piso (Figura, 1). Lo anterior, tiene el propósito de evaluar la eficacia de las predicciones presentados por la (DMAS, 2018 y DMA, 2019).



Figura 1. Estación de monitoreo atmosférico de Morelia, Michoacán. Ubicada en la azotea de Palacio Municipal.

Tabla 1. Comparación entre los valores estimados y obtenidos, en partes por millón (ppm) por el SIMAT para ozono del año 2000, en cinco estaciones de monitoreo. Las cifras marcadas en tono gris, indican que el pronóstico se cumplió. Fuente (Correa-García, 2002).

	Sitios de Monitoreo	Valor de O ₃ medido por el SIMAT Año, 1999	Valor de O ₃ estimado Año, 2000	Porcentaje de incremento esperado Año, 2000	Valor de O ₃ medido por el SIMAT Año, 2000	Residuo	Porcentaje de incremento con respecto al Año, 1999
1	Tlalnepantla	0.108	0.119	10.50	0.098	0.021	9.25
2	Xalostoc	0.084	0.093	11.00	0.093	0.000	11.00
3	Merced	0.120	0.115	4.00	0.118	-0.003	1.66
4	Pedregal	0.146	0.145	0.50	0.140	0.005	4.10
5	Cerro Estrella	0.096	0.106	10.50	0.100	0.006	4.16

Metodología

Los datos de los contaminantes del aire monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas menores a 10 y 2.5 micras (PM_{10/2.5}) del año 2018, se obtuvieron del informe anual de monitoreo atmosférico del centro histórico de Morelia, reportado por la (DMA, 2019). Los promedios anuales y mensuales de los contaminantes obtenidos en el 2018, se cotejaron con los valores reportados por la (DMAS, 2018). Asimismo, se presenta para O₃ los dos modelos de correlación y regresión lineal propuestos por la (DMA, 2019) con la finalidad de calcular el valor futuro de este contaminante para el año 2019.

Resultados

La Tabla 2, presenta el promedio anual del año 2018 para los principales contaminantes del aire que son medidos en el centro de Morelia. Como se puede ver, el valor medio para O₃ y partículas suspendidas PM10 se aproximaron bien con las predicciones anunciadas por la (DMAS, 2018) de un aumento de 0.027ppm a 0.029ppm, y

el incremento de 29 micras a 30 micras respectivamente (Tabla, 2). En cambio, las estimaciones correspondientes al CO, NO₂ y PM_{2.5} fracasaron.

Para el promedio mensual del CO, los incrementos esperados en junio, julio y septiembre se cumplieron con respecto de los valores observados del mismo año; mientras que las predicciones de abril, mayo y agosto fracasaron. Para el último trimestre del año, no se reportaron datos (Tabla, 3). En el caso del NO₂ el descenso pronosticado del último trimestre, se acercó bien con las cifras obtenidas en dichos meses, en tanto que las estimaciones de los otros meses del año fallaron; nótese, que mayo no tiene dato. Por lo que este aspecto se disertara más adelante (Tabla, 4).

Para las PM_{2.5} el descenso estimado para abril y mayo se aproximó bien, con respecto de los valores observados en el 2018; en tanto que, las cifras observadas en agosto y septiembre se acercaron bien, con los valores estimados de dichos meses; en los otros meses del año, los pronósticos fracasaron (Tabla, 5).

Tabla 2. Estadística descriptiva de los contaminantes del aire medidos en el centro de la ciudad de Morelia. Año 2018. Las cifras marcadas en tono gris, indica que los pronósticos se cumplieron.

	NO ₂ ppm	CO ppm	O ₃ ppm	PM ₁₀ µg/ m ³	PM _{2.5} µg/ m ³
Núm. Datos	8,065	5,080	5,342	4,561	7,110
Promedio	0.012	0.312	0.030	37	19
Desv. Estándar	0.006	0.235	0.018	18	12
Varianza	0.000	0.055	0.000	330	145
Mediana	0.011	0.273	0.028	34	17
Valor Mínimo	0.002	0.001	0.001	9	1
Valor Máximo	0.054	1.960	0.102	191	141
Muestreo en %	92	58	61	52	81
Muestreo en días	336	212	223	191	296

Tabla 3. Comparación entre el valor medio estimado y observado del CO, a partir de abril 2018. Las cifras en tono gris, indica que el pronóstico se cumplió y S/D significa sin dato. Fuente Columna 1-5 (DMAS, 2018); Columna 6 (DMA, 2019).

