



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
Secretaría del Medio Ambiente

Dirección General de Gestión Ambiental del Aire



SERIE DE ANÁLISIS DEL SISTEMA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA RED AUTOMÁTICA DE PARTICULAS MENORES A 2.5 MICROMETROS (PM2.5)

Nota Técnica No. 4.

Febrero, 2004

Propósito

Evaluar el estado de la información de partículas suspendidas menores a 2.5 micrómetros (PM2.5) registrada con monitores automáticos y caracterizar su comportamiento, como medidas previas a la difusión pública de esta información.

Período de medición

Se analizó la información registrada del 9 de agosto¹ al 31 de diciembre de 2003, en las 8 estaciones de monitoreo que registran PM2.5 con monitores automáticos y que transmiten información minuto a minuto.

Medición, adquisición y evaluación de desempeño.

En la instalación de una red de estaciones de monitoreo para medir PM2.5, el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) empleó monitores de última generación, así como sistemas de adquisición y transmisión de datos. Al mismo tiempo instrumentó criterios para garantizar la representatividad de los datos y evaluar el desempeño de cada estación de monitoreo. Las características de estas componentes se describen a continuación.

Monitores: La medición de PM2.5 en las estaciones Merced (MER), Tlalnepantla (TLA) y Coyoacán (COY) se realiza con monitores de microbalanza oscilante (TEOM) acoplados a un sistema de recuperación de compuestos orgánicos volátiles (Filter Dynamics Measurement System - FDMS por sus siglas en inglés), por medio del cual se obtienen mediciones simultáneas de PM2.5 con una componente no volátil y otra volátil. En las estaciones San Agustín (SAG), UAM-Iztapalapa (UIZ), Camarones (CAM), San Juan de Aragón (SJA) y La Perla (PER), se emplean monitores de atenuación beta.

Adquisición de datos: Con los monitores antes mencionados es posible obtener mediciones de PM2.5 cada segundo, las cuales son almacenadas en Sistemas de Adquisición de Datos (SAD). Este sistema ofrece la ventaja de programar banderas a los registros cuando existen fallas de operación e identificarlas con la bandera-99.99. El envío de la información desde el SAD a un sistema central de adquisición de datos, donde se integran las bases de datos de minutos, se realiza con un modem *Telab*². De esta manera, en las

¹ El sábado 9 de agosto de 2003 se inauguró formalmente la red de monitoreo de PM2.5

² Es un dispositivo empleado por Teléfonos de México (Telmex) para las telecomunicaciones, permite el envío de información asíncrona y aprovecha el ancho de banda de los sistemas de comunicación para el flujo de datos dentro de una red multipunto.

bases de datos de minutos se visualizan registros con bandera –99.99, asociados a fallas de operación de los monitores, y banderas asociadas a fallas de operación del modem *Telab*, identificadas de la siguiente manera:

Falla	Transmisión	Respuesta	Comunicación
Bandera	TE	NR	NC

Cuando los monitores de PM2.5 o los sistemas H2NS son retirados de operación debido a fallas de mayor relevancia las estaciones no realizan mediciones.

Evaluación de desempeño: El cálculo de las concentraciones horarias de PM2.5 en cada sitio de monitoreo se realiza de manera automática cuando existe el 75% o más de la información disponible (45 minutos o más), de lo contrario se asigna la bandera –99.99 en la base de datos a la hora correspondiente. Esto permite garantizar la confiabilidad de la información horaria y evaluar así el desempeño mensual de cada estación de monitoreo, el cual se califica como “bueno” cuando su base de datos contiene al menos un 75% de la información esperada, cuando contiene entre 50 y 75% se califica como desempeño “regular” y cuando contiene menos de 50% se califica como desempeño “malo”.

