Programa Hoy no circula: réplica al artículo "Análisis del programa *Hoy no circula*"*

Víctor Hugo Páramo Figueroa, Armando Retama Hernández, Cristina Ortuño Mojica y Mónica del Carmen Jaimes Palomera

Para atender los comentarios a este Programa nos plantearemos la siguiente pregunta: ¿Hay un impacto positivo en la calidad del aire de la Ciudad de México los días sábados, desde que entró en vigor el programa "Hoy no circula" sabatino?

Para responderla, nos enfocaremos a analizar qué pasaba dos años antes (1º de julio de 2006 a 30 de junio de 2008) y qué ha sucedido durante la vigencia del "Hoy no circula" sabatino (1º de julio de 2008 a 31 de enero de 2010) en términos de la calidad del aire.

El pasado 1º de julio de 2008 entró en vigor en la Ciudad de México y en los municipios conurbados del Estado de México la medida de restringir la circulación en días sábados a los vehículos con holograma 2 (GODF, 2008), con la finalidad de mejorar la calidad del aire, debido a que años atrás se registraron eventos de precontingencia ambiental atmosférica los sábados, aun cuando en los últimos años se presenta un incremento gradual de días con buena calidad del aire por ozono en la Ciudad de México (Figura 1).

Por otro lado, en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) el comportamiento del ozono no es homogéneo (Mapa 1), debido a la fisiografía de la cuenca, a los patrones del viento y a las fuentes de emisión de los precursores del ozono; a partir de la región menos contaminada, el noreste (estaciones

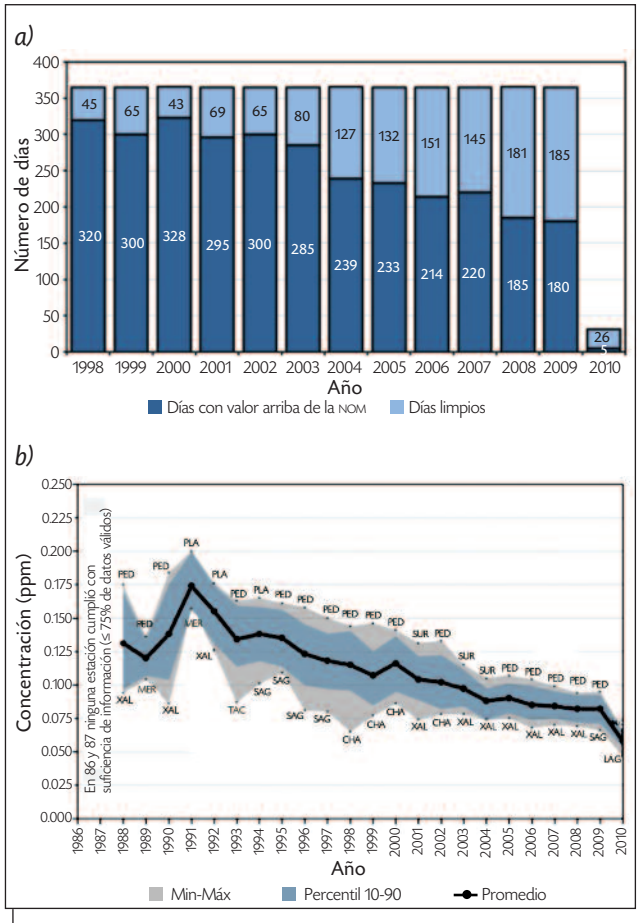
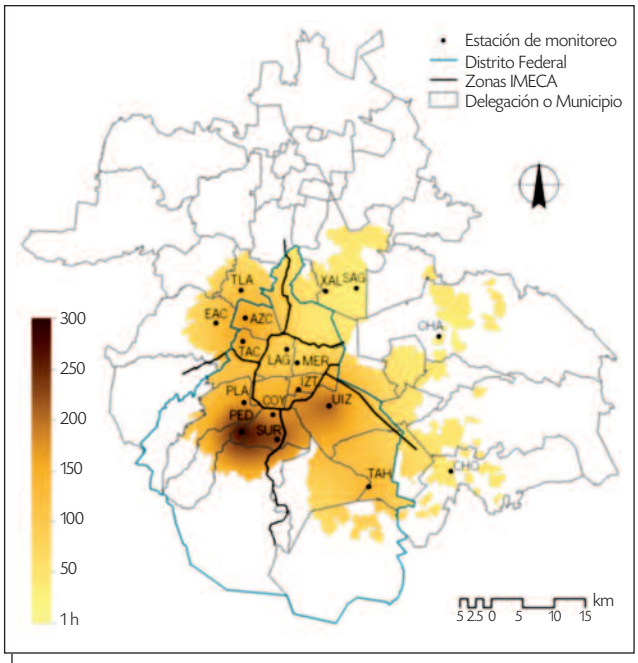