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7
Mes del año	CO en ppm Observado Año 2017	CO en ppm Estimado Año 2018	Limite de -95% CL	confianza +95% CL	CO en ppm Observado Año 2018	Valor Residual
Abril	0.394	0.987	0.610	1.363	0.200	0.787
Mayo	0.407	1.208	0.686	1.731	0.363	0.845
Junio	0.315	0.916	0.612	1.220	0.321	0.595
Julio	0.286	0.496	0.254	0.738	0.427	0.069
Agosto	0.488	0.570	0.383	0.758	0.223	0.347
Septiembre	0.360	0.468	0.285	0.650	0.417	0.051
Octubre	0.193	0.530	0.370	0.690	S/D	
Noviembre	0.380	0.584	0.427	0.741	S/D	
Diciembre	0.520	0.627	0.439	0.815	S/D	

Tabla 4. Comparación entre el valor medio estimado y observado del NO₂, a partir de abril 2018. Las cifras en tono gris, indica que el pronóstico se cumplió. Fuente Columna 1-5 (DMAS, 2018); Columna 6 (DMA, 2019).

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7
Mes del año	NO ₂ en ppm Observado Año 2017	NO ₂ en ppm Estimado Año 2018	Limite de -95% CL	confianza +95% CL	NO ₂ en ppm Observado Año 2018	Valor residual
Abril	0.015	0.019	0.017	0.021	0.012	0.007
Mayo		0.022	0.019	0.025	0.012	0.010
Junio	0.012	0.014	0.014	0.015	0.008	0.006
Julio	0.012	0.014	0.014	0.015	0.010	0.004
Agosto	0.010	0.012	0.011	0.013	0.010	0.002
Septiembre	0.010	0.011	0.009	0.013	0.009	0.002
Octubre	0.010	0.013	0.011	0.014	0.011	0.002
Noviembre	0.020	0.016	0.015	0.017	0.013	0.003
Diciembre	0.022	0.019	0.017	0.021	0.014	0.005

Tabla 5. Comparación entre el valor medio estimado y observado de las PM_{2.5}, a partir de abril 2018. Las cifras en tono gris, indica que el pronóstico se cumplió y S/D significa sin dato. Fuente Columna 1-5 (DMAS, 2018); Columna 6 (DMA, 2019).

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7
Mes del año	PM _{2.5} µg/m ³ Observado Año 2017	PM _{2.5} µg/m ³ Estimado Año 2018	Limite de -95% CL	confianza +95% CL	PM _{2.5} µg/m ³ Observado Año 2018	Valor residual
Abril	28	21	19	24	27	-6
Mayo	34	25	21	28	25	0
Junio	18	20	18	22	13	7
Julio	18	15	12	17	19	-4
Agosto	13	16	14	18	14	2
Septiembre	11	15	13	16	13	2
Octubre	14	17	14	21	12	5
Noviembre	22	22	19	24	14	8
Diciembre	28	26	22	30	S/D	

El descenso esperado para O_3 de abril a junio del 2018 se cumplió, en comparación con los valores observados del mismo año. Igualmente, el valor medio observado en agosto y septiembre se acercó bien con respecto al aumento predicho en estos meses, mientras que en el último trimestre del año no se obtuvieron datos (Tabla, 6).

De esta forma, en 2018 el O_3 se incrementó 11.1% en comparación con el año 2017; teniendo en consecuencia, un aumento persistente por cuarto consecutivo. Este último resultado, según la información recibida por Molina, (2019) explicaría por qué las autoridades encargadas de la protección al medio ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán, podrían cambiar a partir del 2019 el programa de verificación vehicular en forma voluntaria, por uno de control obligatorio; sin embargo Soto-Coloballes, (2017) señala que el manejo de la contaminación del aire en México, permanece en un discurso reduccionista donde el parque vehicular sigue siendo el principal responsable de las emisiones contaminantes.

A pesar de esto, la concentración de O_3 cambia debido al efecto combinado del paso del tiempo y el descenso del NO_2 con coeficiente de asociación aceptable $R=0.99$ $p<0.00246$ y error estimado en 0.001ppm; este modelo sugiere que para el año 2019 el ozono podría alcanzar un promedio de 0.032ppm con intervalo de confianza en 95% entre 0.031ppm y 0.033ppm (Figura, 2); la variable tiempo fue significativo, mientras que la relación del NO_2 con O_3 fue negativa, y no significativa, lo cual podría indicar que la producción de O_3 en el centro histórico de Morelia, podría estar asociado a otras especies químicas, entre las cuales se podría mencionar a los compuestos orgánicos no tóxicos, o también a la calidad de los combustibles como la gasolina y diésel, empleados por el transporte

público y privado, que transita en los alrededores de la caseta de monitoreo, así como las emisiones de fuentes fijas de hoteles, baños públicos, restaurantes, etc.