Tipo de desempeño mensual (% de registros horarios al mes)	Malo ($\leq 50\%$)	Regular (entre 50% y 75%)	Bueno ($\geq 75\%$)
---	--------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------

Metodología

- **Suficiencia de información.** Se evalúa el desempeño de cada estación de monitoreo durante el periodo de medición mediante el porcentaje de datos horarios válidos. Esto permite definir la representatividad de los indicadores que se generan en este informe.
- **Variación temporal.** Se identifica el comportamiento de las PM2.5 en los meses de monitoreo mediante estadística descriptiva y gráficos de caja y bigotes (boxplot), posteriormente se evalúa la similitud entre las concentraciones mensuales de cada estación por medio de la prueba no-parámetrica de Quade³, la cual identifica la presencia de cambios significativos entre meses consecutivos o cercanos con base en la mediana.
- **Comportamiento típico diario.** Para caracterizar el patrón típico diario de las PM2.5 se determina el comportamiento típico diario de cada estación de monitoreo durante el período de medición y por mes.

^{3/} La prueba estadística de Quade se emplea para comparar tres o más poblaciones de datos relacionados, cuya hipótesis es: las poblaciones son iguales vs alguna es diferente (sin identificar cual de ellas). Una vez rechazada la hipótesis de igualdad se procede a realizar comparaciones múltiples y así identificar las poblaciones que son diferentes.

Resultados

Suficiencia de información

La Tabla 1 presenta un resumen de las fallas registradas en cada estación de monitoreo durante el período de monitoreo. Como se observa, en agosto y septiembre la estación PER presentó un mayor número de fallas, mientras que la estación SJA presentó un mayor número de fallas en agosto y octubre. En ambas estaciones las fallas se debieron a la operación de los SAD, en el Anexo 1 se presenta con mayor detalle la relación de fallas por día y la atención que recibieron.

Tabla 1. Total de acciones notificadas y corregidas por estación de monitoreo

	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.
Merced (MER)	0	2	1	1	1	2	3	0	0	0
Tlalnepantla (TLA)	0	1	0	1	0	2	2	2	0	2
Coyoacán (COY)	1	0	2	1	0	1	1	2	5	4
UAM-Iztapalapa (UIZ)	3	0	1	0	2	0	2	3	0	0
San Juan de Aragón (SJA)	9	1	2	2	6	5	0	2	1	0
San Agustín (SAG)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
La Perla (PER)	10	1	17	3	1	1	1	1	0	0
Camarones (CAM)	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1

Notif. Fallas notificadas

Corr. Fallas corregidas

La ausencia de fallas de consideración en las estaciones TLA, COY, UIZ, SAG y CAM motivo que su desempeño fuera "bueno" entre agosto y diciembre de 2003. Por su parte, las fallas en las estaciones PER, SJA y MER⁴ motivaron que tuvieran un desempeño "regular" en algunos meses (Tabla 2).

Tabla 2. Número y porcentaje de datos horarios válidos de PM2.5

	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%	Núm.	%
Merced (MER)	631	85	655	91	516	69	719	100	741	100
Tlalnepantla (TLA)	730	98	712	99	729	98	628	87	744	100
Coyoacán (COY)	721	97	712	99	721	97	688	96	656	88
UAM-Iztapalapa (UIZ)	727	98	677	94	730	98	716	99	741	100
San Juan de Aragón (SJA)	627	84	386	54	499	67	695	97	732	98
San Agustín (SAG)	740	99	718	100	744	100	716	99	725	97
La Perla (PER)	404	54	476	66	723	97	662	92	733	99
Camarones (CAM)	728	98	707	98	713	96	717	100	727	98