Figura 1. Comportamiento histórico de la calidad del aire por ozono en la Ciudad de México. *a)* Número de días limpios y días que no cumplen la NOM; *b)* Tendencia del ozono de 1990 a enero 2010.

* Réplica al artículo "Análisis del programa 'Hoy no circula'", de Héctor G. Riveros Rotgé, publicado en *Ciencia*, vol. 60-1, enero-marzo de 2009, pp. 76-83.



Mapa 1. Número de horas por arriba de 0.110 partes por millón (ppm, NOM de ozono) en la Zona Metropolitana del Valle de México durante 2009.

como Xalostoc, San Agustín y Chapingo), se tiene una relación de hasta tres veces más horas con contaminación en la región más contaminada, el suroeste (estaciones como Coyoacán, Plateros y Pedregal).

Es por esto que como *primera diferencia* con el estudio de Héctor G. Riveros Rotgé (Riveros, 2009), en lugar de estudiar únicamente cinco estaciones de monitoreo, en nuestro análisis empleamos las 22 estaciones de monitoreo que registran ozono en el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

Como *segunda diferencia*, en el estudio de Riveros Rotgé, se analizó un mes después de la aplicación del "Hoy no circula" sabatino y un mes antes (del 2 de junio al 30 de julio de 2008). Sin embargo, estos meses pertenecen a la época de lluvias y no consideran a los meses con niveles más críticos de ozono, de marzo a mayo, cuando hay mayor radiación solar; es por eso que en nuestro análisis consideramos años completos de julio a junio, para captar los cambios climáticos anuales.

De esta forma, los años a evaluar son julio 2006 a junio 2007, julio 2007 a junio 2008, julio 2008 a junio 2009 (año inicial del "Hoy no circula" sabatino) y julio 2009 a enero 2010 (este último aún no representa el año completo, pues como ya se comentó falta la época de mayor concentración de ozono; sin embargo, se utiliza para cubrir un periodo mayor de información). En cada año se analizaron las concentraciones horarias máximas de ozono para los días sábados. La siguiente tabla resume la información:

Tabla 1. Resumen estadístico anual de días sábados (antes y durante el "Hoy no circula" sabatino)

	julio 2006-junio 2007	*julio 2007-junio 2008*	*julio 2008-junio 2009*	*julio 2009-enero 2010*
Datos válidos	53	52	52	31
Media (ppm)	0.119	0.123	0.111	0.093
Mediana (ppm)	0.125	0.123	0.117	0.097
Desviación estándar	0.039	0.033	0.031	0.038
Sesgo (ppm)	-0.300	-0.456	0.036	0.035
Error estándar de la media	0.005	0.005	0.004	0.007
Error estándar del sesgo	0.327	0.330	0.330	0.421
Mínimo (ppm)	0.037	0.039	0.036	0.024
P10 (ppm)	0.056	0.069	0.073	0.040
P20 (ppm)	0.081	0.103	0.081	0.054
P30 (ppm)	0.104	0.112	0.098	0.069
P40 (ppm)	0.119	0.120	0.105	0.078
P50 (ppm)	0.125	0.123	0.117	0.097
P60 (ppm)	0.131	0.133	0.121	0.111
P70 (ppm)	0.137	0.139	0.126	0.115
P80 (ppm)	0.150	0.149	0.134	0.128
P90 (ppm)	0.157	0.168	0.144	0.136
Máximo (ppm)	0.203	0.189	0.196	0.169

Con esta información, se aprecia que los valores máximos más elevados se registraron en 2006-2007 y 2008-2009, pero las concentraciones más altas predominaron en los años 2006-2007 y 2007-2008, a partir del percentil 50 (Tabla 1).