El segundo modelo, ahora supone que el O_3 a nivel mensual, depende inversamente y significativamente del NO_2 y positivamente de las $PM_{2.5}$ con factor de correlación $R = 0.69$ $p<0.00003$ y error estimado de 0.004; este modelo, indica que este contaminante aumentará con porcentajes mínimos, en la mayoría de los meses del año 2019 (Figura, 3; Tabla, 7). Nótese, que en la Tabla, 7 se incorporaron los datos del último trimestre del 2017, debido a la falta de información en el 2018 (Véase Tabla, 6).

Discusión

De un total de 41 predicciones, presentadas en este estudio 17 se cumplieron y 17 fracasaron, mientras que 7 no se confirmaron por falta de datos, debido a problemas con los equipos de medición, que mantuvieron fuera de servicio a los analizadores de CO , O_3 , PM_{10} y $PM_{2.5}$ por varios meses.

A pesar de esto, las predicciones de 41.5% de aciertos y fallas respectivamente 83% y 17% que correspondió a la falta de información (Tabla, 3, 5-6), puede atribuirse a que este tipo de pronósticos tienen un alto grado de incertidumbre, máxime cuando los equipos de monitoreo se descomponen en algún momento del tiempo predicho, o bien a la influencia de los procesos de mantenimiento y calibración realizados en la caseta de monitoreo. Con base en esta última descripción, las predicciones del 2018 y 2019 no estuvieron exentas de fallar, pero el acierto en varias de estas estimaciones, demostró que el valor medio anual de O_3 persiste al incremento desde el año 2015 al 2018.

Tabla 6. Comparación entre el valor medio estimado y observado del O₃, a partir de abril 2018. Las cifras en tono gris, indica que el pronóstico se cumplió y S/D significa sin dato. Fuente Columna 1-5 (DMAS, 2018); Columna 6 (DMA, 2019).

Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4	Columna 5	Columna 6	Columna 7
Mes del año	O ₃ en ppm Observado Año 2017	O ₃ en ppm Estimado Año 2018	Limite de -95% CL	confianza +95% CL	O ₃ en ppm Observado Año 2018	Valor residual
Abril	0.039	0.033	0.025	0.040	0.034	-0.001
Mayo	0.043	0.037	0.029	0.044	0.038	-0.001
Junio	0.035	0.022	0.017	0.027	0.029	-0.007
Julio	0.025	0.019	0.011	0.027	0.030	-0.011
Agosto	0.026	0.031	0.026	0.036	0.028	0.003
Septiembre	0.021	0.031	0.024	0.038	0.044	-0.013
Octubre	0.023	0.029	0.026	0.033	S/D	
Noviembre	0.023	0.026	0.023	0.029	S/D	
Diciembre	0.023	0.027	0.024	0.031	S/D	

