

MAVDT

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL



**PROTOCOLO PARA EL MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA
CALIDAD DEL AIRE**

**MANUAL DE OPERACION DE SISTEMAS DE
VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE**



LIBERTAD Y ORDEN

MINISTERIO DE AMBIENTE,
VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL
República de Colombia

ÁLVARO URIBE VÉLEZ
Presidente de la República

JUAN LOZANO
Ministro de Ambiente, Vivienda y Desarrollo
Territorial

CLAUDIA MORA
Viceministra de Ambiente

CESAR BUITRAGO
Director de Desarrollo Sectorial Sostenible

HELVER REYES
Interventor Contrato FONADE 2062438

CONSULTOR
K-2 INGENIERIA



EQUIPO TECNICO

Manuel Ignacio Amaya
(Gerente-Coordenador de Campo)

Alvaro Martinez
(Director del Proyecto)

Amilcar Rizzo
(Ing. Calidad del Aire)

Francisco Boshel
(Meteorólogo)

Francisco Andrés Leal
Isabel Cristina Rey
Johanna Marcela Bastos
Johnny Jesús Jiménez
Oscar Mauricio Buitrago
(Ing. Consultores)

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN
K2 INGENIERIA LTDA.

IMPRESIÓN

ISBN

DISTRIBUCIÓN GRATUITA

Todos los derechos reservados.
Apartes de los textos pueden reproducirse
citando la fuente.

Su reproducción total debe ser autorizada por el
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo
Territorial

Calle 37 No. 8-40 Bogotá D.C., Colombia
www.minambiente.gov.co

DOCUMENTO DESARROLLADO EN EL
MARCO DEL CONTRATO FONADE 2062438

Préstamo BIRFNo.7335-con el Banco
Internacional de Reconstrucción y Fomento
para financiar la implementación del Programa
de Inversión Para el Desarrollo Sostenible
IDS

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS.....	13
3. GENERALIDADES.....	17
3.1. QUIENES DEBEN APLICAR EL PROTOCOLO.....	17
3.2. PROPÓSITO.....	17
3.4. ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO.....	22
4. SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL MARCO DE LOS PGCA. 23	
4.1. PLANES DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	23
4.1.1. Etapas de un PGCA.....	25
5. TIPOS DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE SEGÚN SU TECNOLOGIA.....	27
6. SISTEMAS MANUALES PARA LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	29
6.1. GENERALIDADES.....	29
6.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN.....	30
6.2.1. Toma de Muestra.....	30
6.2.1.1. Determinación de concentración de material particulado: PST, PM ₁₀ , PM _{2.5}	30
6.2.1.2. Determinación de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.....	32
6.2.2. Análisis de laboratorio.....	34
6.2.3. Procesamiento de la Información.....	34
6.2.4. Reporte.....	34
6.2.5. Control y Aseguramiento de la Calidad.....	35
6.2.6. Mantenimiento de Equipos y Calibración.....	35
6.2.6.1. Rutinas y frecuencias de mantenimiento recomendadas para equipos Hi Vol.	35
6.2.6.2. Calibración de equipos muestreadores de partículas Hi Vol.	36
6.2.6.3. Equipos muestreadores de tres gases.....	36
6.2.6.4. Calibración de equipos muestreadores de tres gases.....	37
7. SISTEMAS AUTOMÁTICOS PARA LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	39
7.1. GENERALIDADES DE LA OPERACIÓN.....	39
7.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN.....	40
7.2.1. Toma de Muestra y Análisis.....	40
7.2.1.1. Analizador de material particulado (PST, PM ₁₀ , PM _{2.5}).....	40
7.2.1.2. Analizador de óxidos de azufre (SO _x).....	41
7.2.1.3. Analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO ₂ /NO _x).....	43
7.2.1.4. Analizador de ozono (O ₃).....	45
7.2.1.5. Analizador de monóxido de carbono (CO).....	46
7.2.1.6. Analizador de hidrocarburos metánicos y no metánicos.....	47
7.2.1.7. Otros elementos necesarios para la operación de SVCA automáticos.....	48
7.2.2. Procesamiento de la Información.....	49



7.2.3.	Reporte.....	51
7.2.4.	Aseguramiento y Control de Calidad.....	51
7.2.5.	Mantenimiento de Equipos.....	51
7.2.5.1.	Revisión de los analizadores de calidad del aire.....	52
7.2.5.2.	Verificación de la calibración de los analizadores de calidad del aire.....	62
7.2.5.3.	Verificación del correcto funcionamiento de calibradores multigas.....	69
8.	SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE HÍBRIDOS.....	74
9.	ELEMENTOS COMUNES EN TODOS LOS SVCA.....	75
9.1.	PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO.....	75
9.1.1.	Objetivos del Programa de Aseguramiento y Control de Calidad.....	76
9.1.2.	Secuencia Metodológica de Implementación.....	77
9.1.3.	Planeación del Programa de Control y Aseguramiento de la Calidad.....	78
9.1.4.	Implementación.....	78
9.1.5.	Evaluaciones.....	79
9.1.6.	Reportes.....	79
9.1.7.	Características Organizativas de un Programa de Aseguramiento y Control de la Calidad.....	80
9.1.8.	Objetivos de Calidad de Datos.....	80
9.1.9.	Establecimiento de los Objetivos de Calidad de Datos.....	82
9.1.10.	Elementos de Aseguramiento de Calidad.....	83
9.2.	MANEJO DE MUESTRAS Y CADENA DE CUSTODIA.....	100
9.2.1.	Manejo de la muestra.....	101
9.2.2.	Cadena de custodia.....	103
9.3.	ANÁLISIS DE LA INFORMACION GENERADA EN LOS SVCA.....	109
9.3.1.	Bases de Datos.....	109
9.3.1.1.	Manejo y presentación de las variables de calidad del aire.....	109
9.3.1.2.	Manejo y presentación de las variables de meteorología.....	112
9.3.2.	Manejo Estadístico de Datos.....	113
9.3.2.1.	Cálculo de los promedios en el tiempo.....	113
9.3.2.2.	Brechas de datos.....	114
9.3.2.3.	Interpolación y ajuste.....	114
9.3.2.4.	Promedio aritmético.....	115
9.3.2.5.	Promedio geométrico.....	115
9.3.2.6.	Concentración promedio anual por hora.....	116
9.3.2.7.	Promedio anual de las concentraciones horarias.....	116
9.3.2.8.	Concentración máxima por hora.....	116
9.3.2.9.	Promedio mensual de concentraciones horarias.....	117
9.3.2.10.	Máximo mensual de las concentraciones horarias.....	117
9.3.2.11.	Estimación de la media móvil.....	117
9.3.2.12.	Comparación de los valores de concentración con la norma.....	121
9.3.2.13.	Cálculo del número de excedencias.....	128
9.4.	INDICADORES DE OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DEL SVCA.....	128
9.4.1.	Análisis del Porcentaje de Captura de Datos.....	128
9.4.2.	Análisis del Porcentaje de Datos Válidos.....	128
9.4.3.	Consistencia de los Datos Relacionados con la Calidad del Aire.....	131
9.4.4.	Consistencia de los Datos Relacionados con las Variables Meteorológicas.....	133
9.5.	GENERACIÓN DE REPORTES.....	134
9.6.	REPORTE DE LA CALIDAD DEL AIRE.....	135





9.6.1.	Información sobre SVCA, Estaciones y Técnicas de Medición.....	135
9.6.2.	Contenido del Informe Anual Nacional de Calidad del Aire	137
9.6.3.	Contenido de informes mensuales y trimestrales de calidad del aire	139
9.6.4.	Contenido del Informe de Calidad del Aire Presentado en las Páginas Web.....	141
9.6.5.	Cálculos y contenido de un informe meteorológico anual	143
9.6.6.	Contenido de un Informe de Campañas de Monitoreo.....	154
9.6.7.	Contenido de un plan de calidad	155

10. BIBLIOGRAFÍA..... 156

11. ANEXO 1. PROCEDIMIENTOS DE DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE CONTAMINANTES 160

11.1. EQUIPOS MUESTREADORES DE MATERIAL PARTICULADO160

11.1.1.	Determinación de la Concentración de Material Particulado menor a 10 µm (PM ₁₀) en la Atmósfera – Muestreador de Alto Volumen (HI-VOL).....	160
11.1.1.1.	Aplicabilidad	160
11.1.1.2.	Principio	161
11.1.1.3.	Intervalo	161
11.1.1.4.	Precisión	161
11.1.1.5.	Exactitud	161
11.1.1.6.	Fuentes potenciales de error	162
11.1.1.7.	Equipos y suministros	163
11.1.1.8.	Calibración del equipo para PM ₁₀	165
11.1.2.	Determinación de la Concentración de las Partículas Suspensas Totales (PST) en la Atmósfera – Muestreador de Alto Volumen (Hi Vol)	174
11.1.2.1.	Calibración del equipo para PST.....	174
11.1.3.	Monitoreo de material particulado (PM ₁₀ ó PST) por Muestreador de Alto Volumen	182
11.1.3.1.	Descripción del principio de operación	182
11.1.3.2.	Resumen de la operación de muestreo	182
11.1.3.3.	Equipos y accesorios	182
11.1.3.4.	Procedimiento de monitoreo de material particulado utilizando equipos con controlador de flujo másico (MFC).....	182
11.1.3.5.	Procedimiento de monitoreo de material particulado utilizando equipos con controlador de flujo volumétrico (VFC)	187
11.1.3.6.	Control de calidad de las muestras	190
11.1.3.7.	Desechado de filtros expuestos	190
11.1.4.	Preparación y análisis de filtros	190
11.1.4.1.	Manejo de filtros	190
11.1.4.2.	Inspección visual del filtro	191
11.1.4.3.	Acondicionamiento del filtro.....	191
11.1.4.4.	Procedimiento de pesaje inicial.....	191
11.1.4.5.	Control de calidad en laboratorio	192
11.1.4.6.	Recepción de las muestras provenientes de campo	194
11.1.4.7.	Procedimiento de pesaje final.....	195
11.1.5.	Procedimientos de cálculo.....	195
11.1.5.1.	Metodología de cálculo de los niveles de concentración de PM ₁₀	195
11.1.5.2.	Metodología de cálculo de los niveles de concentración de PST	198
11.1.6.	Validación de los datos de concentración	200
11.1.7.	Procedimientos de control de calidad en campo	201
11.1.7.1.	Procedimiento de chequeo de flujo (QC) - Muestreadores MFC	202
11.1.7.2.	Procedimiento de chequeo de flujo (QC) - Muestreadores VFC.....	206

**11.2. MÉTODO DE REFERENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN
LA ATMÓSFERA (MÉTODO PARAROSANILINA)210**



11.2.1.	Aplicabilidad.....	210
11.2.2.	Principio.....	210
11.2.3.	Rango.....	210
11.2.4.	Interferencias.....	211
11.2.5.	Precisión y exactitud.....	211
11.2.6.	Estabilidad.....	211
11.2.7.	Equipos.....	211
11.2.7.1.	Toma de muestra.....	211
11.2.7.2.	Transporte.....	214
11.2.7.3.	Análisis.....	214
11.2.8.	Reactivos.....	215
11.2.8.1.	Toma de muestra.....	215
11.2.8.2.	Preparación de reactivos y análisis de las muestras.....	216
11.2.9.	Procedimiento de toma de muestra.....	219
11.2.9.1.	Condiciones generales.....	219
11.2.9.2.	Toma de muestra de 30 minutos y 1 hora.....	219
11.2.9.3.	Toma de muestra de 24 horas.....	220
11.2.9.4.	Medición de Flujo.....	220
11.2.9.5.	Almacenamiento y envío de la muestra.....	222
11.2.10.	Calibración analítica.....	222
11.2.10.1.	Compatibilidad de las celdas del espectrofotómetro.....	222
11.2.10.2.	Procedimiento de Calibración Estático (Opción 1).....	223
11.2.10.3.	Procedimientos de Calibración Dinámicos (Opción 2).....	224
11.2.11.	Preparación de la Muestra y Análisis.....	226
11.2.11.1.	Preparación de la muestra.....	226
11.2.11.2.	Análisis de la muestra.....	227
11.2.11.3.	Rango de Absorbancia.....	227
11.2.11.4.	Disposición del reactivo.....	227
11.2.12.	Cálculos.....	228
11.2.12.1.	Pendiente de Calibración, intercepto, y Coeficiente de Correlación.....	228
11.2.12.2.	Volumen total de la Muestra.....	228
11.2.12.3.	Concentración de Dióxido de azufre.....	229
11.2.12.4.	Estándares de Control.....	229
11.2.12.5.	Conversión de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ppm (v/v).....	230
11.2.13.	Tratamiento y Eliminación de Residuos que Contienen Mercurio.....	230
11.2.13.1.	Método para formar una Amalgama.....	230
11.2.13.2.	Método que usa tiras de papel de aluminio.....	230
11.3.	PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA (FOTOMETRÍA INFRARROJA NO DISPERSIVA).....	231
11.3.1.	Principio de medición.....	231
11.3.2.	Consideraciones de la toma de muestra.....	231
11.3.3.	Procedimiento de calibración.....	231
11.3.3.1.	Principio.....	231
11.3.3.2.	Equipos.....	232
11.3.3.3.	Reactivos.....	233
11.3.3.4.	Procedimiento utilizando el método de dilución dinámica.....	233
11.3.3.5.	Procedimiento utilizando el método de cilindros múltiples.....	235
11.3.4.	Referencias.....	235

11.4. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DEL DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA ATMÓSFERA (QUIMIOLUMINISCENCIA EN FASE GASEOSA)	235
11.4.1. Principio y Aplicabilidad	235
11.4.2. Consideraciones de la toma de muestra	235
11.4.2.1. Los analizadores	235
11.4.2.2. Matraces integradores.....	236
11.4.2.3. Filtros de partículas	236
11.4.3. Calibración Alternativa A Titulación en fase gaseoso (GPT) de un estándar de NO con O ₃	236
11.4.3.1. Principio.	236
11.4.3.2. Equipos.....	237
11.4.3.3. Reactivos	238
11.4.3.4. Especificación del parámetro dinámico.....	238
11.4.3.5. Procedimiento.....	240
11.4.4. Calibración Alternativa B - Dispositivo de permeación de NO ₂	244
11.4.4.1. Principio	244
11.4.4.2. Equipos.....	244
11.4.4.3. Reactivos.....	246
11.4.4.4. Procedimiento.....	246
11.4.5. Frecuencia de calibración.....	250
11.4.6. Referencias.....	250
11.5. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE OZONO EN LA ATMÓSFERA.....	252
11.5.1. Principio	252
11.5.2. Aplicabilidad.....	253
11.5.3. Equipos	253
11.5.4. Reactivos.....	254
11.5.5. Procedimiento	255
11.6. DETERMINACION DE LA CONCENTRACIÓN MASICA DE OZONO. METODO DE QUIMIOLUMINISCENCIA	261
11.6.1. Generalidades.....	261
11.6.2. Limitaciones.....	261
11.6.3. Definición	261
11.6.4. Principio.....	262
11.6.5. Reactivos y materiales.....	262
11.6.5.1. Línea de muestreo	262
11.6.5.2. Filtro de partículas.....	262
11.6.5.3. Etileno	263
11.6.5.4. Aire cero.....	263
11.6.6. Aparatos	263
11.6.6.1. Analizador de quimioluminiscencia	263
11.6.6.2. Aparato para calibración	263
11.6.7. Procedimiento	265
11.6.7.1. Operación del analizador de quimioluminiscencia.....	265
11.6.7.2. Calibración del analizador de quimioluminiscencia.....	266
11.6.8. Expresión de los resultados	267
11.6.8.1. Concentración del ozono de calibración.....	267
11.6.8.2. Concentración de ozono de la muestra	268
11.6.8.3. Precisión.....	268
11.6.8.4. Exactitud	268
11.6.9. Informe de ensayo.....	268



11.6.10.	Referencia	269
11.7.	METODO COLORIMETRICO PARA ANALISIS DE DIOXIDO DE NITROGENO EN LA ATMOSFERA (PROMEDIO DE 24 HORAS)	270
11.7.1.	Principio del método	270
11.7.2.	Rango y sensibilidad	270
11.7.3.	Interferencias.....	270
11.7.4.	Precisión y exactitud	270
11.7.5.	Aparatos	271
11.7.5.1.	Absorbedor	271
11.7.5.2.	Equipo para medición de aire	271
11.7.5.3.	Líneas de muestreo	271
11.7.5.4.	Bomba de aire.....	271
11.7.5.5.	Espectrofotómetro	271
11.7.6.	Reactivos.....	271
11.7.7.	Procedimiento	272
11.7.7.1.	Muestreo.....	272
11.7.7.2.	Desarrollo del color	272
11.7.8.	Calibración y estandarización	272
11.7.9.	Cálculos.....	273
11.7.10.	Efectos de almacenamiento.....	273
11.7.11.	Referencia	273
11.8.	RECOLECCION Y MEDICION DE PARTICULAS DE POLVO SEDIMENTABLES	274
11.8.1.	Aplicación	274
11.8.2.	Definición de términos	274
11.8.3.	Resumen del ensayo.....	274
11.8.4.	Importancia y uso.....	274
11.8.5.	Interferencias.....	274
11.8.6.	Aparatos	274
11.8.7.	Reactivos.....	276
11.8.8.	Muestreo	276
11.8.9.	Procedimiento	277
11.8.9.1.	Material insoluble.....	278
11.8.9.2.	Material soluble total.....	278
11.8.10.	Cálculos.....	279
11.8.11.	Precisión y sesgo.....	279
11.8.11.1.	Reproducibilidad	279
11.8.11.2.	Repetibilidad	279
11.8.12.	Referencias.....	280
12.	ANEXO 2. ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DE AIRE	281
12.1.	CONTAMINANTES DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE	281
12.2.	RANGOS DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE	281
12.3.	PUNTOS DE CORTE DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE	281
12.3.1.	Cálculo del Índice Nacional de Calidad del Aire para Colombia.....	282



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Uso del Protocolo.	18
Figura 2. Estructura del Protocolo.	22
Figura 3. Etapas involucradas en el PGCA.	23
Figura 4. Herramientas de un PGCA.	24
Figura 5. Tipos de SVCA según su tecnología.	28
Figura 6. Proceso general de operación de un SVCA Manual.	29
Figura 7. Ejemplo flujo de proceso de un SVCA Manual.	30
Figura 8. Pasos previos en la realización de muestreos de material particulado.	31
Figura 9. Pasos a realizar en los muestreos de material particulado.	31
Figura 10. Pasos a realizar después del muestreo de material particulado.	32
Figura 11. Pasos previos en la realización de un muestreo de SO ₂ y NO _x	32
Figura 12. Pasos a realizar en los muestreos de SO ₂ y NO _x	33
Figura 13. Pasos a realizar después del muestreo de SO ₂ y NO _x	34
Figura 14. Equipo Muestreador de 3 Gases.	37
Figura 15. Montaje del calibrador de burbuja.	37
Figura 16. Proceso general de operación de un SVCA Automatico.	39
Figura 17. Esquema analizador Beta.	41
Figura 18. Diagrama de Flujo Analizador de SO ₂	43
Figura 19. Diagrama de Flujo Analizador NO _x	44
Figura 20. Diagrama de Flujo Analizador O ₃	46
Figura 21. Diagrama de Flujo Analizador CO.	47
Figura 22. Proceso de tomas de muestras hasta el procesamiento de la información.	50
Figura 23. Ejemplo captura y manejo de la información.	51
Figura 24. Autotest internos y externos equipos analizadores.	52
Figura 25. Proceso de revisión de un analizador de partículas suspendidas totales (PST).	53
Figura 26. Proceso de revisión de un analizador de partículas menores a 10 micras (PM ₁₀).	54
Figura 27. Proceso de revisión del analizador de material particulado PM ₁₀	55
Figura 28. Proceso de revisión del analizador de dióxido de azufre (SO ₂).	57
Figura 29. Proceso de revisión del analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO _x).	58
Figura 30. Proceso de revisión del analizador de ozono (O ₃).	59
Figura 31. Proceso de revisión del analizador de monóxido de carbono (CO).	60
Figura 32. Proceso de cambio de filtros en los analizadores de gases.	61
Figura 33. Proceso de calibración.	63
Figura 34. Ilustración del proceso de verificación de la calibración de los analizadores de gases.	64
Figura 35. Principio de funcionamiento de un calibrador multigas.	69
Figura 36. Burbujeador (soap bubbler flow-meter) usado como patrón de medición de flujo volumétrico.	70
Figura 37. Ilustración del montaje para verificar la operación del calibrador multigas.	72
Figura 38. Verificación del correcto funcionamiento de un calibrador multigas.	73
Figura 39. Proceso general de operación de un SVCA Híbrido.	74
Figura 40. Ciclo de los programas de AC para vigilancia de calidad del aire.	77
Figura 41. Ejemplo etiqueta de la muestra.	102
Figura 42. Ejemplo de la forma de cadena de custodia.	104
Figura 43. Ejemplo de cadena de custodia del laboratorio.	105
Figura 44. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 8 horas de un conjunto de datos.	118
Figura 45. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 3 horas de un conjunto de datos.	120
Figura 46. Media móvil de ocho horas de series temporales con datos inválidos.	121
Figura 47. Diagrama de comparación de la concentración de contaminante con la norma (de acuerdo al ejemplo presentado).	125
Figura 48. Descripción de un diagrama de caja.	132



Figura 49. Gráfica de series de tiempo donde se validan picos de O ₃ en horas de la madrugada.....	133
Figura 52. Nomograma para cálculo de estabilidad atmosférica según Pasquill	152
Figura 53. Ejemplo de distribución horaria de la altura de la capa de mezcla para determinada zona de estudio.....	153
Figura 54. Muestreador de PM ₁₀	160
Figura 55. Partes y componentes de un muestreador de PM ₁₀ real.....	163
Figura 56. Ejemplo de formato de campo para el monitoreo de PM ₁₀ empleado por la firma consultora K2 Ingenieria Ltda. ...	184
Figura 57. Ejemplo de formato de campo para el monitoreo de PST empleado por la firma consultora K2 Ingenieria Ltda. ...	185
Figura 58. Ejemplo de formato de pesaje de filtros en laboratorio.	193
Figura 59. Ejemplo de formato de control de calidad interno de pesaje.	194
Figura 60. Ejemplo de gráfica de control de calidad para validación en campo de tasas de flujo.	202
Figura 61. Tren de toma de muestra para periodos cortos.	212
Figura 62. Sistema de toma de muestra para 24 horas.	213
Figura 63. Absorbedor (toma de muestra de 24 horas) lleno y ensamblado para enviar.	220
Figura 64. Tubo de infiltración esquemático para uso en laboratorio.....	224
Figura 65. Método de Dilución para calibración de analizadores de CO.....	232
Figura 66. Método de cilindros múltiple para calibración de analizadores de CO.	233
Figura 67. Diseño esquemático de un sistema GPT Sistema de Calibración.....	238
Figura 68. Diseño esquemático de un Sistema de Calibración.	245
Figura 69. Diagrama esquemático de un sistema típico de calibración fotométrica UV	254
Figura 70. Diagrama esquemático de un sistema típico de calibración fotométrica UV (opción1).....	259
Figura 71. Diagrama esquemático de un analizador de ozono por quimioluminiscencia	265
Figura 72. Diagrama de un sistema típico de calibración fotométrica UV.	266
Figura 73. Mampara de recipiente para caída de polvo	275
Figura 74. Sección de corte de la mampara	276



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio.....	20
Tabla 2. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia.....	20
Tabla 3. Herramientas básicas para realizar el mantenimiento de las estaciones automáticas	49
Tabla 4. Ejemplo de la composición de la mezcla de gases del cilindro usado para la verificación de la calibración de los analizadores de gases.....	64
Tabla 5. Periodicidad de las operaciones de control de la calibración de los analizadores de gases	66
Tabla 6. Criterios para la verificación de la exactitud de analizadores de gases.....	67
Tabla 7. Formato de calibración de SPAN y CERO.....	68
Tabla 8. Formato de calibración multipunto.....	68
Tabla 9. Descripción del significado de los parámetros de calibración de equipos automáticos.....	69
Tabla 11. Actividades rutinarias de AC para cada estación de vigilancia	88
Tabla 12. Procedimientos de calibración.....	90
Tabla 13. Ejemplo de tabla de validación de datos en campo, fuente: Variables del Sisaire, IDEAM.....	94
Tabla 14. Tipos de banderas que invalidan los datos.....	97
Tabla 15. Tipos de banderas que no invalidan los datos.....	98
Tabla 16. Conversión de dirección del viento.....	99
Tabla 17. Cuestionario de evaluación de la cadena de custodia para métodos manuales.....	106
Tabla 18. Evaluación del manejo de los reportes desde la estación automática hasta el centro general de información del SVCA.....	108
Tabla 19. Variables iniciales de calidad del aire a ser incluidas dentro del SISAIRES.....	109
Tabla 20. Pesos moleculares de algunas sustancias contaminantes.....	111
Tabla 21. Nombres y unidades de variables de meteorología.....	112
Tabla 22. Nombres y unidades de variables de meteorología adicionales.....	113
Tabla 23. Datos de concentración de ozono y resultados de los cálculos de la media móvil para dichos datos.....	119
Tabla 24. Límites máximos permisibles por contaminante criterio según Res. 601 de 2006.....	122
Tabla 25. Disponibilidad de datos para calcular los promedios anuales en el SVCA estudiado.....	130
Tabla 26. Información sobre los SVCA.....	135
Tabla 27. Información sobre las estaciones.....	136
Tabla 28. Información sobre la configuración de las mediciones por compuesto.....	137
Tabla 29. Factores de conversión.....	138
Tabla 30. Disponibilidad de datos meteorológicos existentes en el SVCA evaluado.....	143
Tabla 31. Ejemplo para la presentación del resumen meteorológico anual por horas para una estación.....	146
Tabla 32. Resumen de valores promedios mensuales de las variables climáticas en el SVCA evaluado durante el año 2002 ..	147
Tabla 33. Categorías de estabilidad para períodos diurnos, condiciones convectivas	150
Tabla 34. Categorías de estabilidad para períodos nocturnos, condiciones estables.....	151
Tabla 35. Presentación de resultados obtenidos para altura de mezcla y estabilidad atmosférica	152
Tabla 36. Volúmenes de reactivos a emplear para la preparación de los diferentes tipos de soluciones de sulfato-TCM.....	223
Tabla 37. Formato de datos para cálculos a mano	229
Tabla 38. Puntos de corte del ICA.....	281
Tabla 39. Efectos a la salud de acuerdo al rango y al valor del Índice de Calidad del Aire.....	283
Tabla 40. Acciones preventivas de acuerdo al rango y al valor del Índice de Calidad del Aire.....	285

1. INTRODUCCIÓN

El presente MANUAL DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE que hace parte del PROTOCOLO NACIONAL DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE, incorpora los lineamientos a tener en cuenta para llevar a cabo el diseño y la operación de los SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN COLOMBIA.

Este documento parte de esfuerzos conjuntos del MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y las AUTORIDADES AMBIENTALES Colombianas para estandarizar los procedimientos de monitoreo de calidad del aire.

El desarrollo de este protocolo tiene como punto de partida el documento elaborado durante el año 2005 por el IDEAM denominado PROTOCOLO PARA LA VIGILANCIA Y SEGUIMIENTO DEL MODULO AIRE DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL el cual fue el resultado final de la consultoría No. 023-2004 realizada por el ingeniero Gabriel Herrera Torres y de los trabajos previos de los ingenieros Boris Galvis (consultoría No. 161-2002) y Eder Pedraza (consultoría No. 163-2002), el cual contó con la participación del ingeniero Luis R. Barreto, funcionario de la Subdirección de Estudios Ambientales (IDEAM) y la interventoría del ingeniero Cesar Buitrago, subdirector de Estudios Ambientales (IDEAM) en esa época.

Partiendo del documento elaborado por el IDEAM, La presente versión del PROTOCOLO ha sido desarrollada por la firma de consultoría K2 INGENIERIA LTDA dentro del marco del contrato FONADE 2062438 y la Interventoría del MAVDT (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL). La experiencia de la firma consultora K2 INGENIERIA LTDA, conjuntamente con el aporte de expertos y demás consultores convocados, aunado a las experiencias que a nivel nacional y del exterior fueron consideradas en el proyecto, más los resultados de la validación del PROTOCOLO, que en su nueva versión se realizó para ocho sistemas de vigilancia de calidad del aire en Colombia, permiten presentarlo como un documento conveniente y útil para el buen desarrollo de los programas de vigilancia de la calidad del aire en nuestro país.

En el protocolo se recogen también aspectos considerados en las publicaciones: *"Air Monitoring programme design for urban and industrial areas"*, publicación científica No. 33 de la Organización Mundial de la Salud (OMS), The EEA Air Quality Monitoring and Information Network, publicaciones científicas de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, en inglés), publicaciones científicas de la Agencia Ambiental Europea (EEA en Inglés), otras publicaciones y papers científicos, las experiencias del personal técnico del IDEAM durante las diferentes actividades desarrolladas para la evaluación de la calidad del aire y de K-2 INGENIERIA LTDA y sus consultores en proyectos realizados para entidades públicas y privadas.

Este documento ha sido elaborado pensando en las necesidades y realidades de los países en vías de desarrollo, de modo tal que pueda convertirse en una guía que permita la gestión de la calidad del aire en un marco óptimo, desde el punto de vista económico y técnico.

El protocolo está conformado por tres manuales que guían el proceso de diseño y operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire, con el objetivo principal de lograr mejoramiento continuo en la gestión de la calidad del aire.

2. DEFINICIONES Y ACRÓNIMOS

2.1. DEFINICIONES

A continuación se hace una recopilación de las definiciones contempladas en la legislación Colombiana y otras tomadas de normas internacionales aplicables al tema del presente protocolo:

AIRE¹: es el fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica.

ATMÓSFERA³: es la capa gaseosa que rodea a la tierra.

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA²: es la presencia de sustancias en la atmósfera en altas concentraciones, en un tiempo determinado, como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden ocasionar daños a la salud de las personas o al ambiente.

SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE (SVCA): es un conjunto de procesos, herramientas e instrumentos que tienen como fin determinar los niveles de inmisión que se dan en un área determinada.

PLANES DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE (PGCA): conjunto de procesos, procedimientos y normas cuyo propósito es reducir el impacto que ocasionan al ambiente atmosférico y la salud pública, diferentes tipos de fuentes, dentro de un marco de mejoramiento continuo.

EMISIÓN²: descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

INMISIÓN³: transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor”. Se entiende por inmisión a la acción opuesta a la emisión. Aire inmiscible es el aire respirable a nivel de la troposfera.

FUENTE DE EMISIÓN²: actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire

NORMA DE EMISION: es el valor de descarga permisible de sustancias contaminantes, establecido por la Autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad del aire.

INVENTARIO DE EMISIONES (IE): es el resultado de la suma de estimaciones de emisiones atmosféricas de contaminantes previamente definidos en un área geográfica específica y en un intervalo de tiempo determinado.

ÁREA-FUENTE³: es una determinada zona o región, urbana, suburbana o rural, que por albergar múltiples fuentes de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de

² Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y saneamiento Básico 2000. Título F Capítulo F.1.2 Definiciones.

² IUPAC Compendium of Chemical Terminology. Segunda edición 1997

³ Decreto 948 de junio 5 de 1995. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT).

sustancias contaminantes del aire.

ESTACION DE PUNTO CRÍTICO: puntos donde se encuentran posibles concentraciones altas por exposición directa (Hot Spot)

ESTACION DE CALIDAD DEL AIRE INDICATIVA: estación de calidad del aire compuesta por equipos que usan métodos que no son de referencia o que siendo métodos de referencia monitorean por tiempos inferiores a un año.

ESTACION DE CALIDAD DEL AIRE FIJA⁴: estación que monitorea la calidad del aire ambiente en un punto fijo por un tiempo superior a un año, usando equipos especiales para el monitoreo de un contaminante determinado y con métodos de referencia diseñados para tal fin.

EMISION FUGITIVA⁵: es la emisión ocasional de material contaminante hacia la atmósfera.

FUENTE FIJA²: fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

FUENTE FIJA PUNTUAL⁶: es la fuente fija que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas.

FUENTE FIJA DISPERSA O DIFUSA⁷: es aquella en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión como en el caso de las quemas abiertas controladas en zonas rurales.

FUENTE FIJA ARTIFICIAL DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE⁸: es todo proceso u operación realizada por la actividad humana o con su participación susceptible de emitir contaminantes.

FUENTE MÓVIL⁹: es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

CONTROLES AL FINAL DEL PROCESO¹⁰: son las tecnologías, métodos o técnicas que se emplean para tratar, antes de ser transmitidas al aire, las emisiones o descargas contaminantes, generadas por un proceso de producción, combustión o extracción, o por cualquier otra actividad capaz de emitir contaminantes al aire, con el fin de mitigar, contrarrestar o anular sus efectos sobre el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

OLOR OFENSIVO¹¹: es el olor, generado por sustancias o actividades industriales, comerciales o de servicio, que produce fastidio, aunque no cause daño a la salud humana.

SUSTANCIA DE OLOR OFENSIVO¹²: es aquella que por sus propiedades organolépticas, composición y tiempo de exposición puede causar olores desagradables.

⁴ Basado en PROPUESTA PARA LA ELABORACIÓN DE UN SISTEMA DE EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL MARCO DE LAS NUEVAS DIRECTIVAS. Grupo de Trabajo de Evaluación preliminar, posterior y modelización de la calidad del aire. Versión final 8 de Mayo de 2000

⁵ DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995

⁶ DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995

⁷ DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995

⁸ RESOLUCIÓN NÚMERO 601 04DE ABRIL DE 2006

⁹ RESOLUCIÓN NÚMERO 601 04DE ABRIL DE 2006

¹⁰ DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995

¹¹ DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995

¹² DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995



PUNTO DE DESCARGA¹³: es el ducto, chimenea, dispositivo o sitio por donde se emiten los contaminantes a la atmósfera.

CONTROL DE CALIDAD¹⁴: son técnicas operacionales y actividades que garantizan la calidad de un producto o servicio. El control de calidad también puede ser entendido como Control Interno de Calidad y se ejecuta como chequeos incluidos en los procedimientos normales; por ejemplo: calibraciones periódicas, chequeos dobles, muestreos controlados, etc.

ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD¹⁵: todas aquellas acciones planeadas o sistemáticas necesarias para proveer la confianza esperada de un producto o servicio. El aseguramiento de calidad es visto también como Control de calidad externo, es decir aquellas actividades que se hacen más ocasionalmente, usualmente por una persona ajena a la normal rutina de las operaciones; por ejemplo: una inspección del sistema en el sitio, comparaciones entre varios laboratorios y la evaluación periódica de los datos de control interno entre otras actividades.

MUESTREO¹⁶: acción de escoger muestras representativas de la calidad o condiciones medias del aire. Selección de una pequeña parte estadísticamente determinada, utilizada para inferir el valor de una o varias características del conjunto; para el caso de monitoreo de calidad del aire las características a determinar hacen referencia a las concentraciones de los diversos contaminantes.

ANÁLISIS: determinación directa de la presencia y/o concentración de contaminantes (gases o material particulado) en la muestra de aire que se hace pasar por el equipo; el análisis puede ser de tipo químico u óptico y permite conocer valores in situ y en tiempo real.

2.2. ACRONIMOS

PGCA	Plan de Gestión de la Calidad del Aire
SVCA	Sistema de Vigilancia de la calidad del aire.
SEVCA	Sistema especial de vigilancia de la calidad del aire
SVCAI	Sistema de vigilancia de la calidad del aire industrial
EPE	Estación de propósito especial
IE	Inventario de Emisiones
SISAIRE	Sistema de Información sobre Calidad del Aire.
atm	Unidad de presión, atmósfera. Donde 1 atm ≈ 101.325KPa ≈ 760 mmHg
AC	Aseguramiento de la Calidad
cm	Unidad de longitud, centímetro
CC	Control de Calidad
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés).
HCT	Hidrocarburos Totales
Hg	Mercurio
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico
in	Unidad de longitud, pulgadas

¹³ DECRETO 948 DEL 5 DE JUNIO DE 1995

¹⁴ Tomado y traducido de AIR QUALITY HANDBOOK FOR AIR QUALITY MEASUREMENTS SYSTEMS

¹⁵ Tomado y traducido de AIR QUALITY HANDBOOK FOR AIR QUALITY MEASUREMENTS SYSTEMS

¹⁶ Diccionario de la Real Academia Española. <http://www.rae.es>



INVIAS	Instituto nacional de vías
IVA	Impuesto al Valor Agregado
KPa	Unidad de presión, kilo-Pascal. Donde 101.325KPa \approx 1 atm
l	Unidad de volumen, litros
ml	Unidad de volumen, mililitros
mm	Unidad de longitud, milímetros
mm Hg	Unidad de presión, milímetros de mercurio. Donde 760 mm Hg \approx 101.325 KPa
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
N ₂	Nitrógeno
NH ₄ ⁺¹	Ión amonio. También puede ser escrito sin el superíndice que indica el valor de su carga eléctrica.
NO	Monóxido de nitrógeno
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
N ₂ O ₃	Trióxido de dinitrógeno
N ₂ O ₄	Tetróxido de dinitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
N ₂ O ₅	Pentóxido de dinitrógeno
NO _x	Óxido de Nitrógeno
OH ⁻	Ión hidroxilo
Pb	Plomo
PCB's	Bifenilos policlorinados
PST	Partículas suspendidas totales
PM	Material particulado
PM _{2.5}	Material particulado menor o igual a 2.5 micrómetros
PM ₁₀	Material particulado menor o igual a 10 micrómetros
ppm	Unidad de concentración, partes por millón
SIG	Sistema de información geográfico
SO _x	Óxidos de azufre
VOCs	Compuestos orgánicos volátiles
SENA	Servicio Nacional de Aprendizaje
IVE	Internacional Vehicle Emission Model
µm	Unidad de longitud, micrómetro



3. GENERALIDADES

3.1. QUIENES DEBEN APLICAR EL PROCOLO

El presente protocolo deberá ser aplicado por las siguientes entidades en el marco de su gestión ambiental, propósito institucional y cumplimiento de regulaciones:

- Autoridades ambientales
- Empresas e industrias que realicen mediciones de calidad del aire
- Firmas consultoras, universidades, entes educativos y laboratorios ambientales que presten servicios de medición de la calidad del aire.

3.2. PROPÓSITO

El principal propósito de éste documento es ofrecer a las Autoridades Ambientales responsables de la vigilancia y el control de la calidad del aire, empresas industriales y a entidades de gestión (firmas consultoras) que realicen mediciones de calidad del aire, los lineamientos básicos para llevar a cabo actividades de monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en zonas urbanas y/o industriales del territorio nacional.

El protocolo brinda elementos básicos para la operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, su tratamiento, análisis, interpretación, presentación y reporte de la información recolectada.

De la misma forma, se busca que los responsables de tales actividades de gestión vayan más allá del monitoreo de la calidad del aire y se orienten hacia la implementación de un PLAN DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE (PGCA) que permita el mejoramiento continuo en sus procesos en la búsqueda de la disminución del potencial deterioro de calidad del aire y la salud pública.

El protocolo busca dar respuestas a las siguientes preguntas:

- ¿Por qué se evalúa la calidad del aire?
- ¿Cómo debe efectuarse la vigilancia de la calidad del Aire?
- ¿Cuándo se debe establecer un sistema de vigilancia?
- ¿Dónde se debe efectuar la vigilancia de la calidad del Aire?
- ¿Quién debe efectuar la evaluación de la calidad del aire?
- ¿Cómo se evalúa la calidad de los datos obtenidos?
- ¿Cómo se reporta la calidad del aire?

Lo anterior con el fin de obtener el mayor beneficio en el conocimiento de la calidad del aire y sus tendencias con el menor costo económico posible de acuerdo a las condiciones ambientales del país.

Este documento pretende convertirse en una guía práctica para la gestión de la calidad del aire haciendo énfasis en el monitoreo con todos sus componentes para la homogenización de toma de datos e interpretación de resultados por parte de Autoridades y particulares de modo que sean insumos del Sistema de Información sobre Calidad del Aire, SISAIRE.

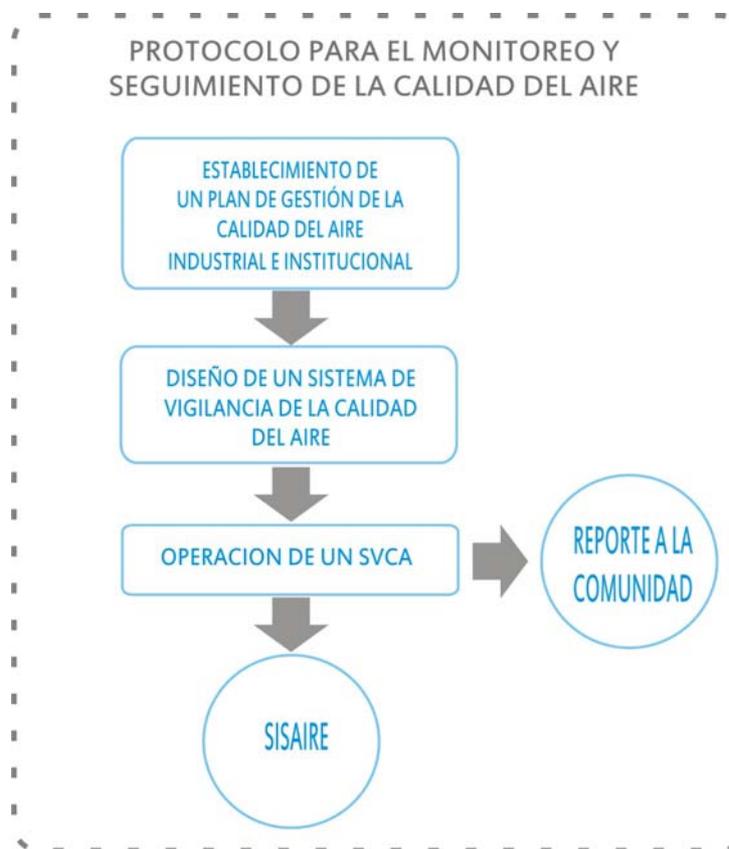


Figura 1. Uso del Protocolo.

3.3. MARCO LEGAL

Desde el año 1967 se han realizado esfuerzos para controlar la contaminación del aire. En ese año se instalaron las primeras redes de monitoreo de calidad del aire. Sólo hasta 1973, se expidió la Ley 23, cuyo objetivo era “Prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional”.

Con esta ley, se le concedieron facultades al gobierno nacional para expedir el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, el cual fue sancionado por el Presidente de la República mediante el Decreto 2811 de 1974. De este decreto, específicamente en el artículo 9, se realizó la propuesta de la norma de calidad del aire.

En 1979 se expide la Ley 09 del mismo año, por la cual se dictan medidas sanitarias para la protección del medio ambiente. Aquí se le otorgan facultades al Ministro de Salud para proferir normas para el control de la contaminación atmosférica, por lo cual en el año 1982, este ministerio expidió el decreto 02 donde se reglamentaba parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979 y también el Decreto - Ley 2811 de 1974, en cuanto a emisiones atmosféricas.

En el año de 1995 el Ministerio del Medio Ambiente (creado mediante la Ley 99 de 1993) expidió el Decreto 948, el cual derogó en algunos artículos al Decreto 02 de 1982. El Decreto 948 de 1995 contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.

A partir de ese momento, se expidieron diferentes decretos y resoluciones que modificaron o derogaron el Decreto 948 de 1995. Estos fueron:

- El Decreto 2107 de 1995, que modificó el decreto 948 sobre uso de crudos pesados, quemas abiertas, emisiones vehiculares y actividades contaminantes.
- El Decreto 1224 de 1996 que derogó el artículo 40 del Decreto 948 de 1995, sobre calidad de combustibles.
- El Decreto 1228 de 1997 que modificó el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 sobre certificación del cumplimiento de normas de emisión para vehículos automotores.
- El Decreto 1552 del 2000 que modificó el artículo 38 del Decreto 948 de 1995 y el artículo 3 del Decreto 2107 de 1995, sobre emisiones de vehículos diesel.
- El Decreto 979 del 2006 que modifica los artículos 7, 10, 93, 94 y 106 del Decreto 948 de 1995.
- Resolución 619 de 1997 sobre factores que requieren permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas.
- Resolución 601 de 2006 la cual establece la norma de calidad del aire o Nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. Esta norma deroga parcialmente el Decreto 02 de 1982, y su objetivo es “establecer la norma de calidad del aire o nivel de inmisión, con el propósito de garantizar un ambiente sano y minimizar los riesgos sobre la salud humana que puedan ser causados por la concentración de contaminantes en el aire ambiente.”
- Decreto número 979 del 03 abril 2006 por el cual se modifican los artículos 7, 10, 93, 94 y 108 del Decreto 948 de 1995. Dicho decreto reglamenta la declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia y las áreas fuente de contaminación.

En la Tabla 1 aparecen los niveles máximos permitidos de calidad del aire para Colombia, establecidos en la Resolución 601 del 2006. Estos valores se calculan con el promedio geométrico para PST y aritmético para los demás contaminantes¹⁷:

¹⁷ Resolución 601 de 2006



Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

CONTAMINANTE	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
PST	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 horas
PM ₁₀ *	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70	Anual
		150	24 horas
SO ₂	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.031 (80)	Anual
		0.096 (250)	24 horas
		0.287 (750)	3 horas
NO ₂	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.053 (100)	Anual
		0.08 (150)	24 horas
		0.106 (200)	1 hora
O ₃	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.041 (80)	8 horas
		0.061 (120)	1 hora
CO	ppm (mg/m^3)	8.8 (10)	8 horas
		35 (40)	1 hora

Nota: mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$: a las condiciones de 298.15° K y 101.325 KPa. (25 °C y 760 mm Hg).
 * El límite máximo permisible anual de PM₁₀ en el año 2009 será 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el año 2011 será 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Tabla 2 se indican las concentraciones y los tiempos de exposición bajo los cuales las autoridades ambientales competentes pueden declarar los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia¹⁷.

Tabla 2. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia

CONTAMINANTE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	UNIDADES	PREVENCIÓN	ALERTA	EMERGENCIA
PST	24 horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	375	625	875
PM ₁₀	24 horas	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	300	400	500
SO ₂	24 horas	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.191 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO ₂	1 hora	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2,000)
O ₃	1 hora	ppm ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8 horas	ppm (mg/m^3)	14.9 (17)	29.7 (34)	40.2 (46)

Nota: mg/m^3 o $\mu\text{g}/\text{m}^3$: a las condiciones de 298.15° K y 101.325 KPa. (25°C y 760 mm Hg)

A continuación se transcribe del Decreto número 979 lo que tiene que ver con la declaratoria de áreas fuente de contaminación:

Artículo 108. Clasificación de “Áreas - fuente” de contaminación.

Las autoridades ambientales competentes deberán clasificar como áreas - fuente de contaminación zonas urbanas o rurales del territorio nacional, según la cantidad y características de las emisiones y el grado de concentración de contaminantes en el aire, a partir de mediciones históricas con que cuente la autoridad ambiental, con el fin de adelantar los programas localizados de reducción de la contaminación atmosférica.

En esta clasificación se establecerán los distintos tipos de áreas, los límites de emisión de contaminantes establecidos para las fuentes fijas y móviles que operen o que contribuyan a la contaminación en cada una de ellas, el rango o índice de reducción de emisiones o descargas establecidos para dichas fuentes y el término o plazo de que éstas disponen para efectuar la respectiva reducción.

Para los efectos de que trata este artículo las áreas - fuente de contaminación se clasificarán en cuatro (4) clases, a saber:

- Clase I - Áreas de contaminación alta: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación o dispersión, excede con una frecuencia igual o superior al setenta y cinco por ciento (75%) de los casos de la norma de calidad anual. En estas áreas deberán tomarse medidas de contingencia, se suspenderá el establecimiento de nuevas fuentes de emisión y se adoptarán programas de reducción de la contaminación que podrán extenderse hasta por diez (10) años.
- Clase II- Áreas de contaminación media: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación y dispersión, excede con una frecuencia superior al cincuenta por ciento (50%) e inferior al setenta y cinco por ciento (75%) de los casos la norma de calidad anual. En estas áreas deberán tomarse medidas de contingencia se restringirá el establecimiento de nuevas fuentes de emisión y se adoptaran programas de reducción de la contaminación que podrán, extenderse hasta por cinco (5) años.
- Clase III- Áreas de contaminación moderada: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación y dispersión, excede con una frecuencia superior al veinticinco por ciento (25%) e inferior al cincuenta por ciento (50%) de los casos la norma de calidad anual. En estas áreas se tomarán medidas dirigidas a controlar los niveles de contaminación y adoptar programas de reducción de la contaminación, que podrán extenderse hasta por tres (3) años.
- Clase IV- Áreas de contaminación marginal: aquellas en que la concentración de contaminantes, dadas las condiciones naturales o de fondo y las de ventilación y dispersión, excede con una frecuencia superior al diez por ciento (10%) e inferior al veinticinco por ciento (25%) de los casos la norma de calidad anual. En estas áreas se tomarán medidas dirigidas a controlar los niveles de contaminación que permitan la disminución de la concentración de contaminantes o que por lo menos las mantengan estables.

Parágrafo Primero: Para la estimación de la frecuencia de las excedencias se utilizarán medias móviles, las cuales se calculan con base en las mediciones diarias.

Parágrafo Segundo: Para la clasificación de que trata el presente artículo, bastará que la frecuencia de excedencias de un solo contaminante, haya llegado a los porcentajes establecidos para cada una de las áreas de contaminación.

En el Anexo 2 del Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire se incluye un ejemplo detallado sobre el procedimiento de cálculo para la determinación de áreas fuente de contaminación.



3.4. ESTRUCTURA DEL PROTOCOLO

El protocolo está constituido por tres manuales que presentan los lineamientos para el diseño y operación de SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE en el marco de un PLAN DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE.



Figura 2. Estructura del Protocolo.

MANUAL DE ELABORACION DE PLANES DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE: Contiene los lineamientos para el diseño de un Plan de Gestión de la Calidad del Aire (PGCA)

MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE: Contiene todos los lineamientos y elementos conceptuales para diseñar un SVCA.

MANUAL DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE: Explica la forma y los procedimientos para operar un SVCA.

4. SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL MARCO DE LOS PGCA

4.1. PLANES DE GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE

Un Plan de Gestión de la Calidad del Aire (PGCA) es un conjunto de procesos, procedimientos y normas cuyo propósito es reducir el impacto que ocasionan al ambiente atmosférico y la salud pública diferentes tipos de fuentes. La aplicación de un PGCA involucra el estudio de la relación fuente-receptor y sus implicaciones en la calidad del aire mediante la utilización de diferentes metodologías y técnicas de investigación.

Es importante destacar que los Planes de Gestión de la Calidad del Aire (PGCA) permiten establecer una mayor comprensión de los procesos productivos e industriales que ocasionan los impactos en mención, así como estimar las consecuencias de éstos en la calidad del aire y tomar las acciones de control más acertadas para minimizarlos.

El siguiente esquema (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) ilustra las posibles etapas de un Plan de Gestión de la Calidad del Aire.



Figura 3. Etapas involucradas en el PGCA¹⁸.

La Figura 4, ilustra varias herramientas técnicas de apoyo al del PGCA, estas se relacionan a continuación:

¹⁸ Tomado de Environmental management systems. An imlementation guide for a small and médium-sized organizations. NSF International. Ann Arbor Michigan. Enero de 2001

- Inventario de emisiones.
- Estudio de dispersión de contaminantes y creación de modelos a mesoescala.
- Monitoreo de la calidad del aire.
- Evaluación de los riesgos ambientales para la salud (estudios epidemiológicos).
- Evaluación de daños por contaminación.
- Análisis del costo ambiental de la contaminación atmosférica.
- Determinación de opciones de mitigación y control.
- Evaluación costo-beneficio de opciones de mitigación y control.
- Establecimiento de regulaciones y medidas de control.
- Desarrollo de programa educativo.