De igual manera se observó un incremento del 13 por ciento en el porcentaje de días que cumplen con la Norma Oficial Mexicana de Protección a la Salud (NOM-021-SSA1-1993) entre 2007-2008 y 2008-2009; este aumento se dio principalmente en concentraciones entre 75 y 110 partes por billón (ppb) (Figuras 2a y 2b).

Sin embargo, una exploración de los datos no es suficiente para concluir si el "Hoy no circula" sabati-

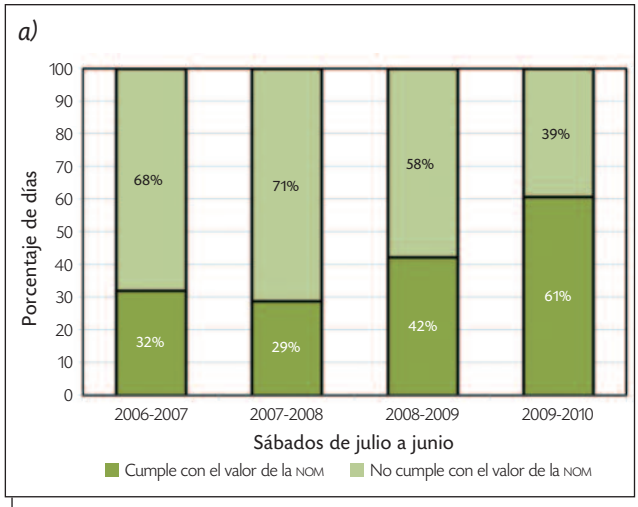


Figura 2a. Porcentaje de días que cumplen o no cumplen con la NOM de ozono.

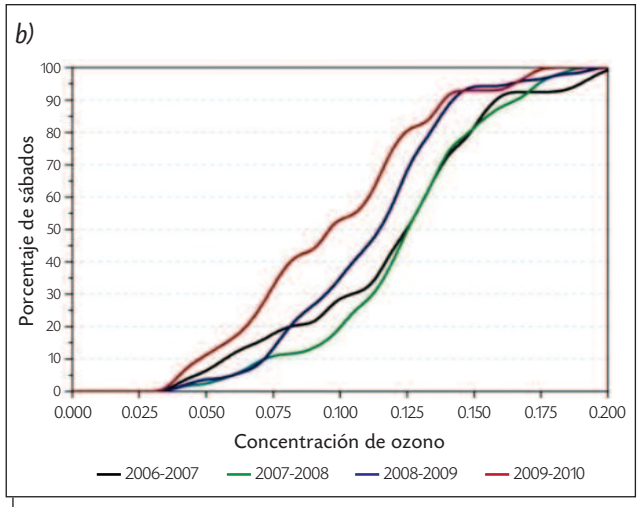


Figura 2b. Distribución acumulada de la concentración de ozono en días sábados.

no ha sido exitoso: se requiere de algún sustento que la respalde con evidencias científicas.

En el estudio de Riveros Rotgé se plantea que no hay una reducción significativa en el ozono sabatino, pero no se expone un método para determinar la significancia de esta aseveración. Por lo cual, como *tercera diferencia*, en nuestro análisis empleamos técnicas estadísticas para determinar la significancia de la reducción o no del ozono.

Se emplearon pruebas de hipótesis no paramétricas para la comparación de los años, debido a la dependencia que presentan los días a lo largo del año y la distribución asimétrica de las concentraciones del ozono (de manera tradicional se emplean pruebas paramétricas como la *t* de Student o la *F* de Fisher cuando los datos son independientes y presentan simetría).

Se planteó como hipótesis que en promedio las concentraciones máximas de los sábados no han cambiado en los últimos cuatro años; es decir, que los cuatro años provienen de la misma población. Esta hipótesis apoya el supuesto de que el programa "Hoy no circula" sabatino no ha tenido ningún beneficio para la calidad del aire por ozono.