Variación temporal

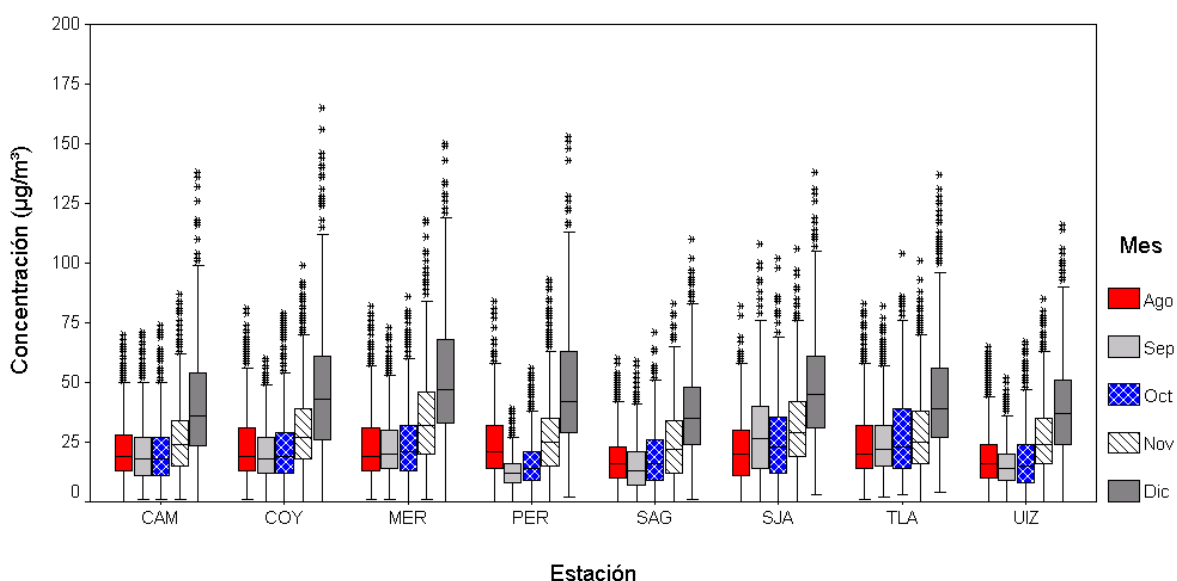
El análisis de la información registrada mensualmente mediante gráficos de caja y bigotes (Figura 2) y los valores de la mediana, la media y el rango intercuartil (Anexo 2), indican que las concentraciones de PM2.5 fueron similares en su comportamiento en la mayoría de las estaciones entre agosto y octubre, cuando aún prevalece la época de lluvias. Solo las estaciones PER y SJA muestran diferencias considerables de un mes a otro.

^{4/} Merced registró valores irregulares (alternando altos y bajos), requirió cambio de filtro y una auditoría de flujo. La Perla requirió calibración y estuvo en mantenimiento durante estos meses. San Juan de Aragón estuvo en mantenimiento por registrar valores negativos.

El análisis mediante la prueba no-paramétrica de Quade basada en la mediana, indica que las estaciones que presentan concentraciones estadísticamente similares en meses consecutivos son: TLA, CAM, UIZ y MER (Anexo 3), esta última a pesar de tener un desempeño "regular" durante octubre⁵. Por su parte, COY y SAG solo tuvieron similitud estadística entre agosto y octubre. En las estaciones SJA y PER no se encontró similitud entre algún par de meses, lo que se explica en parte por su desempeño regular.

Entre noviembre y diciembre hay un aumento paulatino del valor de las concentraciones de PM_{2.5} en todas las estaciones, en este último mes se registran las mayores concentraciones del período. Cabe mencionar que durante noviembre se presenta la transición de la época de lluvias a la época seca fría.

Figura 2. Gráfico de caja de registros horarios de PM_{2.5} por mes



El análisis mediante los valores de la mediana y la media, indica que la estación SAG registró concentraciones de PM_{2.5} menores al resto de las estaciones durante el período de monitoreo, mientras que el resto de las estaciones registran concentraciones similares. Con relación a las concentraciones extremas, éstas prevalecieron en la estación PER; no obstante, debe considerarse su desempeño "regular" en agosto y septiembre.