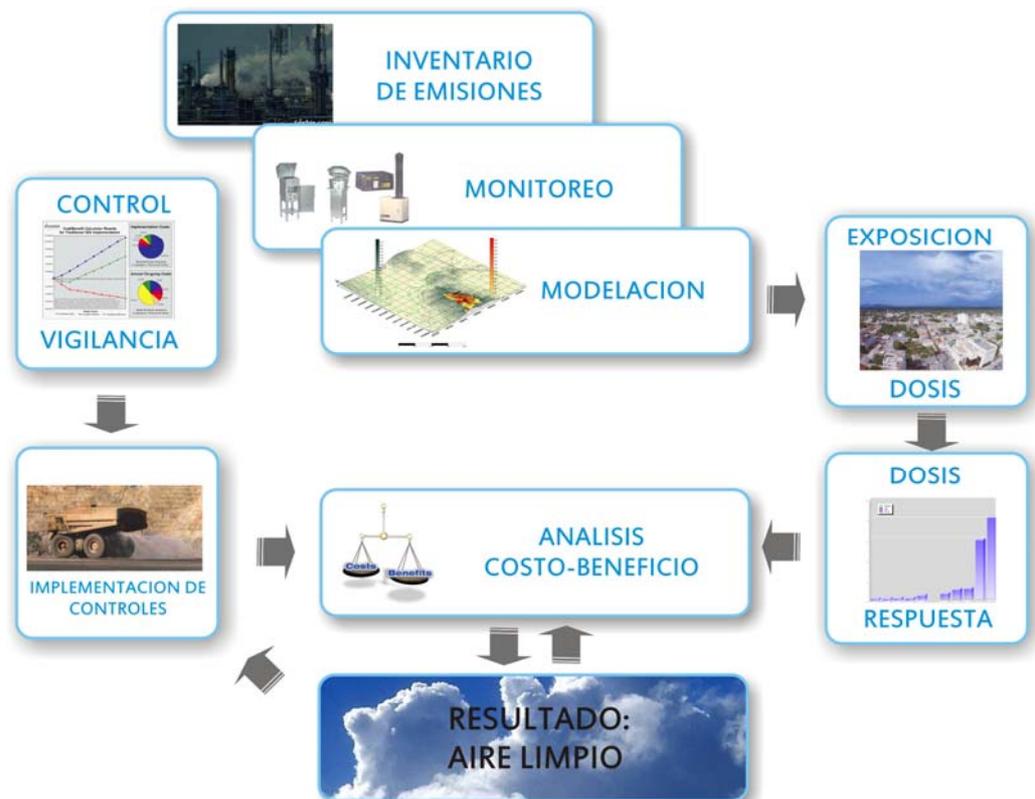


Figura 4. Herramientas de un PGCA¹⁹

Para el desarrollo de un PGCA se han definido tres herramientas básicas, estas son: a) Inventario de emisiones, medición y vigilancia de los contaminantes, b) modelación, y c) las políticas adoptadas, todas estas se integran en un programa de gestión de la siguiente manera:

- La medición y los inventarios de emisiones proveen fundamentos científicos y técnicos para el desarrollo de las políticas y estrategias. la cuantificación del impacto generado en términos de pérdida de calidad del aire y sus efectos en la salud de la población (en comparación con estándares y con información de morbilidad - mortalidad) y hacen posible la cuantificación del

¹⁹ Basado en <http://www.nilu.no>

efecto que producen las medidas adoptadas (evaluación de su impacto) y el costo de su implementación (evaluación económica de su implementación). Sin embargo, estas herramientas utilizadas con el mayor rigor técnico sólo entregan una imagen parcial - útil- de los comportamientos de las variables de contaminación del aire en espacio y tiempo determinados para una ciudad o región.

- La modelación de la calidad del aire permite formular políticas integrales y ajustar las existentes al predecir los efectos de éstas, al poder evaluar escenarios futuros, considerando diferentes alternativas y medidas de control de las emisiones y predecir sus efectos.
- Las políticas estructuradas a partir de los resultados anteriores orientan acciones de control tales como límites de emisión, declaraciones de emergencia, restricciones a usos del suelo o el uso de combustibles, etc.; cuyos efectos son determinados a través de la vigilancia, cerrando así el ciclo del plan o Sistema.

Un PGCA puede ser implementado a varias escalas tanto a nivel micro (a nivel de un usuario o industria) como a nivel local, regional o nacional variando así la forma, dimensión, grado de influencia, implicaciones, y naturaleza de las acciones de control.

4.1.1. ETAPAS DE UN PGCA

Un Sistema de Gestión en la Calidad del Aire PGCA se compone de una serie de etapas²⁰ que buscan determinar los mecanismos, responsabilidades, medidas y recursos para mejorar la calidad del aire. Estas etapas son las siguientes:

- A. REVISIÓN INICIAL
- B. COMPROMISO INSTITUCIONAL PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE
- C. PLANEACIÓN
 - Evaluación de la Calidad del Aire
 - Revisión de requisitos Legales
 - Definición de Objetivos y metas
 - Programas de Gestión de la Calidad del Aire
- D. IMPLEMENTACIÓN
 - Estructura y Responsabilidad
 - Capacitación y Competencia
 - Reporte a la Comunidad
 - Documentación
 - Control Operacional
 - Planes de Emergencia y Contingencia
- E. VERIFICACIÓN Y ACCIÓN CORRECTIVA
 - Seguimiento y Medición
 - No Conformidades y Acción Preventiva y Correctiva
 - Registros
 - Auditoria
- F. REVISIÓN DE LA DIRECCIÓN

²⁰ Planteado por K-2 INGENIERIA LTDA. bajo el esquema ISO 14000.



4.2. IMPLEMENTACIÓN DE UN SVCA EN EL MARCO DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE.

Un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire SVCA es un conjunto de procesos, herramientas e instrumentos que tienen como fin el determinar los niveles de inmisión que se dan en un área determinada.

Los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire -SVCA- son una herramienta fundamental en el desarrollo de los Planes de Gestión de la Calidad del Aire. Se relacionan en los siguientes aspectos:

Permite plantear objetivos del PGCA: Durante la etapa de diseño de un SVCA se obtiene un diagnóstico de la calidad del aire de un área determinada que se convierte no solo en elemento de diseño del Sistema sino en el punto de partida de objetivos y metas del PGCA.

Verifica el cumplimiento de objetivos del Plan de Gestión de la Calidad del Aire: Dado que el fin último de un PGCA es el mejorar o mantener la calidad del aire de un área determinada, es necesario tener una herramienta que indique el cumplimiento de este objetivo. Un SVCA en su operación está permanentemente obteniendo datos de calidad del aire y consecuentemente indicando si las acciones de reducción han tenido repercusión en la calidad del aire.

5. TIPOS DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE SEGÚN SU TECNOLOGÍA

De acuerdo al tipo de instrumentos que utiliza para su operación los SVCA podrán ser:

SVCA Manuales: SVCA totalmente manuales, constituidos por equipos muestreadores.

SVCA Automáticos: SVCA constituidos totalmente por equipos y sistemas automáticos.

SVCA Híbridos: SVCA constituidos por la combinación entre equipos manuales y automáticos.

Como ya se ha planteado anteriormente, un SVCA independientemente del tipo de tecnología que emplee, tiene como principal objetivo de funcionamiento medir la cantidad presente de determinados contaminantes en el aire de determinadas regiones o áreas.

Para realizar las mediciones de la concentración de contaminantes atmosféricos, los SVCA están conformados por equipos que bien pueden ser únicamente muestreadores ó analizadores propiamente dichos.

Los muestreadores, son equipos que como su nombre lo indica, solo pueden ser empleados para la recolección de muestras, las cuales posteriormente deben ser llevadas al laboratorio para desarrollar los análisis físico-químicos pertinentes y realizar las respectivas cuantificaciones de la presencia del contaminante deseado; los muestreadores sólo pueden ser de dos tipos: manuales o semiautomáticos. Por otra parte se tienen los equipos analizadores, estos a diferencia de los muestreadores, no solo recolectan la muestra sino que internamente cuentan con los accesorios necesarios para que a partir de procedimientos como fluorescencia UV, quimioluminiscencia, absorción infrarroja, absorción de rayos beta y microbalanza puedan ser determinadas las concentraciones de cada contaminante específicamente, los analizadores corresponden a equipos automáticos. En las secciones 6.2 y 7.2 de este mismo manual se encuentran resumidos los principios de funcionamiento tanto para los equipos manuales, como para los automáticos, y en el Anexo 1 se detalla los procedimientos de referencia de muestreo y determinación para los diferentes contaminantes.

Cabe mencionar que la principal ventaja de los equipos semiautomáticos en comparación con los manuales, es que permite la recolección de muestras durante varios días, sin necesidad de la presencia del operador para el cambio de medio mustrante; por ejemplo, un equipo semiautomático de material particulado realiza un muestreo cada 24 horas al igual que un manual pero después de dicho período, el mismo equipo cambia el medio filtrante e inicia un nuevo monitoreo y así sucesivamente hasta que se agoten los medios filtrantes para los cuales tiene capacidad.

A continuación se presentan los procesos de operación para SVCA Manuales y SVCA Automáticos así como algunas particularidades de los SVCA Híbridos teniendo en cuenta que estos últimos usan la combinación de procedimientos de los dos anteriores.

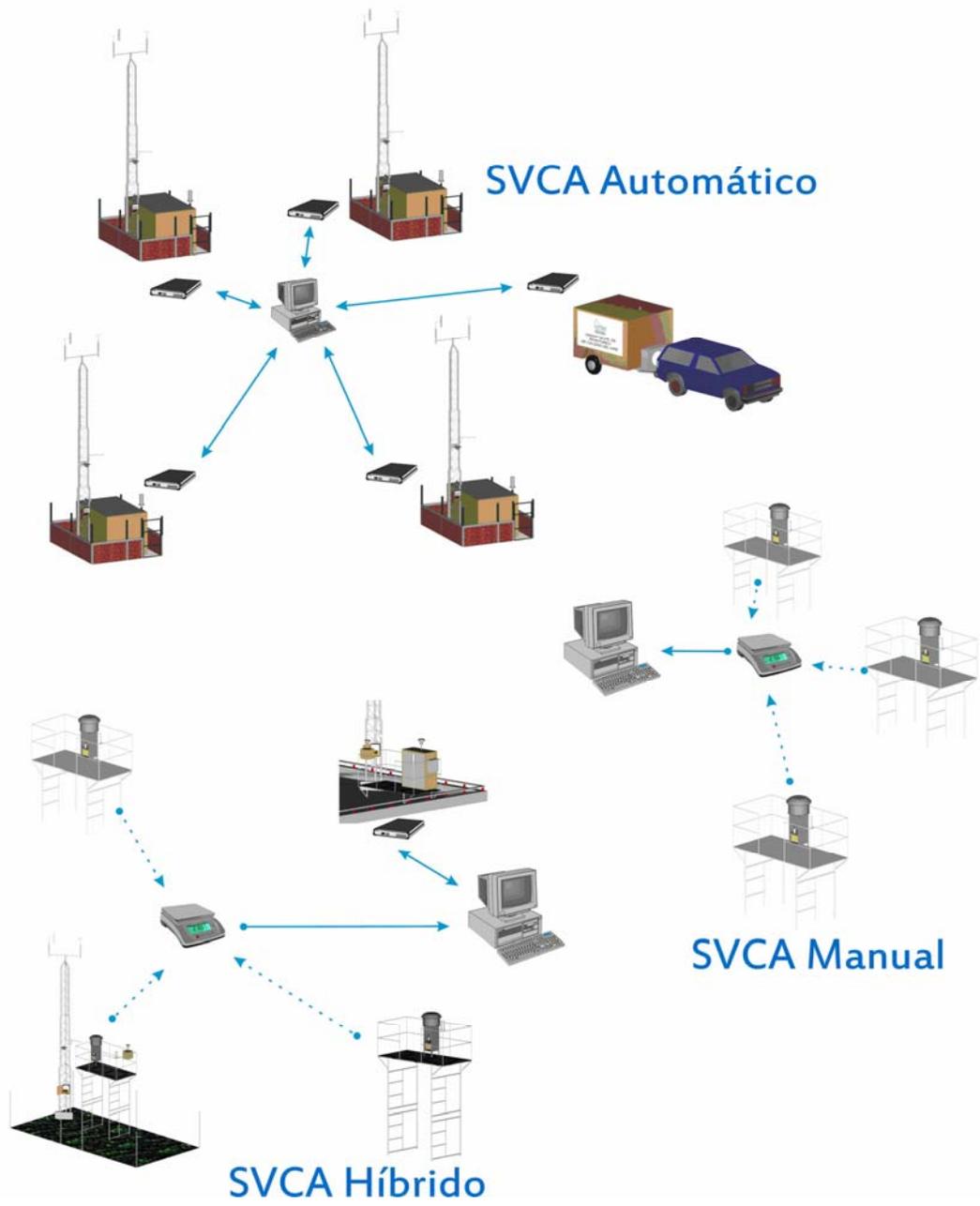


Figura 5. Tipos de SVCA según su tecnología.

6. SISTEMAS MANUALES PARA LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

A continuación se describen los procedimientos para la determinación de concentraciones de contaminantes para los parámetros que hacen parte de un SVCA Manual.

6.1. GENERALIDADES

Los Sistemas de Vigilancia en la Calidad del Aire SVCA manuales se caracterizan por requerir de un laboratorio como apoyo para el análisis de las muestras tomadas. Requieren además, de una rutina para la recolección de las muestras, de acuerdo con una periodicidad preestablecida.

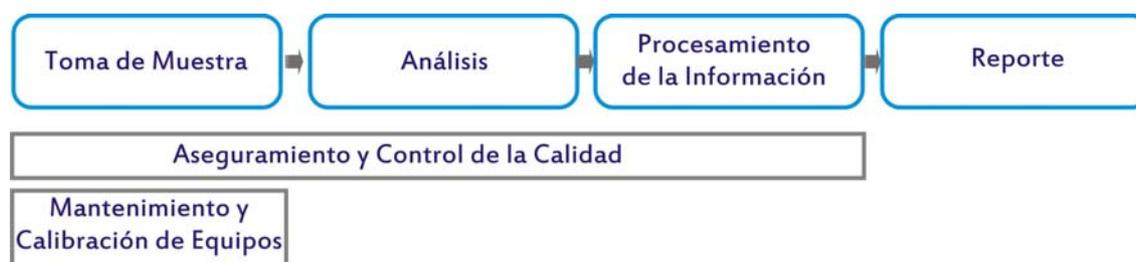


Figura 6. Proceso general de operación de un SVCA Manual.

La Figura 6 muestra las etapas generales de operación de un SVCA manual. Como se observa, el sistema consta de cuatro etapas principales y dos de apoyo, como son: Aseguramiento y Control de la Calidad y Mantenimiento y Calibración de los Equipos.

La operación de todo SVCA debe estar amparada en un plan que defina la secuencia en la cual se desarrollarán cada una de las etapas y los responsables de su ejecución, de modo que el proceso se mecanice y se lleve a cabo garantizando la calidad de la información tomada.

El mecanismo que garantiza la efectividad del proceso y la calidad de la información es el Plan de Calidad del SVCA, el cual deberá desarrollarse a lo largo de todo el proceso a fin de garantizar la confiabilidad de la información reportada. Dentro de este plan se incluyen las actividades de mantenimiento y calibración de equipos, que garantizan su operatividad y la veracidad de las lecturas y registros de las muestras tomadas.

Dentro de la elaboración del Plan de Calidad se debe hacer un flujo detallado del proceso que permita establecer actividades rutinarias y no rutinarias a realizar. La Figura 7 muestra un ejemplo de flujo de proceso específico. Posteriormente serán descritas las etapas de toma de muestra, análisis, procesamiento de la información, generación de reportes, control y aseguramiento de calidad y mantenimiento de equipos, involucradas bajo el marco de operación de un SVCA Manual.



Figura 7. Ejemplo flujo de proceso de un SVCA Manual.
 (Tomado de Plan de Calidad Red de Calidad del Aire Zona Minera-CORPOCESAR)

6.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN

6.2.1. TOMA DE MUESTRA

Esta etapa comprende todos los procedimientos relacionados con la toma de muestras en un SVCA Manual y estará compuesta por las siguientes fases:

- Premuestreo: actividades de preparación de filtros y medios previos al inicio de la ruta de muestreo. Esta actividad se lleva a cabo en el laboratorio.
- Muestreo: Comprende todas las actividades de toma de muestra que se desarrollan en campo.
- Postmuestreo: Son las actividades que se llevan a cabo en laboratorio con la muestra tomada.

A continuación se muestran los diagramas de flujo para la determinación de los contaminantes del aire de referencia durante la operación de un SVCA Manual. El Anexo 1, del presente documento muestra los procedimientos específicos para dichos contaminantes que deben ser llevados a cabo cumpliendo los lineamientos del presente protocolo.

6.2.1.1. Determinación de concentración de material particulado: PST, PM₁₀, PM_{2.5}

Los siguientes diagramas detallan cada una de las actividades a realizar previamente a la realización del muestreo, durante el muestreo y de manera posterior a la realización de este ²¹:

²¹ Tomado de Diagramas de Flujo Área Metropolitana del Valle de Aburra

A. Diagrama de Flujo de Pre-muestreo

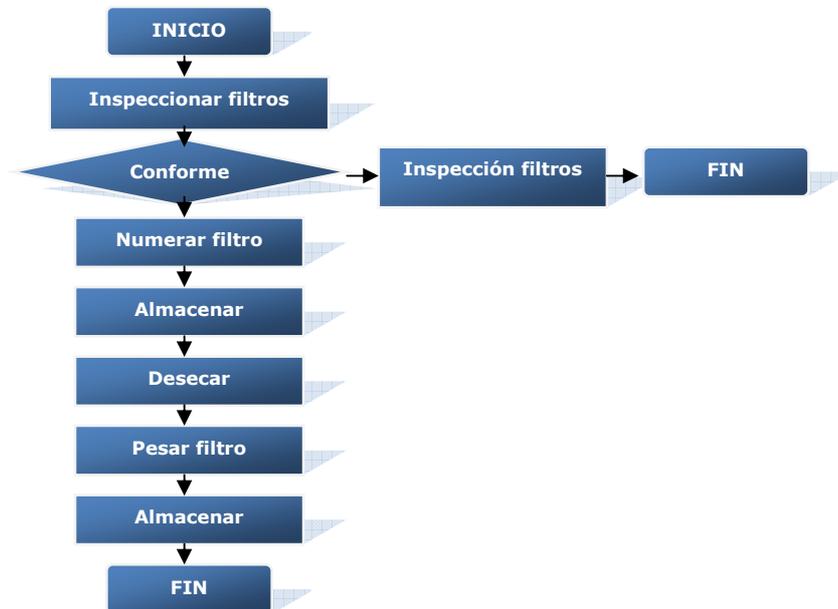


Figura 8. Pasos previos en la realización de muestreos de material particulado.

B. Diagrama de Flujo del Muestreo

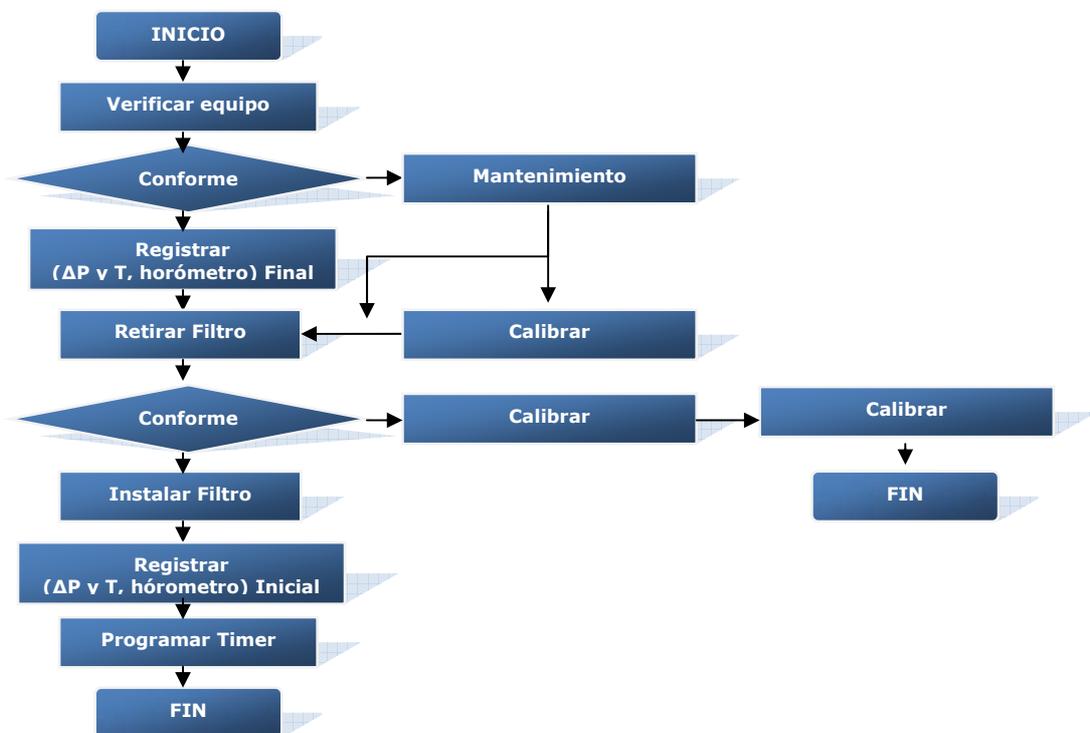


Figura 9. Pasos a realizar en los muestreos de material particulado.

C. Diagrama de Flujo de Post-muestreo



Figura 10. Pasos a realizar después del muestreo de material particulado.

6.2.1.2. *Determinación de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno*

A. Diagrama de Flujo de Pre-muestreo



Figura 11. Pasos previos en la realización de un muestreo de SO₂ y NO_x.

B. Diagrama de Flujo del Muestreo

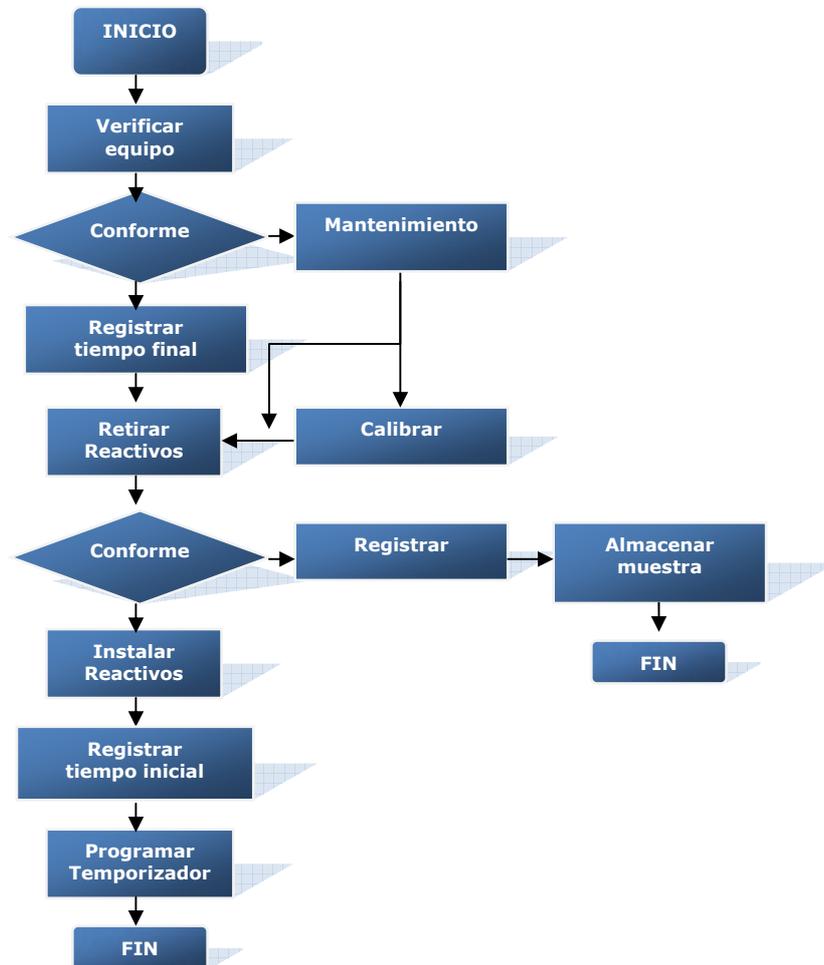


Figura 12. Pasos a realizar en los muestreos de SO₂ y NO_x.

C. Diagrama de Flujo de Post-muestreo



Figura 13. Pasos a realizar después del muestreo de SO₂ y NO_x.

6.2.2. ANÁLISIS DE LABORATORIO

Comprende todas aquellas actividades que se realizan en el laboratorio con el fin de obtener las concentraciones de contaminantes monitoreados. En el Anexo 1 se describen los procedimientos de análisis respectivos para los contaminantes de referencia.

Este proceso se compone de las siguientes partes:

- **Análisis de laboratorio:** Técnicas y procedimientos analíticos realizados en la muestra para obtener valores que puedan ser relacionados posteriormente con la concentración del respectivo contaminante.
- **Cálculos:** Manejo de los datos tomados durante el muestreo, que conjuntamente con los resultados del laboratorio, permiten estimar la concentración de un determinado contaminante.

6.2.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Consiste en la determinación de ciertos factores puntuales que pudieron afectar el muestreo para proceder a su validación y posterior inclusión en la base de datos. Durante esta etapa se realiza el análisis y la consolidación de los datos con el fin de llegar a conclusiones acerca de la calidad del aire correspondiente al dominio del SVCA. Es en esta etapa donde se deben cumplir los objetivos previstos para el Sistema. En el capítulo Etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9), se muestra la forma en que debe realizarse el procesamiento de la información.

6.2.4. REPORTE

El reporte es el resultado del trabajo operativo del SVCA que es entregado a la comunidad. Dependiendo del SVCA del aire, dicho reporte tendrá unas características específicas como su publicación en páginas web o a través de informes físicos impresos. La forma específica de los reportes se presenta en el capítulo Etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9) en donde se muestran los componentes mínimos de cada uno de los reportes.

6.2.5. CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Consiste en el conjunto de procesos y requerimientos que garantizan la confiabilidad de la información. Esta actividad debe llevarse a cabo a lo largo de todas las etapas de la operación del SVCA. El capítulo Etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9) describe la forma como se debe llevar a cabo el Plan de Aseguramiento y Control de la Calidad. En resumen, todo SVCA debe tener un Plan de Calidad implementado que garantice la confiabilidad de la información.

6.2.6. MANTENIMIENTO DE EQUIPOS Y CALIBRACIÓN

Cada SVCA debe tener un programa de Mantenimiento Preventivo. Este programa define las acciones generales a seguir para evitar fallas en el sistema, lo cual redunda en la confiabilidad de los datos. En dicho sistema se definen las rutinas de chequeo y limpieza de partes, así como también las frecuencias de éstas actividades. Se recomienda referirse al manual del fabricante para rutinas de mantenimiento específicas.

El mantenimiento de los equipos garantizará la continuidad en la toma de muestras en el SVCA. Un estricto programa de mantenimiento preventivo y correctivo debe incluirse en el Plan de Calidad del SVCA. De todos los mantenimientos realizados se debe llevar registro según se especifique en dicho plan.

6.2.6.1. *Rutinas y frecuencias de mantenimiento recomendadas para equipos Hi Vol.*

Por cada visita al lugar:

- Verificar el nivel del flujo antes y después del muestreo.
- Verificar el contador de tiempo antes y después del muestreo.
- Revisar los empaques de la placa de fijación y observar posible desgaste en exceso.

Mensualmente:

- Llevar a cabo la calibración del muestreador.
- Limpiar de todo polvo el área del cabezote (inlet) de muestreo.

Trimestralmente:

- Verificar el número de horas de operación desde el último cambio de escobillas. Por lo regular, las escobillas del motor deben reponerse después de 600 a 1000 horas de operación a un voltaje normal de línea. Una vez repuestas las escobillas, debe recalibrarse el muestreador de alto volumen. Sin embargo, esto no debe hacerse sino hasta después de un período inicial de asentamiento para asegurar el acoplamiento adecuado de las escobillas contra la armadura del motor. Se debe inspeccionar la armadura y cambiar el motor si la armadura muestra un desgaste excesivo. Inspeccionar el cableado en busca de alambres quemados. Limpiar el polvo del motor.
 - Inspeccionar el estado de todos los empaques, reponer si se encuentran con desgastes excesivos.
 - Operación del registrador de flujo. Asegurarse que la pluma pueda moverse libremente, de no ser así, revisar el registrador para determinar la causa. Si la impresión es ilegible, verificar que la pluma no se encuentre seca; reponerla de ser necesario. Una vez repuesta la pluma, encender el muestreador brevemente, con un filtro en su lugar, para confirmar que está funcionando correctamente.
 - Realizar el procedimiento de calibración descrito en el Anexo 1, Manual de Procedimientos, o
- 

- de acuerdo con las instrucciones del fabricante del equipo.
- Control de flujo. Revisar el controlador de flujo por ausencia de registro de flujo o si se registran valores bajos, excesivos o erráticos.

6.2.6.2. *Calibración de equipos muestreadores de partículas Hi Vol.*

El equipo muestreador de alto volumen está provisto de un dispositivo de control de flujo, cuya acción sobre el circuito eléctrico conectado al motor regula su velocidad y por lo tanto, su capacidad de succión. La calibración se fundamenta en la posición del dispositivo de control de flujo que permita una aspiración de aire en el rango deseado, es decir de 1.1 a 1.7 m³/min. En resumen, la calibración del equipo consiste básicamente en una verificación del flujo.

El equipo debe ser calibrado en los siguientes casos o eventos:

- Una vez sea instalado.
- Después de cambio de motor.
- Después de cambio de escobillas.
- Cuando se cambia el sitio de muestreo.
- Periódicamente, por lo menos cada tres meses.
- Después de 360 horas de monitoreo.

La calibración del equipo se realiza con la ayuda de un kit de calibración, el cual puede ser un juego de platos o un sistema con una resistencia de flujo variable. El juego de platos consiste en un tubo metálico y cinco platos intercambiables, con diferentes orificios que permiten varios tipos de flujo. El sistema de resistencia de flujo variable es un tubo metálico con un par de discos que permiten obtener varias aberturas al girar uno de los discos. Cada uno de estos kits de calibración posee una ecuación de calibración con su respectiva curva, la cual se obtiene a través de un patrón primario o medidor de volumen estándar de desplazamiento positivo, denominado Rootsmeter.

Por lo anterior, la calibración del equipo depende del tipo: si es volumétrico o másico. Los procedimientos de calibración y los respectivos formatos deben desarrollarse de acuerdo al documento de referencia Quality Assurance Handbook Vol II, Part II de la US EPA.

6.2.6.3. *Equipos muestreadores de tres gases*

El equipo muestreador de gases tipo Rack, consta de una caja metálica con tapa móvil y dos compartimentos. El primer compartimento tiene una bomba de vacío cuyas características cumplen las especificaciones recomendadas por la U.S. EPA 40 CFR Ap²² A (motor de 1700 rpm, 0.5HP de fuerza, presión máxima de 20 psi, 110-115 voltios y 23 pulgadas de mercurio de capacidad de vacío a nivel del mar).

En el segundo compartimento se encuentra el tren de muestreo, que va conectado a la bomba de vacío y consta de un tubo distribuidor conectado en serie a tres colectores de vidrio de boro silicato (burbujeadores) que contienen la solución absorbente para NO_x, SO_x, y un tercero, vacío, que hace las veces de trampa colectora de humedad (burbujeador trampa). El flujo de aire que

²² US EPA CFR 40 Appendix A to Part 50—Reference Method for the Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosaniline Method)



pasa a través del sistema es controlado por orificios críticos, el cual es calibrado antes y después de la colección de la muestra (24 horas). El sistema es protegido por un filtro de membrana de 8 micras colocado entre la entrada de la muestra y el primer burbujeador, y por una trampa de humedad (sílica gel) colocada entre el burbujeador trampa y la bomba de vacío (ver Figura 14).



Figura 14. Equipo Muestreador de 3 Gases.
Foto: Archivo K-2 INGENIERIA LTDA.

Adicionalmente, el colector de NO_x va empotrado en una pequeña nevera refrigerada con hielo seco o hielo con salmuera para mantener el sistema a baja temperatura. El Dióxido de Azufre y el Dióxido de Nitrógeno son monitoreados mediante este equipo muestreador, el cual es un instrumento que utiliza un sistema húmedo de absorción de gases con químicos en estado líquido.

6.2.6.4. Calibración de equipos muestreadores de tres gases

Este procedimiento se efectúa empleando una unidad de calibración tipo burbuja, tal como se describe a continuación:

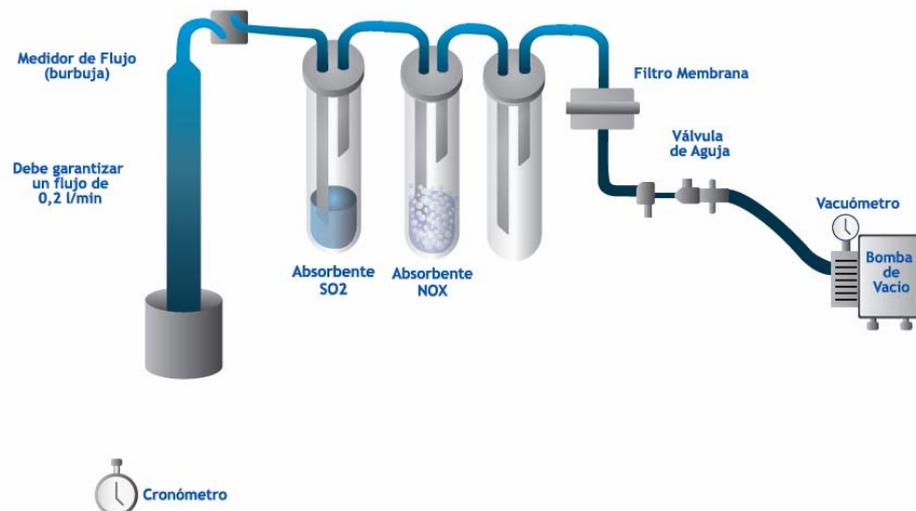


Figura 15. Montaje del calibrador de burbuja.

- Ensamble el equipo como muestra la Figura 15.
- Llene los tubos de muestreo con 50 ml. de agua destilada.

- Revise las conexiones.
- Encienda la bomba de vacío y verifique la presión manométrica.
- Verifique el funcionamiento de los burbujeadores en el tren de muestreo.
- Forme una burbuja, mida y registre el tiempo de viaje entre las marcas de volumen conocido en el calibrador de burbuja, repita esta operación como mínimo tres veces; hasta que los tiempos de recorrido no difieran entre sí en más del 5%. Registre la información en el formato para calibración de orificios críticos.
- Promedie el tiempo de viaje para 8 corridas.
- Corrija el volumen desplazado a condiciones de referencia (760 mm Hg y 25 °C)
- Divida el volumen corregido por el tiempo promedio para determinar la tasa de flujo.
- La tasa de flujo para cada orificio de flujo crítico debe localizarse entre 180 y 220 ml/min, si no se cumple esta condición debe desecharse el orificio.

7. SISTEMAS AUTOMÁTICOS PARA LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE

A continuación se describe la metodología para determinar las concentraciones de los parámetros contaminantes presentes en el aire ambiente correspondientes a un SVCA Automático.

7.1. GENERALIDADES DE LA OPERACIÓN

Los Sistemas para la Vigilancia de la Calidad del Aire SVCA automáticos no requieren análisis posterior de la muestra tomada. Por medio de métodos ópticos y/o eléctricos analizan la muestra directamente proporcionando datos en tiempo real, de modo que se puedan tomar acciones inmediatas ante la ocurrencia de un evento de concentraciones altas de algún contaminante.

La Figura 16 muestra las etapas generales de operación de un SVCA automático. Como se observa, está conformado por tres secciones principales y dos de apoyo: Aseguramiento y Control de la Calidad y Mantenimiento y Calibración de Equipos.



Figura 16. Proceso general de operación de un SVCA Automático.

El análisis de la muestra es realizado de manera continua por el equipo, con base en las propiedades físicas y/o químicas del gas y sus posibles reacciones ante ciertos fenómenos, que generalmente están relacionados con la incidencia de energía en diferentes longitudes de onda; por esta razón los analizadores automáticos emplean principalmente métodos ópticos y electrónicos para el monitoreo y determinación de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos.

La operación de todo SVCA Automático debe estar amparada bajo un plan que defina cada una de las etapas de ejecución y los responsables del desarrollo de tales etapas, de modo que el proceso se mecanice y se lleve a cabo garantizando la calidad de la información tomada. El mecanismo que garantiza la efectividad del proceso y la calidad de la información es el Plan de Calidad del SVCA el cual debe desarrollarse a lo largo de todo el proceso.

Dentro de éste plan se debe incluir el mantenimiento preventivo y/o correctivo, al igual que la calibración; labores que aseguran la operatividad de los equipos y la veracidad en la lectura de las muestras tomadas. En el Plan de Calidad se debe elaborar un flujo detallado del proceso que permita establecer actividades rutinarias y no rutinarias a realizar.

Para que el esquema anterior se cumpla, se debe tener en cuenta que cada estación automática deberá tener un sistema de comunicaciones adecuado (teléfono fijo, celular, radio, etc.). De otra forma será necesaria una rutina de recolección de información, que en gran medida anularía las ventajas de la automatización. A continuación se describen cada una de las etapas de operación para un SVCA Automático.

7.2. ETAPAS DE LA OPERACIÓN.

7.2.1. TOMA DE MUESTRA Y ANÁLISIS²³

Esta etapa comprende los procedimientos relacionados con la captura de la muestra y su análisis en un SVCA Automático. A continuación se describen los métodos empleados por los equipos para el análisis de la muestra:

7.2.1.1. *Analizador de material particulado (PST, PM₁₀, PM_{2.5})*

Principio de Operación: Absorción Beta.

En este método másico para la medición de partículas el material es recolectado del aire ambiente por medio de una cinta. La intensidad de los rayos beta es medida después de que éstos son atenuados por el material particulado. La intensidad es relacionada con la masa del material particulado depositada en la cinta, después de haber efectuado las respectivas correcciones debidas a la absorción de la cinta.

El Carbono-14 o el Prometio-147 son utilizados como fuentes Beta en niveles apropiados de radiación, para los cuales no se requiere licencia. Posteriormente tales radiaciones son detectadas con un centelleador plástico.

²³ Tomado y complementado de Informe de técnicas y estrategias de monitoreo utilizadas por el DAMA en sus estaciones de monitoreo ambiental.

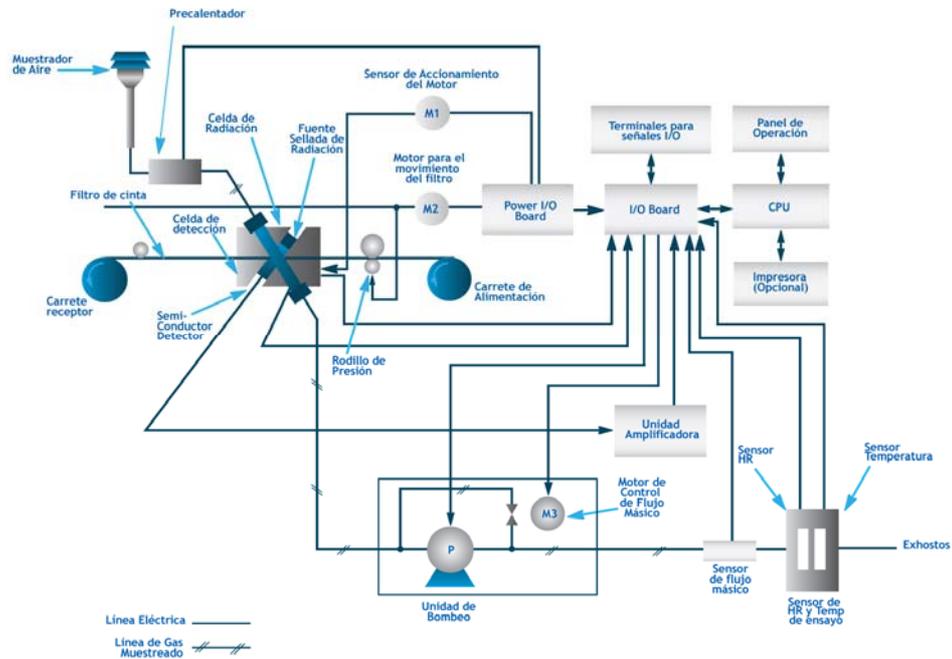


Figura 17. Esquema analizador Beta²⁴.

Principio de Operación: Tapered Element Oscillating Microbalance -

Este sistema de medición utiliza un filtro intercambiable montado al final de un tubo hueco afilado. El extremo ancho del tubo es fijo. El elemento afilado vibra en su frecuencia natural; el aire de muestreo se pasa a través del filtro, en donde se depositan las partículas. La frecuencia de vibración natural disminuye conforme aumenta la masa de material particulado en el filtro, mientras la electrónica del equipo monitorea esta frecuencia.

Este equipo basa su lectura considerando la relación física entre la masa depositada en el filtro y la frecuencia de vibración del elemento. El cambio en tiempo real de la masa es combinado con la exactitud del flujo controlado, con el ánimo de garantizar una medición precisa de la concentración del material particulado depositado.

7.2.1.2. Analizador de óxidos de azufre (SOx)

Principio de Operación: Fluorescencia Ultravioleta.

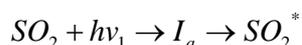
Este método está basado en la energía de luz discreta descargada o fluorescencia característica de la molécula de dióxido de azufre SO₂ cuando es irradiada con luz ultravioleta. Esta luz fluorescente está también en la región ultravioleta (UV) del espectro, aunque a una longitud de onda distinta que la radiación incidental.

²⁴ Tomado del catálogo del equipo PARTICULATE MONITOR FPM 222-223 DKK TOA Corporation

Una de las ventajas de éste método de detección es que el monitoreo a longitudes de onda comprendidas entre 190 y 230 nm, presenta poca interferencia de la fluorescencia debida a otras sustancias que puedan estar presentes en el aire ambiente y que no corresponden a lo que se desea medir. La luz es detectada por un tubo fotomultiplicador que produce un voltaje proporcional a la intensidad de la luz, la cual, a su vez, es traducida a concentraciones de SO₂ por medio de factores de calibración.

Esta tecnología utiliza dos tipos de luz, una fuente UV continua, mecánicamente interrumpida, o una fuente de luz UV electrónicamente pulsada. A longitudes de onda específicas, tanto el vapor de agua como el oxígeno, pueden distorsionar la fluorescencia de los óxidos de azufre.

Una lámpara de Xenón emite la radiación UV, la cual pasa a través de una cámara de reacción donde las moléculas de SO₂ son excitadas debido a la energía radiada, disipando parte de la energía con movimientos vibracionales y rotacionales. La reacción que describe este fenómeno es:



Debido a que por naturaleza, todo cuerpo o sustancia tiende a recuperar su estado inicial, las moléculas de SO₂ excitadas, comienzan a emitir una radiación superior en longitud de onda a la radiación aplicada (aprox. 350 nm) generando así una luz fluorescente que es detectada por el tubo fotomultiplicador (PMT), la cual es proporcional a la concentración de SO₂ en la cámara de reacción.

La absorción de radiación por las moléculas de SO₂ cumple la Ley de Lambert - Beer, que se puede expresar de la siguiente forma:

$$A = \log\left(\frac{I_a}{I_o}\right) = a \cdot x \cdot C_{SO_2}$$

Donde:

A= Absorbancia de SO₂ (adimensional)

I_a= Intensidad de la luz ultravioleta en cualquier punto del sistema (radiación resultante)

I_o= Intensidad de la luz ultravioleta incidente (radiación incidente)

a = Coeficiente de absorción del SO₂ ó absortibidad molar (l/mol.cm)

x = Longitud de la trayectoria ó camino óptico recorrido ó tamaño de la celda (cm)

C_{SO₂} = Concentración molar de SO₂ (mol/l)

El coeficiente de absorción es propio de cada sustancia y se puede encontrar en diferentes fuentes bibliográficas relacionadas con las técnicas de análisis cuantitativo para sustancias químicas²⁵.

La figura 17 es un diagrama de flujo correspondiente a un analizador de dióxido de azufre empleando la técnica de fluorescencia ultravioleta.

²⁵ Tutorial relacionado con la ley de Lambert - Beer. [on line]:
<http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/beers1.htm>



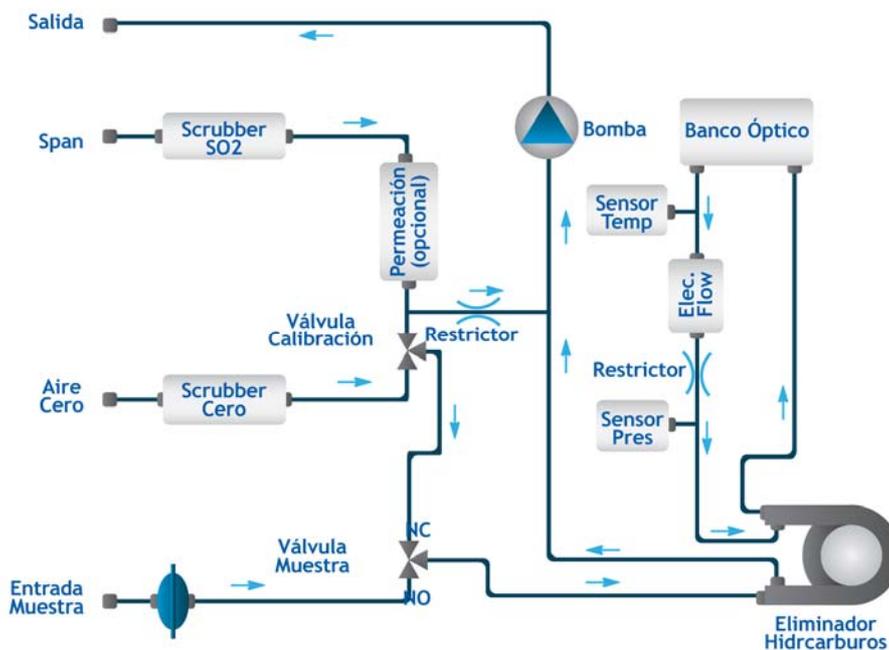


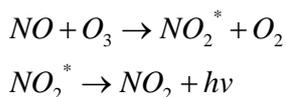
Figura 18. Diagrama de Flujo Analizador de SO₂.
(Tomado del manual del analizador de SO₂ Modelo SIR S-5001)

7.2.1.3. Analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO₂/NO_x)

Principio de Operación: Quimioluminiscencia.

La quimioluminiscencia es una técnica empleada en la determinación cuantitativa de la concentración de alguna sustancia en particular presente en una mezcla comúnmente conocida como *analito*. Es especialmente útil cuando el analito se encuentra en muy bajas concentraciones. El método se fundamenta en emplear la energía emitida por una sustancia química que haya sido excitada previamente a través de radiación generada para lograr tal fin, similar al principio de operación de los métodos por fluorescencia y por espectroscopia de emisión atómica.

Para el caso de medición de los óxidos de nitrógeno, el principio de medición consiste en provocar la reacción del monóxido de nitrógeno con el ozono para formar dióxido de nitrógeno. Parte de estas moléculas que se forman se encuentran en estado excitado como consecuencia del salto de electrones a niveles de energía más altos. Estas moléculas excitadas, al volver a su estado fundamental emiten una radiación quimioluminiscente detectable:



El aire que es succionado por el analizador desde el medio ambiente, es filtrado y dividido en dos líneas de flujo, cada uno de las cuales llega a una respectiva cámara. En una de las líneas de flujo la muestra de aire filtrado no sufre ningún tipo de sometimiento a energías radiantes, ni a agentes

químicos, es decir, que correspondería al valor blanco o testigo. En la segunda línea de flujo, se incita a la reducción del NO₂ a NO mediante acción catalítica. La primera línea de flujo llega a una cámara de reacción, donde se determina la concentración total de NO_x, y la segunda, finaliza en una cámara de reacción diferente a la anterior donde se determina la concentración de NO. La concentración de NO₂ es obtenida por la diferencia matemática entre las concentraciones de NO_x y NO.

La luz emitida, es medida en el tubo fotomultiplicador (PMT) después de pasar por un filtro óptico de banda angosta. La intensidad de luz recibida por el PMT es proporcional a la concentración de NO. La medición de NO₂ se logra convirtiendo el NO_x de la corriente de aire en NO, haciendo pasar la corriente de aire por un catalizador de molibdeno a 315 °C, que convierte el NO_x a NO como se describe en la siguiente reacción:

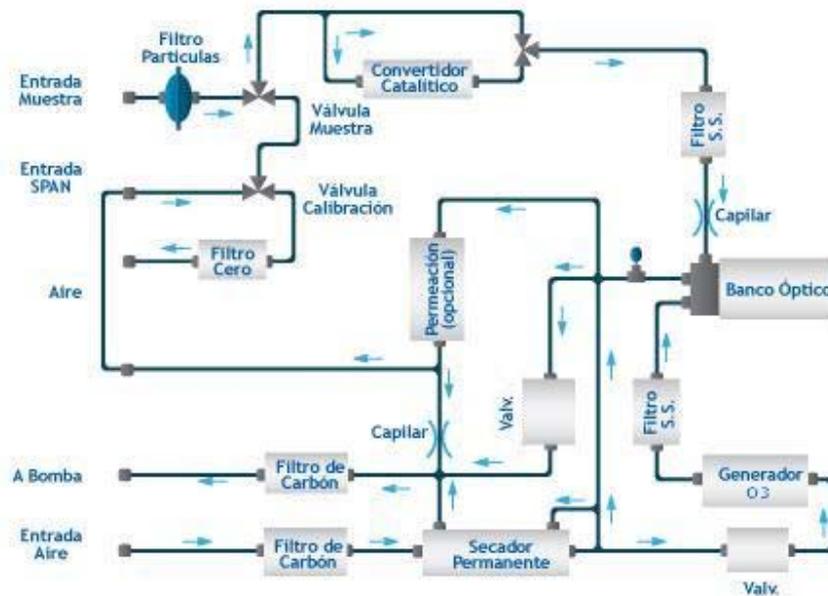
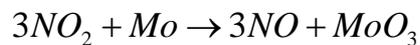


Figura 19. Diagrama de Flujo Analizador NO_x.
(Tomado del manual del Analizador de SO₂ MODELO SIR S-5012 NO_x)

7.2.1.4. Analizador de ozono (O_3)

Principio de Operación: Absorción ultravioleta

La determinación de ozono por absorción ultravioleta se basa también en la Ley de Lambert - Beer²⁶:

$$A = \log\left(\frac{I_a}{I_o}\right) = a \cdot x \cdot C_{O_3}$$

En donde:

A= Absorbancia de O_3 (adimensional).

I_a = Intensidad de la luz ultravioleta en cualquier punto del sistema (radiación resultante).

I_o = Intensidad de la luz ultravioleta incidente (radiación incidente).

a = Coeficiente de absorción del O_3 ó absorptividad molar (l/mol.cm).

x = Longitud de la trayectoria ó camino óptico recorrido ó tamaño de la celda (cm).

C_{O_3} = Concentración molar de O_3 (mol/l).

Cabe anotar que también existen analizadores de ozono cuyo principio de detección se basa en la quimioluminiscencia del ozono al reaccionar con etileno (C_2H_4). Este método presenta como desventaja, en comparación con la determinación por absorción UV, que requiere de agentes químicos reaccionantes.

El principio de operación del equipo es similar al analizador de óxidos de nitrógeno, la muestra de aire succionada por la bomba del equipo es filtrada y bifurcada en dos flujos iguales, uno de estos flujos atraviesa una sección que contiene óxidos de molibdeno como catalizador, el cual atrapa el ozono de la muestra, y esta muestra puede ser empleada como patrón en la medida, para lo cual es dirigida a una celda de medición. El otro flujo pasa directamente a una celda de medición diferente sin atravesar por ningún lecho de catalizador. En las celdas se lleva a cabo el proceso de irradiación de las muestras (la radiación UV es generada por una lámpara de mercurio) y la absorbancia en ambas celdas es determinada por un PMT.

La señal de absorbancias de ambas celdas son traducidas internamente por el analizador a señales eléctricas, y la diferencia entre estas señales es proporcional y equivalente a la concentración de ozono presente en la muestra de aire ingresada originalmente al equipo, este valor de concentración es traducida a una señal digital la cual es reportada por el datalogger y almacenada en la unidad de procesamiento del analizador, para su posterior transferencia a la central de información del SVCA.