La evaluación se realizó por medio de la prueba de Friedman (Daniel, 1990; Siegel 1970). Esta prueba es análoga a la prueba paramétrica de análisis de varianza *F*. Se utilizó el programa estadístico *SPSS*® 13.0 para *Windows*, versión 13.0 (septiembre 2004). Los resultados que arrojó fueron: Con nivel de confianza del 94.6 por ciento (valor p = 0.054) se rechazó la hipótesis de igualdad entre los años 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009.

Tabla 2. Prueba de Friedman (2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009), salida de SPSS

Estadísticas de Prueba[a]	
N	52
Chi-cuadrada	5.826
Df	2
Asymp. Sig.	0.054

[a] *Prueba de Friedman*

De igual manera se compararon los cuatro años (2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010); sin embargo, esta comparación se restringió a los meses de julio a enero, para hacerlos comparables. Los resultados fueron:

Tabla 3. Prueba de Friedman (2006-2007, 2007-2008, 2008-2009 y 2009-2010), salida de SPSS

Estadísticas de Prueba[a]	
N	31
Chi-cuadrada	7.194
Df	3
Asymp. Sig.	0.066

[a] *Prueba de Friedman*

En este caso se observa que no es contundente el rechazo de la hipótesis (valor p = 0.066); sin embargo, con una confianza del 90 por ciento se rechaza la hipótesis, por lo cual es recomendable esperar a que transcurra el año y, al término de junio, reevaluar nuevamente esta parte.

Aún cuando la prueba de Friedman confirmó que estadísticamente hay diferencias entre los tres años, es necesaria otra prueba estadística que permita hacer comparaciones entre pares de años para determinar cuál o cuáles son los años diferentes. Debido a que se compararon más de dos años, fue necesario emplear la prueba de comparaciones múltiples de Friedman (Daniel, 1990).

Esta prueba no está programada en el *software* estadístico, por lo cual se realizaron los cálculos en el *software Excel*® con las fórmulas que describe Daniel (p. 274). Con un valor p = 0.03 los resultados dejaron ver que los años 2006-2007 y 2007-2008 no presentan diferencias significativas (provienen de la misma población), pero los años 2007-2008 y 2008-2009 sí presentan diferencias significativas; es decir, la influencia del "Hoy no circula" sabatino sí determina una diferencia entre estos años.

Tabla 4. Comparaciones múltiples con Friedman (2006-2007, 2007-2008, 2008-2009)

	2007-2008 *vs* 2006-2007	2008-2009 *vs* 2006-2007	2008-2009 *vs* 2007-2008
Z	7.5	16.5	24
N=52			
α = 0.03			
k=3			

Prueba de Friedman de Comparación Múltiple

Rechazo Ho. Si

$$Z \geq z\sqrt{\frac{Nk(k+1)}{6}}$$

con z el cuantil

$$\frac{\alpha}{k(k-1)}$$

de una normal.

Para confirmar los resultados de esta prueba, se empleó la prueba de Wilcoxon (Conover, 1980) únicamente en los años 2007-2008 y 2008-2009. La hipótesis que se evaluó fue que no hay diferencias significativas entre el antes y después de la aplicación del "Hoy no circula" sabatino; esta prueba es análoga a la prueba paramétrica de comparación de medias *t* de Student. Se utilizó el *software* estadístico SPSS®. Los resultados fueron:

Tabla 5. Prueba de Wilcoxon para dos muestras apareadas (2007-2008 y 2008-2009)

	2008-2009 *vs* 2007-2008
Z	−2.128[a]
Asymp. Sig. (doble cola)	0.033

[a] *Basado en rangos positivos. (Y – X > 0, donde X es el año anterior a Y)*

[b] *Prueba de Rangos de Wilcoxon*

Lo que significa que para los años 2007-2008 y 2008-2009, sí hay diferencias estadísticamente significativas (con valor p < 5 por ciento). Una vez corroborada la diferencia entre ambos años, es importante conocer la magnitud del cambio entre ellos. Para esto se calculó el intervalo de confianza para la mediana de las diferencias entre los años 2007-2008 y 2008-2009, el cual se obtuvo como lo define Daniel (1990, p. 158-160). Estadísticamente (α = 0.05) se tiene un decremento entre 3 y 23 partes por billón en la mediana de las diferencias de los máximos de ozono.