Comportamiento típico diario

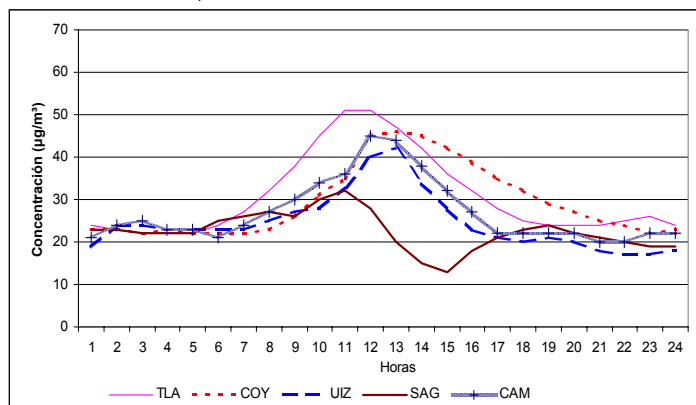
En comportamiento típico diario de las PM_{2.5} en las estaciones con desempeño "bueno" - TLA, COY, CAM y UIZ - presenta un aumento gradual de sus concentraciones entre las 8:00 y 16:00 horas, con concentraciones máximas alrededor de las 13:00 horas, posteriormente su comportamiento mantiene cierta estabilidad⁶. En la estación SAG el comportamiento típico presenta un decremento pronunciado entre las 11:00 y las 15 horas, y en las horas restantes mantiene fluctuaciones (Figura 1, Gráfica a). La frecuencia de concentraciones con valor cero registradas durante el período de análisis (Tabla 3), indica que en esta estación se registraron con mayor frecuencia éstas concentraciones entre las 13:00 y las 14:00 horas, lo que explica en parte su comportamiento típico diario

^{5/} Ente los casos con desempeño "regular" la estación Merced destaca por presentar el mayor porcentaje de información en octubre.

^{6/} Cabe señalar que la estación UIZ tuvo en diciembre un patrón atípico comparado con el resto de los meses (Anexo 2).

Figura 1. Comportamiento típico de PM2.5 por estación de monitoreo (agosto-diciembre).

a) considerando todos los meses



b) considerando los meses con desempeño bueno

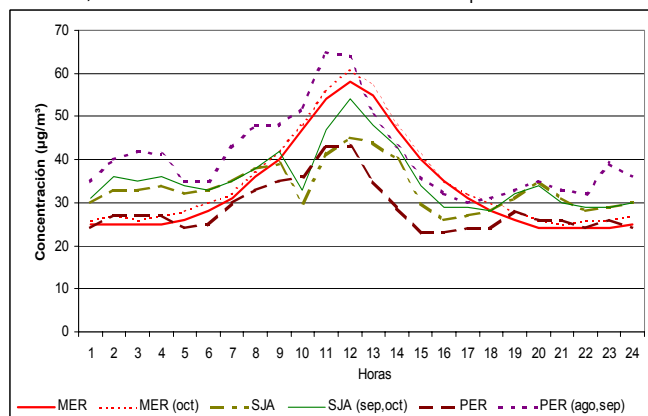


Tabla 3. Días con concentraciones cero por estación durante el período de agosto a diciembre 2003

Estación	Hora del día en que se registran concentraciones cero																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Merced	1	1																						
Tlalnepantla	1		1	1										1	2	1	2	2						
Coyoacán	1	1					1						1	1			1	1	1	1	1	1	3	1
UAM-Iztapalapa	2										2				2	1			1	1		2	1	1
San Juan de Aragón	2	1										2		1		1				1		1		
San Agustín			2		1			1	3	1		2	5	13	4	4								
La Perla								1					1							1			1	1
Camarones		1															1							

En las estaciones SJA y PER se observa un comportamiento típico mejor definido cuando se considera la información de meses con desempeño "bueno", ya que se observa un aumento gradual entre las 8:00 y 16:00 horas aproximadamente, con concentraciones máximas alrededor de las 13:00 horas. No obstante prevalece en ambas estaciones un comportamiento irregular, una especie de zigzageo, en horas consecutivas. En el caso de la estación MER, su comportamiento típico presenta poca variación cuando se analizan los datos registrados en meses con desempeño "bueno" y meses con desempeño regular" (Figura 1, Gráfica b). En el Anexo 4 se presenta el comportamiento típico por mes en cada estación de monitoreo, destacando el comportamiento diferente que tuvieron estas 3 estaciones en los meses con desempeño "regular", en comparación de los meses con desempeño "bueno".