²⁶ Equipos y sistemas de evaluación continua de contaminantes atmosféricos. [on line]: http://www.personal.us.es/jmorillo/medicion5/evaluacion_continua_resumen.pdf

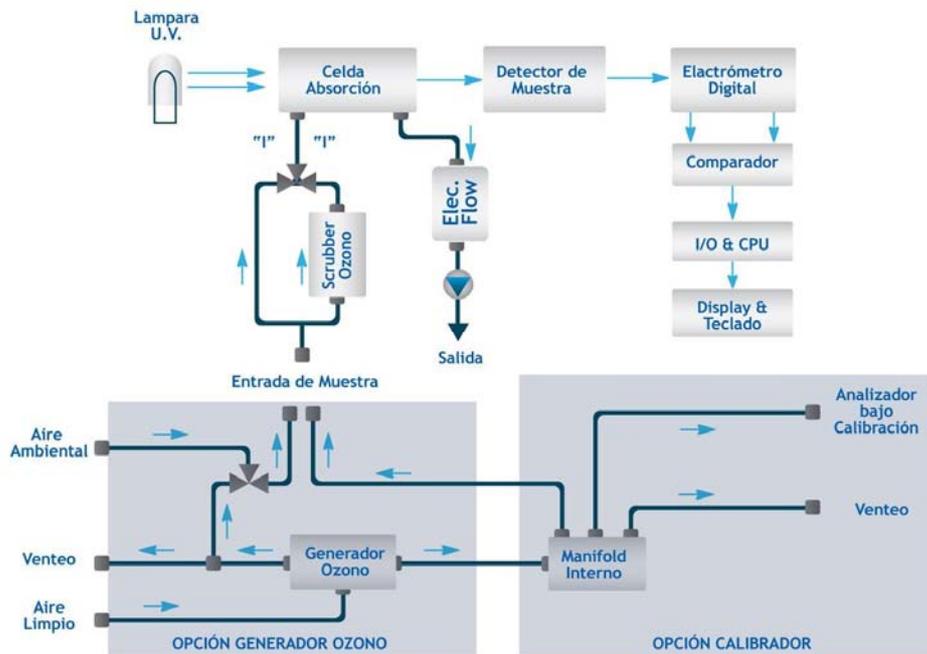


Figura 20. Diagrama de Flujo Analizador O₃.
(Tomado del manual del Analizador de O₃ MODELO SIR S-5014)

7.2.1.5. Analizador de monóxido de carbono (CO)

Principio de Operación: Correlación de filtro de gas (GFC)

La incidencia de radiación infrarroja (IR) atraviesa una rueda rotatoria filtrante de gas (una mitad contiene CO y la otra mitad contiene nitrógeno) antes de ingresar a la celda de muestra. Cuando la radiación infrarroja pasa a través de la mitad de la rueda que contiene CO, todas las longitudes de onda absorbidas por el CO son completamente removidas de la radiación, creando un rayo de "referencia" el cual no resulta afectado por el CO en la muestra que se mide. Cuando la energía IR atraviesa la mitad de la rueda que contiene nitrógeno, las longitudes de onda específicas de CO no son removidas de la radiación, y un rayo de "medición" será atenuado por CO en la muestra. La rotación de la rueda de filtro de gas crea un haz que alterna entre fases de "referencia" y "medición". La energía infrarroja que atraviesa el filtro y la celda de muestra es detectada por un sensor de estado líquido y es convertida a un valor de concentración. Los analizadores infrarrojos CFG son, en general, menos sensibles a los gases interferentes, las fluctuaciones de potencia de la fuente IR, la vibración y la acumulación de polvo en el medio óptico²⁷.

²⁷ Informe de técnicas y estrategias de monitoreo utilizadas por el DAMA en sus estaciones de monitoreo ambiental

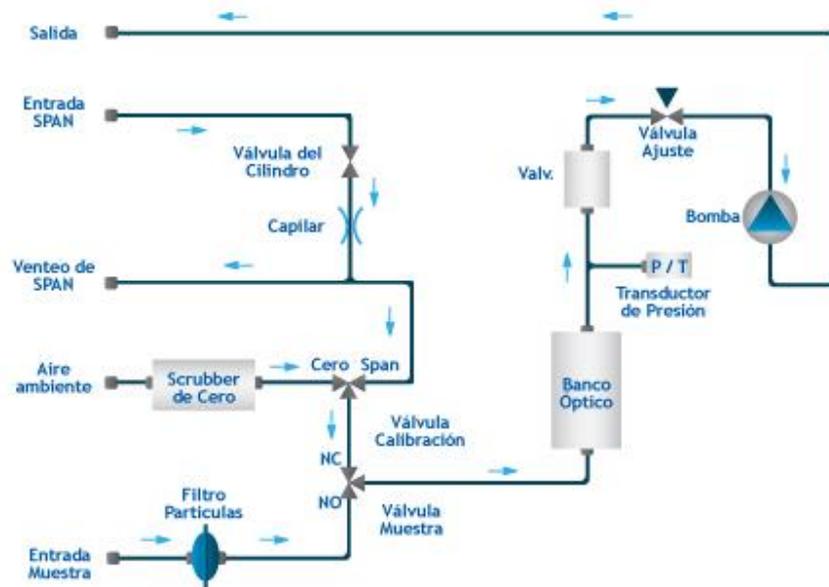


Figura 21. Diagrama de Flujo Analizador CO.
 Tomado del manual del Analizador de CO MODELO SIR S-5006

7.2.1.6. Analizador de hidrocarburos metánicos y no metánicos

Principio de Operación: Cromatografía de gases por ionización de llama.

La muestra de gas es succionada por una bomba eléctrica ubicada en el interior del analizador. El flujo de gas es controlado por el instrumento que permite el paso de muestra durante 12 segundos, después no se hace ninguna inyección de aire. El ciclo total se completa cada 3 minutos, dando como resultado un total de 20 ciclos en una hora.

En el comienzo del ciclo, la válvula inyecta el contenido de la muestra en una columna cromatográfica (consiste en un aceite de silicona ubicada sobre un soporte sólido), apareciendo en sentido descendente de la columna y en orden secuencial de tiempo, el metano seguido por otros hidrocarburos pesados.

Alcanzado el fin de la corriente, en sentido descendente de la columna y la vaselina cromatográfica, se lleva a cabo la lectura de la concentración máxima de metano. Posteriormente, los hidrocarburos que permanecen en la columna son lavados a contracorriente para así medir el pico de estos que aparece en la vaselina cromatográfica y dentro del sistema de la columna (el flujo es revertido directo en la columna) para mostrar así el pico medido de hidrocarburos no metánicos.

La muestra es transportada a un detector de llama de hidrogeno donde las concentraciones máximas de hidrocarburos son medidas. De todas las mediciones en el detector se generan señales eléctricas que son amplificadas y registradas en la pantalla y la altura de los picos de los componentes del gas, las cuales se expresan como concentraciones.

7.2.1.7. Otros elementos necesarios para la operación de SVCA automáticos

Con el fin que los equipos automaticos funcionen adecuadamente y puedan ser calibrados, es necesario que cuenten con equipos accesorios y gases patrón que garantizarán la confiabilidad de los resultados del monitoreo. Estos accesorios son:

Generador de aire cero

Es un sistema simple capaz de producir aire seco de alta calidad libre de partículas. Están diseñados para remplazar cilindros de gas como fuente estándar de calibración.

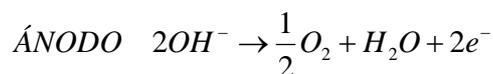
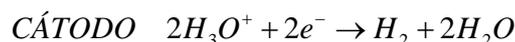
La operación consiste en llevar el aire ambiente al generador de aire cero donde este es comprimido y luego purificado usando una combinación de desecantes y filtros. Hay dos juegos de cánter de desecantes, los cuales tienen que ser llenados periódicamente; bajo uso normal, duraran hasta seis meses. El otro juego de cánter contiene carbón, purafil y paladio en alúmina, un catalítico que no es consumible. Se debe tener en cuenta el cambio periódico del filtro.

Calibrador dinámico por dilución

Permite realizar dilución de gases y efectuar calibraciones a los analizadores de gases. Provee estándares de calibración para chequeos multipunto, span y de cero.

Generador de hidrógeno

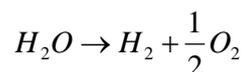
El más importante componente de cada generador es el sistema electrolítico constituido a partir de un número de electrodos en serie. Una característica general de los electrodos Claind es un orificio estrecho que permite que sean ensamblados dentro de una celda completa. Cuando un voltaje continuo es suministrado a los conectores en una terminal electrónica de una celda de modo electrolítica, ocurre la siguiente reacción:



La reacción autopirólisis de agua ocurre así:



La transformación total del agua queda:



El electrolizador produce H_2 y O_2 . El oxígeno es disipado sin peligro dentro de la atmósfera, mientras el flujo de hidrogeno va directo a un desecador donde es secado con un rociado a presión a una temperatura de $-57^\circ F$ ($-40^\circ C$). Después es estimulado el generador y los gases producidos por la electrólisis del agua son separados y no pueden volver a combinarse.



Este hidrógeno producido es desmineralizado y requerido para rellenar el tanque interno (cargado automática o manualmente por el operador). La cantidad de agua electrolizada en la unidad depende directamente de la constante de flujo que cruza directo al modulo de celda. Un electrolito alcalino (escala definida durante la manufactura) es adherido al agua para aumentar la alcalinidad.

Herramientas, equipamiento y/o instrumental de uso general

Para realizar de manera adecuada la revisión y calibración de las estaciones automáticas, es necesario contar con una serie de herramientas e instrumentos básicos, los cuales se describen en la tabla siguiente.

Tabla 3. Herramientas básicas para realizar el mantenimiento de las estaciones automáticas

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Hombre Solo de 10"	1
Alicate	1
Martillo	1
Brocha de 2"	1
Juego de llaves Bristol en pulgadas	1
Juego de llaves Bristol en milímetros	1
Juego de destornilladores (4 pala + 2 estrella)	6
Pinza recta	1
Corta Frío aislado	1
Bisturí	1
Pinza curva	1
Llave expansiva de 6"	1
Juego de limas (4 x 160 mm x 10pcs)	10
Juego de destornilladores de precisión (4 pala + 2 estrella)	6
Brújula	1
Multímetro digital TM - 178	1
Termómetro de referencia	1

Estos implementos son indispensables para efectuar los diversos procedimientos de mantenimiento revisión y calibración de los equipos que conforman las estaciones automáticas de calidad del aire. Sin embargo, en caso de ser necesario, las actividades de revisión y calibración que requieran de un desarrollo más complicado o de mayor duración deberán ser ejecutadas con algunos equipos adicionales que se incluyen en los procedimientos específicos.

Entre estos equipos y herramientas se puede mencionar el burbujeador, utilizado para evaluar el adecuado funcionamiento de los calibradores multigas y el medidor de flujo para verificar el comportamiento de los muestreadores de material particulado.

7.2.2. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Esta actividad comprende la validación de los datos y la determinación de factores puntales que pudieron afectar el muestreo, a fin de incluirlos en la base de datos. Durante esta etapa se realiza

el análisis y la consolidación de los datos para llegar a conclusiones acerca de la calidad del aire dentro del dominio del SVCA. Es en ésta etapa donde se deben cumplir los objetivos previstos para el Sistema. En el capítulo Etapas comunes a todos los SVCA (Capítulo 9) se muestra la forma en que debe realizarse el procesamiento de la información.

Previo al procesamiento de la información se deben enviar los datos al analista desde la estación. Para ello es necesario que existan ciertos dispositivos que se encargarán de la toma del dato desde el analizador, el preprocesamiento, en promedios configurados por el usuario y la transmisión de los datos tal como se muestra en la Figura 22.

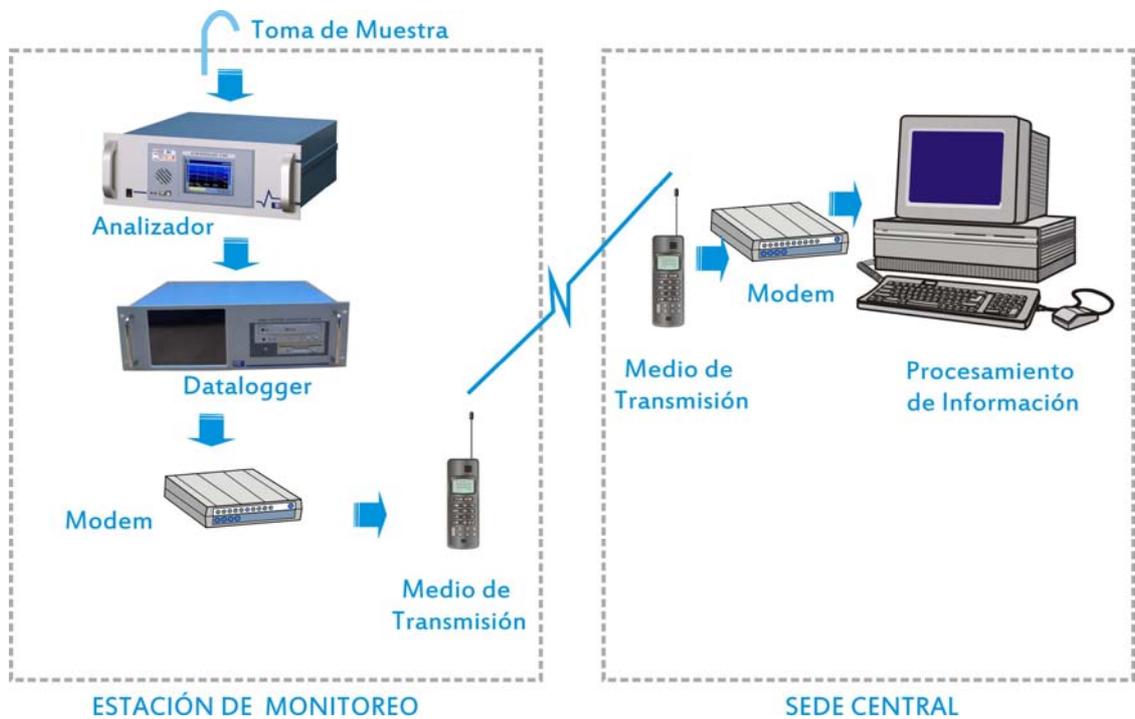


Figura 22. Proceso de tomas de muestras hasta el procesamiento de la información.

Por lo general en los SVCA el procesamiento de la información se realiza automáticamente a través de un software central que comunica con las estaciones y gestiona la información para que sea transferida y luego analizada con las herramientas propias de dicha aplicación.

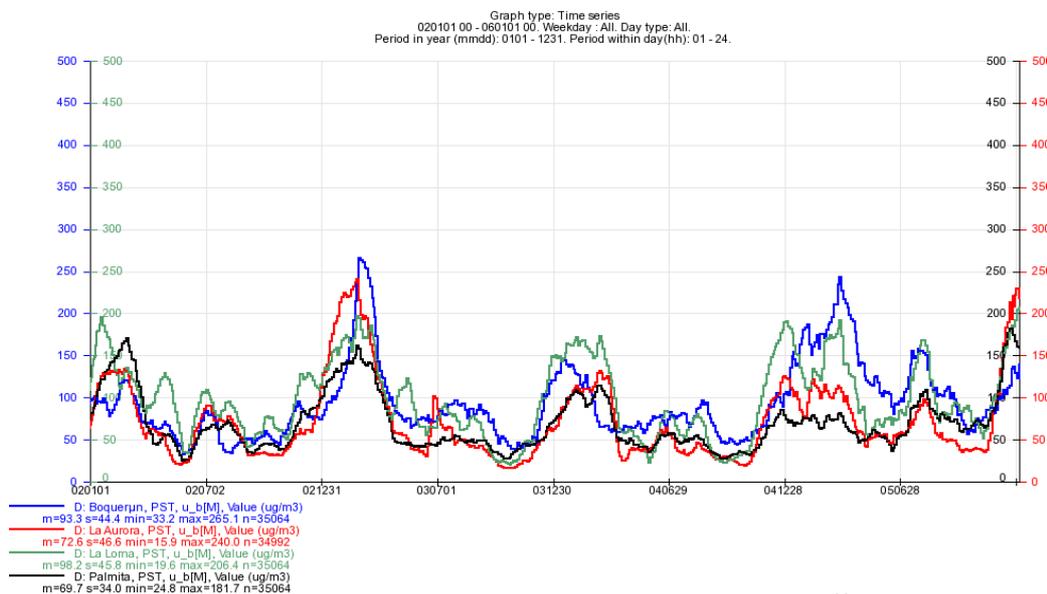


Figura 23. Ejemplo captura y manejo de la información²⁸.

7.2.3. REPORTE

El reporte es el resultado de la operación del SVCA que se lleva a la comunidad, dependiendo del SVCA del aire dicho reporte tendrá unas características específicas, como su publicación en página web o a través de informes físicos impresos. La forma específica de los reportes se presenta en el capítulo 9 Elementos comunes a todos los SVCA en el numeral 9.5 relacionado con la generación de reportes, en donde se detallan los componentes mínimos para cada uno de los reportes.

7.2.4. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

Esta actividad comprende el conjunto de procesos y de requerimientos necesarios para garantizar la confiabilidad de la información. El Aseguramiento y Control de la Calidad debe llevarse a cabo a lo largo de todas las etapas de la operación del SVCA. El capítulo 9 Etapas comunes a todos los SVCA en el numeral 9.1, describe la forma como se debe llevar a cabo. Todo SVCA debe tener un Plan de Calidad implementado que garantice la confiabilidad de la información.

7.2.5. MANTENIMIENTO DE EQUIPOS

Cada SVCA debe tener un programa de mantenimiento preventivo. Este programa define las acciones generales a seguir con el fin de evitar fallas en el SVCA e incrementar la confiabilidad de los datos.

En el programa de mantenimiento se definen las rutinas de chequeo y limpieza de partes, que aseguran el funcionamiento del sistema, así como también las frecuencias de estas actividades. Es

²⁸ Software AIRVIRO. Sweden Meterological e Hidrological Institute. Tomado del informe final ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ZONAS URBANAS Y MINERAS DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR. FASE 1 DIAGNÓSTICO Y DISEÑO DE REDES DE MONITOREO, celebrado entre CORPOCESAR y la firma K-2 INGENIERIA (en representación del SMHI- Swedish Meteorological and Hydrological Institute).

recomendable referirse al Manual del Fabricante para rutinas de mantenimiento específicas.

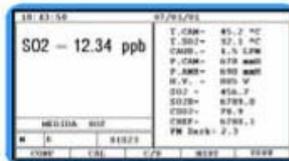
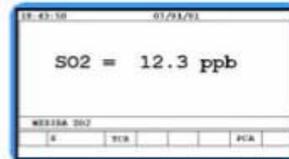
El mantenimiento de los equipos garantizará la continuidad en la toma de muestras en el SVCA. Un estricto programa de mantenimiento preventivo y correctivo debe incluirse en el Plan de Calidad del SVCA. De todos los mantenimientos realizados se debe llevar registro de acuerdo a como se especifique en dicho plan.

Los SVCA automáticos poseen equipos con la capacidad de autotest que diagnostica el estado del equipo. No obstante, debe existir un programa de mantenimiento que siga por lo menos los lineamientos especificados a continuación.

MANTENIMIENTO Y CONTROL EXTERNOS

PANTALLA PRINCIPAL.- Display simultáneo de:

- Fecha y Hora
- Concentraciones y Unidades
- Estado de las válvulas internas
- Entradas digitales activadas
- Hasta seis condiciones de alarma
- Fase actual de medida
- Activación automática de retroiluminación



PANTALLA DE DIAGNÓSTICOS.-

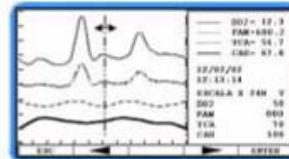
- Potente software de diagnósticos, determinación de posibles averías.
- El parámetro anómalo se muestra con una fecha.
- Control de Calidad continuo.

MANTENIMIENTO Y CALIBRACIÓN.-

- Autorización mediante clave de acceso.

PANTALLA GRÁFICA.-

- Gráficos simultáneos de hasta cuatro parámetros.
- Períodos de integración 5, 10, 15, 30, 60 min.
- Cursor de Selección de fecha, hora, valor, rangos de medida.



SENSORES EXTERNOS

- Se pueden conectar sensores externos.
- El Datalogger y la Memoria son configurables.

TABLA DE DISTRIBUCIÓN			
NUMERO	SEÑAL	PAR	VALOR
1	12314	SO2	12.3
2	12314	FAM	000.2
3	12314	ICA	56.7
4	12314	CRO	67.8

HISTÓRICOS

- Generación automática de tablas para los parámetros seleccionados: datos, diagnósticos y sensores externos.
- Períodos de integración seleccionables: 5, 10, 15, 30, 60 min.
- Cursor para referencia rápida a la fecha.
- Indicación de: - Parámetro. - Fecha
- Valor. - Hora
- Condiciones operativas (flag).

TABLA DE ALARMAS.-

- Generación automática de alarmas de los parámetros seleccionables: fecha, diagnósticos y sensores externos.

TABLA DE ALARMAS			
NO	COND	VALOR	CONDICION
1	ICA	56.7	12314 120202
2	ICA	53.7	120000 120202
3	ICA	65.7	12314 120202

Figura 24. Autotest internos y externos equipos analizadores²⁹.

7.2.5.1. Revisión de los analizadores de calidad del aire

Antes de realizar la medición de los contaminantes, es necesario realizar una revisión general de los analizadores de calidad del aire. La revisión de cada analizador se debe realizar por separado. A continuación se presenta una breve descripción de las pruebas y actividades que se pueden

²⁹ Tomado de la pagina web www.sirsa.es

realizar para este tipo de equipos.

A. Revisión del analizador de partículas suspendidas totales (PST)

A continuación se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de partículas suspendidas totales.



Figura 25. Proceso de revisión de un analizador de partículas suspendidas totales (PST).

Se debe efectuar una observación general al equipo y sus partes, con el fin de revisar el estado de limpieza del cabezal, así como el estado del toma-muestras y del filtro de partículas. Así mismo, es necesario verificar el estado de la bomba externa y cambiar el kit con periodicidad semestral.

Verificar el estado general de la cinta para comprobar que no se esté rasgando, enredando o sufriendo daños por causas externas. Además, es necesario tener un control visual de la duración de la misma. En caso de encontrar algún problema con la cinta, es necesario detener el proceso de muestreo, arreglar la cinta y posteriormente reactivar nuevamente el proceso de muestreo.

Por otro lado, se debe realizar un TEST general al equipo para comprobar el estado de sus principales parámetros y lecturas, esto permite obtener una idea del estado general del mismo.

Se debe verificar la base de datos del analizador con el fin de visualizar posibles interrupciones en la medición, datos constantes o datos no coherentes durante el registro.

B. Revisión del analizador de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀)

A continuación se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de material particulado menor a 10 micras.

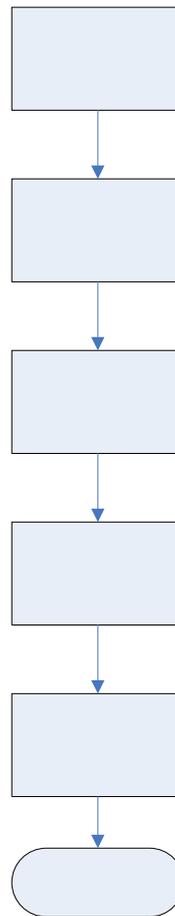


Figura 26. Proceso de revisión de un analizador de partículas menores a 10 micras (PM₁₀).

Se debe realizar una revisión general al equipo y a sus diferentes partes, con el fin de verificar el estado de limpieza del cabezal, así como el estado del toma-muestras y del filtro de partículas. Así mismo, es necesario verificar el estado de la bomba externa y realizar un cambio de kit con periodicidad semestral.

Se debe verificar el estado general de la cinta para comprobar que no se esté rasgando, enredando o sufriendo daños por causas externas. Además, es necesario tener un control visual de la duración de la misma. En caso de encontrar algún problema con la cinta, es necesario detener el proceso de muestreo, arreglar la cinta y posteriormente reactivar nuevamente el proceso de muestreo.

Realizar un TEST general al equipo para comprobar cada uno de sus principales parámetros y lecturas permitiendo tener una idea del estado general del mismo.

Por otro lado, se debe verificar la base de datos del analizador con el fin de visualizar posibles interrupciones en la medición, datos constantes o datos no coherentes durante el registro.

Cambio de cinta de los analizadores de material particulado

El cambio de cinta de los analizadores de material particulado es un procedimiento básico de operación que asegura el buen comportamiento y operación de estos analizadores. El procedimiento se efectúa generalmente cada dos meses con el fin de mantener una operación adecuada y constante, sin embargo debe verificarse en la guía del fabricante la frecuencia sugerida y el procedimiento específico.

La función primordial de la cinta es la de retener las muestras de material particulado en un periodo de tiempo determinado, obteniendo entonces una concentración de partículas relacionada directamente con un flujo de entrada de aire y un tiempo de muestreo.

A continuación se indica el proceso que se debe realizar para el cambio de cinta de partículas en un analizador de material particulado.



Figura 27. Proceso de revisión del analizador de material particulado PM₁₀

- En caso de que la cinta instalada en el analizador no se haya terminado, es indispensable fijar el analizador en modo suspendido. En algunos analizadores con este procedimiento se apaga la bomba automáticamente. Si la bomba de succión del analizador continúa activa, es indispensable apagarla.
- Si la boquilla de muestreo se encuentra en la posición de muestreo, es necesario fijarlo en la posición de espera.
- Antes de liberar la cinta de muestreo se deben soltar los discos sujetadores. Posteriormente, es necesario halar el tornillo sujetador hacia fuera, o la palanca sujetadora hacia arriba, levantando los rodillos que sujetan la cinta. Por último, y sin soltar este tornillo se debe elevar verticalmente el eje que sujeta los rodillos.
- Una vez liberada la cinta de partículas, es necesario retirarla teniendo en cuenta la disposición de la misma con respecto a los rodillos para colocar adecuadamente la nueva cinta.
- Se debe colocar la cinta teniendo mucho cuidado con la disposición de la misma en relación con los rodillos, y recordando que esta debe desplazarse de derecha a izquierda. En algunos analizadores es necesario halar de nuevo la palanca para que libere los rodillos y estos aseguren nuevamente la cinta.
- Antes de poner en operación nuevamente el monitor, es necesario halar de nuevo el tornillo sujetador para que libere los rodillos y éstos aseguren nuevamente la cinta.
- Posteriormente, es necesario fijar el analizador en modo normal, lo que activa automáticamente la bomba, y esperar a que se cumpla la secuencia de inicio y que se fije en la fase medición.

C. Revisión del analizador de dióxido de azufre (SO₂)

A continuación se describen las actividades a realizar durante la revisión del analizador de dióxido de azufre.

- Verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo y el funcionamiento de la bomba.
- Revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de ver posibles variaciones en el mismo.
- Realizar un diagnóstico general del mismo, verificando los diversos parámetros de diagnóstico que se muestran en pantalla. Dichos parámetros deben encontrarse dentro de los rangos recomendados por el fabricante.
- Por último, y antes de continuar con otros analizadores y/o sensores, es muy importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el datalogger, dicha verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión o de transmisión, o fallas de configuración.

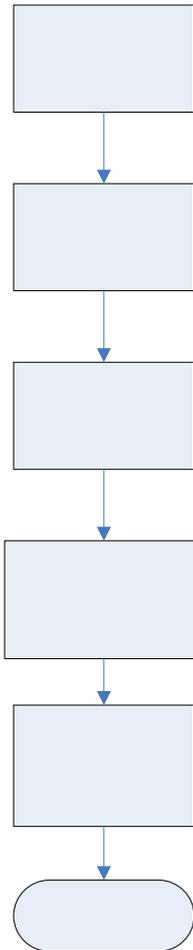


Figura 28. Proceso de revisión del analizador de dióxido de azufre (SO₂).

D. Revisión del analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO_x)

A continuación se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de óxidos de nitrógeno.

Es necesario verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo presente y el buen funcionamiento de la bomba.

Es importante revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo, se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de observar posibles variaciones.

Después de revisar el funcionamiento básico del equipo, es necesario realizar un diagnóstico general del mismo, verificando los diversos parámetros de diagnóstico que se muestran en pantalla. Dichos parámetros deben encontrarse dentro de los rangos recomendados por el fabricante.

Por último, y antes de continuar con otros analizadores, es muy importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el datalogger. Dicha verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión o de transmisión y fallas de configuración.



Figura 29. Proceso de revisión del analizador de óxidos de nitrógeno (NO/NO_x).

E. Revisión del analizador de ozono (O₃)

A continuación se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de ozono.



Figura 30. Proceso de revisión del analizador de ozono (O₃).

Es necesario verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo presente y el buen funcionamiento de la bomba.

Es importante revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo, se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de ver posibles variaciones en el mismo.

Después de revisar el funcionamiento superficial del equipo, es necesario realizar un diagnóstico general del mismo, verificando la temperatura de la celda de reacción, el flujo interno y el voltaje de la lámpara.

Por último, y antes de continuar con otros analizadores, es muy importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el sistema de adquisición de datos (datalogger). Dicha verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión o de transmisión y fallas por configuración.

F. Revisión del analizador de monóxido de carbono (CO)

A continuación se describen las actividades necesarias durante la revisión del analizador de monóxido de carbono.

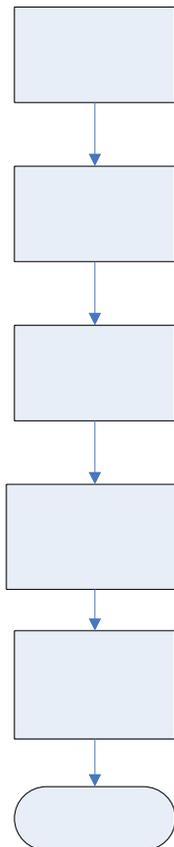


Figura 31. Proceso de revisión del analizador de monóxido de carbono (CO).

Se debe verificar las conexiones eléctricas y neumáticas del analizador, así mismo es necesario verificar el nivel de flujo presente y el buen funcionamiento de la bomba.

Es importante revisar que el analizador se encuentre prendido y en modo de muestreo y no presente señales de alarma. Así mismo se debe revisar el dato en la pantalla con el fin de observar posibles variaciones.

Revisado el funcionamiento básico del equipo, es necesario realizarle un diagnóstico general, verificando los diversos parámetros de diagnóstico que se muestran en pantalla del equipo. Dichos parámetros deben encontrarse entre los rangos recomendados por el fabricante.

Por último, y antes de continuar con otros analizadores, es muy importante verificar el dato mostrado en la pantalla del analizador contra el dato registrado por el datalogger. Esta verificación puede ayudar a identificar fallas internas, fallas de conexión, de transmisión o fallas de configuración.

G. Cambio de filtros en los analizadores de gases.

Los analizadores de gases cuentan con filtros, generalmente de teflón, que sirven para evitar la entrada de material particulado en los mismos, y en particular, hacia la cámara de reacción o las celdas ópticas. Los filtros pueden ser de 37 o 47 milímetros y normalmente tienen una porosidad de cinco micras. Dichos filtros hacen parte de los consumibles determinantes para la adecuada operación de los analizadores de calidad del aire.

Algunos analizadores presentan un filtro externo, localizado en la parte posterior del rack, al lado de los manifolds de muestreo y otros cuentan con un compartimiento interno ubicado en la parte frontal del analizador. Sin embargo, el tipo de filtro y la metodología para el cambio es muy similar en ambos casos y se describe a continuación.

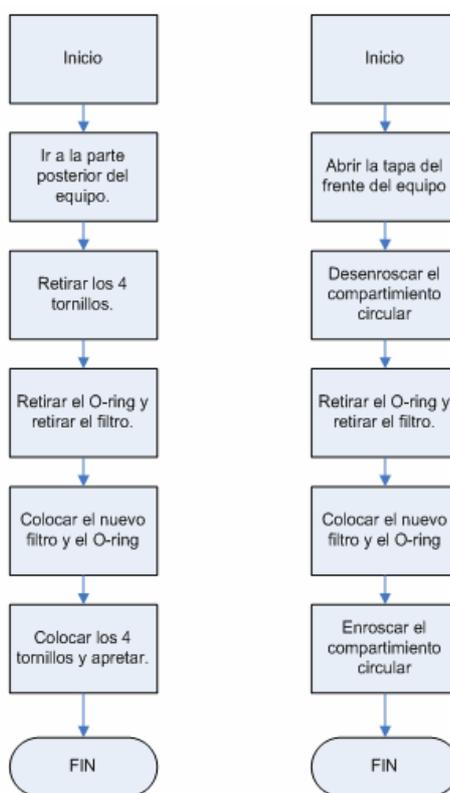


Figura 32. Proceso de cambio de filtros en los analizadores de gases.

En el caso de analizadores con el filtro en la parte posterior, se deben desenroscar los tornillos que permiten abrir y cerrar el dispositivo que lo contiene, levantando la tapa y dejando el filtro al descubierto.

En el caso de analizadores con el filtro en la parte frontal se debe abrir el panel frontal del analizador doblándolo hacia abajo, ubicar el filtro al lado izquierdo del panel e inspeccionarlo visualmente a través de la ventana de vidrio. Posteriormente, se debe desenroscar la tapa del dispositivo que contiene el filtro, retirando el vidrio protector y dejándolo al descubierto.

Una vez retirada la tapa del filtro, es necesario liberar el mismo retirando el anillo sujetador y el O-ring para luego extraer el filtro.

Después de haber retirado el filtro usado, tomar un filtro nuevo y colocarlo en el dispositivo teniendo en cuenta que el elemento debe estar completamente asentado en el fondo del mismo.

Antes de cerrar nuevamente el dispositivo del filtro, revisar el estado del O-ring y reemplazarlo, en caso de ser necesario. Posteriormente se debe colocar el anillo sujetador y cerrar la tapa del dispositivo ajustándola manualmente.

7.2.5.2. Verificación de la calibración de los analizadores de calidad del aire

Para la verificación del funcionamiento de los analizadores de gases contaminantes, es necesario realizar una calibración multipunto, utilizando la metodología recomendada por la US-EPA. Esta metodología consiste esencialmente en hacer pasar una mezcla de gases de concentración conocida a través del analizador y comparar el valor reportado por el equipo contra el valor del patrón.

Se recomienda emplear un cilindro de una mezcla gaseosa de concentración conocida y con certificado de composición bajo trazabilidad NIST³⁰. Esto permite asegurar que la mezcla utilizada tenga una concentración exacta y por lo tanto asegura la precisión y exactitud del proceso de calibración. A continuación se indica el procedimiento que se debe seguir para realizar la calibración.

³⁰ NIST: Instituto de pruebas estándar de Estados Unidos

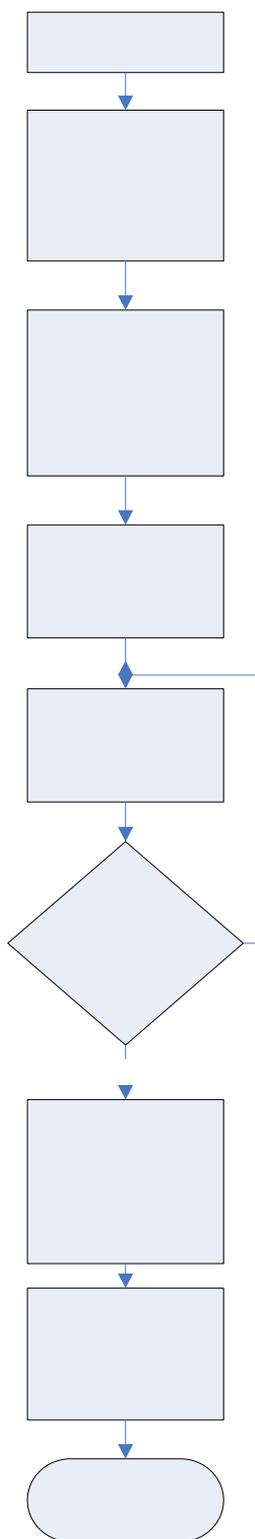


Figura 33. Proceso de calibración.

cili

ca
en

ge
ce
en

Co



La Figura ilustra la metodología empleada para los analizadores de SO₂, NO/NO_x y CO. En el caso de la metodología para analizadores de O₃ existe una leve diferencia en el montaje dado que no existen cilindros con O₃ por ser un gas altamente inestable. Sin embargo, dicha metodología se presenta más adelante.

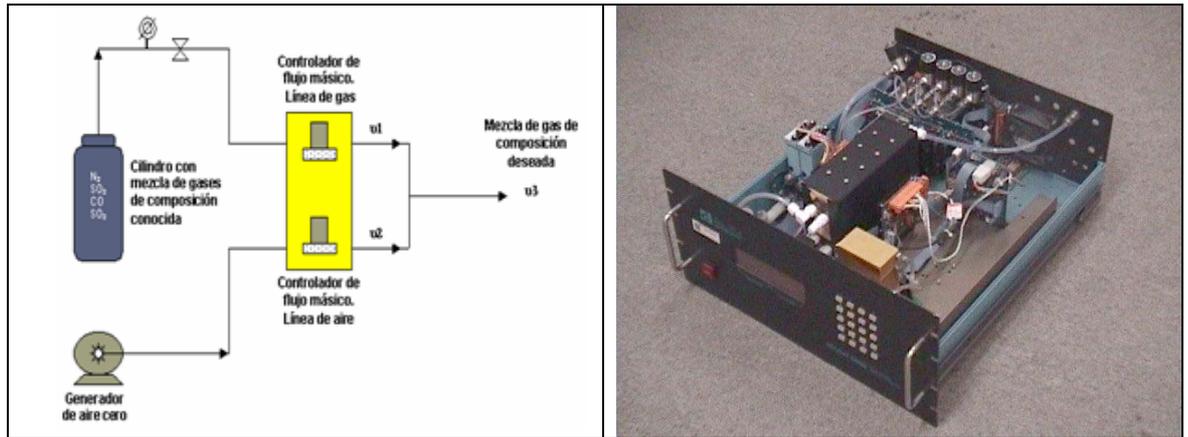


Figura 34 Ilustración del proceso de verificación de la calibración de los analizadores de gases

A. METODOLOGÍA PARA EFECTUAR LA CALIBRACIÓN MULTIPUNTO DE ANALIZADORES DE CALIDAD DEL AIRE

La calibración multipunto de analizadores de calidad del aire consiste básicamente en efectuar al menos cinco mezclas de concentración conocida, las cuales se hacen pasar a través de los equipos analizadores con el fin de evaluar la precisión y exactitud de los datos arrojados por dichos equipos.

B. EL PATRÓN DE REFERENCIA

Como se menciona en el numeral 7.2.5.3, el calibrador multigas es el patrón de referencia para evaluar el adecuado comportamiento de los analizadores de calidad del aire.

Se debe emplear un cilindro con una mezcla de gases con concentraciones como la especificada en la Tabla 4. La composición de los gases de este cilindro debe ser certificada. Esto permite asegurar que la mezcla utilizada tenga una concentración exacta y por lo tanto asegura la precisión y exactitud del proceso de calibración.

Tabla 4. Ejemplo de la composición de la mezcla de gases del cilindro usado para la verificación de la calibración de los analizadores de gases

COMPUESTO	COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA (PPM)
CO	1010
NO	50.0
SO ₂	48.5

Como gas de dilución se debe usar un cilindro de N₂ de alta pureza (99.999%) o en su lugar una fuente de generación de aire cero, que posea scrubbers de CO, HC, NO_x, SO₂ y O₃. Este

procedimiento se ciñe a las recomendaciones de la EPA para calibración de analizadores de gases.

Como mezclador dinámico de gases se debe emplear un calibrador multigas (calibrador dinámico) que permita generar diversas mezclas de concentraciones conocidas.

Antes de efectuar la calibración de los equipos es necesario verificar el correcto funcionamiento de este mezclador. La verificación del funcionamiento del calibrador multigas seleccionado se debe aplicar tanto al inicio del proceso de verificación de calibración de los analizadores de gases, como al final de acuerdo con las especificaciones dadas en el numeral 7.2.5.3. El resultado del anterior procedimiento debe ser muy similar con el fin de asegurar la precisión y exactitud de la calibración efectuada.

C. ACTIVIDADES PREVIAS

Antes de dar inicio al proceso de calibración de los analizadores de gases existe una serie de actividades que se deben realizar con el fin de asegurar el buen funcionamiento de los equipos y de la metodología utilizada.

Herramientas utilizadas

Para empezar con la calibración de los analizadores de gases, es necesario contar con las siguientes herramientas:

- Llave de expansión
- Destornillador de pala
- Acople para pasar del sistema milimétrico a NPT
- Compresor
- 2 mangueras de polietileno LDPE
- Calibrador Multigas

Purga del compresor de aire

Como medida de seguridad, antes de realizar el montaje, es necesario purgar el compresor de aire abriéndole el desagüe que posee en uno de sus costados. Esto, con el fin de asegurar que el aire que va a ser introducido en los Controladores de Flujo Másico no contiene agua que pueda afectar los sensores y el funcionamiento de esta parte del equipo.

Verificación de la fecha de vencimiento de los gases utilizados

Antes de iniciar la calibración de los analizadores de gases, es indispensable verificar la fecha de vencimiento de los gases que se utilizarán para dicho efecto. Este procedimiento es indispensable con el fin de asegurar la validez de los datos que se utilizarán durante el proceso.

D. MONTAJE

Para realizar la calibración de los analizadores de gases se debe conectar una fuente de aire cero a la línea de aire del calibrador y un cilindro con mezcla de gases certificada a una de las líneas de gases. Adicionalmente, es necesario conectar la salida del calibrador al manifold que distribuye las muestras de aire a cada uno de los equipos.

Una vez efectuado el montaje inicial, es necesario tapar otras entradas de muestra tanto al manifold como a los equipos, con el fin de evitar diluciones adicionales y poder asegurar la

concentración de la dilución suministrada a cada uno de los equipos.

Por otra parte, es importante tener en cuenta el flujo de entrada de los analizadores, y la cantidad de analizadores alimentados por el manifold con el fin de aplicar, como flujo de muestra, al menos la sumatoria de flujos, a la entrada del manifold. El flujo de mezcla debe ser igual o superior al flujo total tomado por los analizadores con el fin de evitar diluciones adicionales.

E. PROCESO DE VERIFICACIÓN Y DE CALIBRACIÓN

Se entiende por CALIBRACIÓN al conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de una magnitud de medida o patrón. A efectos de análisis instrumentales, entenderemos por calibración la determinación de la función de calibración: relación entre la concentración de contaminante en el aire y la lectura del instrumento. El proceso de Calibración implica el ajuste de la respuesta del equipo. Por otro lado se entiende por VERIFICACIÓN las mismas acciones descritas anteriormente, pero sin la realización de ajustes a los equipos.

A continuación se incluirán todas las verificaciones y calibraciones, tanto de CERO y SPAN como multipunto, a realizar sobre los equipos, así como la periodicidad de las mismas que se realizarán a los monitores de gases.

Se entiende por CERO cuando se suministra aire limpio, sin contaminantes al monitor de gas. SPAN corresponde al suministro de una concentración conocida del gas, normalmente del 80 - 100% del tope de la escala de medición.

Las operaciones de verificación y de calibración se dividirán de la siguiente forma, según su realización:

Verificaciones CERO - SPAN.

Verificaciones Multipunto.

Calibración de CERO-SPAN.

Calibración Multipunto de acuerdo con la norma CFR40

(<http://www.epa.gov/epahome/cfr40.htm>)

Como regla se realiza una calibración multipunto después de una reparación mayor de un equipo o después de instalarlo o reinstalarlo. Los periodos de calibración se deben recoger en la ficha de control de equipos junto con los mantenimientos. En la Tabla 5 se muestra una periodicidad para la realización de estas pruebas.

Tabla 5. Periodicidad de las operaciones de control de la calibración de los analizadores de gases

VERIFICACIÓN	PERIODICIDAD
Verificación CERO - SPAN	SEMANAL
Verificación MULTIPUNTO	MENSUAL
CALIBRACIÓN	PERIODICIDAD
Calibración CERO- SPAN	MENSUAL
Calibración MULTIPUNTO	TRIMESTRAL

El estado de calibración de un equipo debe quedar perfectamente indicado mediante la colocación de una etiqueta sobre el mismo que contendrá la siguiente información.

Formato de Identificación estado de calibración

Código del equipo	
Fecha de Calibración	
Fecha de la próxima calibración	

Como casos excepcionales, se realizará una calibración multipunto en los siguientes casos.

- Puesta en marcha del equipo tras una avería o mantenimiento correctivo de importancia
- Puesta en servicio por primera vez del equipo tras su instalación
- Después de un largo periodo fuera de uso, cuya duración dependerá de cada equipo y de la experiencia adquirida sobre el mismo

En las verificaciones de CERO y SPAN se deben adoptar los siguientes criterios de aceptación:

- Deriva de CERO menor que 1 % del fondo de escala del rango de medición.
- Deriva de SPAN menor que el 6 % del tope de escala del rango de medición.

Si no se cumple alguno de los criterios anteriores se deberá proceder a revisar el equipo, tras lo cual se realizará una verificación de CERO y SPAN y, en función de los resultados, se realizaría una calibración multipunto.

En las verificaciones multipunto, se tomará como criterio de rechazo el que el factor de correlación este fuera del rango de 1 ± 0.01 %, la pendiente fuera del rango de 1 ± 0.05 y el intercepto sea mayor que 1% del tope de escala del rango de medición, tal como se muestra en la Tabla 6. En caso de no cumplir estos criterios se debería revisar el equipo y realizar una calibración multipunto antes de poner el equipo en operación.

Los criterios de aceptación para las calibraciones SPAN y CERO o multipunto deben estar establecidos en el programa de AC/CC.

Tabla 6. Criterios para la verificación de la exactitud de analizadores de gases

CRITERIO	ESTADO	RANGO	OBSERVACIONES
Pendiente	Excelente	$< 1 \pm 0.05$	Entre respuesta de analizador y concentración de verificación
	Satisfactoria	De 1 ± 0.06 a 1 ± 0.015	
	No satisfactoria	$> 1 \pm 0.016$	
Intersecto	Satisfactorio	$0 \pm 3\%$	De la escala completa del analizador
	No satisfactorio	$> 0 \pm 3\%$	
Coeficiente de correlación	Satisfactorio	0.9950 a 1.0000	Respuesta lineal del analizador a concentraciones de verificación
	No satisfactorio	< 0.9950	

Los registros de las operaciones de verificación y calibración de los equipos se anotarán en formatos como los que se establecen a continuación.

Tabla 7. Formato de calibración de SPAN y CERO

TÉCNICO DE OPERACIÓN				
NOMBRE ESTACIÓN		CÓDIGO ESTACIÓN		
CALIBRACIÓN DE CERO				
Analizador de SO ₂	Cero antes de ajuste (ppb)		Cero después de ajuste (ppb)	
Analizador de NO _x	Cero antes de ajuste (ppb)		Cero antes de ajuste (ppb)	
Analizador de O ₃	Cero antes de ajuste (ppb)		Cero antes de ajuste (ppm)	
Analizador de CO	Cero antes de ajuste (ppm)		Cero antes de ajuste (ppb)	
CALIBRACIÓN DE SPAN				
Analizador de SO ₂	Span antes de ajuste (ppb)		Span después de ajuste (ppb)	
Analizador de NO _x	Span antes de ajuste (ppb)		Span antes de ajuste (ppb)	
Analizador de O ₃	Span antes de ajuste (ppb)		Span antes de ajuste (ppm)	
Analizador de CO	Span antes de ajuste (ppm)		Span antes de ajuste (ppb)	

Tabla 8. Formato de calibración multipunto

TÉCNICO DE OPERACIÓN			
NOMBRE ESTACIÓN		CÓDIGO ESTACIÓN	

Concentración de los gases de referencia		
SO ₂ [PPM]	CO [PPM]	NO ₂ [PPM]

Punto	Q aire [mL/min]	Q gas [mL/min]	Relación de dilución	SO2 [PPB]			CO [PPM]			NO2 [PPB]		
				Real	Inicial	Final	Real	Inicial	Final	Real	Inicial	Final
0												
1												
2												
3												
4												

Punto	Q aire [mL/min]	Q Ozono [mL/min]	Relación de dilución	O3 [PPB]		
				Real	Inicial	Final
0						
1						
2						
3						
4						

A continuación se presenta la explicación de los resultados obtenidos después de un proceso de calibración.

Tabla 9. Descripción del significado de los parámetros de calibración de equipos automáticos

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
Pendiente	Describe la calibración del equipo. Una pendiente cercana a 1 corresponde a equipos cuya calibración es adecuada. Generalmente se aceptan desviaciones del 10%. Es decir valores entre 0.9 y 1.1
Intercepto	Describe el offset del equipo. Valores cercanos a 0 son deseables. De lo contrario se requiere un ajuste del cero del equipo
R ²	Describe la variabilidad del proceso de evaluación de la calibración del equipo. Valores cercanos a 1 son deseables

7.2.5.3. Verificación del correcto funcionamiento de calibradores multigas

Un calibrador multigas es un equipo que mezcla un gas de referencia (mezcla de CO, NO₂, y SO₂ en N₂ con composición conocida) con aire puro (aire cero) en proporciones deseadas. De esta forma el calibrador multigas proporciona un gas cuya concentración de CO, NO₂, y SO₂ es especificada por el usuario. La Figura 35 ilustra su funcionamiento.

El calibrador multigas consta de una entrada para aire, cuatro entradas para gases y una sola salida de la mezcla realizada. Los calibradores multigases se utilizan para calibrar los analizadores de CO, NO_x y SO₂ de las redes automáticas de monitoreo de calidad del aire.

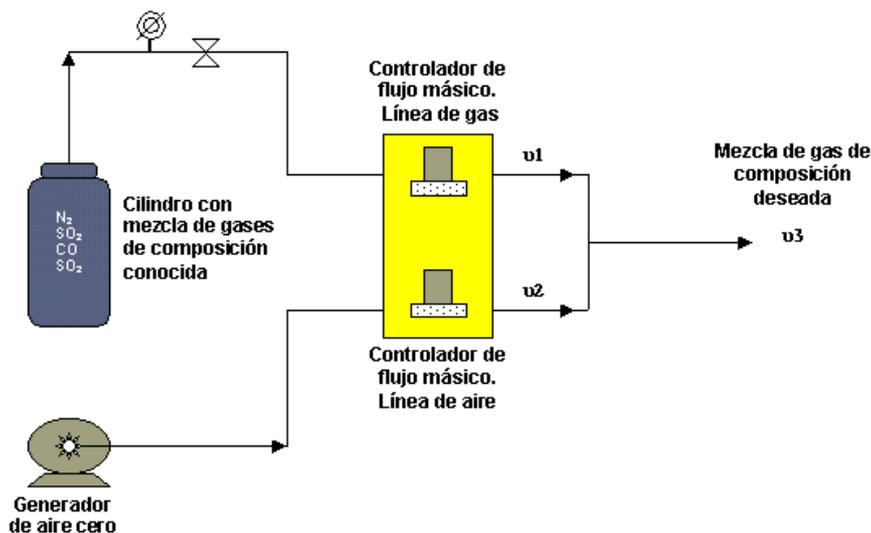


Figura 35 Principio de funcionamiento de un calibrador multigas

Los calibradores multigas realizan la mezcla usando dos controladores de flujo másico. Uno de

estos específicamente destinado a controlar los flujos de aire cero para rangos entre 0 y 10 L/min., y el otro destinado a controlar los flujos de gases para rangos entre 0 y 100 mL/min.

Dichos flujos son establecidos digitalmente, por medio de comandos numéricos, con el teclado del calibrador.

Es importante anotar que solamente se puede realizar una dilución a la vez, esto quiere decir que se utiliza la entrada de aire y solamente una de las entradas de gases por cada dilución deseada.

A continuación se presenta una metodología para verificar el correcto funcionamiento de los calibradores multigas utilizados en redes automáticas de calidad del aire.

METODOLOGÍA PARA VERIFICAR EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CALIBRADORES MULTIGAS

La verificación de la correcta operación de un calibrador multigas consiste en comparar los flujos volumétricos reportados en cada canal del calibrador contra un patrón de medición de flujo volumétrico de referencia.

A. EL PATRÓN DE MEDIDA

En este caso se usa un burbujeador (soap bubbler flow-meter) como patrón de medición. Este dispositivo es recomendado por la EPA como uno de los patrones de medición de flujo volumétrico. La Figura 36 muestra un burbujeador.