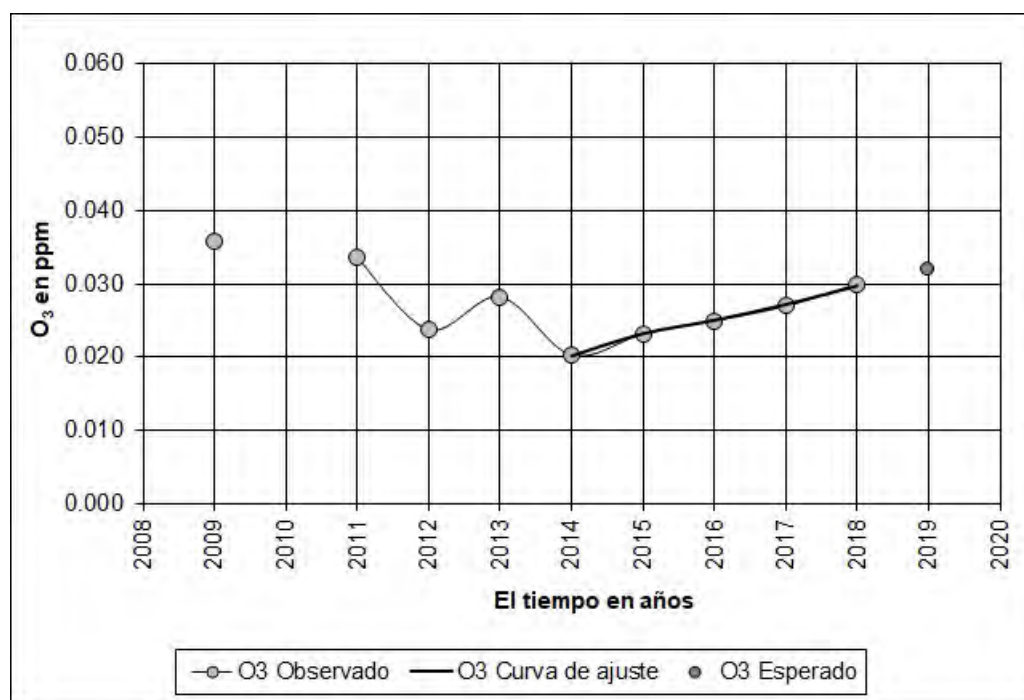


Figura 2. Modelo de regresión lineal que explica los cambios de O₃ por año, en el centro de la ciudad de Morelia. Periodo 2009-2018.

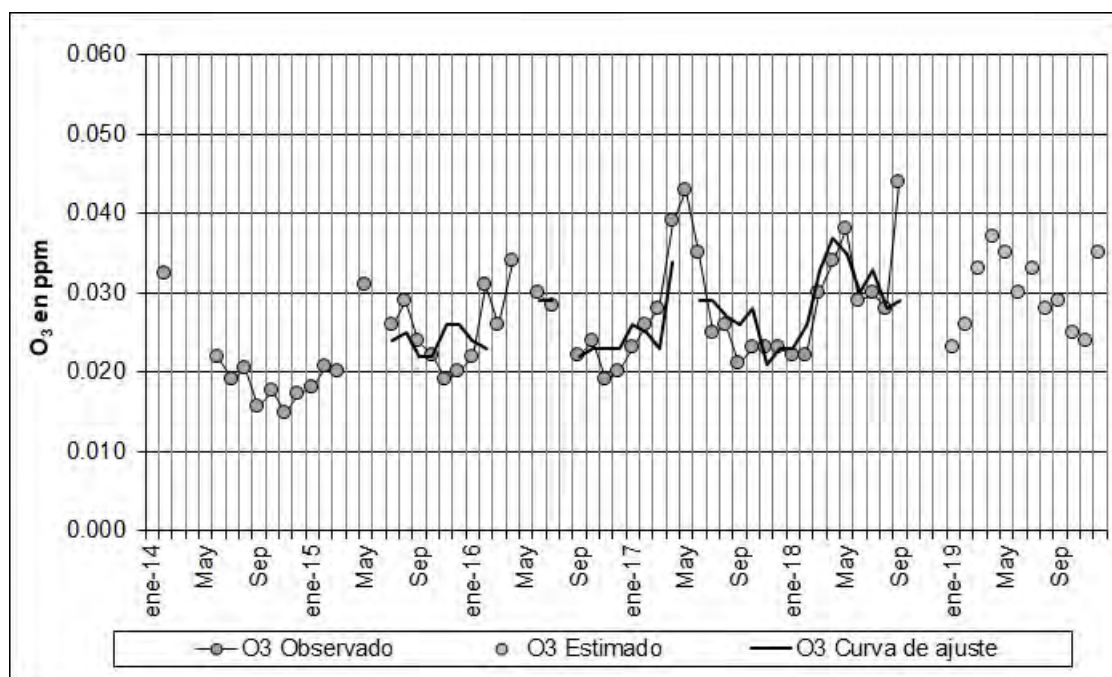


Figura 3. Modelo de regresión lineal que explica los cambios de O₃ por mes del año, en el centro de la ciudad de Morelia. Periodo 2014-2018.

Tabla 7. Valor medio de O₃ observado y estimado para el año 2019 en el centro de la ciudad de Morelia. Los datos en tono gris indican, que el valor corresponde al 2017.

Mes del año	O ₃ ppm	O ₃ ppm	Limite de	confianza
	Observado Año 2018	Estimado Año 2019		
Enero	0.022	0.023	0.020	0.026
Febrero	0.022	0.026	0.024	0.028
Marzo	0.030	0.033	0.030	0.036
Abril	0.034	0.037	0.033	0.042
Mayo	0.038	0.035	0.032	0.039
Junio	0.029	0.030	0.027	0.034
Julio	0.030	0.033	0.030	0.036
Agosto	0.028	0.028	0.026	0.031
Septiembre	0.044	0.029	0.026	0.032
Octubre	0.023	0.025	0.022	0.028
Noviembre	0.023	0.024	0.022	0.026
Diciembre	0.023	0.035	0.031	0.039

Por otra parte en la Tabla 4, no aparece el valor observado de NO_2 para mayo del 2017, debido a que no hay dato en esa fecha; sin embargo se puede tomar el valor más cercano de 0.013ppm que corresponde a mayo del 2015, el cual no tiene mayor influencia en el resultado (Tabla, 4). Por último, los valores residuales (diferencia entre valor estimado y el observado) en la mayoría de las predicciones acertadas quedaron dentro del límite de confianza del 95 % señaladas en las Tablas, 3-6.