Conclusiones

1. El desempeño general de las estaciones que registran PM_{2.5} es “bueno”, dado que en cinco de las ocho estaciones (TLA, COY, UIZ, SAG y CAM) se registró al menos un 75% de la información esperada en cada mes. En la estación MER, únicamente en octubre presentó un desempeño regular (entre 372 y 557 registros horarios en el mes), mientras que PER y SJA presentaron dos meses con desempeño “regular”, agosto-septiembre y septiembre-octubre, respectivamente. Cabe destacar que a partir de noviembre todas las estaciones tuvieron un desempeño “bueno”. Este análisis permite recomendar el uso de la información de las estaciones con desempeño “bueno” con fines de análisis y en el caso de las estaciones con desempeño “regular” en algunos meses se debe tener precaución.
2. La pérdida de datos durante varios días en las estaciones PER, SJA y MER se debió a la operación del SAD, este tipo de situaciones son recurrentes cuando se instalan sistemas nuevos que requieren períodos de adaptación y/o prueba con los antiguos sistemas de adquisición de datos que opera el SIMAT.
3. El análisis de datos durante el período de medición, sugiere que entre agosto-octubre la presencia de lluvias provoca la disminución de las concentraciones de PM_{2.5}, manteniéndose bajas y con poca variabilidad en la mayoría de las estaciones. Por otra parte, es posible asociar un aumento de las concentraciones de PM_{2.5} durante los meses invernales de noviembre y diciembre, lo que se puede asociar con la presencia de inversiones térmicas y la ausencia de lluvias.
4. Los valores de la mediana, la media y el rango intercuartil para los datos mensuales, sugieren que la variación espacial de las concentraciones de PM_{2.5} en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es mínima, al menos durante los meses que comprende este análisis. Por otra parte, las concentraciones extremas tienen mayor relevancia y frecuencia en la estación PER, ubicada en el municipio de Netzahualcoyotl.
5. El patrón típico de las PM_{2.5} con la información de estaciones que tienen un desempeño mensual “bueno” (TLA, COY, CAM, MER, UIZ, SJA, PER), sugiere que las concentraciones de este contaminante se incrementan regularmente entre las 8:00 y 16:00 horas, con concentraciones máximas alrededor de las 13:00 horas. En la estación SAG prevalece un comportamiento típico con un decremento considerable entre las 11:00 y las 15:00 horas, lo cual se asocia con un registro frecuente de concentraciones iguales a 0. Esta situación requiere evaluar el desempeño del equipo en esta estación y realizar las correcciones si es necesario, como en los casos anteriores es recomendable tener precaución en el uso de esta información con fines de análisis.

Anexo 1. Problemas de operación en los monitores de PM2.5 y problemas de comunicación entre agosto y diciembre de 2003.

Fecha	TLA		MER		SJA		PER		COY		CAM		SAG		UIZ	
	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.
01-Ago		CF														
07-Ago					SPB											
08-Ago					SSB											
11-Ago					SPF, SSF		SPF									
12-Ago			CF		SSN		SSN									
15-Ago					SPN	CAL		P.CAL								
18-Ago					SPN											
21-Ago							SPM									
22-Ago					SPN											
25-Ago							SPM								SPI, CC	
26-Ago					SPN		SPM								SPI, CC	
27-Ago					SPN		SPM									
28-Ago				M			SPM		SPF						FEST	
29-Ago							SPM									
30-Ago							SPM									
31-Ago							SPM									
01-Sep							SPM									
02-Sep							SPM			AFL						
03-Sep							SPM	RES								
04-Sep							SPM	CON								
05-Sep							SPM									
06-Sep							SPM									
07-Sep							SPM									
08-Sep			SPI, SSN		SPI		SPM									
09-Sep				M			SPM									
10-Sep		M					SPM				M					
11-Sep							SPM	M								
12-Sep							SPM									
13-Sep							SPM									
14-Sep							SPM									
15-Sep					SPO	F.CIN	SPM									
16-Sep							SPM									
17-Sep							SPM									
22-Sep															SSF, CC	
23-Sep						M			SPN							
24-Sep									SPN							
02-Oct										M						