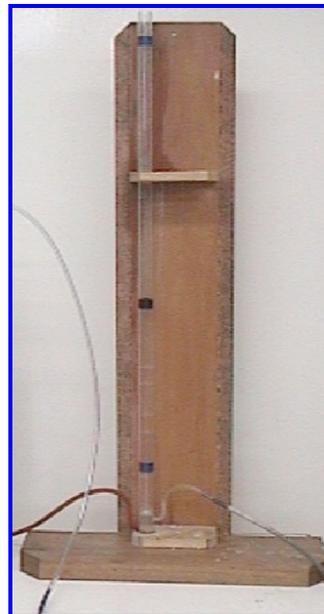


Figura 36 Burbujeador (soap bubbler flow-meter) usado como patrón de medición de flujo volumétrico.

El burbujeador consiste en un tubo en vidrio de diámetro constante con varias marcaciones a distancias determinadas y dos entradas de aire en la parte inferior del mismo.

Este tubo contiene una pequeña cantidad de una solución jabonosa. En una de las entradas se conecta la fuente del flujo volumétrico a ser medido. La otra entrada permite producir burbujas soplando la solución jabonosa. Una vez producida una burbuja la fuente de gas la arrastra a lo largo del tubo. Midiendo la distancia (L) que recorre la burbuja en un tiempo dado (t) y el diámetro del tubo (Di) se encuentra el flujo volumétrico que está produciendo la fuente de gas, mediante la ecuación siguiente:

$$Q = \frac{L}{t} \pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \quad (1)$$

Una vez encontrado este flujo volumétrico, es necesario expresar este flujo a condiciones estándar (Q_{st}.) corrigiendo el valor por la presión local (P_i) y la temperatura local (T_i), de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$Q_{st} = Q \left(\frac{P_i}{T_i} \right) \left(\frac{T_{st}}{P_{st}} \right) \quad (2)$$

P_{st}: Presión estándar

T_{st}: Temperatura estándar

B. ACTIVIDADES PREVIAS

Antes de dar inicio al proceso de verificación de los calibradores multigas existe una serie de actividades que se deben realizar con el fin de asegurar el buen funcionamiento de los equipos y de la metodología utilizada.

Herramientas utilizadas

Para poder empezar con la verificación de los calibradores multigas, es necesario contar con las siguientes herramientas:

- Llave de expansión
- Destornillador de pala
- Cronómetro
- Termómetro
- Acople para pasar del sistema milimétrico a NPT
- Jabón en polvo
- Burbujeador
- Frasco lavador
- Compresor
- 2 mangueras de polietileno LDPE
- Cinta métrica

Purga del compresor de aire

Como medida de seguridad, antes de realizar el montaje, es necesario purgar el compresor de aire abriéndole el desagüe que posee en uno de sus costados. Esto, con el fin de asegurar que el aire que va a ser introducido en los Controladores de Flujo Másico no contiene agua que pueda afectar



los sensores y el funcionamiento de esta parte del equipo.

C. EL MONTAJE

Para realizar la verificación del funcionamiento del calibrador multigas se debe conectar el burbujeador al puerto de salida del calibrador y una fuente de aire cero a la línea de aire del calibrador o una fuente de N_2 (cilindro de N_2) a la línea de gases del calibrador. La Figura 37 ilustra las conexiones a realizar.

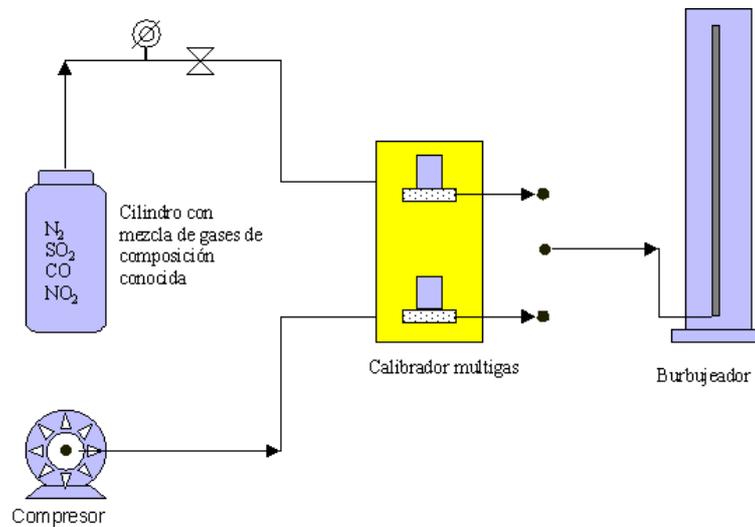


Figura 37 Ilustración del montaje para verificar la operación del calibrador multigas

Una vez terminadas todas las conexiones, es necesario verificar que no haya fugas de aire o de gas, esto se efectúa colocando un poco de solución jabonosa en las uniones y empalmes que tenga el montaje y abriendo las líneas de aire para poder observar que no se formen burbujas.

D. EL PROCESO DE VERIFICACIÓN

- Se fija un flujo volumétrico en el calibrador multigas.
- Se determina el flujo volumétrico en el patrón de medición. Cuando el patrón de medición para dicho flujo es un burbujeador, es necesario tomar en repetidas ocasiones (por lo menos 3) el tiempo en que la burbuja de jabón se desplaza una distancia conocida. Dichos datos deben ser reportados y anotados para procesarlos posteriormente. También se debe registrar la temperatura ambiente.
- Se repite el proceso para diferentes flujos volumétricos del calibrador multigas. Mínimo 5 flujos diferentes cubriendo todo el rango de funcionamiento del calibrador multigas. Se recomienda trabajar con el 20, 40, 60, 80 y 100% del flujo máximo permitido por los Controladores de Flujo Mássico del calibrador multigas.

E. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Una vez obtenidos los diferentes valores de tiempo del desplazamiento de la burbuja de jabón se pueden obtener valores para flujo real con base en las ecuaciones (1) y (2) mostradas anteriormente.

- Posteriormente, se grafican los puntos obtenidos de flujo real vs flujo leído en el calibrador multigas.
- Mediante el método de mínimos cuadrados se obtiene la ecuación de la línea recta que mejor representa los puntos obtenidos y el coeficiente de correlación R^2 .

Una pendiente de la recta cercana a 1 indica que el calibrador está funcionando apropiadamente. La constante de la recta indica el offset del calibrador. Un coeficiente de correlación alejado de 1 indica que el funcionamiento del calibrador es inestable o que el proceso de toma de datos no fue realizado en forma apropiada. La Figura 38 muestra un ejemplo de una gráfica obtenida durante un proceso de calibración de controladores de flujo másico.

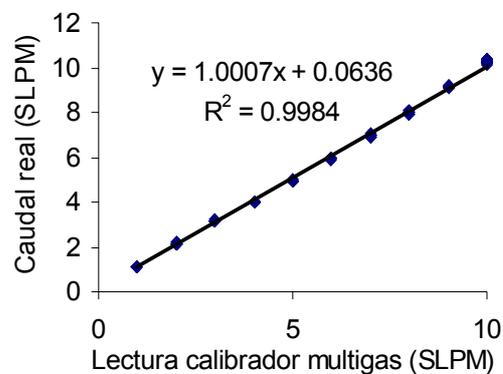


Figura 38 Verificación del correcto funcionamiento de un calibrador multigas

La verificación del correcto funcionamiento de los calibradores multigas es una actividad previa fundamental para poder realizar la calibración de los analizadores de calidad de aire. Esto con el fin de asegurar el correcto funcionamiento del equipo que servirá posteriormente como el patrón de verificación de los analizadores de gases.

8. SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE HÍBRIDOS

Los Sistemas híbridos para la vigilancia de la calidad del aire se caracterizan por combinar las ventajas de los sistemas manuales y los automáticos. Con la combinación de tecnologías se pueden optimizar costos y ampliar la cobertura del sistema aprovechando la resolución y oportunidad de los métodos automáticos y los menores costos de los métodos manuales. Estos sistemas tienen una desventaja, dado que el grado de entrenamiento de los operarios debe ser mayor, así como la cantidad del personal requerido.

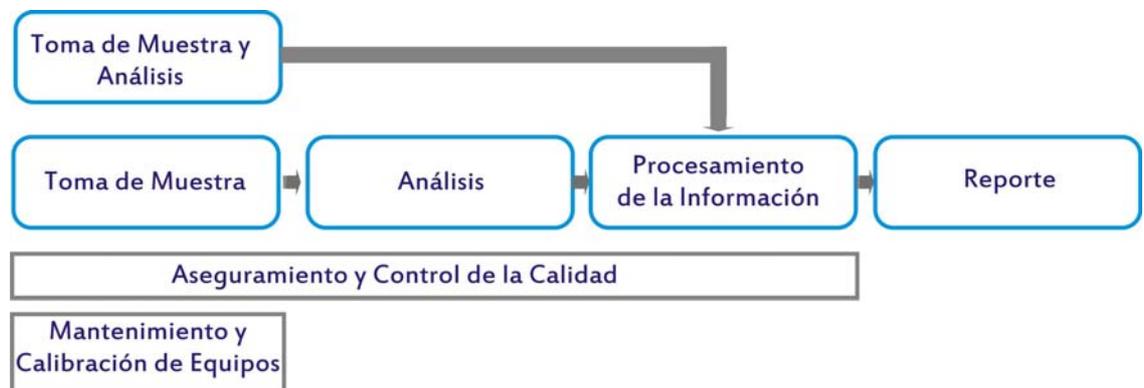


Figura 39. Proceso general de operación de un SVCA Híbrido.

La Figura 39 muestra las etapas generales de operación de un SVCA híbrido. Tal como se observa, está compuesto por cinco etapas que combinan las de los otros SVCA ya vistos.

9. ELEMENTOS COMUNES EN TODOS LOS SVCA

9.1. PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD³¹

Todo Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire deberá implmentar un programa de control y aseguramiento de la calidad materializado en un plan que deberá involucrar los elementos descritos a continuación.

Un programa de aseguramiento de calidad (AC) se define como un conjunto de actividades organizadas por etapas, diseñadas para alcanzar unos objetivos de calidad de datos y certificar que tales datos tengan una calidad conocida.

El Control de calidad (CC) es el sistema general de las actividades técnicas que miden los atributos y desempeños de un proceso, artículo, o servicio respecto a estándares definidos, con el objeto de verificar que estos se encuentren dentro de los requisitos establecidos por el usuario. Se desarrolla para asegurar que la incertidumbre de las mediciones se mantenga dentro de criterios de aceptación establecidos por los objetivos de calidad de datos³².

En síntesis el control de calidad se considera como el uso cotidiano de procedimientos diseñados para obtener y mantener niveles específicos de calidad en un sistema de medición. El aseguramiento de la calidad es un grupo de acciones coordinadas, como planes, especificaciones y políticas usadas para asegurar que el programa de mediciones sea cuantificable y tenga una calidad conocida.³³

Un programa de aseguramiento y control de la calidad para una SVCA, solo puede existir y cumplir su propósito dentro del desarrollo de un programa de vigilancia y control de la calidad del aire y ninguna actividad de vigilancia puede ser justificada si no existe un programa de aseguramiento y control de la calidad que la respalde.

En la Tabla 10, se resumen los aspectos principales que debe contemplar un plan de Aseguramiento de la Calidad. Los objetivos de calidad de los datos, definen los requerimientos que deben cumplir las mediciones, de manera que estas puedan ser usadas para resolver las preguntas formuladas en los objetivos de vigilancia, debiendo cumplir con ciertas características tales como: exactitud, precisión, integridad, representatividad y compatibilidad.

³¹ Tomado traducido y complementado de AIR QUALITY HANDBOOK FOR AIR QUALITY MEASUREMENTS SYSTEMS

³² Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II: Part 1 Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development

³³ "Quality assurance/Quality control program for wet deposition monitoring in East Asia". March 2000. The second interim scientific Adviser group meeting of Acid Deposition monitoring network in East Asia

Tabla 10. Desarrollo de un Programa de Aseguramiento de la Calidad.

DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS DE VIGILANCIA	OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS (Exactitud, precisión, integridad, representación, compatibilidad)
Aseguramiento de Calidad	Diseño del SVCA. Selección del Sitio. Selección del equipo. Diseño del Sistema de Muestreo
Control de Calidad	Desarrollo de Programas de entrenamiento. Elaborar protocolos (procedimientos y estándares de operación, archivos) para la operación y mantenimiento del equipo. Elaborar protocolos de calibración y certificación del equipo. Preparar programas para las visitas de los sitios de muestreo. Elaborar protocolos para la identificación, transporte y análisis de muestras.
Estimación de la Calidad	Elaborar protocolos para el acopio, la inspección, revisión y validación de los datos. Programas para reportes y auditorías.

Los objetivos de vigilancia y de calidad de los datos necesitan ser definidos claramente para optimizar el diseño del SVCA, seleccionar los contaminantes apropiados y sus métodos de medición (de acuerdo con las condiciones ambientales de la región) y determinar el nivel requerido de control de calidad y manejo de datos.

Las principales fases de la estrategia de Vigilancia, con un Programa de Aseguramiento de la Calidad, se agrupan en:

- Diseño del SVCA.
- Selección del sitio.
- Evaluación y selección del equipo.
- Diseño del sistema de muestreo.
- Infraestructura del sitio.
- Operaciones de rutina.
- Mantenimiento y calibración del equipo.
- Acopio, revisión y validación de los datos.

9.1.1. OBJETIVOS DEL PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

Un programa de Aseguramiento y Control de la Calidad debe garantizar que los datos obtenidos del sistema de medición sean representativos de las concentraciones ambientales existentes en cualquiera de las áreas bajo investigación. Esto implica que:

- La variación en los resultados medidos por diferentes instrumentos se mantenga dentro de un intervalo permitido.
- Se minimicen las variaciones interlaboratorio.
- Las variables sean medidas con la misma exactitud y precisión a través de todo el SVCA.
- Las mediciones deberán tener la suficiente precisión y calidad para cumplir con los objetivos de vigilancia establecidos.
- Los datos deberán ser comparables y reproducibles. Los resultados dentro de un mismo SVCA deberán ser consistentes y comparables con estándares internacionales.

- Los resultados deberán ser consistentes en el tiempo y seguir patrones rastreables por medio de estándares metrológicos sobre todo si se realizan análisis a largo plazo.
- Generalmente se requiere que el intervalo anual de captura de datos sea de por lo menos entre 75 - 80% y que la pérdida de datos esté distribuida, en lo posible, a lo largo de todo el año calendario.

El éxito de un buen programa de vigilancia dependerá en gran medida de la adecuada aplicación de un programa de Aseguramiento y Control de la Calidad.

9.1.2. SECUENCIA METODOLÓGICA DE IMPLEMENTACIÓN.

Los programas de Aseguramiento de la Calidad para la vigilancia de calidad del aire son procesos continuos, que pueden y deben estar en constante cambio y adaptación a nuevas circunstancias, a nuevas necesidades o a cambios en la disponibilidad de recursos.

Aunque lo más recomendable para un SVCA puede ser establecer un sistema de calidad similar a la norma ISO 9000, para garantizar la capacidad, competencia y credibilidad de toda la gestión alrededor del programa de vigilancia; a continuación se describen los aspectos más importantes para implantar un programa de aseguramiento de la calidad y su secuencia metodológica.

Es recomendable iniciar el programa de aseguramiento de la calidad desde el comienzo de operación del SVCA y una vez definido los objetivos de vigilancia. No obstante, puede seguirse también la metodología que describe éste capítulo para implementar el programa en un SVCA que ya esté en operación.

En la Figura 40 se representan las etapas de planeación, implementación, evaluación y generación de reportes, que componen los programas de aseguramiento de la calidad para vigilancia de la calidad del aire. Estas etapas y los elementos que las constituyen, se describirán brevemente a continuación.



Figura 40. Ciclo de los programas de AC para vigilancia de calidad del aire.

9.1.3. PLANEACION DEL PROGRAMA DE CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

Lo primero que se debe hacer para implementar un programa de AC en un SVCA es planear a donde se quiere llegar, y como se puede llegar. Las actividades de planeación incluyen:

- Inserción del programa en la normatividad nacional. El programa inicia por revisar la normatividad existente y los planes nacionales sobre el tema para acoger y adaptarse a sus exigencias y seguir sus orientaciones.
- Establecimiento de los objetivos de calidad de los datos. Una vez revisado el marco normativo, el programa de Aseguramiento de la Calidad debe definir los objetivos de calidad de datos, que son las metas cualitativas y cuantitativas que clarifican el fin del programa de vigilancia, definen el tipo apropiado de datos que deben recolectarse, determinan las condiciones más adecuadas para la recolección de los datos y especifican los límites tolerables para respaldar un dato, límites que serán usados como base para determinar la calidad y cantidad de los datos aprobados.
- Selección de los métodos de medición. Después de tener claridad sobre los objetivos a cumplir, se deben seleccionar los métodos de medición que permitan alcanzarlos y que estén de acuerdo con la normatividad vigente.
- Elaboración del Plan del Programa de Aseguramiento de la Calidad. El propósito principal de este plan es sintetizar el programa, partiendo de los objetivos y métodos que ya se han definido, puntualizando las actividades de AC y CC que deberán ser desarrolladas para la implementarlo. Se sugiere elaborar un solo documento. El plan deberá proporcionar una descripción clara de todos los aspectos del programa de AC y deberá incluir información sobre todos los componentes del programa de vigilancia. Además el plan se deberá elaborar para facilitar la comunicación entre los usuarios de los datos, el grupo de trabajo del SVCA, la dirección del programa, y los auditores externos. Proporcionará también los instrumentos a la parte administrativa para mantener el programa de vigilancia dentro del cronograma y según el presupuesto aprobado.
- Elaboración de los manuales de procedimientos. Se deben elaborar los manuales de procedimiento para todas las actividades relativas al programa de vigilancia, con base en la documentación científica sobre los métodos de referencia, y los métodos equivalentes, con base en este PROTOCOLO y en los trabajos que han desarrollado entidades internacionales sobre la materia.
- Elaboración de un programa de entrenamiento. Al finalizar todas las actividades anteriores, se debe organizar un programa de entrenamiento para capacitar a las personas que conforman el grupo de trabajo del SVCA. Dicho entrenamiento debe cubrir en especial, qué deben hacer, por qué deben hacerlo, cómo deben hacerlo, cuando deben hacerlo y que resultados deben obtener de cada actividad.

9.1.4. IMPLEMENTACIÓN

Las actividades de implementación incluyen:

- Ejecución del plan de Aseguramiento de la Calidad (AC). Después de contar con el plan de aseguramiento de la calidad, este debe ponerse en práctica.
 - Actividades internas de Control de Calidad (CC). Comprende el conjunto de actividades y técnicas que miden los atributos y desempeño de un proceso, un equipo, o un servicio y los comparan con los criterios de aceptación establecidos, para que el programa de vigilancia pueda afirmar, con bases científicas, que la incertidumbre de la medición obtenida cumple con lo dispuesto en los objetivos de calidad de los datos. La normatividad de las entidades ambientales internacionales, contiene la documentación y los procedimientos para la
- 

realización de pruebas cualitativas y cuantitativas para asegurar que los datos obtenidos cumplirán los objetivos de calidad. Cada una de estas pruebas evalúa partes de la incertidumbre total de la medición efectuada.

A continuación se presentan las pruebas más importantes:

- Pruebas de precisión y exactitud. Estas pruebas pueden usarse para obtener una evaluación general de la incertidumbre en las mediciones.
- Pruebas de Cero y Span. Están diseñadas para determinar si se está operando adecuadamente el sistema de medición.
- Pruebas de Calibración. Se realizan en el sitio de vigilancia haciendo que el sistema analice muestras de gases con una concentración conocida de los contaminantes.
- Intercomparaciones internas. Estas pruebas consisten en la confrontación de los resultados arrojados por equipos de vigilancia comparables, pueden realizarse en el sitio de medición o en un ambiente controlado como un laboratorio.

9.1.5. EVALUACIONES.

En un programa de vigilancia de calidad del aire, las evaluaciones permiten medir el desempeño o la efectividad del programa y sus elementos, incluyendo la revisión de los sistemas administrativos, de inspección, o de supervisión. Involucran también auditorías, evaluación de desempeño, e intercomparaciones externas.

- Auditorías. Estas auditorías, generalmente externas buscan determinar si el SVCA está cumpliendo con sus objetivos de vigilancia ó en caso de ser necesario, que modificaciones son necesarias realizar para cumplir con ellos. Lo más recomendable es que sean realizadas por parte de pares, o por autoridades ambientales de orden nacional.
- Evaluaciones de Desempeño. Este es un tipo de evaluación en el cual los datos cuantitativos generados en un sistema de vigilancia, son obtenidos de manera independiente y comparados con datos generados rutinariamente para determinar la capacidad profesional de un analista, o el desempeño de un laboratorio o un sistema de vigilancia. Pueden hacerse bajo la colaboración de autoridades ambientales nacionales o apoyadas por instituciones técnicas y científicas como el IDEAM.

9.1.6. REPORTES.

Todos los datos de concentración requerirán evaluaciones para determinar si cumplen con los objetivos de calidad, y por lo tanto deberán generarse reportes de estas evaluaciones. Estos reportes deberán incluir:

- Evaluación de la calidad de los datos. Es la evaluación científica y estadística de los datos obtenidos por las actividades de aseguramiento y control para determinar si los datos de vigilancia son correctos y adecuados en cuanto a calidad y cantidad; así como las condiciones particulares del entorno (precipitación, temperatura, presión, intensidad de actividades productivas y su tipo de fuente, entre otras). Los datos del programa de aseguramiento y control de calidad pueden valorarse a varios niveles de agregación para determinar si los objetivos de calidad de datos se han cumplido. Por ejemplo, los datos de aseguramiento de calidad de las pruebas de precisión, exactitud y parcialidad pueden ser agregados por cada equipo monitor ó para todos los monitores de un SVCA que empleen ese mismo método.
- 

- *Reportes de precisión y exactitud.* Estos reportes deben generarse anualmente y evalúan la precisión y la exactitud de los datos contra los requerimientos establecidos.
- *Reportes de Aseguramiento de calidad.* Un reporte de AC debe proporcionar una evaluación de los datos de aseguramiento y control por un periodo determinado de tiempo, para establecer si los objetivos de calidad de datos se han alcanzado en ese período.
- *Intercambio de experiencias.* Las experiencias obtenidas durante la implementación del programa aseguramiento y control de la calidad deben compartirse con otras autoridades ambientales, con el sector académico y otras entidades privadas, antes que ellas inicien las respectivas vigilancias, con el objeto de obtener una retroalimentación valiosa para el mejoramiento del SVCA. Es importante que la información derivada de estos intercambios, sea debidamente documentada y se refleje en los informes anuales de aseguramiento de calidad del aire.

Después de llevar a cabo la etapa de generación de reportes, puede enfrentarse con bases nuevas, la planeación de las acciones correctivas que permitan obtener mejores resultados continuando así el ciclo del programa de aseguramiento de calidad.

9.1.7. CARACTERÍSTICAS ORGANIZATIVAS DE UN PROGRAMA DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE LA CALIDAD

Los objetivos de vigilancia, las limitaciones económicas y la disponibilidad de personal capacitado, son factores determinantes en el alcance y complejidad del programa de AC y CC, y a la vez la sostenibilidad del mismo.

Los principios generales de la práctica del aseguramiento y control de la calidad son aplicables a todo tipo de metodología de vigilancia, sin embargo, los detalles del programa y del personal requerido dependerán en gran medida de la técnica de vigilancia implementada. Si se usan muestreadores semiautomáticos, el programa de AC deberá hacer énfasis en aseguramiento de la calidad de las actividades de laboratorio, incluido el análisis de las muestras recolectadas; si se utilizan analizadores automáticos, se deberá concentrar esfuerzos en las mediciones.

En cualquier circunstancia, es sumamente importante que todo el personal sea consciente de que el programa de AC y CC, es un componente integral y vital de cualquier programa de vigilancia de la calidad del aire. Los operadores deben estar estrechamente familiarizados con los diferentes aspectos relacionados con los procedimientos de operación y manejo de datos. Por otro lado, la comunicación constante entre los supervisores de control de calidad y los operadores, brinda la oportunidad de intercambiar ideas y examinar los procedimientos de operación. Esta práctica puede ser efectiva para identificar rápidamente los problemas y mejorar la comunicación entre el personal de operación y los supervisores responsables de la implementación formal de los programas de AC. Un programa adecuado de AC también debe detallar los procedimientos destinados a garantizar un flujo efectivo de información entre las autoridades centrales y los operadores, además de proporcionar una adecuada capacitación en procedimientos de CC.

9.1.8. OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS

Los datos recolectados por un SVCA deben responder a las necesidades de los usuarios de la información, es decir a los objetivos de vigilancia trazados para el SVCA, y servirán en la mayoría de los casos sólo para dar respuesta a las preguntas contempladas cuando se trazaron estos objetivos.



Si el SVCA esta bien diseñado, bien operado y tiene un programa efectivo de aseguramiento de calidad, estas preguntas se podrán responder, con un grado de incertidumbre conocido.

Los objetivos de calidad de datos, trazados por usuarios finales de la información (autoridades ambientales, entes de planeación, academia, etc.) con base en los objetivos de vigilancia, determinaran como deben recolectarse los datos, cuales son los criterios para tomar decisiones y cual es la incertidumbre aceptable para esas decisiones.

Esta incertidumbre es la suma de todas las fuentes de error asociadas a todo el proceso de obtención y procesamiento de los datos. Puede representarse por la siguiente ecuación:

$$U_o^2 = U_R^2 + U_p^2 + U_c^2$$

Donde:

U_o = Incertidumbre total.

U_R = Incertidumbre de la representatividad espacial y temporal.

U_p = Incertidumbre de la precisión.

U_c = Incertidumbre de la exactitud.

Incertidumbre de la representatividad espacial y temporal. La representatividad es el atributo de calidad de datos más importante de un SVCA. El término se refiere al grado en el cual los datos representan de una manera precisa y exacta, una característica de una población, la variación de un parámetro en un punto de muestreo, la condición de un proceso o una condición ambiental. No importa que tan preciso y exacto pueda ser un dato si no representa lo que debería representar. La incertidumbre de la representatividad se puede controlar así:

- Diseñando un SVCA con un tamaño adecuado, con sitios representativos consistentes con los objetivos de vigilancia.
- Determinando y documentando las restricciones que impone la meteorología, la topografía, las fuentes de emisión cercanas, en los sitios de vigilancia.
- Estableciendo periodos de muestreo adecuados para los objetivos de vigilancia

Incertidumbre de la calibración e incertidumbre de la precisión. Estas incertidumbres están asociadas a todas las etapas de obtención y procesamiento de los datos. En cada una pueden ocurrir errores, que se dispersan en la siguiente. La finalidad del programa de AC es mantener la incertidumbre en un nivel aceptable, mediante la aplicación de varias técnicas. Si se dispone de recursos suficientes, se puede evaluar la incertidumbre en cada etapa de la medición, de lo contrario puede calcularse, evaluarse o estimarse la incertidumbre general de la medición.

Los tres indicadores más importantes de la calidad de los datos que permiten el cálculo de la incertidumbre general de la medición son:

- La precisión, que se define como grado de concordancia entre las mediciones individuales de una misma propiedad bajo condiciones similares expresadas generalmente en términos de la desviación estándar. Representa el componente aleatorio del error.
 - La parcialidad, definida como la desviación sistemática o persistente en un proceso de medición que causa errores en una misma dirección. Puede ser determinada estimando la desviación positiva y negativa del valor real calculada como un porcentaje del mismo.
 - El límite de detección, que es el valor inferior del intervalo de variación de una característica (como la concentración) que un procedimiento que utiliza un método de medición específico puede discernir.
- 

El término exactitud ha sido empleado en este documento y en general, para representar la medida de la cercanía al “valor real” de una medición pero cuando se habla de incertidumbre, esta medida puede representarse mejor como una combinación de las componentes del error asociadas a la precisión y la parcialidad.

9.1.9. ESTABLECIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE CALIDAD DE DATOS

Teniendo claro el concepto de incertidumbre y haciendo que los usuarios finales lo entiendan puede enfrentarse el proceso de establecimiento de los objetivos de calidad de datos. Este proceso debe permitir³⁴:

- Establecer un lenguaje común entre los usuarios de la información y el personal técnico del SVCA.
- Seleccionar objetivos de calidad de datos que permitan responder adecuadamente las preguntas planteadas por los objetivos de vigilancia.
- Proveer una estructura lógica dentro de la cual el proceso iterativo del programa de Aseguramiento de Calidad (planeamiento, implementación, evaluación, reporte), puede ser logrado eficientemente.
- Orientar y reforzar el desarrollo del diseño del SVCA, al definir los requerimientos espacio temporales para la implantación del SVCA.³⁵

El desarrollo de los objetivos de calidad de datos puede ser complejo y su resultado es definitivamente único, porque obedece a objetivos de vigilancia particulares para cada sistema de vigilancia de calidad de aire (SVCA).

Lo más recomendable es tomar el objetivo de vigilancia más exigente, en términos de calidad de datos, y establecer los objetivos de calidad de datos necesarios para cumplirlo; Por lo general los demás objetivos de vigilancia, que son menos exigentes, podrán cumplirse sin objetivos de calidad de datos adicionales. Si ésta labor es exitosa se logrará minimizar la incertidumbre espacial y temporal asociada a los datos, que responde en esencia al diseño del SVCA. Resta minimizar la incertidumbre de las mediciones, que corresponde a la operación del SVCA. Ésta tarea se logra evaluando y controlando los datos, en las fases de muestreo, procesamiento y análisis, contra los criterios de aceptación impuestos por los objetivos de calidad de datos, para cada una, en términos de los siguientes atributos:

- Precisión.
- Parcialidad.
- Representatividad temporal y espacial.
- Limite de detección.
- Integridad temporal. Se define como la relación entre la cantidad de datos validos obtenidos por un sistema de muestreo comparado y la cantidad ideal que debería obtenerse en condiciones normales de operación.
- Comparabilidad. Es decir el grado de confiabilidad con que un conjunto de datos puede ser comparado con otro.

³⁴ US- EPA. Guidance for the Data Quality Objectives Process EPA QA/G4. 1996

³⁵ La US-EPA ha desarrollado software para orientar el proceso de creación de los objetivos de calidad de datos, con miras a diseñar o reformar el diseño de un SVCA, este software denominado “Data Quality Objectives (DQO) Decision Error Feasibility Trials (DEFT)” puede descargarse de www.epa.gov/ttn/amtic/.



9.1.10. ELEMENTOS DE ASEGURAMIENTO DE CALIDAD³⁶

A) Documento Control

Lo más recomendable es que todo el personal que labora en un SVCA cuente con procedimientos detallados para la realización de sus tareas. Sin embargo para poner en marcha un programa de AC, se deben elaborar al menos los procedimientos detallados para la operación rutinaria del SVCA, los procedimientos de mantenimiento preventivo, los procedimientos de manejo, validación, análisis de datos y generación de reportes, etc.

Se pueden identificar de una manera amplia los siguientes procedimientos para implementar un proyecto de aseguramiento de la calidad:

1. Procedimientos de muestreo
2. Procedimientos de calibración
3. Procedimientos Analíticos
4. Procedimientos de análisis de datos, validación y reporte.
5. Procedimientos desempeño y auditoria del sistema
6. Mantenimiento preventivo
7. Plan de Aseguramiento de la calidad
8. Proyectos de aseguramiento de la calidad

Todos estos documentos deben estar escritos en un documento de control, en manos del coordinador de aseguramiento de la calidad.

B) Objetivos y Políticas de aseguramiento de la calidad

Cada organización se debe escribir y dar a conocer a su personal sus políticas de aseguramiento de la calidad.

En calidad del aire los objetivos generales del aseguramiento de la calidad son producir datos que reúnan los requerimientos de sus usuarios en términos de integridad, precisión, exactitud, representatividad e intercomparabilidad, reduciendo los costos de la calidad.

Los objetivos de la calidad deben ser difundidos entre el personal de la organización relacionado al proceso con le fin de sensibilizarlos en todo lo referente a la importancia de la calidad de los datos en términos de los parámetros expuestos anteriormente.

C) Organización

La organización del aseguramiento y la calidad plantea actividades como:

- La rigurosidad que corresponde a cada actividad de aseguramiento de calidad
- Preparación del programa de aseguramiento de calidad
- Identificación de los problemas del AC a ser resueltos
- Implementación el plan de AC
- Definir un organigrama de responsabilidades y trabajos de cada cargo
- Definir objetivos del AC (Precisión, exactitud e integridad) para cada sistema de medición
- Definir entidades y personas de soporte al AC
- Proveer una guía para el aseguramiento de la calidad del SVCA, procedimientos de laboratorio, validación de datos, mantenimiento de equipos, calibración, etc.

³⁶ U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development.



D) Planeación de la calidad

La planeación de la calidad en mediciones de contaminación de aire es concebida para obtener una calidad de datos aceptables a unos costos razonables. La planeación en general es pensada para el mejoramiento de una serie de acciones para a su vez cumplir con un objetivo trazado y comunicarlo a las personas encargadas de ejecutar dichas acciones

En un sistema de medición se encuentran las siguientes actividades y elementos críticos:

- Toma de la muestra
- Análisis de la muestra
- Procesamiento de datos
- Equipo asociado
- Personal: operadores y analistas

La elaboración del plan de aseguramiento de la calidad implica conocer y definir y conocer todo el proceso de muestreo. Se debe hallar respuesta a preguntas como:

- Cuales actividades deben ser consideradas
- Cuales de estas actividades son las más críticas
- Cuales límites de aceptabilidad pueden ser asignadas a estas actividades
- Cada cuanto deben ser verificadas y chequeadas estas actividades
- Cuales métodos de medida deben ser usados para chequear estas actividades
- Que acciones deben tomarse si se superan los rangos de aceptabilidad

E) Entrenamiento

El entrenamiento continuo y planeado del personal que hace parte del SVCA, es una parte fundamental del programa de AC. El entrenamiento tiene como objeto incrementar la efectividad del personal, y de su organización. El programa de AC requiere que se establezca una programación de entrenamiento que especifique, el perfil profesional, el entrenamiento y la frecuencia del mismo para cada cargo. Todo el personal involucrado en la operación y en el mismo programa de AC, debe tomar los cursos de entrenamiento programados, sin dejar de atender sus responsabilidades.

Se debe entrenar a todo el personal que participa en el proceso (muestreo, análisis, reducción de datos y aseguramiento de la calidad). Todo el personal debe estar involucrado para garantizar los reportes con una gran calidad de los datos

Cada funcionario debe estar enterado de los objetivos de la calidad y su responsabilidad en el proceso. Además conocer las bases teóricas de las actividades que realizan. Regularmente se deben hacer este tipo de capacitaciones, evaluando al tiempo la apropiación de los conocimientos.

Todo el personal, administrativo, profesional y técnico que participa de las diferentes actividades que se dan con la vigilancia permanente de la calidad del aire, requieren de ser capacitados y entrenados principalmente en el área de evaluación y control de la contaminación del aire.

Esta capacitación puede consistir en cursos, talleres ó teleconferencias, ofrecidas por autoridades ambientales de orden internacional como la EPA, el CEPIS de la OPS, entre otras, ó de orden nacional como el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el IDEAM, Centros



Ambientales de Universidades, instituciones académicas formales, asesores ambientales reconocidos, ó pares, complementados con actividades internas tales como exposiciones, lecturas o practicas en campo.

Se recomienda que las actividades de capacitación y entrenamiento se enfoquen a los siguientes temas:

- Legislación aplicada al recurso aire.
- Normas Técnicas para la evaluación de la calidad del aire.
- Aseguramiento de la calidad, de datos, de documentos, de equipos.
- Vigilancia de variables ambientales.
- Calibración de equipos de vigilancia manuales y automáticos.
- Practicas de laboratorio para los Métodos analíticos de calidad del aire.
- Meteorología aplicada a la contaminación del aire.
- Aplicación de cursos de autoinstrucción sobre aire, meteorología.
- Administración y revisión de sistemas administrativos.
- Evaluación de impactos de la calidad de aire en la salud humana
- Estadística aplicada a manejo y presentación de datos ambientales.
- Inventario de emisores y emisiones de contaminantes del aire.
- Evaluación de emisiones atmosféricas en fuentes fijas y móviles.
- Sistemas generales para el control de la contaminación del aire.

F) Preparación del SVCA

Se refiere a los aspectos de diseño de un SVCA de monitoreo. La elección y prueba correcta de sitios de muestreo es fundamental para obtener datos representativos y de alta calidad. Los elementos de diseño más importantes son:

- Dominio del SVCA
- Localización de las estaciones de muestreo
- Examen del sitio
- Selección de los métodos y equipos de muestreo

G) Mantenimiento Preventivo

El beneficio mas importante de un programa de mantenimiento preventivo eficaz es el incremento de la disponibilidad del sistema de medición en relación al tiempo, es decir, tiene que ver directamente con la integridad de los datos. Adicionalmente una operación correcta de los equipos se ve traducida en una alta calidad de los datos que este equipo tome.

Este elemento del aseguramiento de la calidad se deben concretar en un programa continuo de mantenimiento preventivo, en este se definirán los repuestos y consumibles que deben permanecer en stock para no suspender la operación de los equipos ante un probable reemplazo de estos elementos.

H) Recolección de la muestra

El acopio de la información consiste en la captura, colección y manejo de los datos que generalmente la lleva a cabo una persona ó entidad, diferente a la que realiza la validación, por lo que se necesitan fijar procedimientos y reportes que especifiquen QUIÉN está a cargo, de QUÉ parte del proyecto y CÓMO llevó a cabo su trabajo. Además deberá incluirse el DÓNDE, es decir la localización geográfica, el CUÁNDO, en el cual se reportarán no sólo las horas específicas, días, meses o años, sino también tópicos importantes como variaciones diurnas y estacionales, y el POR QUÉ, que consiste en establecer el propósito de la colección de los datos.



Los procesos de captura de información difieren dependiendo del tipo de tecnología que tenga cada estación. En las estaciones automáticas, este procedimiento es menos susceptible de presentar fallas, siempre y cuando se garantice la continua y adecuada comunicación entre la estación remota y la central de información y además, la seguridad de la misma. Para el caso de analizadores manuales o semiautomáticos, donde la captura de datos es realizada a través de una persona y generalmente requiere de procedimientos de cálculo realizados por el operador del SVCA, laboratorista u otro cargo al que le sea asignada esta labor, existe siempre mayor posibilidad de errores que puedan invalidar un dato.

Se deben hacer chequeos durante el muestreo para determinar el desempeño del equipo. Se deben hacer graficas de control para registrar las novedades durante la recolección de la muestra. El tratamiento de la muestra en el postmuestreo es fundamental para la representatividad y calidad de esta.

Cuando un SVCA cuenta con estaciones automáticas para el monitoreo de los diferentes contaminantes criterio y la descarga de dicha información es realizada a través de comunicación telefónica, radial, satelital, cable u otro sistema de transmisión de datos, debe garantizar y mantener el correcto funcionamiento del medio de comunicación empleado para evitar que en la transferencia y descarga de datos a la estación central de información, se pierdan registros o sean transferidos de forma errónea, haciendo que el dato quede inválido.

Toma de datos en SVCA automáticos:

Si bien es cierto que con los analizadores automáticos se reduce la generación de datos erróneos y la cantidad de datos no captados, debido a que existe menor manipulación de la información, es incorrecto pensar que por tal motivo no es necesaria la existencia de procedimientos que aseguren la calidad en la transmisión de datos.

De manera interna cada analizador debe realizar procedimientos de traducción de datos a señales análogas (voltajes) y de éstas a señales digitales las cuales son las que pueden ser visualizadas en el datalogger de cada equipo. Debido a esto, es imperativo que existan programas estrictos de revisión y calibración de los equipos, para garantizar que la señal que se visualiza en el monitor coincida con las salidas eléctricas recibidas y coincida con la información almacenada en la unidad de memoria del analizador, es decir poder asegurar que el sistema de comunicación no introduce perturbaciones. Finalmente, debe verificarse la consistencia de datos entre el datalogger y el sistema central de información.

Se recomienda verificar la consistencia global de toda la cadena de transferencia de datos, registrando en el sistema central los datos generados durante las calibraciones multipunto. Por otro lado se debe verificar que la distribución de información desde el sistema central de datos a los usuarios finales se realice manteniendo la consistencia de la información generada, para ello se recomienda comparar periódicamente grupos de datos, escogidos arbitrariamente, y obtenidos de cada una de las bases de datos para periodos iguales, verificando que su contenido permanezca sin alteración atribuida a los sistemas de envío y recepción de información.

Es posible que existan estaciones donde a pesar de contar con analizadores automáticos, la transmisión de los datos hacia la central de información no puede ser realizada directamente, sino que es almacenada en un procesador, también conocido como CPU (Central Processing Unit) y de ahí son descargados en algún medio magnético de almacenamiento de información (USB, CD ó MMC-SD) y trasladado al centro de control. En estos casos, donde la transferencia de datos no es realizada directamente sino a través de medios externos al equipo, se hace necesario que el SVCA considere adicionalmente al programa de mantenimiento del equipo, un programa de cadena de custodia, que garantice que los datos no van a sufrir cambios, ni deterioro en su calidad.

Transferencia de información en estaciones manuales

El acopio de información en SVCA que cuentan con equipos manuales es bien diferente al mismo proceso en las estaciones automáticas; ya que la generación de datos de concentración de cualquiera de los contaminantes para los cuales es posible emplear estos métodos para su monitoreo, comienza desde el momento en que las muestras llegan al laboratorio y son procesadas. Por lo anterior, es indispensable que existan procedimientos detallados relacionados con la cadena de custodia de las muestras, con los respectivos registros de control de manipulación de las mismas; de esta forma se puede garantizar la calidad de los datos, en esta etapa del monitoreo.

Una vez las muestras son procesadas en el laboratorio a través de los diferentes métodos de análisis y determinación de la concentración de los contaminantes (gravimetría, colorimetría, etc.), debe hacerse llegar esta información a la central de información, donde comenzará el respectivo proceso de validación de la información obtenida.

I) Análisis de la muestra

Los chequeos de control por parte del analista deben conducir a:

- Determinar el desempeño del sistema analítico
- Estimar la variabilidad de los resultados desde el sistema analítico en términos de precisión.

Se deben llevar graficas de control para determinar cuando el sistema o procedimientos analíticos no funcionan adecuadamente y se deban tomar medidas correctivas.

J) Reporte de errores en los datos

Los errores humanos son la fuente más común de errores en los reportes de datos. Los procedimientos de validación de datos pueden ser usados para revisar los niveles operacionales y de análisis. Las graficas de control son una herramienta común usada para la revisión de características críticas en sistema de muestreo

K) Procura del control de calidad

Se refiere principalmente a la calidad de los equipos de muestreo o monitoreo. Se sugiere intercambiar experiencias con otros usuarios de equipos para evaluar calidad, soporte y otras ventajas de los equipos seleccionados. Se deben hacer controles de los estándares de calibración, químicos y consumibles necesarios.

Visitas regulares:

A pesar de que los sistemas automáticos que usan comunicaciones telemétricas proporcionan un método de recopilación de datos efectivo y eficiente para SVCA geográficamente muy extendidas con gran número de analizadores automáticos, se requerirán también visitas regulares de apoyo para la validación de los datos, las cuales se llevarán a cabo tan frecuentemente como la operación lo necesite y lo permitan las restricciones geográficas o de disponibilidad de personal.

Las visitas regulares buscan asegurar la operación adecuada de los instrumentos y maximizar la captura de datos y la integridad de los mismos. Se recomienda que tengan una frecuencia de al menos una por semana. Dentro de estas visitas regulares semanales deben realizarse visitas especiales una vez por mes y una vez por año donde se efectuarán las pruebas más rigurosas y los procedimientos más complejos.

Algunas de las funciones que se llevan a cabo durante las visitas a los sitios de muestreo son:

1. Preparación de instrumentos y elementos consumibles necesarios en la visita.
2. Registro del ingreso del personal a la estación en el libro de control.
3. Inspección visual del sitio, verificación del correcto funcionamiento de los equipos y sensores meteorológicos, limpieza a los toma-muestras. Verificación de cambios en el entorno del sitio de vigilancia que afecten los criterios de ubicación.
4. Revisión de alarmas y eventos registrados por el sistema de adquisición de datos y analizadores o muestreadores. Registro de los cambios inusuales.
5. Inspección y limpieza de manifolds y líneas de conducción de gases. Chequeo de fugas, y reparación de las fallas presentadas.
6. Reposición de consumibles como filtros de partículas suspendidas, para los analizadores de gases, medios de absorción de contaminantes para los sensores electroquímicos, etc., con la frecuencia recomendada por el fabricante.
7. Cambio de lavadores, filtros, desecadores y otros elementos de purificación del sistema de aire cero para calibración, según las recomendaciones del fabricante.
8. Chequeos y pruebas de diagnósticas sugeridas por los fabricantes.
9. En el caso de equipos automáticos, verificación de span y cero en cada instrumento³⁷ de acuerdo con los manuales del fabricante.
10. Calibración multipunto con la frecuencia recomendada por el fabricante o cuando los valores de span o cero salgan del intervalo establecido por los objetivos de calidad de datos.
11. Calibración a los equipos meteorológicos de acuerdo con lo establecido por el fabricante.
12. Mantenimiento preventivo de los equipos de acuerdo con el manual del fabricante, a fin de anticipar la existencia de problemas.
13. Verificación de las características actuales del entorno en cuanto a emisiones por fuentes fijas o móviles u otras actividades nuevas del entorno...

El desarrollo de las actividades descritas en los numerales 3 al 12, deben ser registradas en el libro de control de la estación.

El programa de AC debe establecer procedimientos separados para cada tipo de visita regular, seleccionando las tareas de acuerdo a su complejidad, su rigurosidad y a la frecuencia con que deben realizarse, es decir las tareas de las visitas regulares anuales serán las más exhaustivas y complejas, las mensuales lo serán menos y las semanales serán las más sencillas. Así mismo deben elaborarse los formatos correspondientes para la documentación de las visitas (listas de chequeo) y la recopilación de los datos de AC (Desviación de cero y span, ganancias, calibraciones etc.).

Las actividades rutinarias de aseguramiento y control de la calidad que deben efectuarse en cada estación componente del SVCA, pueden resumirse como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Actividades rutinarias de AC para cada estación de vigilancia

ACTIVIDAD	FRECUENCIA MÍNIMA
Visita regular	Semanal
Calibración	Mensual
Verificación del desempeño	Anual
Auditoría interna	Anual
Auditoría externa	Bianual

³⁷ No deben realizarse ajustes de span y cero durante estas pruebas, que son únicamente de verificación dado que alteran inadecuadamente las ganancias de los equipos. Los ajustes se deben realizar solo durante las calibraciones multipunto.

L) Calibración

Es el procedimiento más importante en la medición. La calibración es un proceso que establece las relaciones entre los resultados que el sistema reporta de muestreo y un patrón conocido. Un plan de calibración debe ser implementado para todos los equipos involucrados en el sistema de medición. Se deben implementar cartas de registro de las calibraciones.

La adecuada calibración del equipo de vigilancia, es esencial para obtener datos precisos y reproducibles de calidad del aire. La importancia de los procedimientos de calibración para los equipos de vigilancia de la calidad del aire nunca será suficientemente enfatizada. Solo a través de la calibración de los diferentes equipos de vigilancia (incluso el datalogger), así como de las pruebas desviación del span y cero, realizadas dentro de un estricto cronograma, y observando rigurosamente los procedimientos, podrán conocerse y certificarse la calidad de los datos de vigilancia. El programa de AC debe recopilar cuidadosa y exhaustivamente los datos generados por estas actividades para su posterior evaluación.

El programa de AC y CC, debe verificar que el material utilizado para la calibración de los diferentes equipos, como los medidores de flujo, de presión, controladores de flujo másico, fotómetros, generadores de ozono, lentes de calibración, sistemas de permeación, cilindros de mezclas de gases, sensores de frecuencia, voltímetros y amperímetros, entre otros, estén certificados contra estándares de referencia o de transferencia, rastreables a estándares primarios nacionales o internacionales, por instituciones reconocidas, o autorizadas³⁸.

La frecuencia de calibración de los equipos de vigilancia de calidad del aire debe ser la siguiente:

- En intervalos regulares de seis meses como máximo.
- Antes de que un equipo recientemente instalado empiece a reportar datos.
- Antes de retirar un equipo del sitio de vigilancia.
- Después de una reparación o el cambio de algún repuesto.
- En intervalos de un mes para un equipo nuevo por un mínimo de 3 meses, para establecer su estabilidad.
- Cada vez que el equipo se salga del rango de control de span y cero.

La frecuencia de calibración de los instrumentos meteorológicos, debe ser:

- En intervalos regulares de un año como máximo.
- Antes de que un equipo recientemente instalado empiece a reportar datos.
- Después de una reparación o el cambio de algún repuesto.

Existe una gran variedad de métodos para realizar una calibración, que dependen de la tecnología y de la calidad de datos deseada, por tanto los procedimientos específicos para calibración de cada equipo serán considerablemente diferentes. En general se recomienda seguir las indicaciones del fabricante, e integrarlas a los procedimientos específicos de calibración de los diferentes equipos elaborados por el programa de AC.

Los datos de vigilancia anteriores a la calibración deben corregirse con base en la misma para que puedan aprobar las instancias de validación.

Para llevar a cabo la calibración individual de diferentes métodos de medición, según el tipo de muestreador y poder realizar comparaciones entre un equipo y otro, aunque sean métodos diferentes se recomiendan los procedimientos siguientes (Tabla 12):

³⁸ Como el US - National Institute of Standards and Technology (NIST), la Agencia de protección ambiental US-EPA, el IDEAM.



Tabla 12. Procedimientos de calibración

<p>MUESTREADORES PASIVOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación contra otros métodos de muestreo y llevar a cabo calibraciones entre otros laboratorios analíticos. • No se pueden realizar calibraciones de campo
<p>MUESTREADORES ACTIVOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calibraciones entre otros laboratorios analíticos usando soluciones estándar. • Calibración dentro y entre SVCA con gases de referencia. • Comparaciones de campo contra monitores automáticos y auditorías de procedimientos operacionales, son de gran utilidad.
<p>MUESTREADORES AUTOMÁTICOS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calibraciones entre estándares de referencia usados por otros laboratorios. • Los sitios deben ser calibrados dentro y entre SVCA usando sistemas o fuentes de gases de referencia. • Llevar a cabo auditorías

Revisión de Cero y Span: En el caso de los analizadores automáticos, la verificación de span y cero es una manera rápida de revisar su desempeño. Dicha revisión, debe realizarse al menos semanalmente. Si los analizadores disponibles tienen la capacidad de realizar el chequeo de span y cero automáticamente y guardar los resultados es posible programar éstas pruebas diariamente, cuidando que los valores de ganancia no sean modificados automáticamente. Además deben programarse para minimizar la pérdida de datos importantes (aproximadamente por un intervalo de una hora), es decir durante periodos del día tiempo poco relevantes, como la madrugada a menos que el sitio de vigilancia presente niveles importantes a esa hora.

Los procedimientos para estas verificaciones dependen de la tecnología de los analizadores y deben elaborarse a partir de las recomendaciones del fabricante.

El programa de AC debe elaborar los formatos adecuados para documentar de manera detallada los resultados de éstas pruebas y las observaciones de los técnicos que las realizan. Si el analizador se sale del intervalo de control, debe realizarse una calibración multipunto y debe identificarse, remediarse y documentarse la causa de la anomalía.

Las reparaciones necesarias deben hacerse de acuerdo con la programación de mantenimiento correctivo para minimizar la pérdida de datos.

M) Acciones correctivas

Existen dos tipos de acciones correctivas: En el sitio (para corregir datos no satisfactorios o reparar el equipo) o de largo plazo (para eliminar las causas de la inconformidad con los datos). Para ejecutar acciones correctivas se deben seguir básicamente los siguientes pasos:

- Definir el problema
- Asignar la responsabilidad para la investigación del problema
- Determinar la acción correctiva para eliminar el problema
- Asignar la responsabilidad para implementar la acción correctiva
- Establecer la efectividad de la acción correctiva e implementarla
- Verificar que el problema desapareció con la acción tomada

N) Costos de la calidad

Se deben identificar los costos totales del control y aseguramiento de la calidad, para minimizarlos al máximo, se pueden identificar los siguientes tipos de costos en sistemas de medición de contaminación del aire:

- Costos de prevención
- Costos de valoración (relacionado con el muestreo y análisis de datos)
- Costos de corrección de fallas

Se deben hacer cuadros periódicos de costos del control de la calidad

O) Pruebas inter- laboratorios y dentro del laboratorio

Tiene el propósito de detectar fuentes de error en las mediciones y la estimación del sesgo y variabilidad en las medidas.