Tabla 6. Intervalo de confianza para la mediana

Límite inferior	*Mediana*	*Límite superior*
−0.0235	−0.0125	−0.003

Como se comentó al inicio no hay homogeneidad en el comportamiento del ozono en la Zona Metropolitana del Valle de México, por lo cual se realizó un análisis para cada estación de monitoreo, el cual dejó ver que no todas las estaciones han reflejado el mismo impacto. Estadísticamente (prueba de Wilcoxon) hay una diferencia significativa en las estaciones ENEP Acatlán, San Agustín, Pedregal, Plateros, Cuajimalpa, Tlalpan, Coyoacán, Acolman, Tacuba y Merced (las dos últimas con una probabilidad de 90 por cien-

to y el resto con 95 por ciento). Esto implica que sólo en estas estaciones la mediana de las concentraciones es menor en 2008-2009 que en 2007-2008 (Tabla 7).

Para reforzar la razón de que no se vea la diferencia significativa en todas las estaciones, se graficó la proporción de días que cumplen la Norma Oficial Mexicana en cada año por estación (Figura 3). En la

Tabla 7. Prueba de Wilcoxon por estación de monitoreo (2007-2008 y 2008-2009)

	LAG0809 – *LAG0708*	*TAC0809* – *TAC0708*	*EAC0809* – *EAC0708*	*SAG0809* – *SAG0708*	*AZC0809* – *AZC0708*	*TLA0809* – *TLA0708*
Z	–0.825[a]	–1.746[a]	–2.709[a]	–2.900[a]	–0.005[a]	–0.880[a]
Asymp. Sig. (doble cola)	0.409	**0.081**	**0.007**	**0.004**	0.996	0.379
	XAL0809 – *XAL0708*	*MER0809* – *MER0708*	*PED0809* – *PED0708*	*CES0809* – *CES0708*	*PLA0809* – *PLA0708*	*UIZ0809* – *UIZ0708*
Z	–0.797[a]	–1.931[a]	–1.997[a]	–1.491[a]	–2.240[a]	–1.413[a]
Asymp. Sig. (doble cola)	0.425	**0.053**	**0.046**	0.136	**0.025**	0.158
	TAX0809 – *TAX0708*	*CUA0809* – *CUA0708*	*TPN0809* – *TPN0708*	*CHA0809* – *CHA0708*	*TAH0809* – *TAH0708*	*SUR0809* – *SUR0708*
Z	–1.336[a]	–2.057[a]	–3.014[a]	–0.920[a]	–1.477[a]	–1.298[a]
Asymp. Sig. (doble cola)	0.182	**0.040**	**0.003**	0.357	0.140	0.194
	COY0809 – *COY0708*	*ACO0809* – *ACO0708*	*IZT0809* – *IZT0708*	*CHO0809* – *CHO0708*		
Z	–2.792[a]	–2.107[a]	–0.739[a]	–0.090[b]		
Asymp. Sig. (doble cola)	**0.005**	**0.035**	0.460	0.928		