Anexo 1. (Continuación)

Fecha	TLA		MER		SJA		PER		COY		CAM		SAG		UIZ	
	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.	Notif.	Corr.
03-Oct						M										
07-Oct						ENE									SSN	
08-Oct															SSN	
09-Oct					SSN											
10-Oct					SSN											
13-Oct					SSN											
14-Oct					SSN	OBS	SSO	M								
16-Oct		M, CF														
20-Oct				CF												
21-Oct			SPN		SPN	PAR, CIN										
24-Oct					SSI											
27-Oct						M										
30-Oct				AFL										AFL		
31-Oct		M														
03-Nov	SPI															
04-Nov		M														
05-Nov						AFL										
07-Nov			SPB													
10-Nov			SPB													
11-Nov			SPB			SAN									SPI	SAN
12-Nov		M														
13-Nov							AFL		AFL							AFL
14-Nov									SSN							
17-Nov															SPF, CC	
18-Nov										SAN,CF						SAN, CF
25-Nov							SPF									
26-Nov	SPF, CC															
02-Dic									SPI					M		
03-Dic					SPI											
09-Dic		CF														
18-Dic									SSO	CF, AFL						
19-Dic											SPN	M				
22-Dic									SPN							
23-Dic		CF							SPI	AFL, BOM						
30-Dic										M						
31-Dic									SPM	M						

Nomenclatura:

Fallas reportadas (Notif.)	Fallas reportadas (Notif.)	Tipo de corrección (Corr.)
SPB. Sistema Principal en Observación	SPF. Sistema Principal Falla	RES. Reactivación de la estación
SSB. Sistema Secundario en Observación	SSF. Sistema Secundario Falla	CON. Prueba de configuración.
SSN. Sistema Secundario con valores negativos	FEST. Falla de la estación	CAL.P. Calibración Pendiente
SPN. Sistema Principal con valores negativos	Tipo de correcciones Corr.)	FCIN. Falla en Cinta.
SPM. Sistema Principal en mantenimiento	CF. Cambio de Filtro	ENE. Se establece la Energía
SPI. Sistema Principal con valores irregulares	M. Mantenimiento	OBS. Se queda en observación.
SSI. Sistema Secundario con valores irregulares	CF. Cambio de Filtro	PAR. Se checan los parámetros.
SPO. Sistema Principal con valores cero	M. Mantenimiento	CIN. Se checa el avance de la Cinta.
SSO. Sistema Secundario con valores en cero	CAL calibración	SAN. Se checan salidas analógicas
CC. Configuración de canal.	AFL. Auditoría de Flujo	BOM. Cambio de bomba de vacío.

Anexo 2. Estadística descriptiva básica de PM2.5 por estación

Estación.	Parámetro	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
CAM	Min.	0	1	1	1	0	0
	Máx.	78	94	80	110	260	260
	Media	22	21	21	27	43	26.9
	Mediana	19	18	18	24	36	22
	Rango Inter.	15	16	16	19	31	20
	Perc 90	41	39	41	47	74	51
COY	Min.	1	0	0	0	0	0
	Máx.	91	60	100	134	245	245
	Media	24	21	24	31	49	29.3
	Mediana	19	18	19	27	43	23
	Rango Inter.	18	15	17	21	35	23
	Perc 90	46	38	48	56	89	57
MER	Min.	1	1	0	1	0	0
	Máx.	93	98	107	118	223	223
	Media	24	25	25	35	53	33.5
	Mediana	19	20	21	32	47	27
	Rango Inter.	18	16	19	26	35	28
	Perc 90	49	45	49	64	88	65
PER	Min.	0	0	0	0	2	0
	Máx.	150	108	74	166	473	473
	Media	24	14	17	28	52	28.4
	Mediana	21	12	14	25	42	20.5
	Rango Inter.	18	8	12	20	34	23
	Perc 90	42	23	31	51	89	57