P) Procedimientos de auditoria

Las auditorias de desempeño son hechas para evaluar cuantitativamente la calidad de los datos producidos por el total del sistema de medición, es decir, recolección de la muestra, análisis de la muestra y procesamiento de datos.

Las auditorias de desempeño están comúnmente limitadas por una porción del total del sistema de medición (medición de rata de flujo, análisis de muestras, etc), pero también pueden incluir el total del sistema de medición.

El propósito de estas actividades es detectar parcialidades sistemáticas en los datos reportados por el SVCA, fallas en: Su programa de AC, en el sistema de administración, en el diseño del SVCA, y en general efectuar una revisión completa del programa de vigilancia. Las auditorias internas deben desarrollarse con la colaboración de otras entidades dedicadas a la vigilancia de calidad del aire (pares), que cuenten con personal idóneo y equipos de iguales o preferiblemente de mejores especificaciones que los propios. Las auditorias externas, en cambio serán realizadas por las autoridades ambientales responsables del acopio de los datos de vigilancia, es decir el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial en cabeza del IDEAM.

En este caso el programa de AC debe limitarse a realizar la programación de estas actividades de acuerdo a la frecuencia recomendada anteriormente, a verificar que se cumpla esta programación y a implementar las acciones correctivas que resulten de las auditorias. Sin embargo el programa de AC puede verificar que se utilicen procedimientos adecuados, dependiendo de la complejidad y la profundidad de las auditorias implementadas. En el documento titulado “SLAMS/NAMS/PAMS Network Review Guidance”, editado por la US-EPA, se encuentran lineamientos para la realización de auditorías.

Dentro de esta actividad también se realiza la intercomparación del desempeño de los instrumentos con los que cuenta el SVCA, ya sea entre si, o con los del laboratorio de referencia si el programa de vigilancia cuenta con uno. La meta que se persigue es asegurar que todos los instrumentos del SVCA estén operando en el mismo nivel, es decir que se obtengan mediciones comparables entre si mismas. Aunque es recomendable involucrar asesores externos durante este proceso de verificación para obtener una mayor imparcialidad, también puede realizarse solo con el personal interno del programa de AC.

Pueden realizarse un gran número de pruebas en los diferentes equipos tanto de vigilancia de calidad de aire como meteorológico. El programa de AC debe seleccionar cuáles debe implementar según los recursos con los que se cuente. Las pruebas de verificación de desempeño para los equipos de calidad del aire han sido estandarizadas en el Código de Regulaciones Federales del



Gobierno de los Estados Unidos título 40 parte 58, anexos A y B³⁹. Los procedimientos para las pruebas a los equipos meteorológicos pueden encontrarse en la Guía de Instrumentos y métodos de Observación Meteorológicos de la OMM⁴⁰. El programa de AC debe utilizar estas fuentes para desarrollar y adaptar sus propios procedimientos para las pruebas de verificación de desempeño.

Q) Validación de datos

Aunque se implemente y se opere a satisfacción, un SVCA, pueden generarse datos incorrectos. Antes que dicha información sea enviada a la autoridad ambiental nacional, es necesario establecer también un sistema de almacenamiento, revisión y validación de datos adecuado, que permita su depuración para aceptarlos ó no.

En este proceso se filtran, aceptan o marcan datos para su análisis posterior (con criterios más amplios). Los datos invalidados deben ser archivados, se deben conservar.

La validación depende del tipo de datos y propósitos de las mediciones. Algunos métodos de validación son:

- Test del total de datos
- Test de límites
- Test de relaciones entre parámetros
- Test de comparación entre sitios

Puede ser realizada por varios métodos, manuales o computarizados

Revisión de datos: El examen ó revisión de los datos es un proceso rutinario, que el personal calificado debe llevar a cabo en cada visita a la estación. Este proceso de revisión da como resultado metadatos usados posteriormente por el equipo de procesamiento como insumos para el proceso de validación de los datos de vigilancia. Los metadatos, definidos de una manera sencilla, son las anotaciones y observaciones realizadas diariamente durante la operación de la estación, junto con la información sobre procesos como la verificación de span y cero y la calibración de los equipos, aportadas por los operadores, en los formatos respectivos.

La revisión sirve tanto para rechazar datos erróneos o inválidos e informar a los operadores de campo de fallas o problemas del equipo que requieran atención, como para identificar datos extremos de concentración de contaminantes que se salgan de las normas de calidad del aire. En general las consideraciones que se tienen que tomar en cuenta para la revisión de los datos son:

- Características e historia de instrumentos.
- Factores de calibración y tendencias.
- Datos fuera de intervalo o negativos.
- Picos o aumentos repentinos.
- Características del sitio de vigilancia.
- Efectos de la meteorología.
- Época del año y hora del día.
- Niveles de otros contaminantes.
- Observaciones desde otros sitios
- Eventos especiales (marchas, incendios, días festivos, etc.)

³⁹ Code of Federal Regulations. Title 40 Protection of Environment. Chapter I Environmental Protection Agency. Volume 5, part 58 Ambient Air Quality Surveillance.

⁴⁰ Organización Meteorológica Mundial - OMM. Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos. OMM-No 8. Ginebra, Suiza. 1990.



Además existen algunos criterios que se utilizan para estimar la calidad de los datos eliminando a los sospechosos y tomando en cuenta las consideraciones anteriores. Estos son:

- Las lecturas que caigan fuera del intervalo de detección del instrumento deberán ser eliminadas de la base de datos final, después de haber verificado la calibración del equipo.
- Datos que presenten cambios muy rápidos con respecto al tiempo, deberán tomarse con precaución verificando las condiciones atmosféricas o la presencia de alguna fuente de contaminación.
- Un importante indicador de la calidad de los datos pueden ser las características específicas de una estación de vigilancia, pues sus alrededores y las fuentes locales, pueden influenciar las mediciones.

Existe una fuerte relación entre la concentración de los contaminantes y las condiciones meteorológicas como dispersión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar; las cuales tendrán que tomarse en cuenta cuando existan datos dudosos.

Ya revisados los datos se procederá a la validación de los mismos para crear una base de datos confiable y que pueda ser utilizada para cumplir con los objetivos de vigilancia que se fijaron.

Validación: La validación es el proceso de confirmar los datos de vigilancia, acopiando e inspeccionando evidencia objetiva que confirme que los requerimientos específicos del uso final de los datos han sido cumplidos.

La validación de los datos debe hacerse en varios niveles, de manera manual o mediante aplicativos de software. En cualquiera de los dos casos es necesario el concurso de un profesional tipo 2 con experiencia y criterio para calificar, rechazar y/o aceptar los datos obtenidos del muestreo; para esto, debe conocer los principios básicos de la química de los contaminantes, el comportamiento de los analizadores, las condiciones meteorológicas locales, los usos de suelo de la zona de estudio, etc., y debe considerar además factores como las desviaciones del cero y span, los resultados de las calibraciones y los ajustes realizados a los parámetros de operación de los equipos, el historial de desempeño y servicio realizado a los equipos (es decir, los metadatos provenientes de la revisión reportados por los operadores), junto con los ciclos estacionales, las condiciones climáticas inusuales, los datos reportados para otros contaminantes y variables ambientales en los intervalos de tiempo adecuados desde el punto de vista de la cinética de las reacciones de los contaminantes atmosféricos.

Como se mencionó anteriormente, existen varios niveles en la validación de datos, el primero de ellos es el que se efectúa en campo, otro que se realiza de manera automática por el equipo (según la programación realizada al mismo) y otro que es realizado en la estación central por la persona encargada en el SVCA de revisar la información generada.

- A. La validación de datos en campo consta fundamentalmente en identificar datos erróneos en el Datalogger, en esta actividad se identificarán aquellos datos que se encuentren fuera del rango lógico de datos y deben ser notificados los sucesos que se hayan presentado y que puedan haber influenciado directamente la veracidad de la información, como por ejemplo: canales bloqueados, interrupciones por procesos de calibración o por falta de energía, problemas en el registrador o en cualquier otro instrumento. De acuerdo con lo anterior, se deberán utilizar unos controles o banderas que identifiquen el problema del dato. Con el objeto de dejar documentadas estas anomalías, el SVCA del DAMA (ahora SDA) desarrolló un formato de campo que se visualiza en la Tabla 13, el cual debería ser utilizado por los diferentes SVCA automáticos, realizando las respectivas modificaciones que cada entidad considere conveniente.



Tabla 13. Ejemplo de tabla de validación de datos en campo, fuente: Variables del Sisaire, IDEAM.

REVISIÓN DE DATOS EN CAMPO												
Técnico de Operación:						Fecha de Revisión:						
ESTACIÓN		PARÁMETROS AFECTADOS	ANOMALÍA		OBSERVACIONES							
COD.	NOMBRE		Fecha y Hora De Inicio	Fecha y Hora De Finalización								

NOMBRE Y CÓDIGO DE LAS ESTACIONES											
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13	14
Bosque	Sony	INEM Tunal	IDRD	Carrefour	Cazucá	Escuela De Ing.	Kennedy	U. Santo Tomás	U. Corpás	Merck	Fontibón

PARÁMETROS													
SO ₂	NO _x	O ₃	CO	PM ₁₀	PST	V.V	DV	TEMP	LLUVIA	HR	RAD. SOL	P. BAR.	V.V - X Y Z

- B. La siguiente etapa en el proceso de validación corresponde a la validación automática, la cual consiste en comparar los datos generados por un equipo de acuerdo al tiempo de monitoreo al cual ha sido programado, en términos generales, la programación de los equipos automáticos en Colombia es de diez minutos (diez minutales), sin embargo, podrá existir otra frecuencia de monitoreo, frente a las mediciones históricas de dichos equipos, para lo cual de acuerdo con la distribución normal de los datos, el límite mínimo de validación corresponde al valor mínimo positivo presentado por el parámetro durante toda la historia del monitoreo y, el límite máximo de validación corresponde a la mediana más tres veces la amplitud intercuartílica del conjunto total de datos, por lo tanto la validación automática debería realizarse de acuerdo con estos dos parámetros; uno para un límite mínimo y otro para un límite máximo, para cada parámetro. Esta depuración automática filtra datos atípicamente altos, negativos o atípicamente bajos y además identifica con banderas aquellos datos que han sido descartados en esta etapa.
- C. Por último, la validación que es realizada en la estación central por la persona encargada en el SVCA de revisar la información generada, es la validación que requiere de un mayor conocimiento de las variables que se miden, de la química de los contaminantes, del comportamiento local de los mismos, de los equipos del SVCA, de los resultados de las calibraciones, entre otras. Esta validación se puede dividir en dos etapas: una validación manual diaria y otra validación cada quince días o tres semanas (siguiendo siempre los mismos parámetros y teniendo siempre los mismos criterios de verificación).

En el proceso de *validación manual diaria*, es necesario emplear las compilaciones diarias de los datos de vigilancia para realizar la exploración general de todos los datos. El programa de aseguramiento de calidad (AC) debe especificar el formato exacto (unidades, decimales, etc.) en que los datos deben remitirse de las estaciones para su validación y análisis, estas especificaciones deben coincidir con lo estipulado en la normatividad nacional vigente y por la entidad encargada de recopilar y consolidar los datos de vigilancia de todo el país, es decir el IDEAM. Si los datos remitidos no coinciden con lo estipulado por el programa de AC, deben ser organizados según sea conveniente.

Además, en la validación manual diaria es recomendable realizar representaciones gráficas del comportamiento de los datos obtenidos para cada contaminante, a través del aplicativo de visualización o de elaboración de gráficos que tenga el SVCA; básicamente se trata de identificar datos que se alejen del comportamiento esperado o histórico de las variables monitoreadas. Un procedimiento a utilizar puede consistir en graficar inicialmente los datos horarios por periodos semanales desde la fecha de la revisión hasta siete días antes, aunque la revisión sea diaria, esto con el objeto de realizar un barrido intensivo de los datos, es decir al menos de siete (7) revisiones manuales durante esta fase.

Una vez encontrado un intervalo con datos sospechosos o anormales, se hace necesario graficar todos los datos, ya no solamente los horarios, para determinar con exactitud la anomalía, su extensión temporal y su posible significado u origen. El personal encargado de la validación de datos siempre debe tener en mente el significado físico y químico de los parámetros monitoreados.

Deberían marcarse como no válidos aquellos datos que presenten períodos constantes, datos con poca variación, datos imposibles físicamente (por ejemplo datos de radiación solar en horas de la noche), datos que muestren alteraciones súbitas, o lapsos de ascenso y caída inusuales en el comportamiento observado cotidianamente en el parámetro, que son cuestionables.⁴¹ Algunos ejemplos de datos que son imposibles debido al significado físico de los parámetros a que se refieren y que deben ser marcados como no válidos son:

- Datos de concentraciones de PM_{10} mayores a las de PST en la misma estación. Dado que el PST está constituido del total de partículas suspendidas en el aire, la fracción de partículas con diámetro menor a diez micras, no puede ser nunca mayor al total.
- Datos de concentraciones de NO_2 que no correspondan a la resta entre la concentración del NO_x menos la concentración del NO. Por ende las concentraciones del NO_2 , también deben ser siempre menores o iguales a las de NO_x .

En conclusión, la exploración general de la base de datos debe:

- Buscar datos inusualmente altos o bajos que pueden indicar errores gruesos en los sistemas de vigilancia. Para poder determinar que valor puede considerarse alto o bajo para un contaminante específico, el profesional encargado de ésta labor debe conocer cuales son las condiciones predominantes para el contaminante en la estación de vigilancia y cuales son los límites de detección superiores e inferiores del equipo, que determinan los valores mas altos o más bajos que puede reportar el equipo. Los datos considerados cuestionables deben ser marcados con una bandera para ser posteriormente verificados. Ésta exploración general de los datos no es sensible a datos con valores intermedios que también pueden estar errados.
- Detectar desviaciones del cero en un analizador automático que no han sido corregidas. Estas desviaciones son evidentes cuando los valores mínimos usuales de las concentraciones de contaminantes que por ejemplo para el CO se presentan en las horas de la madrugada tienden a incrementar o a disminuir por un periodo de varios días. También puede ocurrir que las concentraciones mínimas a estas horas se encuentran constantemente por encima de los valores típicos. En éste caso, puede inferirse que el analizador puede tener un mal ajuste del cero. En ambas situaciones, es necesario contrastar los hallazgos con los reportes de verificación de cero y span, y los reportes de calibración del equipo. Sí es necesario deben corregirse los datos y recomendar el ajuste del equipo.

⁴¹ Sin embargo, se debe tener en cuenta que ciertas condiciones atmosféricas, o la presencia de algunas fuentes contaminantes cercanas pueden dar lugar a fluctuaciones extremas en las concentraciones de contaminantes.



- Detectar y rechazar todos los valores negativos de concentración de los contaminantes a menos que provengan de un grado aceptable de inexactitud del instrumento (una característica común de muchos tipos de analizadores continuos).
- Por último, debe identificarse el número de horas con información utilizable en cada día y descartar para el siguiente nivel de validación los días que no cumplan con el mínimo de recuperación de datos útiles establecido por los objetivos de calidad de datos.

La exploración continua de los datos de vigilancia y de los metadatos producidos por los operadores constituye un enfoque más flexible y recomendable para el nivel uno de validación de datos.

Para este mismo nivel de validación deben tomarse los datos marcados con banderas y analizar su validez a la luz de la experiencia, el sentido común y la iniciativa del personal encargado de examinar los datos, que son prerequisites para el éxito del proceso. Se deben rechazar los datos no adecuados. Para este propósito el grupo de validación, debe contar con los metadatos recopilados por el grupo de operaciones para el período que se va a validar, realizando el proceso de la siguiente manera:

- Inicialmente se deben seleccionar los datos diez minutales marcados con alguna bandera que corresponden a los datos descartados por la validación automática (Ver Tabla 14). Se debe organizar cada parámetro por estación y se deben graficar en el tiempo, con las hojas de cálculo, o programas de análisis estadísticos disponibles. Después deben ser analizados contra los metadatos disponibles, y pueden validarse o descartarse definitivamente. Si los datos se consideran válidos, debe utilizarse el editor de datos con que cuente el SVCA, para marcar los datos con la bandera “V” (Ver Tabla 15) y se deben graficar en el tiempo, con cualquier hoja de cálculo o programa estadístico.
- Posteriormente se deben tomar las curvas de desviación de ZERO y SPAN, y las curvas de calibración de los analizadores de gases, obtenidas por el grupo de operación del SVCA de monitoreo y ajustar los datos diez minutales válidos de la base de datos, según sea necesario. Las desviaciones del cero son evidentes cuando los valores mínimos usuales de las concentraciones de contaminantes que por ejemplo para el CO se presentan en las horas de la madrugada tienden a incrementar o a disminuir por un periodo de varios días. También puede ocurrir que las concentraciones mínimas a estas horas se encuentran constantemente por encima de los valores típicos. En este caso, puede inferirse que el analizador puede tener un mal ajuste del cero. En ambas situaciones es necesario contrastar los hallazgos con los reportes de verificación de ZERO y SPAN, y los reportes de calibración del equipo. Sí es necesario deben corregirse los datos en la base de datos y recomendar el ajuste del equipo en cuestión al grupo de operación.
- Después de realizar estos dos primeros filtros, se deben seleccionar los datos marcados como válidos, es decir, los de bandera “V”, y organizarlos por parámetro y por estación. Con el software estadístico disponible en el SVCA, se deben realizar diagramas de caja de los datos, para identificar los outliers y los extremos, los cuales deben tratar de entenderse basándose en los metadatos disponibles sobre cada parámetro y cada estación, y en la experiencia del grupo de validación⁴².

Algunas recomendaciones generales que deben tomarse en cuenta para este nivel de validación son las siguientes:

⁴² Estos procedimientos están basados en el manejo de validación dado a los datos en la red de Bogotá y de acuerdo con el documento: Variables del Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) publicado por el IDEAM en su página web.



- Las características específicas para una estación particular pueden ser un indicador importante de la calidad de los datos. Los alrededores de la estación, el grado de protección, las fuentes y los puntos receptores locales pueden influir en las mediciones. Por ejemplo, no se esperaría hallar niveles altos de NO en un sitio rural durante las primeras horas de la mañana, pero estos niveles serían fácilmente explicables en un área urbana congestionada debido a las emisiones del tránsito.
- La fuerte relación existente entre las concentraciones de contaminantes y la dispersión atmosférica u otras condiciones meteorológicas también pueden ser un indicador positivo de la validez de los datos. Cuando los datos son dudosos, se deben considerar parámetros tales como el entorno de la estación, la velocidad y dirección del viento, la precipitación y la radiación solar. Por ejemplo, niveles altos de ozono asociados con climas lluviosos y sin radiación solar se deben considerar como dudosos.
- La hora del día también es importante, ya que las variaciones diurnas en los patrones de emisión y en las condiciones meteorológicas pueden ejercer una influencia particularmente fuerte en las concentraciones de O₃ y NO_x. Por ejemplo, altos niveles de ozono durante la noche si bien posibles bajo ciertas condiciones serían sumamente sospechosos a menos que se asocien con alguna evidencia de inicio de transporte vertical (por ejemplo, un aumento súbito en la velocidad del viento).
- La relación entre los diferentes contaminantes también puede aportar claves para determinar la validez de los datos; por ejemplo, no se esperarían altos niveles de ozono si se incrementan los niveles de NO_x.
- La continuidad temporal y espacial de los niveles de contaminación es otro factor que se debe considerar al examinar los datos medidos. Los resultados obtenidos del SVCA a menudo pueden indicar integralmente si las observaciones hechas en un sitio particular son excepcionales o cuestionables.

De acuerdo con lo anteriormente establecido, es importante para que los procesos de validación sean homogéneos en los diferentes SVCA automáticos de Colombia, unificar los controles o banderas que identifiquen los diferentes estados del dato, en este sentido, en la Tabla 14 se presentan los controles o banderas que deberán ser utilizados por las diferentes SVCA según sea el caso y que invalidan el dato. Por otro lado, en la Tabla 15 se presentan los tipos de banderas que no generan la invalidación del dato.

Tabla 14. Tipos de banderas que invalidan los datos.

BANDERA	VALIDEZ	DESCRIPCIÓN DE LA BANDERA
C	N	Dato perturbado por calibración
S	N	Dato perturbado por calibración de Span
Z	N	Dato perturbado por calibración de Zero
M	N	Dato erróneo por razón desconocida
D	N	Dato erróneo por fallo técnico
T	N	Dato que no ha sufrido el proceso de validación adecuado
#	N	Datos insuficientes
B	N	Mal estado externo
E	N	Fallo eléctrico
F	N	Fallo en la corriente eléctrica
!	N	Señal fuera de rango
H	N	Valor de prueba
P	N	Proceso de purga del equipo

Tabla 15. Tipos de banderas que no invalidan los datos.

BANDERA	VALIDEZ	DESCRIPCIÓN DE LA BANDERA
V	S	Dato válido
O	S	Dato corregido
R	S	Dato reconstruido
<	S	Falta de datos
^	S	Valor alto del equipo
_	S	Valor bajo del equipo
/	S	Cambio brusco de la concentración

Después de haber sido elaboradas las pruebas estadísticas y presentadas en diferentes representaciones gráficas (como diagramas de caja, gráficas de períodos diarios, mensuales y/o anuales) se seleccionan los datos válidos y posteriormente estos deben ser corregidos según los resultados de calibración de los equipos y calcular los promedios en el tiempo para la comparación con las normas nacionales vigentes.

El programa de AC debe estipular adecuadamente cual es el procedimiento de validación de los datos, que pruebas deben realizarse a los mismos y que documentación debe generarse.

Por otra parte, los datos que sean cargados al SISAIRE, deberán estar disponibles en el computador, carpeta y dirección que en su momento se determine, es decir que cumpla con las condiciones de acceso de la información que se encuentren estipuladas en dicho Sistema de Información sobre Calidad de Aire (SISAIRE).

La información que sea cargada al SISAIRE deberá estar previamente validada (prevalidación diaria), deberá estar de acuerdo con los formatos diseñados y deberá cumplir con la estructura de los mismos formatos, que serán definidos por el SISAIRE, específicamente para los SVCA automáticos.

Validación de los datos de las estaciones semiautomáticas y/o manuales

Los procesos de validación de los equipos semiautomáticos o manuales difieren de la propuesta realizada para los equipos automáticos, dado que no es posible realizar una programación del equipo, ni tampoco existe la gran cantidad de datos que se pueden tomar con un equipo automático y muchas otras limitaciones. Por lo anterior, es muy importante realizar un proceso de captura adecuado. En la sección “Procedimientos específicos de muestreo” del presente protocolo, se muestran algunos procedimientos de monitoreo, como el de los equipos muestreadores de alto volumen (Hi Vol) para PST y para PM₁₀.

En cuanto a la validación de datos, el SISAIRE diseñará un formato en el cual se espera que la información capturada por los SVCA se obtenga de una manera homogénea, y permita que sean realizados los procesos de migración de información desde la autoridad ambiental al SISAIRE, a través de un mismo formato.

Validación de los datos de las estaciones meteorológicas

El procesamiento de información meteorológica es realizado en tres etapas que incluyen la lectura de los datos de entrada, cálculo de resúmenes y finalmente generación de reportes. Cada una de estas actividades es soportada por diversos programas específicos para cada función.

Una vez son obtenidos los datos por los sensores meteorológicos son almacenados en archivos con extensiones propias de cada equipo. Dichos archivos son recolectados en la central de información y de allí deben ser clasificados, reorganizados y salvados en un solo tipo de archivo para cada una

de las variables, esto con el fin de facilitar su lectura y posterior uso para la generación de análisis y reportes. Este proceso se separa a su vez en tres pasos:

- Separación de parámetros individuales: A partir de los archivos originales, y de acuerdo al formato de origen, se extraen por separado las cifras de cada parámetro relevante y se almacenan en nuevos archivos en un formato simple de texto conocido como CSV (valores separados por comas, por sus siglas en inglés). De este modo se generan archivos para cada parámetro meteorológico (dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, presión, humedad relativa, radiación solar, etc.), en donde son reportados los valores de la respectiva variable y también la fecha y la hora en la que fue obtenido el dato por el equipo de medición.
- Separación de datos por años: Cada archivo de texto con las variables ya organizadas, debe ser nuevamente tratado, separando los grupos de datos por años, es decir que se tendría para cada parámetro meteorológico un grupo de archivos que corresponderían a cada uno de los años de los que se tiene dicha información.
- Separación los datos por meses: De forma similar al proceso anterior, los reportes anuales también deben ser separados de manera mensual, de esta forma finalmente, se tendrán archivos de cada una de las variables meteorológicas clasificadas para cada uno de los meses de medición.

Para el caso del análisis de los datos relativos a la dirección del viento obtenidos por las estaciones de monitoreo, es necesario realizar un paso adicional al procesamiento común que debe desarrollarse y que fue descrito en los pasos anteriores. Este paso adicional consta de realizar la conversión de los datos obtenidos en grados de dirección a sus respectivas convenciones internacionales que indican las direcciones desde las cuales provienen. Esta tarea se elabora de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 16. Conversión de dirección del viento

CONDICIÓN	SÍMBOLO
$337 \leq DV \leq 360$ ó $0 \leq DV < 22.5$	N (Norte)
$22.5 \leq DV < 67.5$	NE (Noreste)
$67.5 \leq DV < 112.5$	E (Este)
$112.5 \leq DV < 167.5$	SE (Sureste)
$167.5 \leq DV < 202.5$	S (Sur)
$202.5 \leq DV < 247.5$	SW (Suroeste)
$247.5 \leq DV < 292.5$	W (Oeste)
$292.5 \leq DV < 337$	NW (Noroeste)
V.V = 0	CALMA

Nota: DV hace referencia a dirección del viento y V.V hace referencia a velocidad del viento.

El siguiente paso en el procesamiento de información meteorológica después de haber homogenizado la forma de almacenar los datos y generado los archivos anuales y mensuales para cada variable, es el de verificación de la calidad y confiabilidad de los datos. Los criterios para la evaluación de calidad deben ser definidos para cada ciudad con base en los valores históricos registrados en cada ciudad en las estaciones del IDEAM, según la elevación sobre el nivel del mar de la estación y según las secuencias que presentan los datos en cada estación; de esta forma, los datos que se encuentren fuera de los rangos lógicos no serán tenidos en cuenta para los posteriores cálculos y deberán ser marcados para su posterior revisión.

Una vez los datos han sido verificados, se generan diferentes resúmenes en donde se relacionan los parámetros meteorológicos de acuerdo a la hora y período, de la siguiente forma:

- *Resúmenes mensuales:* Los datos de cada variable se reúnen en una tabla de acuerdo a cada mes disponible, aplicando una función de promedio, excepto para el parámetro de precipitación en donde se aplica la suma de todos los valores por hora, y para el parámetro de dirección de viento en donde se aplica la moda estadística. En este paso también se generan archivos CSV que incluyen todos los datos que hayan sido rechazados por la etapa de verificación.
- *Resúmenes anuales:* Se generan nuevamente resúmenes del mismo modo descrito para los resúmenes mensuales, pero esta vez se generan a partir de los resúmenes mensuales y para cada año.
- *Resúmenes multi-anuales:* Se generan resúmenes que abarcan todo el rango de años para los que se disponen datos, tal y como se ha explicado anteriormente, con la única diferencia que para el parámetro de precipitación ya no se aplica la suma de todos los valores, sino el promedio de los valores anuales.

Empleando los datos recopilados en los resúmenes, se generan gráficas que representan el comportamiento de los valores meteorológicos a través de las horas de un día. Estas gráficas se generan para cada año, y finalmente para el rango multi-anual completo.

La última fase del procesamiento de datos consiste en la generación de reportes mensuales, anuales y multi-anuales, los cuales deben incluir la tabla de datos y las gráficas que se hayan generado para el período de tiempo correspondiente, partiendo de los resúmenes y gráficas creados en la fase anterior. Es recomendable además que todas las tablas que fueron inicialmente creadas en formato de texto simple CSV sean exportadas a hojas de cálculo (formato .xls) para facilitar sus futuros accesos y aplicaciones por diversos usuarios (para mayor información sobre el contenido y análisis a incluir en un informe de meteorología, revisar la sección 9.6.5 de este mismo manual).

R) Análisis estadístico de los datos

Se deben utilizar técnicas adecuadas de análisis de datos, de acuerdo al tipo de datos manejados y los requerimientos del usuario. Previo al cálculo de promedios en el tiempo y comparación de las mediciones con las normas de calidad de aire promulgadas por la autoridad ambiental competente, los datos ya validados y corregidos, deben ser convertidos a valores a condiciones de referencia (298.15 K y 101.325 KPa) y presentarse en las unidades adecuadas. Las ecuaciones y factores para realizar estas conversiones han sido claramente estipulados dentro de la norma y también son mencionados en este manual (sección 9.3.1.1 y 9.3.2.12).

9.2. MANEJO DE MUESTRAS Y CADENA DE CUSTODIA

En los SVCA manuales, la principal fuente de ingreso de error en los datos obtenidos se debe al manejo de las muestras; como ejemplo de los procesos que requieren de manipulación de las muestras para el almacenamiento, transporte y análisis están los muestreos de material particulado (PST, PM₁₀ y PM_{2.5}) a través de los muestreadores de alto volumen o Hi Vol, análisis de SO₂ y análisis de plomo.

Pero la presentación de posibles fallas en los monitoreos no solo se presentan en los equipos de operación manual, sino que también en aquellas estaciones automáticas donde no es posible la



descarga y transferencia directa de los datos desde el sitio del monitoreo hasta la central de información y por lo tanto se requiere delegar a algún miembro de la organización del SVCA, la tarea de ir periódicamente a la estación realizar la descarga de datos a un medio magnético de almacenamiento de información (como CD, USB, etc.) o incluso directamente a un procesador portátil y luego dicha información llevarla a la central de información; en otras ocasiones donde los equipos reportan los datos de forma impresa, dichos documentos es necesario también recolectarlos y llevarlos hasta la central de información para su procesamiento, análisis y archivo. Para ambas actividades mencionadas anteriormente, es necesario también contar con un procedimiento estándar para realizar dicha actividad, así como también de establecer el encargado directo por el cumplimiento y buen desarrollo de la misma.

Bien sea para los equipos automáticos como los equipos manuales, debe existir un protocolo o procedimiento guía, que describa un único proceso a seguir en cada caso y también unos formularios o formatos que soporten la ejecución de dicha actividad bajo los parámetros de calidad establecidos; dicha documentación que asegura el manejo que se le da a las muestras (y a los reportes o medios magnéticos con la información para el caso de estaciones automáticas sin transmisión directa de datos) se le conoce como registro de custodia o cadena de custodia.

9.2.1. MANEJO DE LA MUESTRA

Los métodos que incluyen la manipulación de las muestras son para material particulado, ozono y plomo; en general es en las etapas de recolección del medio de obtención de la muestra, transporte y análisis donde se provocan los mayores errores en las mediciones de estos contaminantes, debido a la manera en que se determinan las concentraciones, por esto, es fundamental que las muestras sean manipuladas tal y como se recomiendan en las normas de operación, para evitar modificaciones, pérdidas o alteraciones en las muestras y por lo tanto en la información que se va a obtener. Las fases en las que se deben manipular las muestras incluyen: etiquetado, recolección y transporte.

Etiquetado e Identificación de la Muestra

Se debe tener cuidado en el etiquetado de las muestras y es importante resaltar que debe existir un documento donde se defina el manejo de las muestras para garantizar la correcta identificación de las muestras durante el ensayo y el análisis, dicho documento debe seguirse en su totalidad para evitar anular muestras por un mal seguimiento.

Los filtros que van a ser empleados en el monitoreo, deben ser identificados claramente, con tinta a prueba de agua, para que no vaya a “correrse” o a desvanecerse por acción de la humedad del aire, o de los gases contaminantes presentes en el aire succionado o por las temperaturas a las cuales están sometidos los filtros; también pueden emplearse otros métodos de identificación como código de barras siempre y cuando no afecten la capacidad del filtro y cumplan satisfactoriamente con su función de identificación. Es importante que sea cual sea el método escogido para marcar los medios filtrantes, se debe tener cuidado que no se debe deteriorar la capacidad del filtro, ni generar perforaciones, o cambios en el poro del material.

Cada contenedor de muestras que se emplea en el transporte de las mismas debe tener un único número de identificación para evitar la posibilidad de intercambio de muestras; este número de identificación debe ser reportado en el informe de los análisis. Puede incluirse información general si es necesario, dependiendo del método de análisis que se esta empleando. Para los métodos de análisis de gases a través de agentes absorbentes, es indispensable registrar también el número de recipientes recolectados y observaciones respecto al nivel de muestra encontrado.

Debe existir un buen control en la manipulación de las muestras para evitar la contaminación de las mismas y para lograr que el análisis se realice a las muestras con las características tales con las que se reportaron; por esta razón las muestras deben permanecer en un lugar seguro entre el tiempo de recolección y el tiempo que tardan en ser analizadas, es importante que todas las muestras estén seguras hasta su uso y descarte; estas normas de seguridad deben ser descritas en un reporte el cual irá firmado por el responsable de la manipulación de las muestras.

Los reportes de los analizadores automáticos también deben ser identificadas claramente y sin lugar a ambigüedades, esta identificación puede ser colocada sobre cada reporte de resultados del equipo teniendo cuidado que no se tapen o interfieran los resultados mostrados. Si la hoja de reporte es muy larga la información deberá ser almacenada en intervalos periódicos de tiempo en cartas. Las marcas deben ser indelebles. La Figura 41 muestra la etiqueta estandarizada para la identificación de las muestras que puede ser empleada.

Nombre de la Organización del Muestreo

N° de Identificación de la Muestra: _____

Tipo de Muestra: _____

Fecha de Recolección: _____

Nombre del Sitio: _____

Serial del Muestrador: _____

Figura 41. Ejemplo etiqueta de la muestra.

Colección de la Muestra

Para evitar desechar muestras por invalidez se debe tener precaución en su sellado y ubicación en los contenedores, los cuales a su vez deben garantizar un ambiente libre de agentes reaccionantes con el contenido de las muestras. Sin embargo, si debido a la logística de transporte es inevitable que el contenedor sea abierto por personal no autorizado, entonces adicionalmente las muestras deben ir selladas individualmente con un adhesivo especial, el cual llevará un número y estará firmado por el operario responsable del manejo de la estación en donde se recogió la muestra; este adhesivo debe estar ubicado de tal forma que garantice que la muestra no puede ser destapada sin la destrucción total del adhesivo, notándose así claramente la manipulación por personal no autorizado y la posible contaminación de la muestra.

Posteriormente las muestras deben ser entregadas al laboratorio para análisis; es preferible que dichas entregas se realicen en el mismo día en que fueron tomadas, pero si esto no es posible, entonces las muestras deberán ser ubicadas en un sitio seguro que evite rupturas, pérdidas o contaminación.

Transporte

En el transporte de muestras u otros datos de monitoreo, es demasiado importante y por esto se hace demasiado énfasis en que se deben tomar precauciones para evitar y minimizar al máximo el riesgo de manipulación, destrucción accidental y efectos físicos o químicos sobre la muestra.

En general, las muestras siempre estarán expuestas a factores físicos y ambientales como la temperatura y la presión y además a contaminaciones por la manipulación (empaques y acomodación); sin embargo cada etapa (identificación del empaque, recolección, sellado, manipulación, almacenamiento, transporte y entrega final al laboratorio) debe existir un documento guía para el ejercicio de estas actividades y un registro donde se especifique

claramente el responsable de cada etapa y de la calidad de las muestras; todo esto debe estar organizado en un Manual o Guía de Operación Estándar aplicable a todo el SVCA. Finalmente incluso en el laboratorio se deben mantener las muestras en un lugar seguro, protegiéndolas de todos aquellos factores que puedan afectar su calidad mientras llega el momento de realizarle el análisis a cada paquete de muestras. La persona responsable de la entrega de las muestras al laboratorio o del registro de datos debe ser capaz de asegurar la no manipulación y/o destrucción de las muestras y en todo momento será el principal responsable de las mismas.

Para asegurar que las muestras líquidas no van a presentar derrames durante el transporte debe marcarse el nivel del líquido en la parte exterior del recipiente o envase con un marcador permanente.

Cuando se usen latas de acero inoxidable debe compararse la presión de la lata al ser recibida en el laboratorio con la presión final obtenida en la recolección de las muestras, esto indica si el recipiente presento fugas y/o pérdidas de muestra.

9.2.2. CADENA DE CUSTODIA⁴³

Si los datos obtenidos por el SVCA serán empleados como evidencia, debe existir un reporte escrito donde se describa la ubicación de los datos y de las muestras todo el tiempo. Este registro es necesario para hacer un sondeo inicial de la representatividad de las muestras, sin él no se puede garantizar que la muestra es la misma desde que fue recolectada hasta el momento de su análisis en el laboratorio.

Los datos solo deben ser manipulados por personas involucradas en alguna forma con el sistema de monitoreo. Cada persona que manipula las muestras o los reportes de datos de las estaciones automáticas debe estar en la capacidad de identificar y registrar en el documento de la cadena de custodia, de manos de quien recibió el material y a quien se lo entregará directamente. La Figura 42 es un ejemplo de la forma de registro que debe acompañar a las muestras o a los datos desde el sitio en donde fueron recolectados hasta el laboratorio donde serán analizados, todas las personas que tengan contacto con este material deben firmar el registro de la cadena de custodia.

⁴³ Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. August 1998.

No		nombre del proyecto		No de muestras	No. y tipo de contenedor						Observaciones
operario											
No	fecha	hora	descripción de la estación								
entregado por		fecha	hora	recibido por		impresión		comentarios			

Figura 42. Ejemplo de la forma de cadena de custodia.

Una vez las muestras llegan a su destino se debe proceder a realizar una verificación de la integridad y utilidad de las muestras; cuando se encuentre alguna muestra que no se este muy seguro sobre la validez de la misma, debe marcarse y dicha marca reportarse y se debe mantener el seguimiento aun de este registro hasta que pueda comprobarse la validez o invalidez de las muestras; esta marca puede reportarse en la forma anterior en comentarios u observaciones.

Los registros de cadena de custodia deben ser usados para hacer un seguimiento de la manipulación de las muestras a través de diversas fases de almacenamiento, procesamiento y análisis en el laboratorio. La Figura 43 es un ejemplo de formato de cadena de custodia para el laboratorio.

laboratorio					
número de la muestra	número de recipiente	descripción de la muestra			
persona responsable de muestras:		hora:		fecha:	
número de la muestra	entregada por	recibido por	hora	fecha	revisión del cambio de custodia

Figura 43. Ejemplo de cadena de custodia del laboratorio.

Cuestionario para la revisión de cadenas de custodia

En general, es recomendable que las entidades encargadas del manejo y operación de los SVCA, tengan presente los siguientes cuestionamientos para evaluar su desempeño y cumplimiento en este aspecto y visualizar cuales puntos están por mejorar. A continuación se presentan dos tablas con las respectivas preguntas a contestar por el SVCA, de acuerdo a si manejan equipos manuales (ver Tabla 17) o equipos automáticos sin transmisión directa de datos (ver Tabla 18).

Revisión de cadena de custodia para métodos de monitoreo manual

Este cuestionario deberá ser diligenciado para los casos en los que no se cuente con estaciones automáticas y en general para todos aquellos métodos indirectos de determinación de concentración de contaminantes, como por ejemplo: material particulado (PST, PM₁₀ mediante equipos Hi Vol), plomo y también si se emplea la técnica de absorción de gases en solventes líquidos.

Tabla 17. Cuestionario de evaluación de la cadena de custodia para métodos manuales.

No.	DESCRIPCIÓN	SI	NO
1	¿Se cuenta con un documento de <i>Manual de Procedimiento Estándar de Operación</i> debidamente respaldado y documentado para la identificación inicial de los contenedores, porta muestras o recipientes, recolección, identificación, manipulación, transporte, protección y conservación de muestras incluyendo lo establecido en el método de medición del contaminante medido?		
Observaciones:			
2	¿Existen formatos o registros correspondientes a la custodia de las muestras desde su recolección hasta la entrega en el laboratorio, donde se reporte etapa por etapa el responsable y además en caso de ser aplicable que permita la verificación en cada sección de la integridad de las muestras?		
Observaciones:			
3	¿Existen y se aplican procedimientos para la recepción, cadena de custodia, manejo, protección, almacenamiento, retención y descarte de muestras de ensayo, incluidas las medidas necesarias para proteger la integridad de las muestras?		
Observaciones:			
4	¿Existe y se aplica un sistema de identificación de recipientes, porta muestras y/o contenedores y esta identificación se mantiene mientras esté en el laboratorio, utilizando etiquetas y códigos únicos?		
Observaciones:			
5	¿Existe y se aplica un sistema para la identificación de las muestras y esta identificación se mantiene durante su permanencia en el laboratorio, utilizando etiquetas y códigos únicos?		
Observaciones:			
6	¿Existe y se aplica un procedimiento estándar registrado en el <i>Manual de Procedimiento Estándar de Operación</i> para el sellado y protección de las muestras? Y en el caso de recipientes que contienen líquidos existe el método de verificación de niveles?		
Observaciones:			
7	¿El personal encargado de la recepción de muestras en cada etapa de la transferencia, las revisa y lleva registros de sus características, por ejemplo, revisar que no hayan rupturas de los recipientes, derrames o daño en los adhesivos de sellado de las muestras?		
Observaciones:			
8	¿Existen procedimientos e instalaciones adecuadas para evitar el deterioro, pérdida o daño de las muestras durante el almacenamiento, manejo y preparación?		
Observaciones:			
9	¿Existen y se aplican las instrucciones establecidas para el		



	manejo de las muestras tanto en el recorrido del sitio de toma hasta el laboratorio como durante el análisis en sí dentro del laboratorio?		
Observaciones:			
10	¿Se lleva un control y registro de las condiciones ambientales para todas las muestras (temperatura y presión). Se llevan registros de las temperaturas de almacenamiento. Existen medidas de almacenamiento y seguridad que protegen las condiciones e integridad de las muestras que requieren custodia especial?		
Observaciones:			
11	¿Se cumple con las condiciones para el pretratamiento de muestras (filtración, homogenización) antes de realizar el análisis definitivo en el laboratorio?		
Observaciones:			
12	¿Existen registros para el control del pretratamiento de muestras?		
Observaciones:			



Revisión de cadena de custodia para métodos de monitoreo automático (manejo de reportes)

Tabla 18. Evaluación del manejo de los reportes desde la estación automática hasta el centro general de información del SVCA.

No.	DESCRIPCIÓN	SI	NO
1	¿Se cuenta con un documento de <i>Manual de Procedimiento Estándar de Operación</i> debidamente respaldado y documentado para la operación del equipo, impresión, identificación y envío de cada uno de los reportes generados por el equipo?		
Observaciones:			
2	¿Existen formatos o registros correspondientes a la custodia de los reportes de datos de los equipos desde el momento en que fueron generados hasta la entrega en el laboratorio o central de información, donde se permita comprobar el listado de todas las personas que tienen acceso a ese material y la veracidad de dichos documentos?		
Observaciones:			
3	¿Existen y se aplican procedimientos para la identificación de cada reporte, utilizando etiquetas y códigos únicos y se mantiene esta identificación para su posterior organización en la central de información?		
Observaciones:			
4	¿El personal encargado de la recepción de los reportes en cada etapa de la transferencia, los revisa y comprueba que realmente sean los reportes originalmente generados por el equipo?		
Observaciones:			
5	¿Existen procedimientos e instalaciones adecuadas para evitar el deterioro, pérdida o daño de los documentos durante la transferencia, archivo y manejo de dicha información?		
Observaciones:			

9.3. ANALISIS DE LA INFORMACION GENERADA EN LOS SVCA

9.3.1. BASES DE DATOS.

Las bases de datos de calidad del aire generadas en los diferentes Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire deberán ajustarse a los requisitos del Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE). Los detalles de los aspectos de la base de datos del SISAIRE y el modo en que se realizará la captura de la información para cada SVCA, serán dados a conocer por el IDEAM o por la institución que se defina a nivel nacional.

El SISAIRE ha sido formulado para convertirse en el medio a través del cual, se centralice la información relacionada con calidad de aire recolectada a lo largo del territorio nacional y de esta manera poder contar con los criterios suficientes para poder generar, implementar y evaluar estrategias de control y prevención de la contaminación atmosférica. Por los motivos anteriores, es que el SISAIRE define las variables que deben presentarse, el formato en el que deben presentarse y el formato para su respectivo almacenamiento, los procedimientos de validación de información, los análisis a desarrollar y también la periodicidad en el reporte de los resultados del monitoreo y seguimiento de calidad de aire que se realice en cada región del país.

9.3.1.1. Manejo y presentación de las variables de calidad del aire

Es necesario identificar todas las variables de calidad del aire con un nombre. Se recomienda utilizar la columna nombre de la Tabla 19 para identificar cada una de ellas. Es importante que todas las variables estén en mayúsculas, no utilizar subíndices ni tampoco espacios entre los caracteres de cada nombre con el fin de permitir la correcta migración de los datos de las diferentes SVCA del país. En la Tabla 19 se presentan las variables que deberán ser incluidas dentro del SISAIRE⁴⁴, el nombre de las mismas y las unidades.

Tabla 19. Variables iniciales de calidad del aire a ser incluidas dentro del SISAIRE.

VARIABLE		NOMBRE	UNIDADES	
CONTAMINANTES CRITERIO	1	Partículas totales en suspensión	PST	µg/m ³
	2	Partículas suspendidas menores a 10 micras	PM ₁₀	µg/m ³
	3	Partículas suspendidas menores a 2.5 micras	PM _{2.5}	µg/m ³
	4	Dióxido de azufre	SO ₂	µg/m ³
	5	Monóxido de nitrógeno	NO	µg/m ³
	6	Dióxido de nitrógeno	NO ₂	µg/m ³
	7	Óxidos de nitrógeno	NO _x	µg/m ³
	8	Ozono	O ₃	µg/m ³
	9	Monóxido de carbono	CO	mg/m ³

⁴⁴ Variables del Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y procedimientos para validar la información generada por las redes de calidad del aire. IDEAM, 2006

VARIABLE		NOMBRE	UNIDADES	
CONTAMINANTES NO CONVENCIONALES	10	Benceno	C_6H_6	$\mu g/m^3$
	11	Plomo y sus compuestos	Pb	$\mu g/m^3$
	12	Cadmio	Cd	$\mu g/m^3$
	13	Mercurio	Hg	$\mu g/m^3$
	14	Hidrocarburos totales expresados como metano	HCT	$\mu g/m^3$
	15	Tolueno	$C_6H_5CH_3$	$\mu g/m^3$
	16	Vanadio	V	$\mu g/m^3$
GENERADORES DE OLORES	17	Acetaldehído	C_2H_4O	$\mu g/m^3$
	18	Ácido butírico	$C_4H_8O_2$	$\mu g/m^3$
	19	Amoniaco	NH_3	$\mu g/m^3$
	20	Clorofenol	C_2H_5ClO	$\mu g/m^3$
	21	Dicloruro de azufre	S_2Cl_2	$\mu g/m^3$
	22	Etil mercaptano	C_2H_5SH	$\mu g/m^3$
	23	Etil acrilato	$C_5H_8O_2$	$\mu g/m^3$
	24	Estireno	C_8H_8	$\mu g/m^3$
	25	Mono-metil-amina	CH_5N	$\mu g/m^3$
	26	Metil mercaptano	CH_3SH	$\mu g/m^3$
	27	Nitrobenceno	$C_6H_5NO_2$	$\mu g/m^3$
	28	Propil mercaptano	C_3H_8S	$\mu g/m^3$
	29	Butil mercaptano	$C_4H_{10}S$	$\mu g/m^3$
	30	Sulfuro de dimetilo	C_2H_6S	$\mu g/m^3$
	31	Sulfuro de hidrógeno	H_2S	$\mu g/m^3$

De acuerdo con lo anterior, las variables de calidad del aire, deberían ser divididas en tres grandes grupos: Contaminantes Criterio, Contaminantes no Convencionales y Contaminantes Generadores de Olores Ofensivos, de acuerdo con la Resolución 601 de 2006. Sin embargo, es posible incluir nuevos contaminantes los cuales serán clasificados como “otros contaminantes”.

En caso que las unidades de medición sean diferentes a $\mu g/m^3$ o mg/m^3 , y se presenten en ppm, es necesario realizar el proceso de conversión que se detalla más adelante y que se deduce a partir de la ecuación de estado del gas ideal.

Partiendo de la ecuación de estado del gas ideal ($PV = nRT$), es sencillo comprobar que a condiciones de referencia (1 atm de presión y temperatura en 298.15 K) 1 mol de cualquier sustancia gaseosa ocupa un volumen igual a 24.4 litros.

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow \frac{n}{V} = \frac{P}{R \cdot T}$$

Donde:

P: Presión a condiciones estándar o de referencia (1 atm ≈ 760 mm Hg ≈ 101325 Pa ≈ 101.325 KPa)

R: Constante de los gases ideales (8.314 m³.Pa/kmol.K ≈ 0.082 l.atm/mol.K)

T: Temperatura a condiciones estándar o de referencia (25 °C ≈ 298.15 K)

Reemplazando los valores de condiciones de referencia en la ecuación anterior, se tiene:

$$\frac{n}{V} = \frac{P}{R \cdot T}$$

$$\frac{1 \text{ mol}}{V} = \frac{1 \text{ atm}}{(0.082 \text{ l} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}) \cdot (298 \text{ K})} = \frac{1 \text{ mol}}{24.4483 \text{ l}}$$

Por lo anterior, para aquellos contaminantes que la normatividad colombiana vigente establezca sean reportados en ppm o en µg/m³, es necesario realizar la respectiva conversión empleando el peso molecular de la sustancia involucrada (Ver Tabla 20).

$$\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{[\text{ppm}] \cdot \text{PM} [\text{Kg/Kmol}]}{24.45 [\text{m}^3/\text{Kmol}]} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{g}}{\text{Kg}} \right]$$

$$\left[\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \frac{[\text{ppm}] \cdot \text{PM}}{24.45} \cdot 10^3$$

Todas las variables de calidad del aire utilizan microgramos por metro cúbico (µg/m³) como unidad de medida, exceptuando el monóxido de carbono que emplea miligramos por metro cúbico (mg/m³). Como criterio de estandarización de estas medidas y específicamente del µg/m³ no se deben utilizar espacios, ni mayúsculas, ni subíndices, y el símbolo µ, se debe obtener por medio de oprimir ALT y al mismo tiempo 0181 o por medio de insertar el símbolo, en la plantilla texto normal.

Tabla 20. Pesos moleculares de algunas sustancias contaminantes.

CONTAMINANTE	PESO MOLECULAR (g/mol) ó (Kg/Kmol)
Dióxido de azufre (SO ₂)	64.0580
Monóxido de nitrógeno (NO)	30.0060
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	46.0050
Ozono (O ₃)	47.9970
Monóxido de carbono (CO)	28.0100
Acetaldehído (C ₂ H ₄ O)	44.0530
Ácido Butírico (C ₄ H ₈ O ₂)	88.1060
Amoníaco (NH ₃)	17.0310
Clorofenol (C ₂ H ₅ ClO)	80.5140

CONTAMINANTE	PESO MOLECULAR (g/mol) ó (Kg/Kmol)
Dicloruro de azufre (S ₂ Cl ₂)	135.0260
Etil mercaptano (C ₂ H ₅ SH)	59.1060
Etil acrilato (C ₅ H ₈ O ₂)	100.1170
Estireno (C ₈ H ₈)	104.1520
Mono-metil-amina (CH ₅ N)	31.0580
Metil mercaptano (CH ₃ SH)	48.1030
Nitrobenceno (C ₆ H ₅ NO ₂)	123.1110
Propil mercaptano (C ₃ H ₈ S)	76.1570
Butil mercaptano (C ₄ H ₁₀ S)	90.1840
Sulfuro de dimetilo (C ₂ H ₆ S)	62.1300
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	34.0760

Los sistemas automáticos para la medición de la calidad del aire tienen la posibilidad de generar datos cada diez minutos; sin embargo, por la gran cantidad de información a almacenar en el SISAIRE y el tipo de análisis a realizar, no es necesario contar con información de tan cortos periodos de tiempo. Se recomienda entonces para los sistemas automáticos de medición emplear promedios horarios.