[a] *Basado en rangos positivos. (Y – X > 0, donde X es el año anterior a Y)*

[b] *Basado en rangos negativos. (Y – X < 0, donde X es el año anterior a Y)*

[c] *Prueba de Rangos de Wilcoxon*

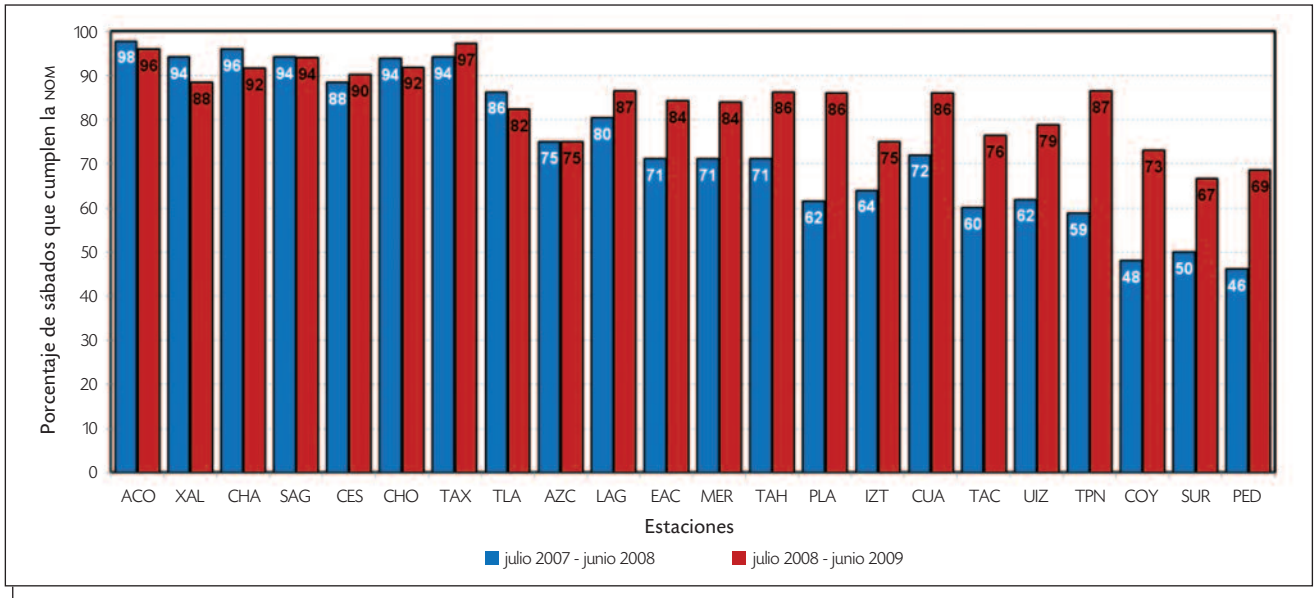
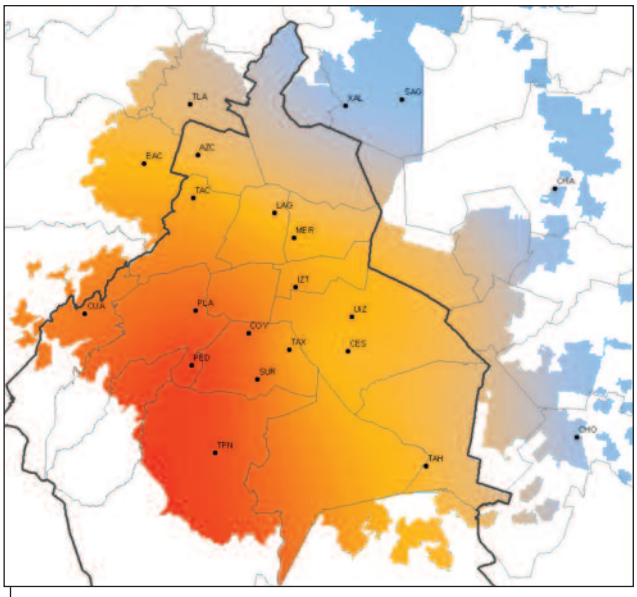


Figura 3. Porcentaje de sábados que cumplen con la NOM de ozono por estación de monitoreo.