Estación	Parámetro	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
SAG	Min.	0	0	0	0	1	0
	Máx.	81	59	85	83	237	237
	Media	18	15	18	24	38	22.6
	Mediana	16	13	16	22	35	19
	Rango Inter.	13	14	17	22	24	20
	Perc 90	31	31	35	43	65	43
SJA	Min.	0	0	0	0	3	0
	Máx.	112	149	118	148	258	258
	Media	23	31	27	32	49	33.3
	Mediana	20	27	23	29	45	29
	Rango Inter.	19	26	24	23	30	28
	Perc 90	44	59	54	57	79	62
TLA	Min.	1	2	3	0	4	0
	Máx.	83	95	104	140	137	140
	Media	25	25	28	30	44	30.7
	Mediana	20	22	23	25	39	25
	Rango Inter.	18	17	25	22	29	24
	Perc 90	46	48	57	60	77	59
UIZ	Min.	0	0	0	0	0	0
	Máx.	80	110	101	85	272	272
	Media	19	16	18	27	42	24.6
	Mediana	16	14	15	24	37	19
	Rango Inter.	14	11	16	19	27	21.5
	Perc 90	38	31	37	49	71	49

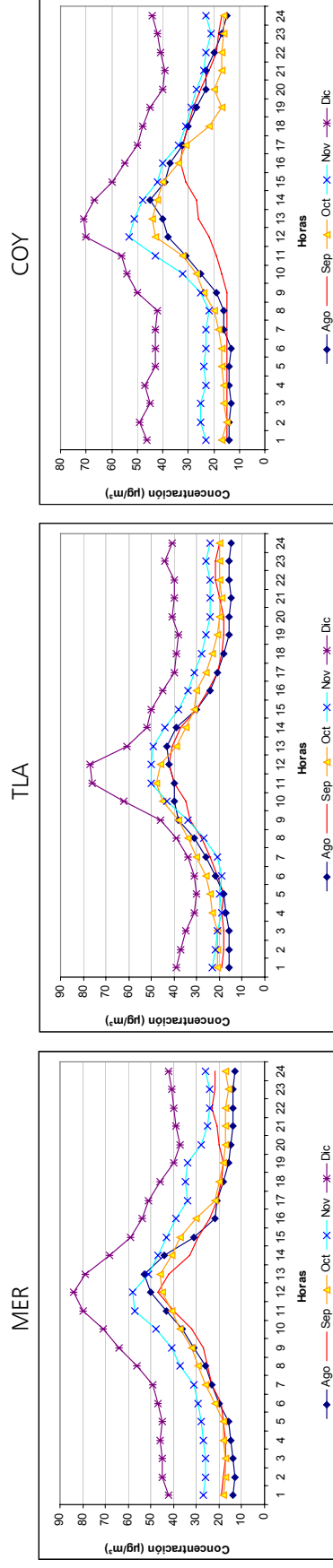
Anexo 3. Comparación entre meses (p-value de la prueba de Quade para muestras relacionadas)

Estación	Meses estadísticamente iguales (p-value)	Estación	Meses estadísticamente iguales (p-value)
MER	Ago-Sep (0.102) Sep-Oct (0.070)	SJA	Ninguno
TLA	Ago-Sep (0.088) Sep-Oct (0.065)	SAG	Ago-Oct (0.055)

	Oct-Nov (0.317)		Ninguno
COY	Ago-Oct (0.271)	PER	
UIZ	Ago-Oct (0.214) Sep-Oct (0.152)	CAM	Ago-Sep (0.077) Ago-Oct (0.197) Sep-Oct (0.540)

Nota: los pares de meses que no aparecen en esta tabla presentan diferencias estadísticamente significativas, es decir presentan cambios significativos en las concentraciones.

Anexo 4. Comportamiento típico mensual de PM2.5 por estación de monitoreo.



Anexo 4. (Continuación).