Conclusiones

En el 2018 el O_3 se incrementó 11.1 % en la ciudad de Morelia, en comparación con el valor registrado en el 2017, y constituye el cuarto año consecutivo con tendencia al aumento. La expectativa de este contaminante, para el año 2019 podría seguir en aumento. Se recomienda actualizar el entorno físico de la caseta de monitoreo, en un radio de 500metros con el propósito de identificar nuevas fuentes fijas de emisión de contaminantes.

Del 100 % de las predicciones del año 2018, para los diferentes contaminantes del aire, en el centro de la ciudad de Morelia se cumplieron en 41.5 %, otro 41.5 % fracasó y el 17 % de estos pronósticos no se evaluaron por falta de información. Se recomienda, continuar con estos ensayos a corto plazo y ampliarlo a las variables meteorológicas que se miden en la caseta de monitoreo.

La aplicación en el futuro inmediato del programa de verificación vehicular obligatoria en la ciudad de Morelia, no asegura que la contaminación atmosférica disminuya. En otro caso, se recomienda invertir en el transporte público urbano, de tal manera que la sociedad deje sus vehícu-

los y utilice más el transporte público. Dado que los servicios de transporte que prestan las diferentes rutas de combis en Morelia es insuficiente.

Referencias

Correa-García, A. (2016) "Tendencia de O_3 en la ciudad de Morelia". Modalidad Ponencia. Sexto Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático. Realizado el 17-21 de octubre del 2016, en Colima, Col. México.

Consultado en <https://eventos.ucol.mx/digedpa/cnicc2016/>.

Correa-García, A. y Zavala-Hurtado A. (2002) Contaminantes precursores del ozono en la Ciudad de México Ciencia y Desarrollo (México) 28(166) pp. 48-55.

Correa-García, A. (2002) Contaminación por ozono en la Ciudad de México Ciencia y Desarrollo (México) 28(163) pp. 4-13.

Dirección de Medio Ambiente DMA (2019) Informe anual de monitoreo atmosférico del centro histórico de Morelia: Año 2018. Secretaría de Desarrollo Rural y Medio Ambiente. Ayuntamiento de Morelia. 03 de junio del 2019. Recuperado el 09 de marzo 2020 en <http://bios.biologia.umich.mx/>

Dirección de Medio Ambiente y Sustentabilidad DMAS (2018) Informe anual de monitoreo atmosférico en el centro histórico de Morelia Michoacán: Año 2017. Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura. Ayuntamiento de Morelia. 18 de mayo del 2018. Recuperado el 09 de marzo 2020 en <http://bios.biologia.umich.mx/>

Dirección de Medio Ambiente y Sus-

tentabilidad DMAS (2016) Informe anual de monitoreo del aire en Morelia Michoacán: Año 2016. Secretaría de Desarrollo Metropolitano e Infraestructura. Ayuntamiento de Morelia. Recuperado el 09 de marzo 2020 en <http://bios.biologia.umich.mx/>
Molina., A. (2019) Verificación vehicular es ya obligatoria en Michoacán. La Voz de Michoacán. Publicado el 05 de enero del 2019.

Nakamura, M., Pérez-Abreu, R. y Pérez-Abreu, V. (1993) Un modelo estadístico para excedentes de episodios altos de ozono en la Ciudad de México. Ciencia. México. Núm. 44, pp. 397-407.

Soto-Colobaltes., N., V. (2017) El control de la contaminación atmosférica en México (1970-1980): tensiones y coincidencias entre el sector salud y los industriales. Dynamis 2017; 37 (1): 187-209.

Rico, A. E., Correa-García, A y Coronado-Maldonado, M. (2002) Contaminación Atmosférica por ozono en la zona metropolitana del Valle de México. Contaminación Atmosférica IV Simposio. Universidad Autónoma Metropolitana Noviembre 5-7 del 2002. Celebrado en El Colegio Nacional, México, DF, México. Publicado en el cuaderno de resúmenes.

Ruiz-Santoyo, E. y Cruz-Núñez, X. (1991) Modelos fotoquímicos de contaminantes atmosféricos urbanos. Ciencia. México núm. 42, pp. 99-109.