En este sentido, es importante aclarar que los datos comprendidos entre una hora y la siguiente, deberán corresponder a los de ésta última. Por ejemplo, para los datos tomados entre las 3:00 y las 4:00 p.m. el reporte que haga la autoridad ambiental corresponderá al de las 4:00 p.m.

9.3.1.2. Manejo y presentación de las variables de meteorología

Las variables meteorológicas registradas por cada red dependen del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) de la población o región. En la Tabla 21 y Tabla 22 se presentan las variables meteorológicas, su nombre y las unidades en las cuales debe ser reportada la misma, muchas de estas variables no son medidas en los SVCA, sin embargo se incluyen todas las posibles variables que mide el IDEAM con el fin de tener opciones predefinidas en caso de querer implementarse en un futuro.

Tabla 21. Nombres y unidades de variables de meteorología.

VARIABLE	NOMBRE	UNIDADES
Precipitación sólida	PSolida	mm
Temperatura y humedad del viento a 10 cm	T/HAire10	° C/%
Temperatura del viento a 10 cm	Taire10	° C
Humedad del viento a 10 cm	HAire10	%
Temperatura y humedad del viento a 2 m	T/HAire200	° C/%
Temperatura del viento a 2 m	Taire200	° C
Humedad del viento a 2 m	HAire200	%
Temperatura del viento a diferente altura	Taire=h	° C
Humedad del viento a diferente altura	HAire=h	%
Radiación global	Rglobal	W/m ²
Radiación visible	Rvisible	μm/m ² s
Dirección y velocidad del viento	D/Vviento	Grados/m/s
Dirección del viento	DViento	Grados

Velocidad del viento	VViento	m/s
Temperatura del suelo	TSuelo	° C
Presión atmosférica	P	hPa
Precipitación líquida	PLíquida	mm
Radiación ultravioleta	RUVb	W/m ²
Radiación difusa	RDif	W/m ²
Temperatura de capa de mezclado	TCM	° C
Brillo solar	BrS	h ⁴⁵

Tabla 22. Nombres y unidades de variables de meteorología adicionales.

VARIABLE	NOMBRE	UNIDADES
Precipitación sólida	PSólida	mm
Temperatura y humedad del suelo a 10 cm	T/HSuelo10	° C/%
Temperatura y humedad del suelo a 30 cm	T/HSuelo30	° C/%
Temperatura y humedad del suelo a 50 cm	T/HSuelo50	° C/%
Evaporación	Evap	mm

Al igual que las variables de calidad del aire de los sistemas automáticos de medición, las variables meteorológicas deberán ser reportadas cada hora, de tal manera que el SISAIRE obtenga información horaria, sin que esto signifique que los procesos de transmisión de datos entre la autoridad ambiental y el IDEAM sean horario.

9.3.2. MANEJO ESTADÍSTICO DE DATOS.

Una vez han sido validados los datos obtenidos por los equipos de monitoreo de calidad de aire, y se les haya comprobado su confiabilidad, se procede a realizarles un tratamiento estadístico para elaborar resúmenes y generar los reportes.

Los reportes de calidad del aire deben cumplir con ciertos requisitos mínimos en cuanto a cantidad de datos presentados, cálculos, análisis y comparación con la norma nacional de acuerdo con la Resolución 601 del 4 de abril de 2006. En esta sección se presentarán las metodologías para estimar los parámetros estadísticos requeridos.

En caso de que el porcentaje de información perdida iguala o supera al 25% no podrán realizarse los cálculos de los valores promedio para el período de tiempo a evaluar. Datos no válidos no podrán ser ingresados en las hojas de cálculo para el tratamiento de la información.

9.3.2.1. Cálculo de los promedios en el tiempo.

El cálculo de los promedios en el tiempo de los datos de vigilancia debe ajustarse a las siguientes definiciones:

- Se define una “hora” como el periodo de sesenta minutos transcurridos “inmediatamente antes” de la hora reportada, es decir los datos de vigilancia correspondientes a las 7 a.m. son los recolectados desde las 6:01 a.m. a las 7:00 a.m. Esta definición se justifica por la necesidad de correspondencia entre los datos de vigilancia de calidad del aire y los datos meteorológicos. Tal definición ha sido establecida de acuerdo con los estrictos lineamientos

⁴⁵ Expresada como horas de sol al día

de la Organización Meteorológica Mundial, y está basada en el razonamiento de que la hora reportada solo puede cubrir eventos que ya han sucedido. Algunas organizaciones internacionales definen la hora como el tiempo transcurrido después de la hora reportada, y reconocen que este enfoque requiere de un esfuerzo adicional al momento de compaginar las mediciones con los datos meteorológicos. El IDEAM, ente encargado de recopilar la información sobre mediciones de calidad del aire, requiere que el formato remitido por las entidades que realizan la vigilancia utilice el esquema de “hora antes”. Sin embargo la entidad encargada de vigilancia puede elegir el esquema que más le parezca, y el IDEAM los podrá reportar en formato “hora antes”.

- El día se define como el periodo de 24 horas transcurrido entre las 00:01 y las 24:00, donde 00:01 es el primer minuto del día, después de la media noche. Es decir, en un día se obtendrán 24 promedios horarios desde la 1 que es la primera hora del día, hasta las 24 que es la última. Ésta definición es fundamental cuando se quiere calcular promedios diarios. La semana, el mes, y el año corresponden a la definición universal, del período que sigue inmediatamente al momento reportado; es decir, la semana comienza en minuto 00:01 del lunes y termina en el minuto 24:00 del domingo. El mes y el año se ajustan a los períodos de tiempo reportados por el calendario.

Los promedios corridos (medias móviles) deben corresponder al enfoque del tiempo que precede el reportado, ya sean de una hora, tres horas, ocho horas, 1 día, 1 semana, 1 mes, 1 año.

9.3.2.2. *Brechas de datos.*

Ningún tipo de vigilancia entrega datos las 24 horas del día durante los 7 días a la semana. Siempre existirán brechas en el conjunto de datos, algunas causadas deliberadamente como las de las calibraciones, otras inevitables y fortuitas como las ocasionadas por cortes en la energía eléctrica, fallas de los equipos, etc. A pesar de la experiencia y de la alta inversión, es difícil acercarse a un 95 % de recolección de datos válidos.

Nunca se debe interpolar o extrapolar datos brutos para completar estas brechas, a menos que se conozcan perfectamente las tendencias en estos periodos y puedan justificarse. En general cuando se pierde el 25 % ó más de los datos de un periodo a promediar, debe descartarse este periodo y no calcularse, ni reportarse valor alguno para el mismo.

Los objetivos de calidad de datos deben establecer claramente cual debe ser el porcentaje de recuperación de datos, y si deben ser contabilizados los períodos de calibración como pérdidas.

El programa de AC debe asegurarse que los códigos reportados durante los períodos de calibración, o durante las fallas de los equipos, que en algunos sistemas son 9999, se excluyan del cálculo de los promedios, desde el primer nivel de validación, donde además debe introducirse un metadato que explique la razón por la cual los datos son invalidados.

9.3.2.3. *Interpolación y ajuste*

Aunque no se recomienda interpolar datos brutos, a veces los datos validados pueden ser interpolados. Por ejemplo cuando van a ser alimentados a un modelo, no deben tener brechas para que el modelo pueda correr. Existen técnicas estadísticas sofisticadas para realizar estas interpolaciones (ajuste de curvas, análisis de tendencias, filtrado selectivo de frecuencias, etc.), pero la más adecuada es una simple regresión lineal. Por recomendación heurística no deben

realizarse interpolaciones en brechas de más de 1% de período promediado.

En algunas ocasiones puede hacerse una excepción cuando existen obvias y justificables tendencias, como las presentadas en algunos puntos de vigilancia en el comportamiento diario de contaminantes como el CO, asociadas a los patrones de tránsito de fuentes móviles. En tales casos, se obtienen distribuciones bien definidas de concentraciones horarias a través del día, con base en las cuales pueden interpolarse los valores faltantes de otros días en los cuales se cuenta solo con los puntos máximos y mínimos que usualmente se presentan a la misma hora del día.

Al interpolar datos debe tenerse en cuenta:

- Naturaleza del contaminante.
- Entendimiento de las condiciones atmosféricas presentes y su influencia sobre la dispersión.
- Experiencia con tendencias y ciclos diarios de emisiones y meteorológicos.
- Los periodos relevantes a promediar.
- El programa de AC debe encargarse además de evaluar el desempeño del proceso y el personal de validación de datos y de calcular los indicadores que antes ha establecido para determinar si se han cumplido los objetivos de calidad de los datos. A continuación se describen algunas pruebas que permiten efectuar ésta evaluación.

9.3.2.4. Promedio aritmético

Promedio de todos los n datos recolectados en determinado período de tiempo.

$$(C_{prom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

Donde:

$(C_{prom})_j$: concentración promedio del período de tiempo j

$\sum_{i=1}^n C_i$: Suma de los n datos de concentración del contaminante i obtenido en el período de tiempo j

n : cantidad de datos obtenidos en el período de tiempo j

9.3.2.5. Promedio geométrico

Antilogaritmo de la media aritmética de los logaritmos de los valores observados. También puede expresarse como la raíz enésima del producto de los n valores observados. $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots x_n$ ⁴⁶.

$$\log(C_{prom_geom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n;$$

⁴⁶ Diccionario Estadístico del Data Mining Institute, S.L. Madrid, España; [on line]: <http://www.estadistico.com/dic.html?p=1607>

$$\left(C_{prom_geom} \right)_j = 10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]}$$

Donde:

$(C_{prom_geom})_j$: promedio geométrico de concentración para un intervalo de tiempo j (puede ser por hora, cada tres horas, cada ocho horas, diario u anual).

$\sum_{i=1}^n \log(C_i)$: Suma de los n logaritmos de los valores de concentración del contaminante i

$10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]}$: Antilogaritmo del promedio de los logaritmos para los n valores de concentración del contaminante i .

Este promedio solo es empleado para la estimación de los valores medios en determinado intervalo de tiempo para PST.

9.3.2.6. Concentración promedio anual por hora.

Se obtiene promediando los datos de la misma hora durante todo el año, contemplando la información horaria válida disponible de todo el año para cada estación de vigilancia. Solo puede ser calculado para aquellos métodos de medición en los cuales se puedan obtener datos horarios para cada día.

$$\left(C_{prom_horaria} \right)_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ij}}{n} \quad \begin{array}{l} \text{para } j = 0, 1, 2, 3, \dots, 21, 22, 23 \\ \text{para } i = 1, 2, 3, \dots, n; \end{array}$$

Donde:

j : índice relativo a la hora a la que se hace referencia

i : índice relativo al número de datos válidos

n : cantidad de datos válidos reportados durante el año (este valor puede cambiar para cada hora del día). Este valor no deberá ser superior a 366 para aquellos métodos donde diariamente se obtengan reportes horarios.

C_{ij} : Valor de concentración del contaminante para la hora i del dato j .

9.3.2.7. Promedio anual de las concentraciones horarias.

Se obtiene de todas las concentraciones horarias válidas de que se dispone al año por estación de vigilancia.

9.3.2.8. Concentración máxima por hora.

Se toma el valor máximo para cada una de las horas del día contemplando la información disponible de todo el año para cada estación de vigilancia.

9.3.2.9. *Promedio mensual de concentraciones horarias.*

Se calcula del total de las concentraciones horarias válidas en el mes por estación de vigilancia.

9.3.2.10. *Máximo mensual de las concentraciones horarias*

Se obtiene de todas las concentraciones horarias válidas de que se dispone al mes por estación de vigilancia.

9.3.2.11. *Estimación de la media móvil*

Para definir que es una media móvil, debe primero comprenderse el significado de serie temporal o serie cronológica. Una serie temporal es un conjunto de datos cuyos valores representan observaciones de un fenómeno, uniformemente espaciadas a lo largo del tiempo. Bajo este concepto los datos reportados por los equipos de monitoreo de calidad de aire, corresponden a series cronológicas o temporales que representan la concentración de determinado tipo de contaminante, medida cada cierto intervalo de tiempo.

La media móvil es el promedio de un valor de la serie y los que le rodean. Las medias móviles se utilizan para suavizar las series cronológicas, es decir, para reducir el ruido o las fluctuaciones en las series⁴⁷.

En el caso en el que se desee calcular medias móviles de por ejemplo ocho (8) horas, para un conjunto de datos de calidad de aire, el procedimiento sería tomar el primer conjunto de ocho datos y calcular su valor promedio (este primer conjunto corresponderá a las ocho primeras horas para las cuales se tenga la serie de datos. Según el ejemplo de la Figura 44 son los valores de concentración de O₃ para las horas 00:00 hasta las 07:00, reportados por alguna estación de monitoreo de calidad de aire), luego se procede a calcular el valor promedio para los datos correspondientes a las horas 01:00 hasta las 08:00, el tercer valor calculado de la media móvil corresponderá al promedio del grupo de datos reportados para las horas comprendidas entre las 02:00 hasta las 09:00 y así sucesivamente para todo el conjunto de datos que se tengan y que se vayan a evaluar.

El procedimiento de cálculo de la media móvil debe seguirse para todos los conjuntos de datos que conformen el período al que se esté haciendo referencia; es decir, si se desea realizar un informe trimestral, se deberá contar con datos válidos registrados por la estación para cierto contaminante durante los tres meses que hacen parte del informe.

⁴⁷ Diccionario Estadístico del Data Mining Institute, S.L. Madrid, España; [on line]: <http://www.estadistico.com/dic.html?p=613>

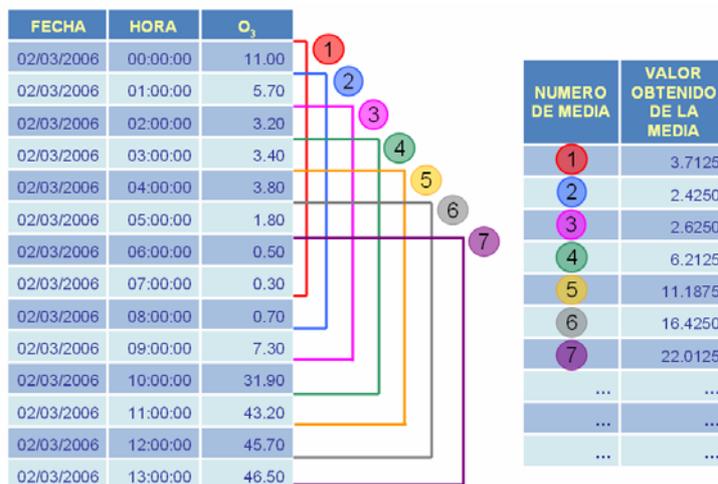


Figura 44. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 8 horas de un conjunto de datos.

A continuación, se reportan datos tabulados de ozono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), durante los días 2 y 3 de Marzo de 2006, reportados por una de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de algunas de las ciudades de Colombia y a partir de ellos se realizarán los respectivos de cálculos de la media móvil (la temperatura media de la ciudad de la cual se tomaron los datos es de 24.42 °C y la presión atmosférica es 90.10 KPa).

Tabla 23. Datos de concentración de ozono y resultados de los cálculos de la media móvil para dichos datos.

No. DATO	FECHA	HORA	DATO HORARIO O ₃ (µg/m ³)	MEDIA MÓVIL (µg/m ³)	MEDIA MÓVIL (Cond. Estándar) (µg/m ³)	NORMA 8 HORAS (µg/m ³)
1	02/03/2006	00:00:00	11.00	---	---	80.00
2		01:00:00	5.70	---	---	80.00
3		02:00:00	3.20	---	---	80.00
4		03:00:00	3.40	---	---	80.00
5		04:00:00	3.80	---	---	80.00
6		05:00:00	1.80	---	---	80.00
7		06:00:00	0.50	---	---	80.00
8		07:00:00	0.30	3.71250	4.16669	80.00
9		08:00:00	0.70	2.42500	2.72168	80.00
10		09:00:00	7.30	2.62500	2.94615	80.00
11		10:00:00	31.90	6.21250	6.97255	80.00
12		11:00:00	43.20	11.18750	12.55620	80.00
13		12:00:00	45.70	16.42500	18.43446	80.00
14		13:00:00	46.50	22.01250	24.70554	80.00
15		14:00:00	61.10	29.58750	33.20728	80.00
16		15:00:00	67.70	38.01250	42.66301	80.00
17		16:00:00	44.40	43.47500	48.79380	80.00
18		17:00:00	21.40	45.23750	50.77192	80.00
19		18:00:00	14.30	43.03750	48.30277	80.00
20		19:00:00	9.80	38.86250	43.61700	80.00
21		20:00:00	6.10	33.91250	38.06141	80.00
22		21:00:00	4.60	28.67500	32.18314	80.00
23		22:00:00	3.90	21.52500	24.15840	80.00
24		23:00:00	5.20	13.71250	15.39011	80.00
25	03/03/2006	00:00:00	2.40	8.46250	9.49781	80.00
26		01:00:00	2.50	6.10000	6.84628	80.00
27		02:00:00	4.00	4.81250	5.40127	80.00
28		03:00:00	3.70	4.05000	4.54548	80.00
29		04:00:00	2.80	3.63750	4.08252	80.00
30		05:00:00	1.80	3.28750	3.68970	80.00
31		06:00:00	2.30	3.08750	3.46523	80.00
32		07:00:00	0.40	2.48750	2.79182	80.00
33		08:00:00	0.30	2.22500	2.49721	80.00
34		09:00:00	0.90	2.02500	2.27274	80.00
35		10:00:00	4.80	2.12500	2.38498	80.00
36		11:00:00	37.40	6.33750	7.11284	80.00
37		12:00:00	85.10	16.62500	18.65893	80.00
38		13:00:00	94.70	28.23750	31.69212	80.00
39		14:00:00	42.70	33.28750	37.35994	80.00
40		15:00:00	23.50	36.17500	40.60070	80.00
41		16:00:00	19.30	38.55000	43.26626	80.00
42		17:00:00	16.20	40.46250	45.41274	80.00
43		18:00:00	10.10	41.12500	46.15629	80.00
44		19:00:00	6.00	37.20000	41.75110	80.00
45		20:00:00	3.30	26.97500	30.27516	80.00
46		21:00:00	2.30	15.42500	17.31212	80.00
47		22:00:00	1.20	10.23750	11.48997	80.00
48		23:00:00	0.60	7.37500	8.27727	80.00
...	80.00	

Como se puede observar en la tabla anterior, el primer cálculo para la media móvil de ocho horas, que corresponde al ejemplo dado, solo se puede obtener una vez se cuente con ocho datos consecutivos de concentración. Ahora bien, si lo que se requiere es el cálculo de la media móvil de tres horas, se tomarán grupos de tres datos consecutivos cada uno, empleando los mismos valores anteriores, el bosquejo de cálculo se muestra en la Figura 45.

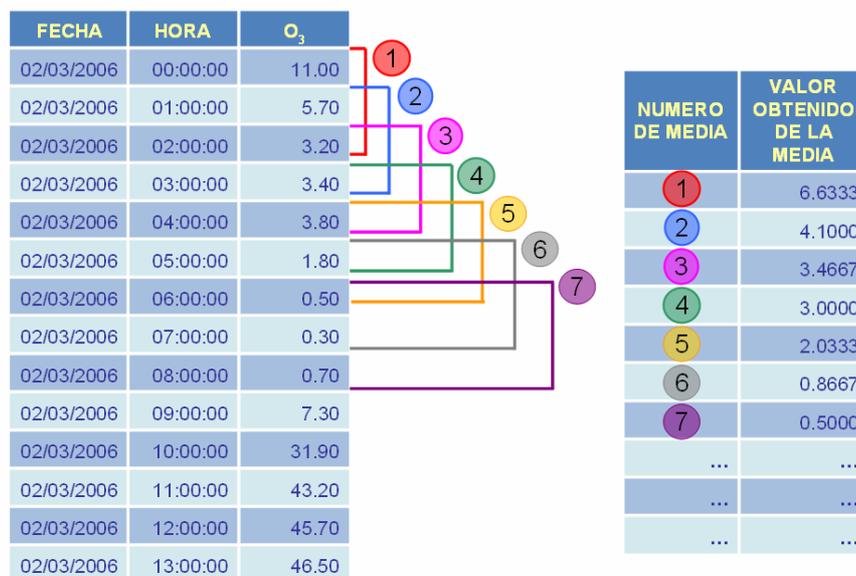
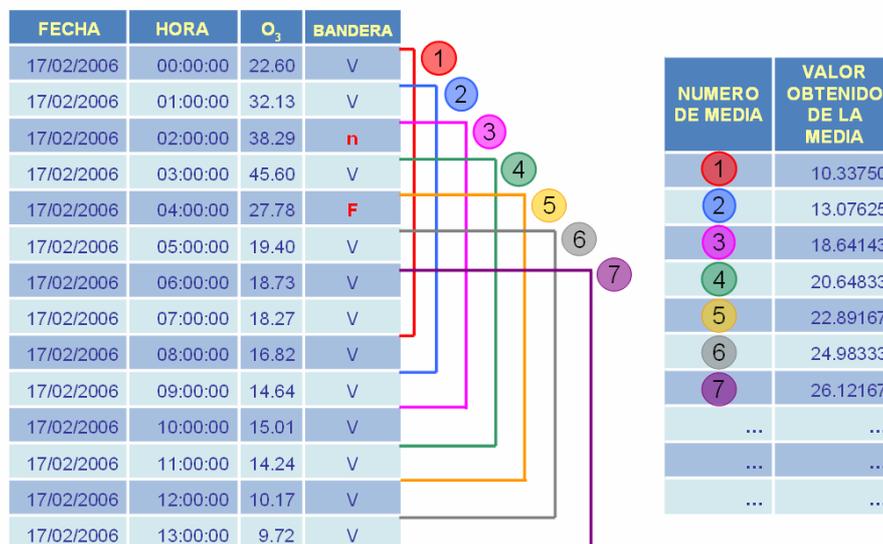


Figura 45. Ejemplo de metodología para la estimación de la media móvil para 3 horas de un conjunto de datos.

Cabe anotar, que los datos empleados en los cálculos deben haber sido previamente validados. En el caso de presentarse datos inválidos dentro de la serie de tiempo, estos deben estar primeramente identificados (siguiendo el procedimiento indicado en la sección de validación de datos de este documento) y no deberán ser incluidos dentro del cálculo de ninguna de las medias móviles; además, debe aplicarse el parámetro que para calcular este parámetro estadístico mínimo en cada grupo de datos debe contarse con el 75% de información válida, si la cantidad de datos invalidados es superior a la cuarta parte de la cantidad total de datos, entonces para ese grupo de datos no debe calcularse la media móvil, ni mucho menos establecer algún valor por extrapolación o interpolación para compararlo con la norma (ver Figura 46).



SIGNIFICADO DE LAS BANDERAS

V: Dato válido F: Falla en el analizador n: tamaño de muestra insuficiente

Figura 46. Media móvil de ocho horas de series temporales con datos inválidos.

De los datos de concentración de ozono que se presentan en la figura anterior, existen dos datos dentro de dicha serie temporal que su validez ha sido rechazada durante el proceso de manejo y validación de la información obtenida por cada uno de los equipos que conforman las estaciones; los datos corresponden a las 2:00 y a las 4:00 a.m. De acuerdo con el procedimiento de cálculo de medias móviles, a los tres primeros grupos de ocho horas se les estimaría la media sin incluir esos dos datos. Es decir el promedio para esos tres casos debe realizarse solo con seis datos. Para los grupos de datos 4 y 5, el promedio será calculado omitiendo el dato de las 4:00 a.m. y por lo tanto solo incluirá siete valores. Sin embargo, y a pesar de existir en la serie temporal presentada en la Figura 46 dos datos no válidos, es posible estimar para todos los casos la media móvil de ocho horas, ya que se esta alcanza a cumplirse que por lo menos el 75% de los datos de cada uno de los grupos corresponden a datos válidos y aceptados en cuánto a calidad y representatividad.

En general, la media móvil puede ser calculada para grupos de series de datos de tres (3) horas, ocho (8) horas, veinticuatro (24) horas (a partir de datos horarios) y un año (a partir de datos diarios), para todo contaminante medido en cualquier estación de monitoreo de calidad de aire.

9.3.2.12. Comparación de los valores de concentración con la norma.

Un objetivo fundamental de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, es verificar el cumplimiento de los niveles de concentración de contaminantes acorde con la norma nacional (Resolución 601 de 2006). A continuación se presenta una metodología tanto para el cálculo de las concentraciones a condiciones de referencia (Temperatura: 298.15 K y Presión: 760 mmHg ≈ 101325 Pa ≈ 101.325 KPa) a partir de los valores promedios horarios de concentración, como de la estimación de la media móvil para cada contaminante partiendo de los datos obtenidos por los equipos de medición de los SVCA y, finalmente la presentación gráfica de los resultados.

La Resolución 601 de 2006 establece en su Capítulo II, artículo 4^o los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio y los tiempos de exposición para cada contaminante. En la Tabla 24 se muestra en resumen por período, en los cuales cada contaminante debe ser comparado con su respectiva norma.

Tabla 24. Límites máximos permisibles por contaminante criterio según Res. 601 de 2006.

PERIODO DE TIEMPO	CONTAMINANTE	NORMA NACIONAL (Cond. Estándar)	
		ppm	µg/m ³
Anual	PST		100
	PM ₁₀		70
	SO ₂	0.031	80
	NO ₂	0.053	100
24 horas	PST		300
	PM ₁₀		150
	SO ₂	0.096	250
	NO ₂	0.080	150
8 horas	O ₃	0.041	80
	CO	8.80	10
3 horas	SO ₂	0.287	750
1 hora	NO ₂	0.106	200
	O ₃	0.061	120
	CO	35	40

Para comparar los datos de calidad de aire obtenidos de las mediciones con la norma, debe seguirse un procedimiento básico, similar para todos los posibles casos de comparación. De forma general el procedimiento que se sigue es el siguiente:

Con los datos ya validados (e identificados con banderas) y organizados por orden cronológico, se calculará primeramente el valor promedio horario (promedio de todos los datos recolectados y válidos obtenidos en una hora). En la Tabla 23 se encuentra un ejemplo de datos horarios para ozono recolectados en dos días de monitoreo.

Una vez se tienen estimados los valores promedio de concentración horaria del contaminante, se procede con el cálculo de la media móvil (ver procedimiento descrito en la sección 9.3.2.11). El período de tiempo para la estimación de la media móvil se definirá de acuerdo a la comparación que se requiera hacer y según lo estipulado en la Resolución 601 de 2006 (ver Tabla 24). Para el ejemplo presentado en la Tabla 23, se está realizando la evaluación del cumplimiento de la norma de 8 horas de la concentración de ozono y por este motivo la media móvil es calculada con grupos de ocho datos horarios, cabe anotar que este promedio es calculado a las condiciones propias de la ciudad a la que pertenecen los datos.

Debido a que las normas establecidas en la legislación colombiana se encuentran definidas a condiciones de referencia o condiciones estándar, es necesario expresar cada promedio de ocho (8) horas obtenido a estas mismas condiciones estándar; en ningún momento es correcto expresar la norma nacional (condiciones de referencia) a norma local (condiciones propias de cada ciudad), para realizar la comparación.

Para expresar la media móvil (obtenida a partir de los datos promedios horarios de la estación) a condiciones de referencia o condiciones estándar y poder establecer la comparación con la norma, se parte de la ecuación de gas ideal y se establece las correspondientes relaciones, esto es:

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación de gas ideal}$$

Donde:

P: Presión.

V: Volumen.

n: número de moles.

R: Constante de los gases ideales ($8.314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{Kmol} \cdot \text{K} \approx 0.082 \text{ l} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}$)

T: Temperatura (siempre expresada en grados Kelvin, K).

A través de la ecuación del gas ideal, puede determinarse la concentración en función de la presión, la temperatura y el peso molecular de la sustancia de la que se desea cuantificar su presencia en el gas, de la siguiente forma:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$P \cdot V = \frac{m \cdot R \cdot T}{PM}$$

$$P = \frac{m}{V} \cdot \frac{R \cdot T}{PM}; \quad \text{como } \frac{m}{V} = C$$

$$P = C \cdot \frac{R \cdot T}{PM}$$

$$C = \frac{P \cdot PM}{R \cdot T}$$

En esta serie de ecuaciones, se encuentran los siguientes términos:

m: masa de la sustancia que se quiere determinar en el gas (Kg)

PM: peso molecular de la sustancia a determinar (Kg/Kmol)

C: Concentración de la sustancia en el gas (Kg/m^3 ó g/l)

Ahora bien, del tratamiento matemático anterior realizado a la ecuación del gas ideal, se llega a la conclusión que dependiendo del contaminante (de sus propiedades físicas como masa y peso molecular) y de las condiciones atmosféricas (presión y temperatura) se obtendrán determinados valores de concentración; por lo tanto es válido afirmar que la concentración del contaminante *i* a condiciones estándar es igual al producto del peso molecular de dicho contaminante por la relación existente entre las condiciones estándar de presión y temperatura (P_{st} , T_{st}):

$$(C_i)_{st} = \frac{(P)_{st} \cdot PM_i}{R \cdot (T)_{st}}$$

Como los datos promedio de concentración que se obtienen del monitoreo de calidad de aire, corresponden a los valores de concentración de cada contaminante en particular obtenidos a las condiciones locales de presión y temperatura, y dichas condiciones son diferentes a las condiciones de referencia, entonces los datos que se obtienen en realidad de concentración corresponden a:

$$(C_i)_j = \frac{(P)_j \cdot PM_i}{R \cdot (T)_j}$$

Donde:

$(C_i)_j$: concentración del contaminante i en la región o ciudad j .

$(P)_j$: presión en la región o ciudad j , es decir la condición local de presión

$(T)_j$: temperatura en la región o ciudad j , es decir la condición local de temperatura

PM_i : peso molecular del contaminante medido.

R : Constante de los gases ideales ($8.314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{kmol} \cdot \text{K} \approx 0.082 \text{ l} \cdot \text{atm} / \text{mol} \cdot \text{K}$)

Concluyendo, los datos obtenidos de valores promedio (media móvil para el período de tiempo que se va a evaluar) se tienen referenciados a las condiciones locales de la región o ciudad para los cuales se realizó la medición; pero estos a su vez deben ser comparados con la norma nacional, la cual se encuentra expresada a condiciones de referencia o condiciones estándar (760 mmHg de presión o 101325 Pa o 101.325 kPa y a una temperatura de 298.15 K); por este motivo es necesario expresar los datos promedios obtenidos de la medición a valores promedios de concentración expresados a condiciones de estándar o de referencia, esto se realiza de la siguiente forma:

$$\frac{(C_i)_{st}}{(C_i)_j} = \frac{\frac{(P)_{st} \cdot PM_i}{R \cdot (T)_{st}}}{\frac{(P)_j \cdot PM_i}{R \cdot (T)_j}} = \frac{(P)_{st} \cdot PM_i \cdot R \cdot (T)_j}{R \cdot (T)_{st} \cdot (P)_j \cdot PM_i}$$

Los datos promedios de ocho horas obtenidos a condiciones locales ($(C_i)_j$) son expresados bajo condiciones de referencia, empleando la siguiente expresión (para el ejemplo que se ha planteado, estos datos corresponden a la columna "*Media Móvil (Cond. Estándar $\mu\text{g}/\text{m}^3$)*" de la Tabla 23:

$$(C_i)_{st} = \frac{(P)_{st} \cdot PM_i \cdot R \cdot (T)_j}{R \cdot (T)_{st} \cdot (P)_j \cdot PM_i} \cdot (C_i)_j$$

Finalmente, tan pronto se hayan expresado los datos promedio de concentración a condiciones de referencia o condiciones estándar, se procede a compararlos con la norma nacional para el período de tiempo estipulado. En el ejemplo presentado en la Tabla 23, se compara la norma para ocho (8) horas de ozono en $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dicha comparación se visualiza mejor de manera gráfica y su construcción se muestra en la Figura 47.

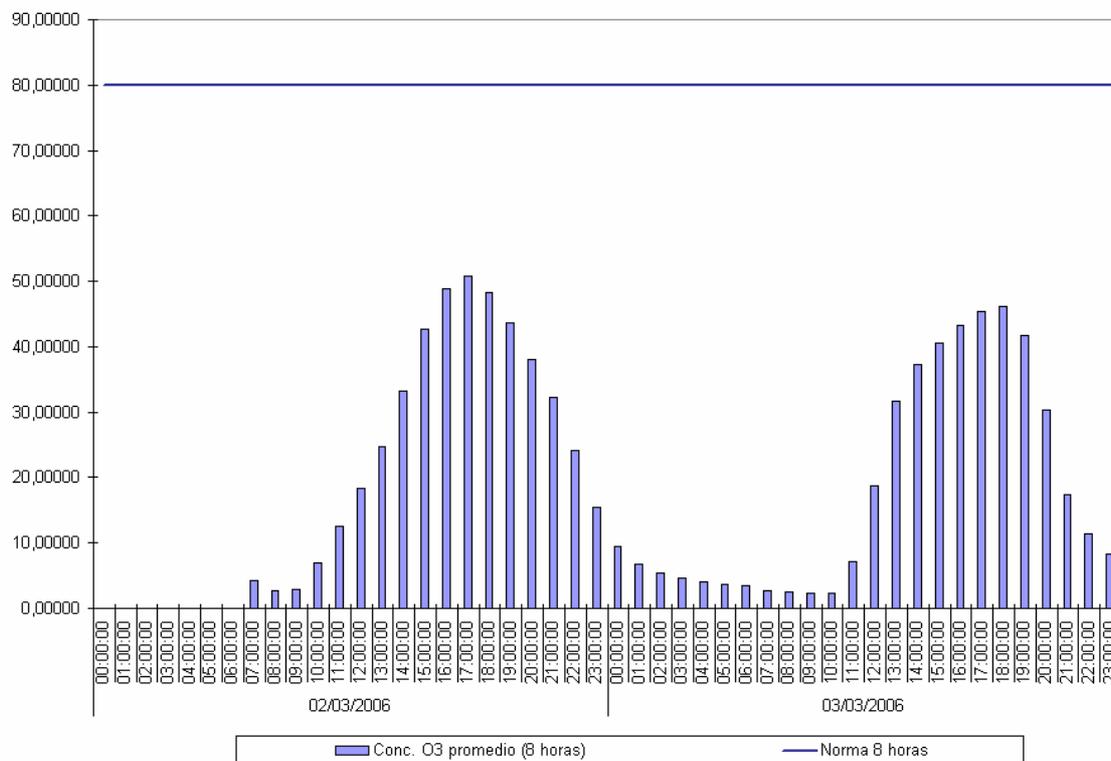


Figura 47. Diagrama de comparación de la concentración de contaminante con la norma (de acuerdo al ejemplo presentado).

En el ejemplo presentado (ver Tabla 23 y Figura 47) solo se realizan los cálculos para dos días, pero como se mencionó antes, los días para los cuales se tomen datos, debe corresponder al tipo de informe que se vaya a realizar (semanal, mensual ó trimestral). Para los informes anuales, la media móvil será calculada para intervalos de 24 horas y/o anual con las respectivas comparaciones con la norma nacional.

Comparación con la norma para PST.

Al comparar los valores de concentración obtenidos en el monitoreo de partículas suspendidas totales (PST) con la norma nacional, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- Para la comparación con la norma diaria (24 horas), debe estimarse la media móvil para conjuntos de 24 datos horarios pero empleando el promedio geométrico (sección 9.3.2.5); luego realizar la respectiva conversión a condiciones de referencia, y posteriormente, comparar los valores obtenidos con el valor de la norma nacional. Este procedimiento solo podrá seguirse en caso de contar con equipos automáticos en donde se tengan, por lo menos, reportes horarios de concentración.
- Para la comparación con la norma anual, también debe emplearse el promedio geométrico (sección 9.3.2.5) en vez del promedio aritmético. Los datos incluidos serán los promedios diarios de concentración, por tal motivo para hablar de media móvil debe contarse con datos históricos superiores a un año y anteriores al año para el que se desea realizar el informe. Esta comparación es posible realizarla tanto para estaciones manuales como para automáticas, haciendo la salvedad que la cantidad de datos obtenidos por los equipos

manuales durante el año no debe ser inferior a noventa y un (91) datos (correspondientes al 75% de 121 datos que serían el total de mediciones posibles por muestreadores manuales) y que la cantidad de datos obtenidos a través de muestreo automático corresponderán a 274 datos, que corresponden al 75% de los 365 datos que se pueden obtener durante un año de monitoreo.

Comparación con la norma para PM₁₀

Para realizar la evaluación del cumplimiento de la norma nacional relacionado con los máximos niveles permisibles de PM₁₀, se siguen las mismas pautas mencionadas anteriormente para PST, exceptuando que en vez de utilizar el promedio geométrico, se emplea el promedio aritmético (ver sección 9.3.2.4) y lógicamente, se establecerá como parámetro de comparación los valores correspondientes al PM₁₀.

Comparación con la norma para SO₂

En la normatividad nacional existen tres parámetros de comparación para vigilar si se están o no cumpliendo con los niveles máximos permitidos de concentración de SO₂ en el aire, estos límites están definidos para tres (3) horas, veinticuatro (24) horas ó diario y anual. Las comparaciones con cada uno de estos límites deben realizarse teniendo presente las siguientes pautas:

- Para comparar los valores medios para grupos de datos de 3 horas en una serie cronológica de concentración de SO₂, inicialmente se debe estimar la media móvil de 3 horas siguiendo el procedimiento descrito en la sección 9.3.2.11 del presente documento, luego expresar los valores obtenidos con condiciones locales, a valores promedio a condiciones estándar o de referencia y luego proceder a compararlos con el valor de la norma nacional (0.287 ppm ó 750 µg/m³). La media móvil para los valores de concentración de SO₂, para cualquier intervalo de tiempo se calcula como un promedio aritmético. Este procedimiento solo es posible de efectuar si se cuenta con datos horarios de concentración, los cuales normalmente solo pueden ser obtenidos a través de métodos automáticos de medición.
- Cuando se desea realizar la comparación de los valores medios registrados por los equipos de monitoreo de SO₂ en un SVCA con la norma diaria (24 horas), se realiza a través de la media móvil de 24 datos aritmética de los valores horarios.
Esta comparación puede ser empleada en la elaboración de informes mensuales o trimestrales, siempre y cuando se cuente con la cantidad de datos suficientes para el período de tiempo al que se le plantea el análisis. Por requerir valores horarios de concentración de SO₂ este análisis puede desarrollarse para estaciones donde se cuente con equipos automáticos de medición.
- En la legislación colombiana también queda establecida la comparación de la concentración de SO₂ con la norma anual, la cual se encuentra definida en la Resolución 601 de 2006. Esta comparación es realizada con el promedio aritmético de las concentraciones diarias obtenidas por los equipos de monitoreo (121 para manuales o el 75% de este valor y 365 para automáticas ó el 75% de este valor).

Comparación con la norma para NO₂

En la Resolución 601 del año 2006, se establece la norma de calidad de aire ó el valor máximo permisible de concentración de NO₂ para períodos de tiempo iguales a 1 hora, 24 horas y anual. Para los tres casos se plantea el cálculo de la media móvil empleando el promedio aritmético (ver sección 9.3.2.4) para conjuntos de datos de 24 horas ó para el conjunto de datos de 365 ó 121 datos dependiendo de si es el caso de comparación con la norma diaria ó anual y de si se cuenta con equipos automáticos o manuales, respectivamente.

- Cuando se compara con la norma de 1 hora, el procedimiento se limita a tomar el valor promedio de cada hora, reportarlo a condiciones de referencia y compararlo con la norma nacional. Este procedimiento solo puede realizarse si se cuenta con estaciones automáticas, debido a que a través de este tipo de analizadores si es posible contar con resultados horarios e incluso en algunas ocasiones se tienen frecuencias de medición cada 10 minutos.
- La norma de 24 horas de NO₂ es empleada como criterio de comparación con la media móvil aritmética para grupos de 24 valores horarios de concentración de dicho contaminante, reportados por los equipos automáticos.
- Cuando se tienen datos de concentración equivalentes a un año de medición de NO₂, por cualquiera de los métodos de monitoreo de gases (manuales o automáticos), es posible realizar la comparación de las respectivas medias móviles con la norma nacional anual. Es necesario tener en cuenta que si se desea estimar la media móvil para un año, mínimo se debe contar con reportes diarios de por lo menos un año anterior al que se desea analizar; esta aclaración es importante porque en caso de solo contar con datos de solo un año de monitoreo, pues no tiene sentido hablar de media móvil, sino que solo se tendría un valor promedio anual de concentración para todos los datos de dicho año.

Comparación con la norma para O₃

La norma de calidad de aire, en relación con la concentración máxima permitida de ozono (O₃) en el aire en territorio nacional esta definida para 1 hora y para 8 horas. En ambos casos se requiere que el monitoreo de dicho contaminante se realice a través de analizadores automáticos, debido a que solo a través de esta forma es posible obtener resultados de concentración horarios y en algunas situaciones hasta cada 10 minutos.

- La norma de calidad del aire, relacionada con la concentración máxima permisible de ozono para un período de tiempo igual a 1 hora esta definida en 0.061 ppm o 120 µg/m³, dependiendo de las unidades empleadas (para la elaboración de informes se recomienda el empleo de las segundas unidades, en aras de lograr una estandarización en los reportes). Los datos horarios de concentración reportados por el equipo son redefinidos a condiciones estándar y posteriormente comparados con la norma nacional; en caso de contar con reportes diezminutales, estos deben ser promediados empleando la media aritmética.
- Una vez se tengan los reportes horarios de concentración de ozono, obtenidos a través del monitoreo automático, estos deben ser definidos a condiciones estándar (para lo cual, previamente debe conocerse las condiciones locales de temperatura y presión) y finalmente se procede con el cálculo de la media móvil para grupos de 8 datos horarios (tal y como se ejemplificó en la Figura 44 y Figura 46) y es estos valores de media móvil los que son comparados con la norma nacional para períodos de tiempo iguales a 8 horas.

Comparación con la norma para CO.

En la Resolución 601 de 2006, se encuentran definidos los valores máximos permisibles de concentración en el aire de este contaminante para 1 y 8 horas. El procedimiento para realizar la comparación es similar al especificado para el ozono, pero teniendo en cuenta que los valores de la norma son diferentes para cada contaminante.



9.3.2.13. Cálculo del número de excedencias.

Una excedencia se define como el evento en el cual los valores de concentración de un contaminante sobrepasan lo estipulado por norma de calidad del aire. Por ejemplo para la norma horaria de ozono debe contarse una excedencia por cada vez que el promedio de concentración de una hora sobrepase el valor establecido por la norma y totalizarse el número de veces por año, en éste caso el número de excedencias debe reportarse como el “número de veces que la norma ha sido sobrepasada en determinado año”.

Por otro lado, cuando se trata de promedios corridos (medias móviles), como en la norma de CO de 8 horas, debe contarse una excedencia por cada vez que el promedio de concentración de 8 horas sobrepase el valor establecido por la norma y totalizarse el número de veces por año, en éste caso el número de excedencias debe reportarse como el “número de veces que la norma ha sido sobrepasada en determinado año”.

9.4. INDICADORES DE OPERACIÓN Y DESEMPEÑO DEL SVCA

Con el objeto de evaluar la operación de los equipos que conforman cada una de las estaciones de un SVCA y de su desempeño en general es necesario determinar el porcentaje de captura de datos de los equipos y establecer parámetros de comparación para todas las estaciones en un período de tiempo definido.

9.4.1. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE CAPTURA DE DATOS

Para determinar el porcentaje de captura de datos es necesario establecer la cantidad máxima de datos que se pueden obtener en un periodo determinado y la cantidad de datos recolectados durante ese mismo periodo. Por ejemplo, un analizador de material particulado manual que mide la calidad del aire cada tercer día podría registrar máximo 121 datos por año. Si durante un año específico registra 90 datos, el porcentaje de captura sería de 74.4%.

$$\%Cap_datos = \frac{d}{N} \cdot 100$$

Donde:

%Cap_datos: Valor numérico que indica el desempeño del equipo, en relación a la cantidad de datos entregados a la central de información.

d: Número total de datos reportados por el equipo durante el período de tiempo definido.

N: Número de datos que debieron haber sido reportados en el período de tiempo definido.

9.4.2. ANÁLISIS DEL PORCENTAJE DE DATOS VÁLIDOS

Existe también la posibilidad de que en las estaciones se tenga un porcentaje de captura de datos aceptable. Sin embargo, los valores registrados pueden no ser validados de acuerdo a los lineamientos presentados en la sección correspondiente a los procedimientos de validación de información generada por los analizadores (ver sección 9.1.10, inciso Q). Por esta razón, es recomendable que en el momento de desarrollar la evaluación del SVCA, se defina un porcentaje que relacione la cantidad de datos aceptados (datos válidos) con la cantidad de datos capturados por la central de información.

$$\%Val_datos = \frac{V}{N} \cdot 100$$

Donde:

%Val_datos: Valor numérico que indica la confiabilidad del equipo, en relación con la cantidad de datos válidos entregados a la central de información.

V: Número de datos aceptados como válidos y que pueden ser empleados en posteriores cálculos y análisis que realice el SVCA.

N: Número de datos que debieron haber sido reportados en el período de tiempo definido.

Tal como se ha mencionado en diversas ocasiones a lo largo de este documento, es necesario que el porcentaje de datos válidos empleados en la realización de los correspondientes cálculos de promedios, comparaciones con la norma de calidad de aire y estimación del número de excedencias; no debe ser inferior del 75%.

Partiendo de la cantidad de datos válidos obtenidos por el equipo analizador, es posible determinar el *porcentaje multianual* de operación para cada una de las estaciones con las que cuenta el SVCA (en caso de contar con el histórico de datos para un período no menor a dos años) e incluso el porcentaje del SVCA que reporte su desempeño anual.

Es prioritario comprender que el indicador multianual de operación de los equipos, debe ser estimado para cada tipo de analizador presente en las estaciones, es decir, se estimará este porcentaje para equipos de PM₁₀, para equipos de PST, para equipos de SO₂, para equipos de NO₂ y así sucesivamente para cada uno de los tipos de analizadores que miden cada uno de los contaminantes criterio. Este porcentaje es calculado realizando la relación entre el total de datos válidos obtenidos por el equipo en un año de operación con la cantidad máxima de datos que en el mismo período de tiempo el equipo hubiese podido reportar, es decir:

$$\%Op_multianual = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n N_i} \cdot 100$$

En donde:

%Op_multianual: porcentaje multianual de operación del equipo

V_i: Cantidad de datos válidos reportados por el equipo durante los años considerados

N_i: Cantidad de datos que podrían obtenerse por el equipo durante los años considerados

i: Indica el año al que hace referencia

n: Cantidad de años que se están teniendo en cuenta para la estimación del indicador.

A manera de ejemplo, considere un SVCA que ha estado operando de manera intermitente durante los años 2002, 2003, 2004 y 2006, además el SVCA durante el período de tiempo descrito, ha contado en general con 12 estaciones de medición de calidad del aire (E₁, E₂, E₃,..., E₁₁, E₁₂). Las estaciones cuentan con equipos manuales de PST, PM₁₀, SO₂ y NO₂. Ahora bien, analizando los datos históricos almacenados por el SVCA, se obtiene la siguiente información para PM₁₀ (Ver Tabla 25).

Tabla 25. Disponibilidad de datos para calcular los promedios anuales en el SVCA estudiado.

ESTACIÓN	AÑO								% OP_MULTI ANUAL
	2002 *		2003		2004		2006		
	Datos	%Val_datos	Datos	%Val_datos	Datos	%Val_datos	Datos	%Val_datos	
E1	22	22.4	44	36.4			30	24.8	20.82
E2			52	43.0					11.28
E3			52	43.0	3	2.5			11.93
E4			15	12.4					3.25
E5			22	18.2					4.77
E6			16	13.2					3.47
E7			15	12.4	21	17.4			7.81
E8			23	19.0	22	18.2			9.76
E9							40	33.1	8.68
E10					20	16.5	40	33.1	13.02
E11			18	14.9	21	17.4			8.46
E12							9	7.4	1.95

* Teniendo en cuenta que en el año 2002 la operación de las estaciones inician en marzo, el máximo de datos posible es 98.

En la tabla anterior se observa que los porcentajes de datos válidos han sido estimados para cada estación de forma anual, tomando como base que como se trata de analizadores manuales de PM₁₀, la cantidad máxima que pueden llegar a reportar en un período de tiempo igual a un año es 121 datos. Sin embargo, debido a que la operación del SVCA en el año 2002 inició en el mes de marzo, entonces para dicho año, la cantidad máxima de datos posibles por reportar es de 98.

Como se puede observar en la Tabla 25 la máxima disponibilidad de datos válidos es del 43% lo que indica que no es posible calcular promedios anuales para comparar con las normas nacionales vigentes.

El porcentaje de operación multianual para cada equipo de PM₁₀, de cada estación es calculado tomando la suma de los datos obtenidos por la estación cada año, y dividiéndolos por la suma del número máximo posible de datos por cada año. Para el caso de la estación E1 de la corporación que se menciona en el ejemplo, el porcentaje multianual sería:

$$\%Op_multianual\ E1 = \frac{22 + 44 + 0 + 30}{98 + 121 + 121 + 121} \cdot 100 = \frac{96}{461} \cdot 100 = 20.82\%$$

El proceso se repite para las 12 estaciones que cuentan con el analizador del contaminante indicado.

Otro indicador que puede ser determinado para el SVCA y relacionado con la evaluación del desempeño del mismo, es el *porcentaje de operación anual del SVCA*, el cual es calculado a partir de la totalidad de TODOS los datos válidos recolectados durante un año, en conjunto con todas las estaciones del SVCA, y la cantidad de datos que se deberían recoger en un año (el año para el que se desea realizar la evaluación) empleando todas las estaciones del mismo SVCA que hayan operado durante el mismo período de tiempo. Esto podría expresarse matemáticamente como:

$$\%Op_anual_red = \frac{\sum_{j=1}^m V_j}{\sum_{j=1}^m N_j} \cdot 100$$

En donde:

%Op_anual_SVCA: porcentaje anual de desempeño del SVCA.

V_j: Cantidad de datos válidos reportados por el equipo en cada una de las estaciones en un año.

N_j: Cantidad de datos que podrían obtenerse por el equipo en cada una de las estaciones en un año.

j: Indica la estación a la que hace referencia.

m: Cantidad de estaciones que operaron durante el año que se esta considerando.

De esta forma, el porcentaje de operación para el SVCA que esta siendo considerado para el ejemplo de cálculo, en cuánto a la medición de PM₁₀, durante el año 2003 se calcula de la siguiente manera (ver datos de la Tabla 25):

$$\%Op_anual_red_{(2003)} = \frac{44+52+52+15+22+16+15+23+18}{121+121+121+121+121+121+121+121+121} \cdot 100$$

$$\%Op_anual_red_{(2003)} = \frac{257}{1089} \cdot 100 = 23.60\%$$

Debido a que para el año 2003, en el ejemplo que se mencionó, funcionaban en nueve (9) estaciones los analizadores de PM₁₀ del mismo tipo, podría multiplicarse la cantidad máxima de datos que se obtendría por el equipo en el año (121) por el número de estaciones que operaron para ese mismo año. En caso que existieran en algunas de las estaciones consideradas analizadores del mismo contaminante pero con diferente funcionamiento y, que debido a esta diferencia, variara la cantidad del máximo número de datos posibles a obtener, entonces deberán sumarse las capacidades individuales de obtención de datos de cada equipo para obtener el número total de valores que teóricamente pudieran obtenerse para dicho contaminante, en dicho año.

Estos cálculos de indicadores de operación aquí presentados, deben ser estimados, discriminando cada tipo de analizador y de contaminante.

9.4.3. CONSISTENCIA DE LOS DATOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL AIRE

Para evaluar la consistencia de los datos relacionados con calidad del aire, es recomendable elaborar diagramas de caja por contaminante y por tipo de promedio a analizar (horario, 3 horas, 8 horas, 24 horas, anual), identificar los datos clasificados como valores extremos o valores atípicos y buscar información adicional (metadata) que permita identificar las causas de la información detectada. En la Figura 48 se presenta un ejemplo de un diagrama de cajas. La elaboración de estos diagramas, permiten la realización del análisis de los datos para su validación, actividad que ha sido presentada previamente en este protocolo en la sección 9.1.10, inciso Q.