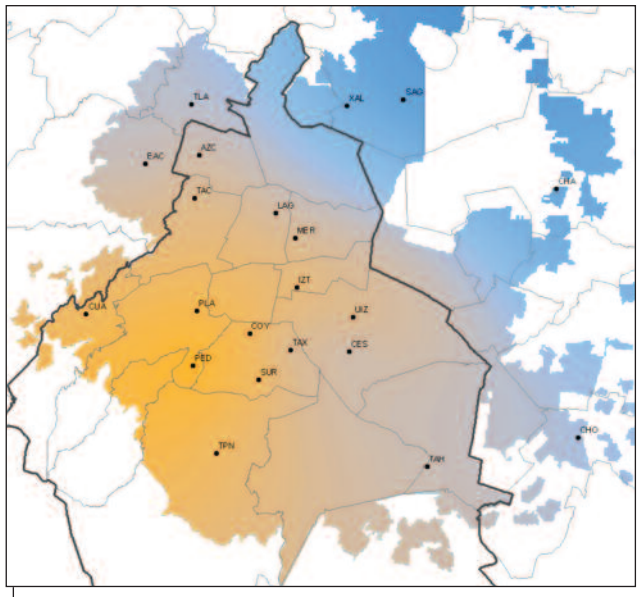
gráfica se observa que las estaciones que no presentan cambios significativos anualmente registran más del 75 por ciento de días con buena calidad del aire, lo que podría explicar por qué no hay diferencias significativas en el promedio anual.

Los mapas 2a y 2b reflejan el comportamiento promedio del ozono en los años 2007-2008 y 2008-2009. Como se aprecia, las concentraciones más altas se registraron en 2007-2008 en la región poniente de la Zona Metropolitana del Valle de México:

Como conclusión se tiene que para la Zona Metropolitana del Valle de México si hay diferencias significativas entre los sábados antes de aplicar el "Hoy no circula" sabatino. A un año de su aplicación, la disminución que se registró está en promedio entre 3 y 23 partes por billón, con un nivel de confianza del 95 por ciento.



Mapa 2a. Promedio de ozono en sábados, 2007-2008.



Mapa 2b. Promedio de ozono en sábados, 2008-2009.

Las estaciones ENEP Acatlán, San Agustín, Pedregal, Plateros, Cuajimalpa, Tlalpan, Coyoacán, Acolman, Tacuba y Merced presentan diferencias estadísticamente significativas entre los años 2007-2008 y 2008-2009, mientras que las demás estaciones no muestran diferencias significativas.

La región poniente registra las concentraciones más altas de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Víctor Hugo Páramo Figueroa es doctor en química industrial por la Universidad de Pau, Francia. Se ha desempeñado en el sector público desde el año 1987, primero en el Instituto Nacional de Ecología, de 1987 a 2000, y desde diciembre de 2000 funge como director general de Gestión de la Calidad del Aire del Gobierno del Distrito Federal. Sus áreas de responsabilidad incluyen la operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México y el Programa de Verificación Vehicular, entre otros.
vparamo@sma.df.gob.mx

Armando Retama Hernández es químico y director de monitoreo atmosférico en la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire en la Secretaría del Medio Ambiente. Cuenta con más de 20 años de experiencia en el área y ha colaborado en diversos estudios relacionados con el tema de la contaminación y sus efectos.
aretama@sma.df.gob.mx

Cristina Ortuño Mojica es actuaria, con estudios de maestría en estadística. Su interés principal es la estadística no paramétrica, estadística espacial, simulación y análisis multivariado, con aplicaciones en calidad del aire. Actualmente se desempeña como subdirectora de Análisis en la Dirección de Monitoreo Atmosférico en la Secretaría del Medio Ambiente.
cortuno@sma.df.gob.mx

Mónica del Carmen Jaimes Palomera es maestra en ingeniería ambiental por la Universidad Nacional Autónoma de México, cuenta con más de diez años de experiencia en el manejo de datos de calidad del aire y actualmente ocupa la Jefatura de Estadística en la Subdirección de Análisis de la Secretaría del Medio Ambiente.
mjaimes@sma.df.gob.mx

Bibliografía

Conover, W. J. (1980), *Practical nonparametric statistics*, 2a edición, John Wiley & Sons.
Daniel, Wayne W. (1990), *Applied nonparametric statistics*, 2a edición, PWS-Kent Publishing Company.
GODF (2008), *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, núm. 359, 19 de junio.
Riveros, Héctor G. (2009), "Análisis del programa 'Hoy no circula'", *Ciencia*, vol. 60-1, enero-marzo, pp. 76-83.
Siegel, Sidney (1970), *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*, México, Trillas.