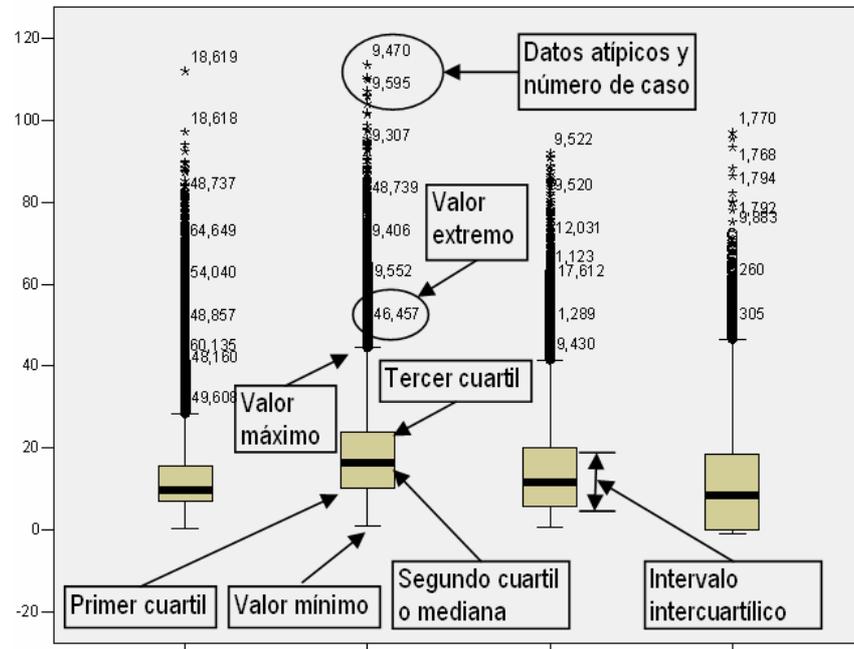


Figura 48. Descripción de un diagrama de caja.

El diagrama de caja es una representación gráfica de varias estadísticas:

- El primer cuartil (valor por debajo del cual está el 25 % de los datos) representado por el borde inferior de la caja.
- La mediana como medida de tendencia central, correspondiente al segundo cuartil (valor por debajo del cual está el 50% de los datos) representada por la línea horizontal dentro de la caja.
- El tercer cuartil (valor por debajo del cual está el 75% de los datos) representado por el borde superior de la caja.
- El intervalo intercuartílico como medida de la dispersión, definido como la diferencia entre el tercer y primer cuartil, representado por la altura de la caja.
- El valor mínimo que corresponde al mínimo valor de los datos o, en caso de valores atípicos, a 1.5 distancias intercuartílicas, menores a la mediana.
- El valor máximo que corresponde al máximo valor de los datos o, en caso de valores atípicos, a 1.5 distancias intercuartílicas, mayores a la mediana.
- Los valores extremos, son los que se encuentran por encima de 1.5 y por debajo de 3 distancias intercuartílicas, representados por un círculo.
- Los datos atípicos que se encuentran a más de tres distancias intercuartílicas, representados por un asterisco.
- El número de caso que corresponde a la medición en la cual se encontró el valor extremo o el dato atípico.

Los percentiles (\hat{Q}) son valores que dividen una distribución de frecuencias obtenida en una medición en cien partes ordenadas y de igual área; de forma similar se definen los deciles y los cuartiles ya que corresponden a dividir una distribución de frecuencias en 10 partes iguales (10, 20, 30, ..., 90, 100) y en 4 partes iguales (25, 50, 75 y 100) respectivamente.

Teniendo en cuenta que cada diagrama de caja corresponde a la representación gráfica del monitoreo de algún contaminante específico para determinado intervalo de tiempo, sería adecuado que la lectura de los valores de concentraciones se realizará en el eje vertical del diagrama y que cada bloque o caja corresponda a un intervalo de tiempo definido.

Es posible que en algunos casos no desee implementar esta metodología para el análisis de la consistencia de datos, sin embargo En caso de no emplear los diagramas de caja como herramientas para desarrollar el análisis de la consistencia de datos, sería necesario calcular para cada conjunto de valores los siguientes valores estadísticos: máximo, mínimo, media, mediana, percentil 25, percentil 75 e indicar los valores atípicos.

De igual manera, es posible realizar gráficas de series de tiempo que permitan identificar valores atípicos en ciertas horas del día (por ejemplo picos de ozono en las noches). En la Figura 49 se presenta una gráfica de series de tiempo donde se observa esta situación.

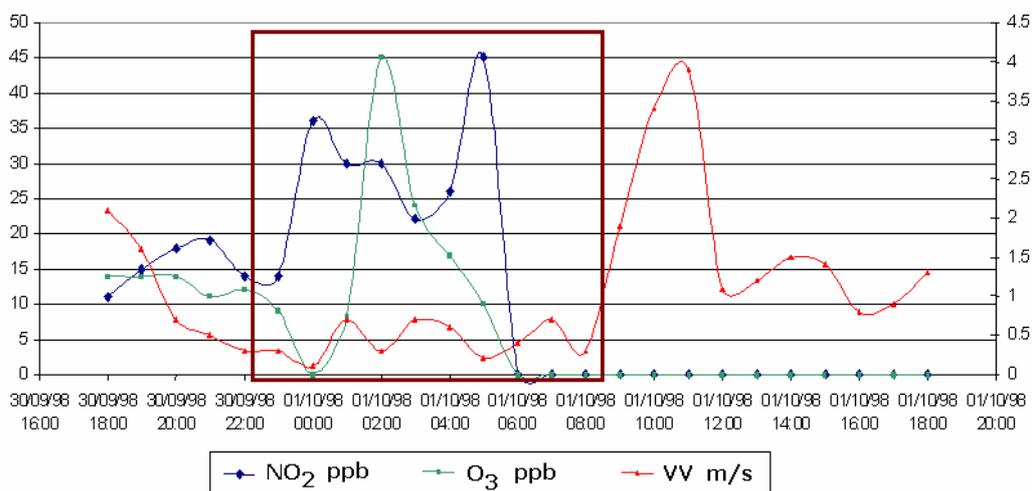


Figura 49. Gráfica de series de tiempo donde se validan picos de O₃ en horas de la madrugada.

Al comparar diferentes contaminantes medidos en una misma estación se pueden observar inconsistencias en los datos validados como por ejemplo valores de PM₁₀ mayores a los de PST o valores de NO₂ y NO que no corresponden a la cinética química establecida entre estos contaminantes (valores de NO₂ constantes ante valores de NO muy variables).

También es importante determinar la hora de inicio y finalización de las mediciones similares realizadas para determinar si son comparables. Por ejemplo, que los promedios de 24 horas de las mediciones de PM₁₀ en una misma estación inician y terminen a la misma hora. Se recomienda que las mediciones de 24 horas inician a medianoche.

9.4.4. CONSISTENCIA DE LOS DATOS RELACIONADOS CON LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

Siguiendo la misma metodología usada para evaluar la consistencia de los datos relacionados con la calidad del aire, es posible evaluar los datos correspondientes a las variables meteorológicas. Por ejemplo, es posible identificar valores de radiación solar que superen la máxima emisión que se pueda recibir del sol o valores de velocidad del viento, o temperatura, por fuera de los rangos normales sin información adicional de los datos.

Es importante determinar la coherencia en el tiempo por comparación de los diferentes parámetros con los obtenidos en una observación precedente o por la verificación de la tasa de cambio en elementos cuantitativos, la coherencia interna a través de la verificación entre sí de los distintos parámetros, como por ejemplo dirección del viento con velocidad del viento, tasa de descenso en los perfiles de la temperatura vertical, cortante de viento.

Coherencia en relación con los límites máximos y mínimos establecidos estadísticamente basados en datos históricos y coherencia con relación a los límites físicos o absolutos (en función de la zona, la estación, el mes, ecuaciones físicas, entre otros). Entre los límites físicos se pueden tomar: la temperatura del aire debe ser igual o mayor a la temperatura del punto de rocío derivada de la humedad relativa mediante la fórmula psicrométrica, comparación de la presión de la estación con la fórmula hipsométrica, comparación del gradiente observado con el gradiente adiabático seco en la atmósfera libre o pruebas de coherencia física entre parámetros interdependientes, entre otros.

9.5. GENERACIÓN DE REPORTES

Una base de datos final y validada sobre calidad del aire es por sí sola, de utilidad limitada. Para que se aplique en la elaboración de políticas, en el manejo de la contaminación del aire, en la investigación científica sobre sus efectos, los datos se deben cotejar, analizar y diseminar. Los resúmenes anuales y, de preferencia, mensuales de datos constituyen un nivel mínimo de la administración de esta información. Estos resúmenes pueden usar métodos sencillos de análisis estadístico y gráfico, en el Manual de Diseño de este mismo protocolo, se encuentra estipulada la periodicidad para la generación de reportes para cada tipo de SVCA. Los formatos apropiados para este propósito se pueden diseñar fácilmente (véase por ejemplo, BROUGHTON et al⁴⁸).

Un reporte más regular de datos, por día u hora, puede ser apropiado para algunos objetivos del SVCA (por ejemplo, los sistemas de alerta), aunque en tales casos, se debe poner de manifiesto que los datos diseminados pueden no estar plenamente validados y la calidad puede no estar asegurada. La diseminación de datos provisionales o validados solo representa un primer paso para alcanzar los objetivos de la vigilancia.

Ésta información debe proporcionar antecedentes a los encargados de tomar decisiones, así como una base para elaborar y verificar hipótesis científicas y modelos de los procesos relacionados con la calidad del aire y con su impacto en el hombre y su ambiente.

Para maximizar el uso de las mediciones ambientales de calidad del aire en su totalidad, se debe contar con datos sobre otros factores socioeconómicos y geográficos compatibles y de calidad óptima. Por ejemplo, el uso de datos para profundizar nuestro conocimiento de los procesos de emisión y dispersión atmosférica que incrementan las concentraciones de contaminantes requiere acceder a mediciones meteorológicas y de emisión.

Otro ejemplo sería evaluar el impacto de las condiciones de calidad del aire en el ecosistema o en la salud; para lo cual se requiere información sobre distribuciones poblacionales, epidemiología, factores sociales y efectos sobre la salud.

Generalmente los datos de vigilancia y de las emisiones se usan para elaborar estrategias de reducción de los efectos. Esto es, para manejar la contaminación del aire en el ámbito local o

⁴⁸ Broughton, G. F. J.; Bower, J. S.; Stevenson, K. J. et al. Air Quality in the UK: A Summary of Results from Instrumented Air Monitoring Networks in 1991/92. Stevenage, Warren Spring Laboratory, informe LR 941 (AP). 1993.

nacional. La importancia de una base de datos consolidada a escala nacional residiría en que se puede usar para evaluar el impacto de las medidas de control en el largo plazo y para estimar la situación de las ciudades de las que solo se cuenta con datos limitados, al compararlas con ciudades "representativas" similares. Las bases de datos de calidad del aire tienen a su disposición una variedad de metodologías analíticas comprobadas. Sin embargo, en el análisis final, el nivel y los medios apropiados de tratamiento de datos estarán determinados en gran medida por el uso de datos que se ha concebido al inicio. Se debe considerar el uso de sistemas de información geográfica, especialmente cuando se pretende combinar los datos de contaminación con los de epidemiología y otras fuentes coordinadas geográficamente (sociales, económicas y demográficas).

9.6. REPORTE DE LA CALIDAD DEL AIRE.

Los informes a ser elaborados y remitidos al centro de coordinación y recopilación de información, han de prepararse según los formatos y condiciones que se presentan en este aparte, donde se establecen los datos mínimos, cálculos y análisis a ser abordados en dichos reportes. El continuo y cabal seguimiento de los procedimientos establecidos para el aseguramiento y control del funcionamiento de los equipos de vigilancia, garantiza que los datos brutos recopilados tengan un nivel de precisión y exactitud que permitan un procesamiento posterior con una menor incertidumbre sobre la coincidencia entre las situaciones reales y las descritas por los datos.

Para el análisis de los fenómenos y episodios de contaminación; habiendo asegurado la calidad de la materia prima (los datos), es importante establecer no sólo un formato y modo común de presentación de la información por parte de los diferentes SVCA, sino también los cálculos y las unidades de las variables utilizadas.

9.6.1. INFORMACIÓN SOBRE SVCA, ESTACIONES Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN.

El reporte que aparece a continuación debe ser enviado al IDEAM, una única vez por la persona responsable o por el representante legal de la institución que posee el SVCA, así mismo se notificará la recepción de dicha información, y se pedirán aclaraciones, si hubiere el caso.

Los diferentes SVCA en la medida de lo posible, deberán remitir el máximo de información posible en relación con los siguientes aspectos:

Tabla 26. Información sobre los SVCA.

1. Nombre
2. Abreviatura
3. Tipo de SVCA (industria local, ciudad, zona urbana, aglomeración urbana, provincia, región, país, internacional)
4. Organismo responsable de la gestión del SVCA
4.1. Nombre
4.2. Nombre y apellidos de la persona responsable
4.3. Dirección
4.4. Teléfono y fax
4.5. Correo electrónico
4.6 Sitio de Internet

Tabla 27. Información sobre las estaciones.

1. Información general
1.1. Nombre de la estación
1.2. Nombre de la ciudad o localidad, si procede
1.3. Número de referencia o código nacional y/o local
1.4. Código de la estación atribuido con arreglo al presente proyecto.
1.5. Nombre del organismo técnico responsable de la estación (si difiere del responsable del SVCA)
1.6. Organismos o programas a los que se remiten los datos (por compuesto, si procede) (local, nacional, GEMS, CEPIS, etc.)
1.7. Objetivo(s) del seguimiento (conformidad con los requisitos de los instrumentos jurídicos, evaluación de la exposición (salud humana y/o ecosistemas y/o materiales) análisis de tendencias, evaluación de emisiones, etc.)
1.8. Coordenadas geográficas (según la norma ISO 6709: longitud y latitud geográficas y altitud geodésica)
1.9. Contaminantes medidos
1.10. Parámetros meteorológicos medidos
1.11. Otra información pertinente: dirección predominante del viento, relación entre distancia y altura de los obstáculos más cercanos, etc.
2. Clasificación de las estaciones
2.1. Tipo de zona
2.1.1. Urbana: zona edificado continua
2.1.2. Suburbana: zona muy edificada: zona continua de edificios separados combinada con zonas no urbanizadas (pequeños lagos, bosques, tierras agrícolas)
2.1.3. Rural: todas las zonas que no satisfacen los criterios establecidos para las zonas urbanas / suburbanas
2.2. Tipo de estación en relación con las fuentes de emisión predominantes
2.2.1. Tráfico: estaciones situadas de tal manera que su nivel de contaminación está influenciado principalmente por las emisiones procedentes de una calle/carretera próxima
2.2.2. Industria: estaciones situadas de tal manera que su nivel de contaminación está influido principalmente por fuentes industriales aisladas o zonas industriales
2.2.3. Entorno de fondo: estaciones que no están influenciadas ni por el tráfico ni por la industria
2.3. Información complementaria sobre la estación
2.3.1. Zona de representatividad (radio). Para las estaciones “tráfico”, indique la longitud de la calle/carretera que la estación representa
2.3.2. Estaciones urbanas y suburbanas: población de la ciudad
2.3.3. Estaciones “tráfico”
<ul style="list-style-type: none"> • volumen de tráfico estimado (tráfico medio diario anual) • distancia con respecto al bordillo de la acera • porcentaje del tráfico correspondiente a los vehículos pesados • velocidad del tráfico • distancia entre las fachadas de los edificios y altura de los edificios (calle de tipo cañón) • anchura de la calle/carretera (calles distintas de las de tipo cañón)
2.3.4. Estaciones “industria”
<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de industria(s) (nomenclatura seleccionada para el código de contaminantes atmosféricos) • Distancia de la fuente / zona fuente
2.3.5. Estaciones rurales (subcategorías)
<ul style="list-style-type: none"> • Proximidad a una ciudad • Regional • Aislada

Tabla 28. Información sobre la configuración de las mediciones por compuesto.

1. Equipos
1.1. Nombre
1.2. Principio analítico o método de medición
2. Características del muestreo
2.1. Localización del punto de toma de muestras (fachada de edificio, calzada, azotea, patio)
2.2. Altura del punto de toma de muestras
2.3. Tiempo de integración del resultado
2.4. Tiempo de toma de muestras.

9.6.2. CONTENIDO DEL INFORME ANUAL NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE

El objetivo principal de un informe de este tipo es poner a disposición de las autoridades, investigadores, grupos ambientalistas y público en general, datos y análisis sobre la calidad del aire de las ciudades que poseen Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire. Dicha publicación permitiría a las diferentes autoridades que realizan actividades de vigilancia, evaluación e inspección, contar con información sistematizada sobre los niveles de contaminación en cada una de las ciudades presentadas, permitiendo con ello, evaluar las acciones de los Programas de Control de la Calidad del Aire, para prevenir, controlar y/o mejorar las condiciones prevalecientes en cada una de ellas, o en su caso, rediseñar los instrumentos de política.

En términos generales para este documento se plantean seis capítulos; una introducción, el primero ilustra sobre los estándares que operan y su relación con los efectos en la salud de los grupos más vulnerables. Así mismo se presenta la información pertinente de cada SVCA a nivel de infraestructura física y factor humano disponible para la operación, mantenimiento y gestión. Los SVCA que poseen tratamiento especial de los indicadores, es decir la elaboración y presentación de índices. En el siguiente capítulo se muestran los datos correspondientes a las variables meteorológicas, donde se debe incluir los factores espaciales y temporales que caracterizan la zona de estudio. Consecutivamente se relaciona el capítulo correspondiente a la calidad del aire, donde a través del seguimiento de los diferentes indicadores se puede establecer los niveles de inmisión en función de la normatividad vigente, en este capítulo también debe incluirse la presentación del ICA (Índice de Calidad del Aire); este índice debe ser estimado por estación y para cada uno de los contaminantes monitoreados por el SVCA, para cada día de monitoreo será presentado por cada estación el mayor valor obtenido de los diferentes contaminantes, y con estos valores se estima el promedio para cada estación y de esta forma se presenta el ICA anual. El procedimiento para calcular el ICA y las consideraciones adicionales referentes a los rangos y su presentación adecuada en los informes, son presentadas en la sección 12, anexo 2 del presente documento. En el último capítulo se pide relacionar las fuentes de emisión que causan el deterioro de la calidad del aire de la zona, es decir si se posee información de los inventarios de tanto de fuentes fijas como móviles. También se proponen varios anexos que complementan el análisis que se hace para todos los contaminantes.

Algunas de las consideraciones a tener en cuenta para cálculos y representaciones gráficas, son:

- Los niveles o concentraciones de los contaminantes en el aire se expresan en unidades de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para facilitar la comparabilidad con la situación en otros países.
- Para O_3 y NO_2 se calcula el porcentaje y número de horas en que se excede la norma de calidad del aire correspondiente a cada contaminante. Se calcula sobre la cantidad de horas

con datos válidos por estación.

- Concentración promedio por hora. Se obtiene promediando los datos de la misma hora durante todo el año, contemplando la información horaria válida disponible de todo el año para cada estación de vigilancia.
- Concentración máxima por hora. Se toma el valor máximo para cada una de las horas del día contemplando la información disponible de todo el año para cada estación de vigilancia.
- Promedio mensual de las concentraciones horarias. Se calculó del total de las concentraciones horarias válidas en el mes por estación de vigilancia.
- Máximo mensual de las concentraciones horarias. Se obtiene de todas las concentraciones horarias válidas de que se dispone al mes por estación de vigilancia.
- Promedio anual de las concentraciones horarias. Se obtiene de todas las concentraciones horarias válidas de que se dispone al año por estación de vigilancia.

Cuando sea necesario los promedios en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ se calculan a partir de los promedios anuales en ppm y para ello se emplea la siguiente conversión:

$$C[\mu\text{g}/\text{m}^3] = \frac{C[\text{ppm}] \times PM}{0.024466}$$

En condiciones estándar de presión (760 mmHg) y temperatura (25 °C).

De tal forma que para cada contaminante se puede utilizar el siguiente factor de conversión:

Tabla 29. Factores de conversión.

CONTAMINANTE	M (PESO MOLECULAR) Kg/Kmol	FACTOR DE CONVERSIÓN
CO	28	1144.26 x ppm = $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO ₂	46	1879.85 x ppm = $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO ₂	64	2615.45 x ppm = $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O ₃	48	1961.58 x ppm = $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A continuación se presenta un índice de documento sugerido para el Informe Anual de Calidad del Aire.

INTRODUCCIÓN

1 GENERALIDADES: Breve conceptualización de los siguientes items:

- 1.1 Parámetros monitoreados de calidad del aire y sus efectos para la salud humana.
- 1.2 Marco normativo: norma de calidad del aire
- 1.3 Índice de Calidad del Aire: procedimiento de cálculo y significado de cada rango de posibles resultados.
- 1.4 Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire: Breve descripción de las condiciones ambientales y poblacionales de la región que esta cubierta por el SVCA, representatividad de las mediciones, ubicación geográfica de las estaciones, fichas técnica de las estaciones y tecnologías empleadas en cada estación para el monitoreo.
- 1.5 Estadísticas empleadas: explicación de los procedimientos de cálculo y sobre todo del significado y/o uso que se le da a dicho cálculo.
- 1.6 Meteorología: conceptualización y procedimientos para la estimación de altura de capa de mezcla y estabilidad atmosférica (ver sección 9.6.5) y procedimientos para cálculos de los

resúmenes o promedios de las otras variables meteorológicas (temperatura, precipitación, presión, radiación solar y humedad relativa).

2. EVALUACION DE LA CANTIDAD, CALIDAD, OPORTUNIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LA INFORMACION EN LA BASE DE DATOS
 - 2.1 Análisis del porcentaje de captura de datos: presentar los resultados para todos y cada uno de los contaminantes monitoreados
3. CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA
 - 3.1 Resultados de Calidad del Aire: Preferiblemente reportes gráficos que permitan comparar los valores promedios anuales de concentración obtenidos con la norma, también se aconseja incluir representaciones como los diagramas de caja por estaciones para cada contaminante, ya que estos permiten visualizar si la estación cae en algún tipo de área fuente.
 - 3.2 Análisis de la Calidad del Aire: comportamiento anual del Índice de Calidad del Aire (el ICA anual para cada estación se calcula como el promedio de los índices diarios estimados a partir de la información recolectada en cada una de ellas), del mismo modo que se emplea para estimar el ICA anual, es posible realizar para cada estación el análisis del ICA por días de la semana de acuerdo con toda la información que se tenga del año y/o el análisis y comparación del ICA para cada estación para cada uno de los 12 meses del año.
 - 3.3 Resultados de las mediciones meteorológicas: se presentan los resultados de promedios de las variables medidas, empleando los criterios en cuanto a sus formatos de presentación, los cuales son detallados en la sección 9.6.4 de este mismo documento. Mínimo deberá contener: rosas de vientos diurnas, nocturnas y totales para todas y cada una de las estaciones donde se realicen mediciones; promedio anual para cada hora del día en cada estación donde se realicen mediciones de temperatura, presión, precipitación, distribución porcentual horaria de la precipitación, radiación solar, humedad relativa, dirección y velocidad del viento; y finalmente resumen de los valores promedios mensuales de las variables meteorológicas de la ciudad o región.
 - 3.4 Determinación de áreas - fuente de contaminación: esto debe realizarse para todos y cada uno de los contaminantes monitoreados y para cada estación de monitoreo.
 - 3.5 Estudios especiales: Resultados de estudios y/o investigaciones científicas realizadas durante el año, relacionados con diferentes temas como por ejemplo estudios de valoración de la contaminación en la salud humana o estudios epidemiológicos desarrollados, estudios en días de pico y placa, estudios en días de no carro, estudios en días de quema de pólvora, etc.
4. CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
 - 4.1 Presentación de medidas de contingencia y/o de control de emisiones de fuentes fijas, que hayan sido aplicadas por la autoridad ambiental en el último año.
 - 4.2 Presentación de medidas de contingencia y/o de control de emisiones de fuentes móviles, que hayan sido aplicadas por la autoridad ambiental en el último año
 - 4.3 Presentación de nuevos controles (esto solo en caso que la autoridad ambiental competente decida implementar algún nuevo control para algunas de las fuentes emisoras con mayor impacto sobre la calidad del aire, de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de calidad del aire y en los planes de gestión).

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9.6.3. CONTENIDO DE INFORMES MENSUALES Y TRIMESTRALES DE CALIDAD DEL AIRE

La realización de informes trimestrales por parte de los SVCA permite conocer a corto plazo el estado de la calidad de aire en la región y también desarrollar seguimientos a los posibles efectos

que se puedan presentar, bien sea por las medidas de control implementadas o también por la aparición de nuevas fuentes contaminantes.

De acuerdo a lo establecido en el Manual de Diseño de este mismo Protocolo de Monitoreo y Seguimiento de Calidad del Aire, cada tipo de Sistema de Vigilancia debe cumplir con ciertos requerimientos de infraestructura, hardware, software y frecuencia de generación de reportes. Específicamente, los sistemas que deben presentar este tipo de informes impresos a la nación son: SVCA's tipo Básico, tipo Intermedio, tipo Avanzado y tipo Especial.

Se recomienda que el contenido de este informe sea el siguiente:

1. INTRODUCCION

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

3. GENERALIDADES

- 3.1 Ubicación geográfica de estaciones y entorno
- 3.2 Tecnologías de medición de las estaciones
- 3.3 Resumen ficha técnica de las estaciones
- 3.4 Contaminante evaluado
- 3.5 Tecnologías de monitoreo utilizadas

4. RESULTADOS DE LOS MONITOREOS CALIDAD DEL AIRE

- Gráficas de evolución diaria de la concentración del contaminante (incluir variables meteorológicas como precipitación)
- Resultados estadísticos
- Resultados consolidados
- Comparación con la norma
- Cálculo de Índice de Calidad del Aire - ICA para cada estación (este cálculo debe ser presentado de forma mensual para cada estación, por ejemplo si el período de monitoreo corresponde a los meses de enero a marzo, entonces debe estimarse el ICA de cada estación, para el mes de enero, febrero y marzo de forma separada).
- Análisis de datos atípicos
- Particularidades del período

5. METEOROLOGIA DEL PERIODO

- Gráficas de comportamiento mensual
 - Temperatura
 - Precipitación
 - Rosa de vientos (diurnas, nocturnas y totales)

6. CONCLUSIONES

ANEXOS

ANEXO 1: FICHA TECNICA DE LAS ESTACIONES

ANEXO 2: SOPORTE DEL REGISTRO DE CALIBRACIONES

ANEXO 3: BITÁCORA DE MUESTREOS

- Fecha de inicio y finalización del muestreo
- Identificación y peso final del filtro utilizado
- Presión barométrica de la zona
- Temperatura promedio de la zona

- Flujo del muestreo
 - Registro inicial y final de la lectura del horómetro
 - Identificación de la carta utilizada en el registrador de flujo durante el muestro
 - Identificación de la estación o sitio de operación del equipo, así como su ubicación geográfica (GPS)
 - Identificación del equipo utilizado
 - Operador y responsable del monitoreo
 - Observaciones y dificultades durante el muestreo
- ANEXO 4: Reportes de laboratorio (cuando aplique el caso)
- ANEXO 5: Memorias de cálculo de datos
- ANEXO 6: Registros del Plan de calidad
- ANEXO 7: Cadena de custodia de los datos (cuando aplique el caso)

9.6.4. CONTENIDO DEL INFORME DE CALIDAD DEL AIRE PRESENTADO EN LAS PÁGINAS WEB

En la página web de la autoridad ambiental respectiva a cada SVCA debe incluirse y mantenerse una sección donde se reporten semanalmente los datos recolectados por las estaciones de monitoreo y vigilancia de calidad de aire; estos datos han debido ser sometidos a los procedimientos de validación siguiendo las indicaciones del presente Protocolo.

El contenido mínimo sugerido de los reportes semanales que serán publicados en la web para libre acceso de cualquier ciudadano es el siguiente:

- Datos de la semana presente
- Presenta el índice de calidad del aire para cada día de monitoreo realizado
- Graficas con los datos
- Capacidad para poder bajar informes del SVCA

La Figura 50 muestra un ejemplo de página web posible para el reporte de la información.



The screenshot shows the 'Red Minera' website interface. At the top, there is a navigation menu with links: inicio, historia, operación, convenio, l.c.a., download, informes, enlaces, and datos. Below this, there are tabs for 'mp10', 'p.s.t.', and 'meteorología'. The main content area is titled 'DISTRIBUCION DE ESTACIONES RED DE MONITOREO' and features a map of the region with station locations marked. A table below the map displays air quality data for various stations as of 2008-01-29.

Convenios

Verde	Buena (0-154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Amarillo	Desfavorable para grupos (155-254 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Naranja	Desfavorable (255-354 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Rosa	Muy desfavorable (355-424 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Púrpura	Peligroso (425-604 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fecha: Seleccionar [VER]

Nombre	PM10 - 2008-01-29	Nivel $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ZM16-Bosconia		
ZM15-CHRISCIANA		83.12
ZM14-Movil 1		
ZM13-El Matillo		
ZM12-Rincon Hondo		56.96
ZM11-De Fondo		
ZM10-Movil Via		
ZM9-La Jagua-Via		
ZM8-La Loma-Via		
ZM7-Plan Bonito Norte		124.38
ZM6-Bogueron		
ZM5-La Aurora		83.24
ZM4-Las Palmitas		81.63
ZM3-Plan Bonito Sur		
ZM2-La Jagua-Centro		84.16
ZM1-La Loma-Centro		57.91

Ubicación de Estaciones

** Los datos presentados han surtido un proceso de prevalidación, pero es posible que cambien con una validación posterior.

Calculo del Índice de Calidad del Aire

Enlaces con información general y vínculos para bajar informes

Plano Interactivo que despliega datos y características de las estaciones

The bottom section shows two detailed views from the website. The left screenshot displays the 'FICHA TÉCNICA DE LA ESTACION' (Station Technical Sheet) with various fields for general information, location, and emission sources. The right screenshot shows a bar chart titled 'Estación: 12' with a legend 'Escala de rango de niveles para publicar' and a photograph of the monitoring station.

Figura 50. Pagina web tipo (CORPOCESAR-Red Minera. www.corpocesar.gov.co)

9.6.5. CÁLCULOS Y CONTENIDO DE UN INFORME METEOROLÓGICO ANUAL

Un informe básico de meteorología esta orientado a suministrar a los especialistas, a las autoridades y a la comunidad en general, la información meteorológica relacionada con el tema de la calidad del aire urbana.

Se resalta la importancia de los datos horarios, en razón a las condiciones variables de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla a lo largo del día. Los datos suministrados son importantes para la realización de las modelaciones de la dispersión de los contaminantes atmosféricos a partir de las fuentes emisoras, tema esencial en los estudios de calidad de aire.

Asimismo, el informe permite establecer la continuidad de los datos generados en las estaciones meteorológicas de los SVCA, de manera que cada usuario del informe pueda inferir la confiabilidad de los resúmenes meteorológicos presentados para cada estación.

El siguiente es el contenido sugerido para el capítulo de meteorología.

1. Evaluación de los datos de la red meteorológica urbana

1.1 Inventario de las variables meteorológicas medidas en las estaciones meteorológicas de los SVCA

1.2 Evaluación de la continuidad de los datos meteorológicos reportados en las estaciones en cada ciudad durante el año.

Reportar los porcentajes de días en los que no se obtienen datos por cada estación y por cada variable. La presentación del inventario y de la continuidad de datos debe tener una estructura básica. A continuación se presenta un ejemplo de dicho reporte tomando como base la información obtenida en el análisis de información meteorológica realizado para uno de los SVCA existentes en el país, el cual posee cuatro estaciones con medición de parámetros meteorológicos (ver Tabla 30 y Figura 51).

Tabla 30. Disponibilidad de datos meteorológicos existentes en el SVCA evaluado

	ESTACION	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
	PERIODO DATOS	Feb. 2002 - Oct. 2006	Feb. 2002 - Oct. 2006	Ene. 2001 - Mar. 2006	Ene. 2001 - Dic. 2006
	VARIABLES	T, HR, DV, VV, RS, PB, P			
AÑO	INDICADOR				
2001	Días de operación			365	365
	Días falta todos			0	7
	Días falta T			0	7
	Días falta HR			0	7
	Días falta RS			58	7
	Días falta VV			58	7
	Días falta DV			58	7
	Días falta Pb			0	7
	Días falta Precip.			0	7

	ESTACION	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
	PERIODO DATOS	Feb. 2002 - Oct. 2006	Feb. 2002 - Oct. 2006	Ene. 2001 - Mar. 2006	Ene. 2001 - Dic. 2006
	VARIABLES	T, HR, DV, VV, RS, PB, P			
AÑO	INDICADOR				
2002	Días de operación	334	336	365	365
	Días falta todos	0	0	0	0
	Días falta T	0	124	0	0
	Días falta HR	0	0	0	0
	Días falta RS	0	0	0	0
	Días falta VV	0	0	0	0
	Días falta DV	0	0	0	0
	Días falta Pb	0	0	0	0
	Días falta Precip.	0	0	0	0
2003	Días de operación	365	365	365	365
	Días falta todos	0	0	0	92
	Días falta T	0	0	0	92
	Días falta HR	0	0	0	92
	Días falta RS	0	0	0	106
	Días falta VV	0	0	0	92
	Días falta DV	0	0	0	92
	Días falta Pb	0	0	0	92
	Días falta Precip.	0	0	0	92
2004	Días de operación	365	365	365	365
	Días falta todos	17	0	0	8
	Días falta T	17	0	0	8
	Días falta HR	17	265	0	8
	Días falta RS	17	0	0	8
	Días falta VV	185	0	0	8
	Días falta DV	185	0	0	8
	Días falta Pb	17	0	0	8
	Días falta Precip.	17	0	0	8
2005	Días de operación	365	365	365	365
	Días falta todos	13	102	0	0
	Días falta T	13	102	0	0
	Días falta HR	13	142	0	0
	Días falta RS	13	102	0	0
	Días falta VV	13	102	0	0
	Días falta DV	13	102	0	75
	Días falta Pb	13	102	0	0
	Días falta Precip.	13	102	0	0

	ESTACION	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
	PERIODO DATOS	Feb. 2002 - Oct. 2006	Feb. 2002 - Oct. 2006	Ene. 2001 - Mar. 2006	Ene. 2001 - Dic. 2006
	VARIABLES	T, HR, DV, VV, RS, PB, P			
AÑO	INDICADOR				
2006	Días de operación	292	365	174	365
	Días falta todos	0	0	0	9
	Días falta T	0	0	77	9
	Días falta HR	0	0	77	9
	Días falta RS	0	0	77	9
	Días falta VV	0	0	0	9
	Días falta DV	0	31	0	69
	Días falta Pb	0	0	77	9
	Días falta Precip.	0	0	77	9
Total días operación	1721	1796	1999	2190	
Total días falta todo	30	102	0	116	
% días falta todo	1.74	5.68	0,00	5.30	
% días falta T	1.74	12.58	3.85	5.30	
% días falta HR	1.74	22.66	3.85	5.30	
% días falta RS	1.74	5.68	6.75	5.94	
% días falta V.V	11.50	5.68	2.90	5.30	
% días falta DV	11.50	7.41	2.90	11.46	
% días falta Pb	1.74	5.68	3.85	5.30	
% días falta Precip.	1.74	5.68	3.85	5.30	

Convenciones:

T: temperatura del aire; HR: humedad relativa; V.V: velocidad del viento; DV: dirección del viento; Pb: presión atmosférica (barométrica); P: precipitación; RS: radiación solar.

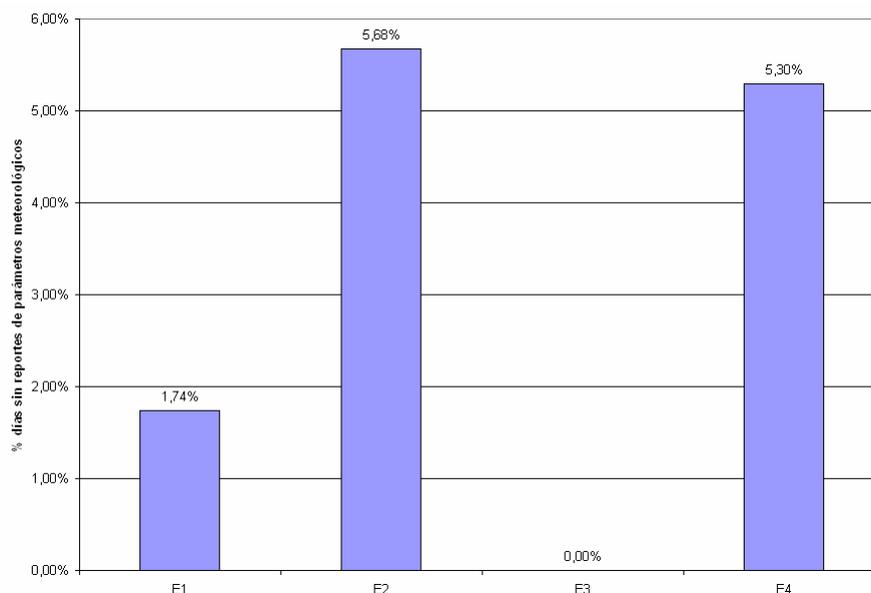


Figura 51. Porcentajes de días con datos faltantes en las estaciones meteorológicas la ciudad evaluada

1.3 Control de calidad de los datos: Rangos lógicos que se deben cumplir en las estaciones de la ciudad o región en evaluación para cada una de las variables que serán consideradas.

1.4 Herramientas utilizadas en el procesamiento y análisis de los datos: mencionar clara y detalladamente todas y cada una de las herramientas tanto físicas como de software empleadas durante el procesamiento de los datos obtenidos por las mediciones.

2. Estudios meteorológicos de las ciudades

2.1 Resumen de las bases técnicas de los estudios climatológicos y micrometeorológicos: Descripción breve, clara y concisa del fundamento teórico bajo el cual es realizado el análisis de la información y los cálculos de parámetros que permiten la caracterización climatológica y micrometeorológica de la ciudad.

2.2 Condiciones climatológicas predominantes en la ciudad o región:

2.2.1 Resumen anual por horas y resúmenes mensuales para las diversas estaciones de la ciudad o región, de las siguientes variables: temperatura del aire, dirección y velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, precipitación. Un ejemplo básico de este tipo de resúmenes puede observarse en la siguiente tabla:

Tabla 31. Ejemplo para la presentación del resumen meteorológico anual por horas para una estación

HORA	VEL VTO m/s	DIR VTO	TEMP ° C	PRECIP mm	PRECIP %	HUM REL %	RAD SOL W/m ²	PRESION HPa
0	0.64	SW	21.82	67.60	3.87	79.15	0.23	679.36
1	0.65	N	21.53	148.10	8.49	79.49	0.27	679.12
2	0.60	N	21.23	136.50	7.82	79.83	0.30	679.00
3	0.62	N	21.00	94.80	5.43	79.84	0.30	678.94
4	0.62	N	20.81	95.10	5.45	80.10	0.30	679.02
5	0.59	N	20.63	92.80	5.32	80.09	2.74	679.16
6	0.60	SW	20.84	80.60	4.62	78.70	66.85	679.43
7	0.72	SE	21.82	84.70	4.85	74.75	237.26	679.47
8	0.91	SE	22.78	90.50	5.19	72.00	432.65	679.63
9	1.07	SE	24.07	28.30	1.62	67.96	626.32	679.62
10	1.32	SE	25.40	31.10	1.78	62.37	716.56	679.58
11	1.77	SE	26.10	31.30	1.79	60.86	727.99	679.27
12	1.94	SE	26.20	30.40	1.74	62.04	625.93	678.99
13	1.96	SE	26.11	22.80	1.31	63.30	501.42	678.64
14	1.91	SE	25.92	28.00	1.60	64.56	393.18	678.27
15	1.78	SE	25.49	63.40	3.63	66.93	287.02	678.04
16	1.53	SE	24.82	81.90	4.69	70.18	152.38	678.11
17	1.15	SE	24.00	48.30	2.77	74.07	38.04	678.39
18	0.89	S	23.23	58.60	3.36	77.68	0.64	678.72
19	0.83	S	22.85	57.50	3.30	79.13	0.30	679.08
20	0.76	S	22.64	56.70	3.25	79.52	0.29	679.30
21	0.71	S	22.47	60.90	3.49	79.52	0.27	679.48
22	0.69	SW	22.24	81.70	4.68	79.24	0.24	679.54
23	0.69	N	22.03	173.40	9.94	79.43	0.23	679.53
24 HORAS	1.04	SE	23.17	1745	100	73.78	200.49	679.07
DIURNO	1.39	SE	24.46	621.30	35.60	68.14	400.47	678.95
NOCTURNO	0.69	N	21.87	1123.70	64.40	79.42	0.51	679.19
MAX HORA	1.96		26.20	173.40		80.10	727.99	679.63
MIN HORA	0.59		20.63	22.80		60.86	0.23	678.04

2.2.2 Rosas de viento: mensuales, anual total (todos los datos), anual diurna y anual nocturna.

2.2.3 Resumen analítico de las condiciones climatológicas del año: detalle de los valores climáticos mensuales y anuales de las variables analizadas y elaboración de mapas donde se representa la distribución de la precipitación en toda la región, el comportamiento de la humedad relativa, velocidad y dirección del viento. El resumen analítico debería ir acompañado de gráficas explicativas. Como ejemplo, se presentan los datos del mismo SVCA con las cuatro estaciones mencionadas anteriormente: E₁, E₂, E₃ y E₄ para el período el año 2002.

Tabla 32. Resumen de valores promedios mensuales de las variables climáticas en el SVCA evaluado durante el año 2002

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	AÑO
E1													
Velocidad Viento (m/s)	1.48	1.57	1.54	1.44	1.40	1.25	1.31	1.35	1.41	1.48	1.46	1.46	1.43
Velocidad Viento día (m/s)	2.17	2.25	2.24	2.13	2.00	1.86	1.90	1.97	2.01	2.12	2.10	2.13	2.07
Velocidad Viento noche (m/s)	0.79	0.88	0.84	0.76	0.79	0.65	0.71	0.73	0.81	0.84	0.82	0.78	0.79
Temp. (° C)	21.02	21.60	21.56	21.21	21.17	20.97	20.93	21.34	20.86	20.71	20.58	20.87	21.07
Precip. (mm)	37.70	105.38	99.68	95.30	91.95	69.32	57.80	42.30	79.10	137.20	140.23	62.28	1018.25
H R (%)	86.26	80.80	83.39	86.68	86.47	85.95	84.28	83.94	85.75	87.48	89.18	88.04	85.75
Radiación solar (W/m ²)	419.55	446.68	463.46	449.77	457.17	420.56	407.11	424.71	440.16	426.86	410.10	391.57	429.81
Presión atm. (hPa)	664.46	664.08	664.11	664.15	661.92	662.53	665.17	664.02	669.04	664.23	664.19	664.35	663.94
E2													
Velocidad Viento (m/s)	1.55	1.56	1.28	0.91	0.97	0.98	0.87	1.22	1.27	1.26	1.24	1.23	1.18
Velocidad Viento día (m/s)	1.79	1.76	1.65	1.34	1.32	1.35	1.29	1.56	1.63	1.59	1.50	1.53	1.51
Velocidad Viento noche (m/s)	1.31	1.36	0.91	0.47	0.62	0.61	0.46	0.88	0.91	0.92	0.97	0.92	0.86
Temp. (° C)	25.36	26.06	25.84	25.67	25.69	25.15	25.14	25.47	25.14	25.15	25.12	25.50	25.52
Precip. (mm)	47.57	87.97	81.42	79.20	65.60	44.21	56.11	33.70	73.02	71.36	80.28	33.58	754.01
H R (%)	77.62	74.25	77.80	81.81	82.53	82.67	81.72	79.34	80.66	82.01	84.10	82.49	79.88
Radiación solar (W/m ²)	396.46	439.02	466.78	473.77	505.47	475.84	475.35	492.28	480.63	439.19	409.92	399.36	450.67
Presión atm. (hPa)	659.53	660.77	656.53		668.42	667.40	669.85	669.07	666.56	666.57	665.34	665.89	665.71
E3													
Velocidad Viento (m/s)	0.58	0.74	0.64	0.53	0.52	0.40	0.39	0.43	0.46	0.51	0.50	0.56	0.52
Velocidad Viento día (m/s)	1.03	1.27	1.09	0.88	0.83	0.63	0.64	0.73	0.78	0.88	0.85	1.00	0.89
Velocidad Viento noche (m/s)	0.14	0.22	0.20	0.18	0.20	0.17	0.14	0.14	0.15	0.15	0.15	0.12	0.16
Temp. (° C)	22.29	22.67	22.22	21.69	21.96	22.12	22.83	22.34	22.11	22.80	22.51	22.13	22.27
Precip. (mm)	92.68	164.23	109.22	83.05	121.60	61.25	76.65	73.80	117.35	156.65	136.33	39.55	1232.35
H R (%)	77.86	77.02	78.22	83.59	84.87	82.87	82.27	79.91	79.74	83.40	82.00	78.05	80.48
Radiación solar (W/m ²)	438.65	475.26	482.49	446.77	480.07	421.42	408.84	462.28	461.90	448.49	440.64	430.93	443.81
Presión atm. (hPa)	676.26	674.13	676.46	676.06	675.90	676.05	674.97	675.96	675.60	674.59	675.52	675.35	675.87

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	AÑO
E4													
Velocidad Viento (m/s)	1.02	1.55	1.10	1.03	1.05	1.00	0.97	0.99	1.05	0.97	0.85	0.93	1.05
Velocidad Viento día (m/s)	1.42	1.87	1.46	1.40	1.39	1.30	1.27	1.33	1.40	1.29	1.17	1.31	1.40
Velocidad Viento noche (m/s)	0.63	1.22	0.75	0.67	0.71	0.69	0.66	0.66	0.70	0.64	0.52	0.54	0.71
Temp. (° C)	23.11	23.38	23.95	23.11	23.49	23.12	23.29	23.64	23.22	22.84	22.55	22.83	23.25
Precip. (mm)	94.18	148.44	138.16	134.84	117.46	97.53	77.90	52.80	95.52	109.76	114.83	94.45	1275.86
H R (%)	75.49	73.37	76.68	83.35	82.55	82.41	78.78	77.97	79.21	82.23	82.79	78.19	79.58
Radiación solar (W/m2)	382.87	404.29	410.88	413.09	438.78	389.30	393.04	415.27	394.95	386.47	374.38	383.56	400.08
Presión atm. (HPa)	678.16	671.26	677.62	677.82	677.95	678.33	677.99	677.90	677.95	677.61	678.21	678.37	677.30

2.3 Condiciones micrometeorológicas predominantes en la ciudad o región.

2.3.1 Resumen anual (con datos horarios) y resúmenes mensuales para cada ciudad o región de la estabilidad atmosférica y la altura de la capa de mezcla.

Uno de los puntos críticos en los estudios de la calidad del aire en áreas urbanas en Colombia, se refiere a la falta de metodologías meteorológicas confiables para la solución adecuada de los modelos de dispersión de los contaminantes atmosféricos. El procedimiento que se sugiere a continuación es propuesto por Ruiz⁴⁹ a partir de los lineamientos presentados en el estudio “Implementación de Metodologías para la Meteorología y la Micrometeorología de Dispersión de los Contaminantes en el Aire” del IDEAM realizado en 1998⁵⁰.

La altura de mezcla en horas diurnas depende tanto del calentamiento ocasionado por la radiación solar recibida en un sitio (altura convectiva) como del movimiento turbulento generado por los desplazamientos del aire (viento horizontal y vertical, altura mecánica).

Por ello para las horas diurnas se puede expresar que:

$$H_z = MAX(h_{conv}, h_{mec})$$

Donde:

H_z: altura de mezcla en un período diurno dado

h_{conv}: altura de mezcla convectiva

h_{mec}: altura de mezcla mecánica en el período en cuestión.

A su vez:

$$(h_{conv})_{ti} = \left[(h_{conv})_{ti-1}^2 + \frac{2.4 H_0}{\rho C_p \gamma} (t_2 - t_1) \right]^{0.5}$$

⁴⁹ Ruiz, F. Metodologías para estimar la altura de la capa de mezcla y otros parámetros de turbulencia atmosférica. Universidad Nacional de Colombia. Posgrado en Meteorología. 2001.

⁵⁰ Sozzi, R. La turbulencia de la atmósfera y la dispersión de los contaminantes. 2 volúmenes. ASAS. Cinisello Balsamo. Italia. 1997.

Sozzi, R. y F. Ruiz. Implementación de metodologías para la meteorología y la micrometeorología de dispersión de los contaminantes en el aire. IDEAM. 1998.

Donde:

$(h_{conv})_{ti}$ y $(h_{conv})_{ti-1}$: son respectivamente las alturas de mezcla en el período actual y en el período previo

$\left(\frac{2.4 H_0}{\rho C_p \gamma}\right) \cdot (t_2 - t_1)$: es un término cuyo valor depende del flujo de calor sensible (H_0)

γ : es un parámetro semi-empírico de ajuste de la altura de mezcla basado en la rugosidad superficial, cuyo valor es de 0.005

t_2 y t_1 : son tiempos, precedente y actual. Como los cálculos son horarios la diferencia entre t_2 y t_1 será igual a 1 hora, que convertidos en la unidad de segundos será igual a 3600.

ρ : es la densidad del aire a presión constante; puede ser leída en tablas de propiedades físicas del aire

C_p : es la capacidad calorífica o calor específico del aire a presión constante; puede ser leído en tablas de propiedades físicas. Una forma de estimar el producto de ρ y C_p del aire en casos en los que no se cuente con ninguna tabla de datos de propiedades, es a través de la siguiente expresión:

$$\rho C_p = 350.12 \cdot (P[mbar]/T[K])$$

Por su parte el flujo de calor sensible se define de la siguiente forma:

$$H_0 = 0.3R_g + A$$

Donde

R_g : es la radiación global en W/m^2

A: parámetro calculado a partir del dato de fracción de la nubosidad (N) predominante en el tiempo comprendido entre el período previo de cálculo y el actual (t_2-t_1), es decir:

$$A = 2.4N - 25.5$$

La fracción de nubosidad (N) predominante en cada período horario se estimó a partir de los datos de la distribución porcentual de la precipitación en cada una de las 24 horas del día. De este modo, en las horas con mayor precipitación se estimó un valor N de 0.8 y en las horas de menor precipitación N se tomó como 0.2. Entre estos valores se interpolaron los restantes valores horarios de la nubosidad.

En cuanto a la altura de mezcla mecánica, h_{mec} , su valor depende de la velocidad de fricción (u^*).

$$h_{mec} = 1330 \cdot u^*$$

$$u^* = u_0 \left[1 + a \left(1 + b \frac{Q_0}{Q^*} \right) \right]$$

$$u_0 = k \cdot \frac{u}{\ln(z_m/z_0)}$$

Donde:

u : velocidad del viento

k: constante de Von Karman: 0.41

a : parámetro definido como: si $z_0/z_m \leq 0.01$ $a = 0.128 + 0.005 \ln(z_0/z_m)$;

si $z_0/z_m > 0.01$ $a = 0.107$

z_m : depende de la rugosidad superficial (z_0) y de la altura del instrumento que mide la velocidad del viento $z_m = z_r - 4z_0$

Donde: z_r : es la altura de la medición del viento
 z_0 : es la rugosidad superficial, cuyo valor es 1 en zonas urbanas y 0.05 para pastos

$$Q_0 = \frac{H_0}{\rho C_p} \quad y \quad Q^* = \frac{T \cdot u_0^3}{k \cdot g \cdot z_m}$$

Para las horas nocturnas, H_z está definido por el valor de h_{mec} . No obstante, en esta situación nocturna,

$$u^* = C_{DN} \cdot \frac{u}{2} \cdot (1 + C^{0.5})$$

$$C_{DN} = \frac{k}{\ln(z_m/z_0)}$$

$$C = \frac{1 - 4u_o^2}{C_{DN} \cdot u^2}$$

Donde:

C_{DN} : es un parámetro de ajuste que indica la relación entre el tipo de superficie y la altura a la que se mide el viento.

C: es un factor que refleja el efecto de la rugosidad de la superficie en la velocidad del viento en la altura de medición.

Una metodología análoga para el cálculo de la altura de mezcla en ausencia de datos de globos meteorológicos, fue desarrollada por científicos de la oficina de meteorología del Reino Unido (Farmer, 1983) en la cuál el parámetro es hallado a través de un proceso iterativo de la longitud de Monin-Obukhov (L) y de la velocidad de fricción. Más información acerca de la capa de mezcla puede también encontrarse en el reporte final COST action 715⁵¹.

Por otra parte, la estabilidad atmosférica se ha determinado con base en las relaciones existentes entre la estabilidad, la radiación solar y la velocidad del viento, definidas por Pasquill y Gifford según se presenta en la Tabla 33 y Tabla 34.

Tabla 33. Categorías de estabilidad para períodos diurnos, condiciones convectivas

Vel. Viento (m/s)	Radiación Solar Global (W/m ²)					
	> 700	540 - 700	400 - 540	270 - 400	140 - 270	< 140
< 2	A	A	B	B	C	D
2 - 3	A	B	B	B	C	D
3 - 4	B	B	B	C	C	D
4 - 5	B	B	C	C	D	D
5 - 6	C	C	C	C	D	D
> 6	C	C	D	D	D	D

⁵¹ Meteorology applied to urban air pollution problems, B. Fisher, S. Joffre, J. Kukkonen, et al., 2005.

Tabla 34. Categorías de estabilidad para períodos nocturnos, condiciones estables

Vel. Viento (m/s)	Radiación Solar Neta (W/m ²)		
	> - 20	- 20 a - 40	< - 40
< 2	D	F	F
2 - 3	D	E	F
3 - 5	D	D	E
5 - 6	D	D	D
> 6	D	D	D

A: Condiciones muy inestables
 B: Condiciones moderadamente inestables
 C: Condiciones ligeramente inestables
 D: Condiciones neutras
 E: Condiciones ligeramente estables
 F: Condiciones moderadamente estables

En el caso de la estabilidad para condiciones nocturnas, es necesario estimar la radiación neta, lo cual se realiza a través de la siguiente ecuación, válida para períodos diurnos o nocturnos:

$$R_n = \frac{(1 - \alpha) \cdot R_g + (C_1 \cdot T^8) + C_2 \cdot N - \sigma \cdot T^4}{1 + C_3}$$

Donde:

R_g: radiación solar global (inexistente en la noche)

T: es la temperatura absoluta (° K)

N: es la fracción de nubosidad, estimada de acuerdo con los elementos antes detallados.

C₁ = 5.31*10⁻¹³

C₂ = 60

C₃ = 0.12

σ = 5.67*10⁻⁸ (constante de Stefan Boltzman).

Otra forma alterna de calcular la estabilidad atmosférica, con resultados equivalentes a las dos tablas anteriores es mediante el nomograma de Pasquill mostrado en la Figura 52.

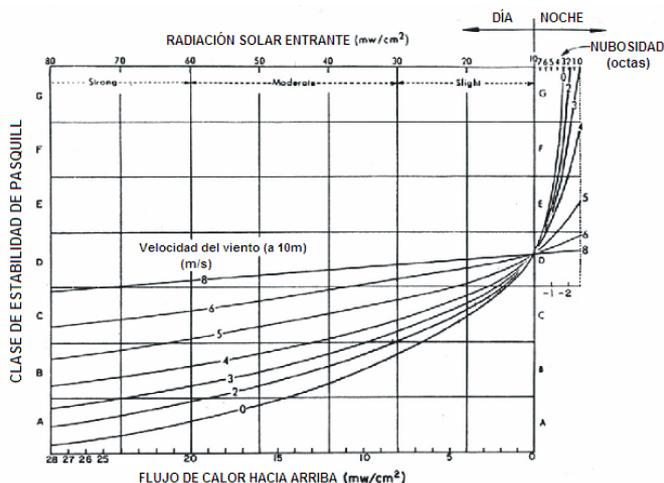


Figura 52. Nomograma para cálculo de estabilidad atmosférica según Pasquill⁵²

2.3.2 Resumen analítico de las condiciones micrometeorológicas del año.

Una forma sugerida para presentar los resultados de los cálculos realizados para altura de mezcla y estabilidad atmosférica de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente es a través de tablas y gráficas como se muestra a continuación (ver Tabla 35 y Figura 53)

Tabla 35. Presentación de resultados obtenidos para altura de mezcla y estabilidad atmosférica

ESTIMACIÓN ALTURA DE MEZCLA (h_{mix}) Y ESTABILIDAD ATOMOSFÉRICA															
VALORES PROMEDIOS HORARIOS - PERÍODO 2002															
Datos obtenidos con base en la información recolectada de las estaciones de la red meteorológica															
HORAS DIURNAS															
$H_z = MAX(h_{mec}, h_{conv})$															
$h_{mec} = 1330 \cdot u$					$h_{conv} = [h_{conv-i}^2 + (2.4 H_0 / \rho C_p \gamma)(t_2 - t_1)]^{0.5}$										
$u^* = u_0 [1 + a(1 + (b Q_0 / Q^*))]$															
$u_0 = k \cdot \frac{u}{\ln(z_m / z_0)}$					$Q_0 = H_0 / \rho C_p$					$H_0 = 0.3R_g + A$					
$z_m = z_r - 4z_0$					$Q^* = (T \cdot u_0^3) / (k \cdot g \cdot z_m)$					$A = 2.4N - 25.5$					
HLC	u	t	z ₀	z _m	u ₀	N	R _g	H ₀	O ₀	Q*	u*	h _{mec}	h _{conv}	H _z (m)	ESTABILIDAD
7	0.71	21.48	1	6	0.16	0.2	222.5	41.72	0.047	0.05	0.44	582	353	582	C
8	0.87	23.18	1	6	0.20	0.2	439.2	106.74	0.120	0.10	0.65	870	576	870	B
9	0.94	24.92	1	6	0.22	0.2	645.6	168.66	0.191	0.12	0.83	1098	813	1098	A
10	1.17	26.08	1	6	0.27	0.2	753.9	201.15	0.228	0.24	0.75	995	1028	1028	A
11	1.70	26.55	1	6	0.39	0.2	744.1	198.22	0.226	0.73	0.64	854	1203	1203	A
12	2.10	26.61	1	6	0.48	0.2	692.2	182.63	0.208	1.38	0.66	878	1344	1344	B
13	2.20	26.46	1	6	0.50	0.2	592.2	152.65	0.174	1.59	0.65	871	1451	1451	B
14	2.15	26.25	1	6	0.49	0.2	481.8	119.53	0.136	1.47	0.62	830	1530	1530	B
15	2.03	25.86	1	6	0.47	0.3	330.3	74.314	0.084	1.25	0.57	759	1577	1577	B
16	1.78	25.27	1	6	0.41	0.4	165.6	25.139	0.028	0.84	0.48	633	1592	1592	C
17	1.39	24.34	1	6	0.32	0.4	42.30	-11.86	-0.01	0.40	0.33	443	1315	1315	D

⁵² CALINE 4. User`s Manual

Continuación tabla (para horas nocturnas)

HORAS NOCTURNAS															
$h_{mix} = h_{mec}$															
$u^* = CDN \cdot (u/2) \cdot (1 + C^{0.5})$										$u_0^2 = (I \cdot z_m) / (k \cdot A)$					
$C_{DN} = \frac{k}{\ln(z_m/z_0)}$										$C = (1 - 4u_0^2) / C_{DN} \cdot u^2$					
$I = 4.7$					$k = 0.41$					$A = 1100$					
$R_n = \frac{(1 - \alpha) \cdot R_g + (5.31 \times 10^{-13} \cdot T^8) + 60 \cdot N - 5.67 \times 10^{-8} \cdot T^4}{1 + 0.12}$															
HLC	u	N	t	T	z ₀	z _m	R _n	Ln(z _m /z ₀)	C _{DN}	u ₀ ²	C	u [*]	h _{mec}	H _z (m)	ESTABILIDAD
18	1.00	0.4	23.38	296	1	6	-47.85	1.7918	0.229	0.06	12	0.51	680	680	F
19	0.82	0.3	22.74	296	1	6	-53.99	1.7918	0.229	0.06	12	0.42	555	555	F
20	0.71	0.3	22.28	295	1	6	-54.54	1.7918	0.229	0.06	12	0.36	479	479	F
21	0.63	0.2	21.90	295	1	6	-60.33	1.7918	0.229	0.06	12	0.32	430	430	F
22	0.61	0.4	21.58	295	1	6	-49.98	1.7918	0.229	0.06	12	0.31	411	411	F
23	0.59	0.5	21.24	294	1	6	-45.00	1.7918	0.229	0.06	12	0.30	398	398	F
0	0.56	0.6	20.97	294	1	6	-39.95	1.7918	0.229	0.06	12	0.29	380	380	F
1	0.55	0.8	20.70	294	1	6	-29.53	1.7918	0.229	0.06	9	0.25	336	336	F
2	0.54	0.8	20.45	293	1	6	-29.80	1.7918	0.229	0.06	6	0.21	283	283	F
3	0.54	0.7	20.24	293	1	6	-35.38	1.7918	0.229	0.06	2	0.15	200	200	F
4	0.53	0.6	20.05	293	1	6	-40.94	1.7918	0.229	0.06	2	0.15	195	195	F
5	0.54	0.6	19.89	293	1	6	-41.11	1.7918	0.229	0.06	2	0.15	198	198	F
6	0.57	0.3	20.12	293	1	6	-56.94	1.7918	0.229	0.06	2	0.16	209.4	209	F

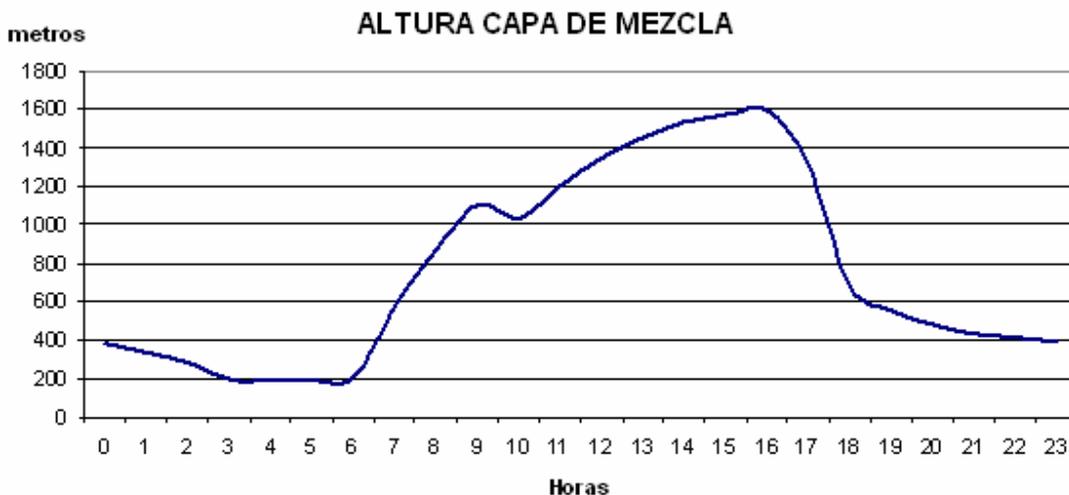


Figura 53. Ejemplo de distribución horaria de la altura de la capa de mezcla para determinada zona de estudio

9.6.6. CONTENIDO DE UN INFORME DE CAMPAÑAS DE MONITOREO

Un informe sobre una campaña de monitoreo de calidad del aire debe tener como pautas mínimas, aquellas que le den información a las entidades o entes ambientales poder tomar medidas de vigilancia, inspección y evaluación, permitiendo con ello, evaluar las acciones de los Programas de Control de la Calidad del Aire, y así orientar su gestión en prevenir, controlar y/o mejorar las condiciones prevalecientes en cada una de ellas, o en su caso rediseñar los instrumentos de política. Adicionalmente, es importante que los informes de campañas de monitoreo permitan comparar los resultados entre campañas, bien sea en un mismo punto, a través del tiempo, o en diferentes puntos en un mismo lapso de tiempo.

Estos informes deben contener como pautas mínimas las indicadas a continuación.

1. Fecha y hora de inicio y finalización de la medición. Para el caso de la hora de inicio, de acuerdo a lo establecido en los métodos de calidad de aire establecidos en el protocolo.
2. Responsable del informe. Razón Social o Nombre del responsable, Cedula o NIT, número de identificación, entre otros.
3. Mencionar como se encuentra en el proceso de acreditación ante el IDEAM.
4. Objetivos y Alcances.
5. Localización de la medición (Georeferenciada y con registro fotográfico)
6. Propósito de la medición.
7. Análisis de la Normatividad Vigente e información previa.
8. Tipo de instrumentación utilizada.
9. Equipo de medición utilizada, incluyendo números de serie.
10. Datos de calibración, ajuste del instrumento de medida y fecha de vencimiento del certificado de calibración del Equipo.
11. Procedimiento de medición utilizada para cada contaminante.
 - 11.1. Material Particulado (PM_{10}).
 - 11.2. Partículas Suspendidas Totales (PST).
 - 11.3. Dióxido de Azufre (SO_2)
 - 11.4. Óxidos de Nitrógeno (O_3)
 - 11.5. Monóxido de Carbono (CO)
 - 11.6. Otros Contaminantes
12. Descripción de las fuentes de emisión en campo: Identificación de las fuentes de emisión y el estado en el que se encuentran en el momento de hacer las mediciones.
13. Condiciones atmosféricas (dirección y velocidad del viento, lluvia, temperatura, presión atmosférica, humedad).
14. Resultados numéricos y comparación con la normatividad aplicada.
15. Descripción de los tiempos de medición.
16. Descripción de los contaminantes a medir.
17. Análisis de los Resultados
 - 17.1. Material Particulado (PM_{10}).
 - 17.2. Partículas Suspendidas Totales (PST).
 - 17.3. Dióxido de Azufre (SO_2)
 - 17.4. Óxidos de Nitrógeno (O_3)
 - 17.5. Monóxido de Carbono (CO)
 - 17.6. Otros Contaminantes
18. Conclusiones y recomendaciones.
19. Bibliografía
20. Copia de los certificados de calibración de los equipos.

9.6.7. CONTENIDO DE UN PLAN DE CALIDAD

Un Plan de Calidad es aquel documento donde se detallan todas y cada una de las actividades relacionadas con la vigilancia, control y medición de los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos. La redacción, elaboración y aprobación del Plan de Calidad debe ser ejecutada antes de iniciar la operación de cualquier Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).

El contenido que debe ser incluido dentro de todo Plan de Calidad es:

1. Generalidades: Esta sección está relacionada con la descripción de los principales objetivos del documento que se presenta (es decir, cuáles son los objetivos de tener un plan de calidad); debe incluir una sección de control del manual y registro donde se deben registrar desde la fecha de elaboración, como las posteriores fechas de modificaciones al documento en caso que se presenten y finalmente debe incluir una breve descripción del SVCA que representa (Cantidad de estaciones, tipo de tecnología, ubicación específica y detallada de las mismas, objetivos de los monitoreos del SVCA, etc.).
2. Estructura y Responsabilidad: Capítulo dedicado a definir el organigrama del programa de monitoreo y seguimiento de calidad del aire, al cual obedece la creación del respectivo SVCA; en esta sección se deberán incluir los cargos y las responsabilidades de todas las personas que participen en la ejecución del proyecto.
3. Objetivos de Aseguramiento de Calidad: Presentación de los objetivos del SVCA, los objetivos de calidad y los objetivos de control de calidad en términos de precisión, exactitud e interidad.
4. Procedimientos de Muestreo: Descripción detallada de los métodos y procedimientos de muestreo que se emplearán en la operación del SVCA.
5. Cadena de Custodia: Descripción detallada de los procedimientos de empaque, marcado y transporte de las muestras y/o reportes de los equipos.
6. Procedimientos de Revisión y Calibración: Descripción para la realización de los procesos de calibración de los equipos.
7. Análisis de Datos, Validación y Reporte: Descripción detallada de los procesos a realizar por el coordinador del SVCA, relacionado con los análisis, validación y elaboración de informes.
8. Control de Calidad Interno: Definición de los procedimientos para el control de calidad como por ejemplo el chequeo de calidad en el pesaje y otras actividades relacionadas con el monitoreo de la calidad del aire.
9. Auditorías de Desempeño del Sistema: Definir como se deben desarrollar las posibles auditorías al SVCA durante su operación (evaluación del cumplimiento de objetivos, evaluación de la capacidad del personal que opera el SVCA, evaluación de operación interna y evaluación de desempeño).
10. Mantenimiento Preventivo: Definición de las acciones para los mantenimientos preventivos de todos y cada uno de los equipos que hacen parte del SVCA.
11. Reportes de Aseguramiento de Calidad: Definir el tipo y contenido de los informes que serán presentados a la dirección del SVCA, en el momento de realizarse algún tipo de auditoría.

10. BIBLIOGRAFÍA

U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1. Ambient Air Quality Monitoring Program Quality System Development. EPA-454/R-98-004. Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711. August 1998.

Central Pollution Control Board & ASEM – GTZ. Conceptual Guidelines and Common Methodology for Air Quality Monitoring, Emission Inventory & Source Apportionment Studies for Indian Cities. Parivesh Bhawan, East Arjun Nagar, Delhi - 110 032. Draft, 2006.

Universidad de Chile y Fundación Centro Nacional del Medio Ambiente. Elaboración de Reglamentos y Protocolos de Procedimientos para el Aseguramiento de la Calidad del Monitoreo de Contaminantes Atmosféricos. Informe final, informe técnico LMA-030-2003 preparado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. Santiago, Chile. Diciembre 2003.

Ministry for the Environment. Good-Practice Guide for Air Quality Monitoring and Data Management. Prepared and published by the Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand, PO Box 10 362. December 2000.

Dirección General de Salud Ambiental - DIGESA, Ministerio de Salud del Perú. Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos. Perú. 2005.

U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume I, Principles. EPA-600/9-76-005. Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711. 1976.

U.S. Environmental Protection Agency. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II, Ambient Air Specific Methods. EPA-600/4-77-027a. Office of Air Quality, Planning and Standards, Research Triangle Park, NC 27711. 1977.

U.S. Environmental Protection Agency. A Procedure for Establishing Traceability of Gas Mixtures to Certain National Bureau of Standards Standard Reference Materials. EPA-600/7-81-010. Environmental Monitoring Systems Laboratory (MD-77), Research Triangle Park, NC 27711, January 1981.

DASQUPTA, P. K. and DECESARE, K. B. Stability of Sulfur Dioxide in Formaldehyde and Its Anomalous Behavior in Tetrachloromercurate (II). Submitted for publication in *Atmospheric Environment*, 1982.

WEST, P. W. and GAEKE, G. C. Fixation of Sulfur Dioxide as Disulfatomercurate (II) and Subsequent Colorimetric Estimation. *Anal. Chem.*, 28:1816, 1956.

EPHRAIM, F. Inorganic Chemistry. P. C. L. Thorne and E.R. Roberts, Eds., 5th Edition, Interscience, 1948, p. 562.

LYLES, G. R.; DOWLING, F. B. and BLANCHARD, V. J. Quantitative Determination of Formaldehyde in the Parts per Hundred Million Concentration Level. *J. Air. Poll. Cont. Assoc.*, Vol. 15(106), 1965.

McKEE, H. C.; CHILDERS, R. E. and SAENZ, O. Jr. Collaborative Study of Reference Method for Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosanilina Method). EPA-APTD-0903, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, September 1971.

URONE, P.; EVANS, J. B. and NOYES, C. M. Tracer Techniques in Sulfur–Air Pollution Studies Apparatus and Studies of Sulfur Dioxide Colorimetric and Conductometric Methods. *Anal. Chem.*, 37: 1104, 1965.

BOSTROM, C. E. The Absorption of Sulfur Dioxide at Low Concentrations (pphm) Studied by an Isotopic Tracer Method. *Intern. J. Air Water Poll.*, 9:333, 1965.

SCARINGELLI, F. P.; SALTZMAN, B. E. and FREY, S. A. Spectrophotometric Determination of Atmospheric Sulfur Dioxide. *Anal. Chem.*, 39: 1709, 1967.

PATE, J. B.; AMMONS, B. E.; SWANSON, G. A. and LODGE, J.P. Jr. Nitrite Interference in Spectrophotometric Determination of Atmospheric Sulfur Dioxide. *Anal. Chem.*, 37:942, 1965.

ZURLO, N. and GRIFFINI, A. M. Measurement of the Sulfur Dioxide Content of the Air in the Presence of Oxides of Nitrogen and Heavy Metals. *Medicina Lavoro*, 53:330, 1962.

REHME, K. A. and SCARINGELLI, F. P. Effect of Ammonia on the Spectrophotometric Determination of Atmospheric Concentrations of Sulfur Dioxide. *Anal. Chem.*, 47:2474, 1975.

McCOY, R. A.; CAMANN, D. E. and McKEE, H. C. Collaborative Study of Reference Method for Determination of Sulfur Dioxide in the Atmosphere (Pararosanilina Method) (24-Hour Sampling). EPA-650/4-74-027, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, December 1973.

FUERST, R. G. Improved Temperature Stability of Sulfur Dioxide Samples Collected by the Federal Reference Method. EPA-600/4-78-018, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, April 1978.

SCARINGELLI, F. P.; ELFERS, L.; NORRIS, D. and HOCHHEISER, S. Enhanced Stability of Sulfur Dioxide in Solution. *Anal. Chem.*, 42:1818, 1970.

MARTIN, B. E. Sulfur Dioxide Bubbler Temperature Study. EPA-600/4-77-040, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, August 1977.

American Society for Testing and Materials. ASTM Standards, Water; Atmospheric Analysis. Part 23. Philadelphia, PA, October 1968, p. 226.

O'KEEFFE, A. E. and ORTMAN, G. C. Primary Standards for Trace Gas Analysis. *Anal. Chem.*, 38:760, 1966.

SCARINGELLI, F. P.; FREY, S. A. and SALTZMAN, B. E. Evaluation of Teflon Permeation Tubes for Use with Sulfur Dioxide. *Amer. Ind. Hygiene Assoc. J.*, 28:260, 1967.



SCARINGELLI, F. P.; O'KEEFFE, A. E.; ROSENBERG, E. and BELL, J. P. Preparation of Known Concentrations of Gases and Vapors With Permeation Devices Calibrated Gravimetrically. *Anal. Chem.*, 42:871, 1970.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM. Variables del Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) y procedimientos para validar la información generada por las redes de calidad del aire. 2006.

MONTGOMERY, Douglas. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Segunda edición; México: Limusa Wiley. 2004.

MONTGOMERY, Douglas. *Control Estadístico de la Calidad*. Tercera edición; México: Limusa Wiley. 2006.

DAMA. Informe de técnicas y estrategias de monitoreo utilizadas por el DAMA en sus estaciones de monitoreo ambiental.

Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II—Ambient Air Specific Methods, EPA-600/4-77-027a, U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Research Triangle Park, NC 27711, 1977.

A procedure for Establishing Traceability of Gas Mixtures to Certain National Bureau of Standards Standard Reference Materials. EPA-600/7-81-010, U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory (MD-77), Research Triangle Park, NC 27711, January 1981.



INTERNET

Diccionario Estadístico del Data Mining Institute, S.L. Madrid, España; [on line]:
<http://www.estadistico.com/dic.html>

Tutorial relacionado con la ley de Lambert - Beer. [on line]:
<http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/molspec/beers1.htm>

Equipos y sistemas de evaluación continua de contaminantes atmosféricos. [on line]:
http://www.personal.us.es/jmorillo/medicion5/evaluacion_continua_resumen.pdf

11. ANEXO 1. PROCEDIMIENTOS DE DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

A continuación se desarrollan los procedimientos específicos de muestreo para diferentes tecnologías. Estos deberán ser el estándar nacional para el desarrollo de actividades específicas pero no implica que no se puedan usar otras tecnologías no desarrolladas a continuación de las validas para Colombia establecidas en el manual de diseño.

11.1. EQUIPOS MUESTREADORES DE MATERIAL PARTICULADO

11.1.1. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO MENOR A 10 μM (PM_{10}) EN LA ATMÓSFERA - MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN (HI-VOL)⁵³

11.1.1.1. Aplicabilidad

El método PM_{10} provee una medida de concentración máscica de material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 μm nominales (PM_{10}) en el aire ambiente durante un periodo de 24 h. El proceso de medición es no destructivo y la muestra de PM_{10} está sujeta a posterior análisis físico o químico. En la Figura 54 se presenta un muestreador PM_{10} .

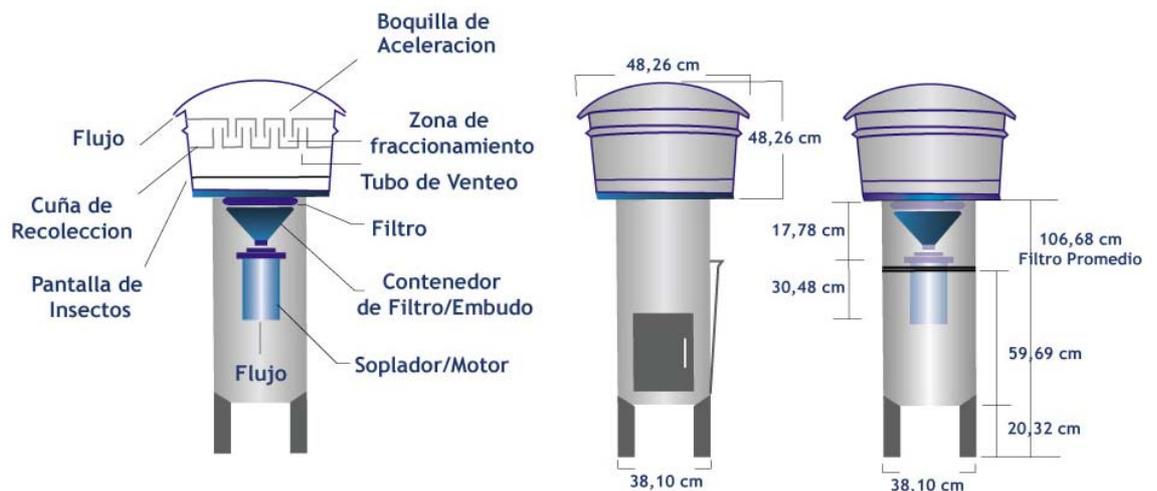


Figura 54. Muestreador de PM_{10}

Fuente: Protocolo para la vigilancia y seguimiento del modulo aire del sistema de información ambiental - IDEAM.

⁵³ Environmental Protection Agency. Reference Method for the Determination of Particulate Matter as PM_{10} in the Atmosphere. Code of Federal Regulations. Appendix J to Part 50, 1997

11.1.1.2. Principio

Un muestreador de aire arrastra aire ambiente a una velocidad de flujo constante hacia una entrada de forma especial donde el material particulado se separa por inercia en uno o más fracciones dentro del intervalo de tamaño de PM_{10} . Cada fracción dentro del intervalo de tamaño de PM_{10} se recolecta en un filtro separado en un periodo de muestreo específico.

Cada filtro se pesa (después de equilibrar la humedad), antes y después de usarlo para determinar el peso neto (masa) ganado debido al PM_{10} colectado. El volumen total de aire muestreado, corregido a las condiciones de referencia (25 °C, 101.3 kPa), se determina a partir de la velocidad de flujo medida y el tiempo de muestreo. La concentración másica de PM_{10} en el aire ambiente se calcula como la masa total de partículas recolectadas en el intervalo de tamaño de PM_{10} dividido por el volumen de aire muestreado y se expresa en microgramos por metro cúbico estándar $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \text{ std})$. Para muestras de PM_{10} recolectadas a temperaturas y presiones significativamente diferentes de las condiciones de referencia, las concentraciones corregidas algunas veces difieren sustancialmente de las concentraciones reales (en $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ real}$), particularmente a grandes elevaciones. Aunque no es requerido, la concentración real de PM_{10} puede calcularse a partir de la concentración corregida, usando la temperatura ambiente y la presión barométrica promedio durante el periodo de muestreo.

11.1.1.3. Intervalo

El límite inferior del intervalo de la concentración másica se determina por la repetibilidad de los pesajes de tara del filtro, suponiendo el volumen nominal de muestra de aire para el muestreador. Para muestreadores que tienen un mecanismo automático para cambio de filtros, puede no haber un límite superior. Para muestreadores que no tienen este mecanismo automático, el límite superior se determina por la carga másica del filtro más allá de la cual el muestreador no mantiene por mucho tiempo la velocidad de flujo de operación dentro de los límites especificados, debido al incremento de la caída de presión a través del filtro cargado. Este límite superior no puede especificarse en forma precisa ya que es una función compleja del tipo y la distribución del tamaño de partícula en el ambiente, la humedad, el tipo de filtro y otros factores. Sin embargo, todos los muestreadores deberían ser capaces de medir concentraciones másicas de PM_{10} durante 24 h de al menos $300 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ std}$, mientras se mantenga la velocidad de flujo de operación dentro de los límites especificados.

11.1.1.4. Precisión

La precisión de los muestreadores de PM_{10} debe ser de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentraciones de PM_{10} por debajo de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 7% para concentraciones por encima de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

11.1.1.5. Exactitud

Debido a que el tamaño de las partículas que constituyen el material particulado del ambiente varía en un amplio rango y la concentración de partículas varía con el tamaño de partícula, es difícil definir la exactitud absoluta de los muestreadores de PM_{10} . La especificación para la efectividad del muestreo de PM_{10} requiere que la concentración de masa esperada calculada para un posible muestreador de PM_{10} , cuando se muestree una distribución de tamaño de partícula específica, esté entre $\pm 10\%$ de la calculada para un muestreador ideal cuya efectividad de

muestreo esté especificada. Además, el tamaño de partícula para una efectividad de muestreo del 50% debe ser $10 \pm 0,5 \mu\text{m}$. Otras especificaciones relacionadas con la exactitud se aplican a la medición y calibración de flujo, medio filtrante, procedimientos analíticos (pesaje) e interferencias.

11.1.1.6. Fuentes potenciales de error

Partículas volátiles: Las partículas volátiles recolectadas en los filtros a menudo se pierden durante el envío y/o el almacenamiento de los filtros en forma previa al pesaje posterior al muestreo. Aunque el envío y almacenamiento son algunas veces inevitables, los filtros deberían ser re-pesados tan pronto sea posible, para minimizar las pérdidas.

Interferencias: Los errores positivos en las mediciones de concentración de PM_{10} pueden resultar por la retención de especies gaseosas en los filtros. Tales errores incluyen la retención de dióxido de azufre y ácido nítrico. La retención de dióxido de azufre en los filtros, seguida por la oxidación a sulfato, referida como una interferencia por formación de sulfato, es un fenómeno que se incrementa con la alcalinidad del filtro. Poca o ninguna interferencia por formación de sulfato debería ocurrir si se usan filtros que reúnan la especificación de alcalinidad del numeral 11.1.1.7 en la sección en la que se habla de las propiedades de los medios filtrantes. La interferencia por formación de nitrato, resulta inicialmente por la retención de ácido nítrico y ocurre por los grados de variación de los diferentes tipos de filtro, incluyendo fibra de vidrio, éster de celulosa, y muchos filtros de fibra de cuarzo. Puede haber pérdidas reales de nitrato particulado en la atmósfera durante o después del muestreo, debido a la disociación o reacción química. Este fenómeno se ha observado en filtros de teflón y se ha inferido para filtros de fibra de cuarzo. La magnitud de los errores por formación de nitrato en la medición de la concentración másica de PM_{10} varía con la localización y la temperatura ambiente; sin embargo, para la mayoría de sitios de muestreo, se espera que estos errores sean pequeños.

Humedad: Los efectos de la humedad del ambiente sobre la muestra son inevitables. El procedimiento para equilibrar el filtro descrito en el numeral 11.1.4.3 del presente documento está diseñado para minimizar los efectos de la humedad sobre el medio filtrante.

Manejo del filtro: Es necesario el manejo cuidadoso de los filtros entre los pesajes del premuestreo y el postmuestreo, para evitar errores debido a daño de los filtros o pérdidas de partículas recolectadas en los filtros. El uso de un cartucho o casete para filtros puede reducir la magnitud de estos errores. Los filtros también deben reunir las especificaciones de integridad dadas en el numeral 11.1.4.2 de este mismo documento.

Variación de la velocidad de flujo: Las variaciones en la velocidad de flujo de operación del muestreador pueden alterar las características de discriminación del tamaño de partícula a la entrada del muestreador. La magnitud de este error dependerá de la sensibilidad de la entrada a las variaciones en la velocidad de flujo y a la distribución de partículas en la atmósfera durante el periodo de muestreo. Se requiere el uso de un mecanismo de control de flujo (véase numeral 11.7.1.3), para minimizar este error.

Determinación del volumen de aire: Pueden resultar errores en la determinación del volumen de aire por errores en las mediciones de velocidad de flujo y tiempo de muestreo. El mecanismo de control de flujo sirve para minimizar errores en la determinación de la velocidad de flujo y se requiere un medidor de tiempo transcurrido para minimizar el error en la medición del tiempo de muestreo.

11.1.1.7. Equipos y suministros

Muestreador de PM₁₀

El muestreador debe estar diseñado para:

- Arrastrar la muestra de aire hacia la entrada del muestreador y a través del filtro de recolección de partículas a una velocidad de fase uniforme.
- Mantener y sellar el filtro en una posición horizontal tal que la muestra de aire sea arrastrada en forma descendente a través del filtro.
- Permitir que el filtro se instale y remueva convenientemente.
- Proteger el filtro y el muestreador de las precipitaciones y prevenir que insectos y otros desechos sean muestreados.
- Minimizar las fugas de aire que puedan causar error en la medición del volumen de aire que pasa a través del filtro.
- Descargar el aire de salida a una distancia suficiente de la entrada del muestreador para minimizar el muestreo del aire de salida.
- Minimizar la recolección de polvo de la superficie de soporte.

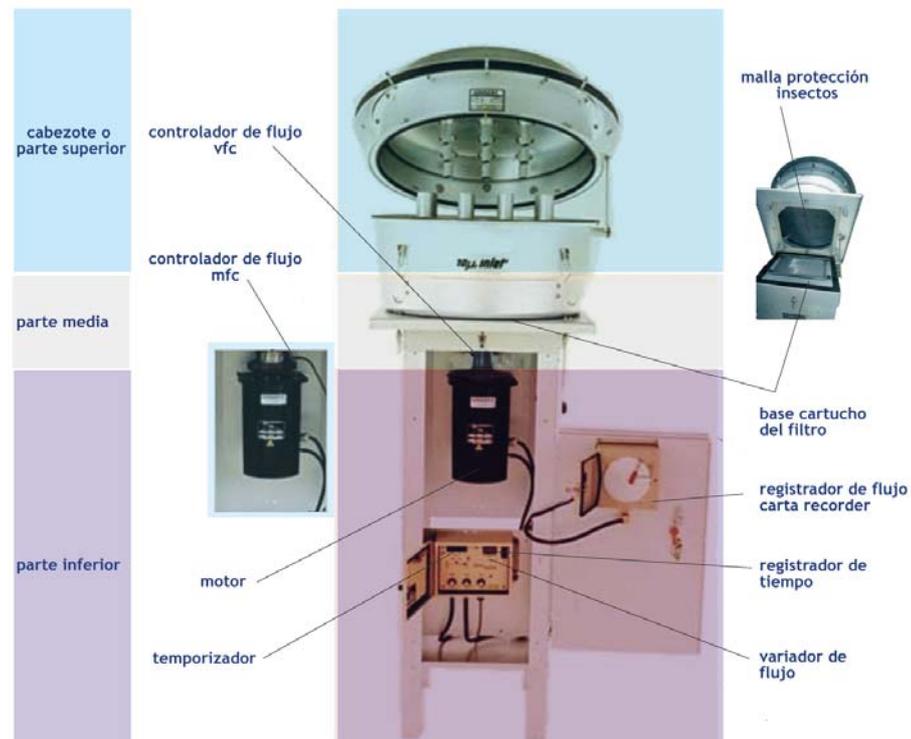


Figura 55. Partes y componentes de un muestreador de PM₁₀ real

Además, el muestreador de PM₁₀ (ver Figura 55), debe tener un sistema de entrada de aire que cuando se opere dentro del intervalo de velocidad de flujo especificado, provea las características de discriminación de tamaño de partícula reuniendo todas las especificaciones de desempeño esperadas. La entrada del muestreador no debe mostrar una dependencia significativa de la dirección del viento. Este último requerimiento puede satisfacerse generalmente con una entrada de forma circularmente simétrica alrededor de un eje vertical.

Debe tener un mecanismo de control de flujo capaz de mantener la velocidad de flujo de operación dentro de los límites especificados para la entrada del muestreador sobre las variaciones normales en el voltaje de línea y la caída de presión del filtro. Otro aspecto importante con el que debe contar este tipo de equipos es el sistema para medir la velocidad de flujo total durante el período de muestreo; para esto se recomiendan los registradores de flujo continuo aunque no son indispensables, finalmente hay que destacar que la exactitud de la medida de flujo debe ser igual a $\pm 2\%$.

Se debe usar un dispositivo para controlar el tiempo capaz de iniciar y detener el muestreador, a fin de obtener un periodo de recolección de muestras de 24 ± 1 h (1440 ± 60 min). Para medir el tiempo transcurrido de muestreo, se debe usar un cronómetro con exactitud de ± 15 minutos. Este dispositivo es opcional para muestreadores con registradores de flujo continuo si la medición del tiempo de muestreo obtenida por medio del registrador cumple la especificación de exactitud de ± 15 minutos. Finalmente y como cualquier otro equipo que se encuentre dentro del inventario de un SVCA, debe existir un manual de operación que incluya instrucciones detalladas para la calibración, operación y mantenimiento del muestreador.

- Medio filtrante: Comercialmente no se dispone de un medio filtrante ideal en todos los aspectos para todos los muestreadores. Los objetivos del muestreo determinan la importancia relativa de varias características del filtro (por ejemplo, costo, facilidad de manejo, características físicas y químicas, etc.) y, por consiguiente, la selección entre los filtros aceptables. Además, ciertos tipos de filtros pueden no ser adecuados para usarse con algunos muestreadores, particularmente bajo condiciones de carga pesada (altas concentraciones de masa), porque el incremento alto o rápido de la resistencia de flujo del filtro podría exceder la capacidad del mecanismo de control de flujo del muestreador; sin embargo, los muestreadores equipados con dispositivos automáticos de cambio de filtro permiten el uso de este tipo de filtros. Los requisitos mínimos para asegurar la aceptación del medio filtrante para medir las concentraciones máxicas de PM_{10} son los siguientes:
 - Eficiencia de recolección. Debe ser mayor o igual al 99%, medida por el método de ensayo ASTM D 2986 con partículas de $0.3 \mu m$, a la velocidad de operación del muestreador.
 - Integridad. $\pm 5 \mu g/m^3$ (asumiendo el volumen nominal de una muestra de aire de 24 horas en el muestreador). La integridad es medida como la concentración de PM_{10} equivalente correspondiente a la diferencia promedio entre los pesos inicial y final de una muestra aleatoria de filtros de prueba que se pesan y manejan bajo condiciones de muestreo reales o simuladas, pero sin que una muestra de aire pase a través de ellos (por ejemplo, blancos de filtro). Como mínimo, el procedimiento de ensayo debe incluir equilibrio y pesaje iniciales, instalación en un muestreador inhabilitado, remoción desde el muestreador y equilibrio y pesaje finales.
 - Alcalinidad. Debe ser $< 25 \mu eq/g$ de filtro, después de un almacenamiento mínimo de dos meses en un ambiente limpio (libre de contaminación por gases ácidos) a temperatura y humedad de la habitación.
 - Estándar de transferencia de la velocidad de flujo. El estándar de transferencia de la velocidad de flujo debe ser adecuado para la velocidad de flujo de operación del muestreador y debe calibrarse contra un estándar primario de flujo o volumen que sea trazable a estándares nacionales o internacionales. El estándar de transferencia de la velocidad de flujo debe ser capaz de medir la velocidad de flujo de operación del muestreador con una exactitud de $\pm 2\%$.
 - Ambiente de acondicionamiento para el filtro
 - Intervalo de temperatura: 15 a $30^\circ C$.
 - Control de temperatura: $\pm 3^\circ C$.

- Intervalo de humedad: 20 a 45% de humedad relativa.
 - Control de humedad: $\pm 5\%$ de humedad relativa.
- Balanza analítica. La balanza analítica debe ser adecuada para pesar los filtros del tipo y tamaño requeridos por el muestreador. El intervalo y sensibilidad requeridos dependerán de los pesos tara del filtro y de las cargas másicas. Normalmente se requiere una balanza analítica con una sensibilidad de 0.1 mg para muestreadores de alto volumen (velocidades de flujo $> 0.5 \text{ m}^3/\text{min}$). Para muestreadores de bajo volumen (velocidades de flujo $< 0.5 \text{ m}^3/\text{min}$) se requieren balanzas de mayor sensibilidad.

11.1.1.8. Calibración del equipo para PM_{10}

Con el fin de garantizar que el muestreo de las partículas respirables sea representativo, se requiere que el equipo muestreador trabaje siempre bajo unas mismas condiciones, para lo cual es necesario antes realizar un proceso de calibración del equipo.

El equipo muestreador de alto volumen PM_{10} de flujo constante, está provisto de un dispositivo de control de flujo, cuya acción sobre el circuito eléctrico conectado al motor regula su velocidad y por lo tanto su capacidad de succión. La calibración se fundamenta en la posición del dispositivo de control de flujo que permita una aspiración de aire en el rango de 1.02 a 1.24 m^3/min a condiciones actuales o reales. Un caudal de 1.13 m^3/min garantiza la separación de partículas menores de 10 micrómetros. Por lo tanto la calibración del equipo consiste básicamente en una verificación de flujo.

El equipo debe ser calibrado en los siguientes casos o eventos:

- Una vez sea instalado y también cuando se cambia el sitio de muestreo.
- Después de cambio de motor o de cambio de escobillas.
- Periódicamente, por lo menos cada tres meses.
- Después de 360 horas de monitoreo.
- Si los resultados de un chequeo de flujo en campo exceden los límites del control de calidad ($\pm 10\%$ de la tasa de flujo indicada para el muestreador)
- Cuando un chequeo de flujo en campo o una auditoría de desempeño indique que el muestreador está fuera del rango de flujo aceptable (ej. 1.02 a 1.24 m^3/min) para la entrada.

La calibración del equipo se realiza con un kit de calibración, el cual puede ser un juego de platos o un sistema con resistencia de flujo variable. El juego de platos consiste en un tubo metálico y cinco platos intercambiables, con diferentes números de orificios que permiten varios flujos. El sistema de resistencia de flujo variable es un tubo metálico con un par de discos que permiten obtener varias aberturas al girar uno de los discos. Cada uno de estos kits de calibración posee su ecuación de calibración con su respectiva curva, la cual se obtiene a través de un patrón primario o medidor de volumen estándar de desplazamiento positivo, Rootsmeter.

La calibración del equipo depende del tipo, si es volumétrico o másico. Los procedimientos de calibración y los respectivos formatos de acuerdo al Quality Assurance Handbook Vol II, Part II pueden ser implementados cabalmente en hojas de cálculo donde se desarrollan estos procedimientos en campo. A continuación se muestran dichos procedimientos:

Procedimiento de calibración para equipos PM₁₀ con controlador de flujo másico (MFC)

Precauciones

- La calibración puede ser afectada por las fluctuaciones de voltaje.
- No se debe realizar la calibración bajo condiciones de altas velocidades de viento, ya que éstas pueden provocar fluctuaciones de presión en los manómetros.
- No deben realizarse estas operaciones en condiciones de mal tiempo (lluvia, tormentas, neblina, nieve, etc.).

Equipos y accesorios

- Orificio transmisor de flujo normal calibrado. La relación de calibración de este orificio transmisor de flujo normal debe ser referenciada anualmente y estar dentro de un $\pm 2\%$ del estándar primario trazable al NIST. Nota: Las placas de resistencia variable suministradas con el orificio de transferencia normal puede que tengan que modificarse para la calibración de muestreadores PM₁₀. Los huecos de las placas pueden tener que ampliarse o que haya necesidad de abrir huecos adicionales para obtener tasas de flujo dentro del rango aceptable.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 400mm (0-16in) y escala mínima de 2 mm (0.1in)
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 200 mm (0-8in) y escala mínima de 2 mm (0.1in).
- Termómetro capaz de medir de una manera precisa temperaturas del aire ambiente en un rango de 0 - 50°C con exactitud de 0.1°C y trazable con una precisión de 0.1°C a un termómetro certificado por NIST.
- Barómetro capaz de medir de una manera precisa presión barométrica ambiental en un rango de 500 - 800 mmHg (66 a 106KPa) con precisión al mmHg. Debe estar referenciado a un estándar de precisión conocida dentro de ± 5 mm Hg. Para mediciones en campo, un barómetro aneroide portátil (ej. un altímetro de escalador o de ingeniero) es apropiado.

Herramientas manuales varias, hoja de cálculo y cinta aislante de 51mm

Procedimiento de calibración

- Registre en el formato de calibración el lugar de calibración, la fecha, el responsable de la calibración y la identificación de los equipos.
- Registre la temperatura ambiente promedio en la cercanía del equipo muestreador.
- Registre la presión barométrica promedio del sitio de calibración.
- Instale un filtro limpio y opere el equipo durante 5 minutos para establecer equilibrio térmico antes de la calibración.
- Apague el equipo y retire el filtro.
- Desconecte el motor del controlador de flujo y conéctelo directamente a una fuente de energía estable.
- Coloque el kit de calibración.
- Encienda nuevamente el equipo y asegúrese de que no existan fugas en el sistema. Esto se logra tapando totalmente la entrada de aire del calibrador y conectando el manómetro a la salida del motor. Si no hay caída de presión, se comprueba que no hay fugas en el equipo. Evite mantener encendido el equipo con la entrada de aire bloqueada por más de 30 segundos, ya que puede dañar el motor. Antes de realizar esta operación cerciórese que no esté conectado el manómetro diferencial al calibrador.
- Apague el equipo y conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 8 in de agua a la toma de presión del kit de calibración.
- Conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 18 in de agua a la derivación de presión que se encuentra en la parte inferior de la carcasa del motor.
- Inserte el plato número 1, encienda el equipo y déjelo operar entre 3 y 5 minutos para restablecer el equilibrio térmico.

- Lea y registre la caída de presión a través del orificio estándar de transferencia (ΔH) en in de agua, al igual que la deflexión en el manómetro del muestreador (ΔP) en in de agua (o la lectura I en la carta registradora de flujo).
- Repita los dos pasos anteriores para los diferentes platos de resistencia. En el caso de tener un calibrador del tipo de resistencia de flujo variable, se deben reemplazar los pasos anteriores para cinco posiciones, desde una máxima hasta una mínima abertura. Se requieren por lo menos cuatro ratas de flujo de calibración y por lo menos tres valores deberán estar dentro del rango aceptable de flujo (1.02 a 1.24 m³/min para muestreadores de PM₁₀).
- Apague el equipo, retire el kit de calibración y conecte nuevamente el motor al controlador de flujo.
- Calcule la rata de flujo a condiciones reales a través del calibrador para cada punto utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{orificio}) = \left[\left[\Delta H (T_a / P_a) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

Q_a (orificio) = Caudal real a través del calibrador (m³/min).

ΔH = Caída de presión a través del calibrador (mm o in de agua), si la medida se encuentra expresada en mm se debe convertir a in dividiendo por 2.54.

P_a = Presión barométrica (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio.

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio.

(m y b son a condiciones reales para el caso de PM₁₀, para PST son a condiciones estándar).

Nota: Este caudal debe estar en el rango de 1.02 a 1.24 m³/min.

- Calcule el valor de la lectura manométrica transformada (ΔP_{ext}) para cada punto utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{ext} = \left[\Delta P_{ex} (T_a + 30) / P_a \right]^{0.5}$$

Donde:

ΔP_{ext} = Lectura de presión transformada del manómetro del muestreador.

ΔP_{ex} = Lectura de presión en el manómetro del muestreador (in de agua).

P_a = Presión barométrica (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente (K).

Una adecuada aproximación al valor de la temperatura del aire a la salida del motor se obtiene adicionando 30 K al valor de la temperatura ambiente (T_a).

Si se usa un registrador de flujo continuo, calcule y registre la cantidad I_t así:

$$I_t = I \left[(T_a + 30) / P_a \right]^{0.5}$$

Donde:

I_t = Lectura transformada de la carta record.

I = Lectura de la carta record de flujo.

Nota: Si se usa un registrador de flujo con escala lineal, use $I^{1/2}$ en vez de I en la ecuación anterior.

- Construir la curva de calibración del equipo graficando el caudal a condiciones reales (Q_a (orificio)) en el eje x, contra la lectura de presión transformada del manómetro del muestreador (ΔP_{ext}) en el eje y. Calcular la pendiente, el intercepto y el coeficiente de correlación de la curva:

$$\Delta P_{ext} = m[Q_a(\text{orificio})] + b$$

El coeficiente de correlación nunca debe ser menor a 0.990 y ningún punto puede desviarse más de $\pm 0.04 \text{ m}^3/\text{min}$ del valor pronosticado por la ecuación de regresión.

- Para períodos de muestreo subsiguientes, la tasa de flujo operativa real promedio del muestreador, Q_a media se calcula con la pendiente y el intercepto de la calibración usando la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{media}) = \left(\left[\frac{\Delta P_{exm}(T_a + 30)}{P_a} \right]^{0.5} - b \right) (1/m)$$

Donde:

$Q_a(\text{media})$ = Tasa de flujo real promedio del muestreador (m^3/min).

ΔP_{exm} = Promedio de las lecturas inicial y final del manómetro del muestreador (in H_2O).

$$\Delta P_{exm} = \frac{\Delta P_i + \Delta P_f}{2} \text{ expresada en in de agua}$$

T_a = Temperatura ambiente promedio durante el período de muestreo.

P_a = Presión ambiente promedio durante el período de muestreo (mm Hg).

m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador.

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador.

En el caso de tener registradores de flujo, $Q_a(\text{media})$ se determina de la siguiente manera:

$$Q_a(\text{media}) = \left(\left[\frac{I_m(T_a + 30)}{P_a} \right]^{0.5} - b \right) (1/m)$$

Donde I_m es la lectura del registrador de flujo media para el período de muestreo. Si el registrador de flujo empleado es con escala lineal, use $I^{1/2}$ en vez de I en la ecuación anterior.

Procedimiento de ajuste del controlador de flujo (Determinación del Set Point)

- Calcule y registre en el formato de calibración el valor del Set Point del manómetro (o la lectura del registrador de flujo) utilizando la siguiente ecuación:

$$SSP = \left[\frac{P_a}{(T_a + 30)} \right] [1.13m + b]^2$$

Donde:

SSP = lectura del set point del muestreador (mm de agua).

P_a = Presión barométrica (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio.

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio.

El valor de 1.13 m³/min corresponde al valor ideal del flujo de muestreo.

Para el registrador de flujo: $SSP = (1.13m + b)[P_a / (T_a + 30)]^{1/2}$

- Verifique que el motor se encuentre conectado al controlador de flujo y que se encuentre conectado el manómetro diferencial al puerto de presión de la carcasa del motor.
- Instale un filtro limpio (en un casete de filtro) de acuerdo a las instrucciones del fabricante (si se utiliza un registrador de flujo cuantitativamente, instale una carta record limpia y verifique que el registrador esté en cero, es decir que el lapicero permanezca en el círculo más interno de la carta).
- Encienda el equipo y permita que se caliente durante 3 a 5 minutos hasta que esté a la temperatura de operación.
- Siguiendo las instrucciones del fabricante ajuste el controlador de flujo hasta que la lectura en el manómetro indique el valor calculado del SSP.
- Verifique que el controlador de flujo mantenga la rata de flujo por al menos 10 minutos. Apague el muestreador, que a partir de ahora está listo para el siguiente día de muestreo.

Procedimiento de calibración para equipos PM₁₀ con controlador de flujo volumétrico (VFC).

El procedimiento de calibración a utilizar relaciona tasas de flujo conocidas (Q_a determinadas por el orificio de transferencia normal) con la relación de presión de estancamiento y la presión barométrica (P_1/P_a). La presión de estancamiento (P_1) es la presión del aire dentro del muestreador en el área justo bajo el filtro. Los muestreadores VFC tienen un puerto de presión de estancamiento a través del cual puede medirse dicha presión. Un muestreador VFC también puede tener un orificio de salida bajo el motor similar al de los muestreadores MFC. En tal caso, la tasa de flujo del muestreador puede medirse y equilibrarse usando la presión plena del orificio de salida como se describió en el procedimiento anterior. Sin embargo, el uso de la presión de estancamiento generalmente da una indicación más precisa de la tasa de flujo del muestreador. Adicionalmente, puede conectarse un registrador de flujo continuo al puerto de presión del orificio de salida para determinar de modo no cuantitativo que la tasa de flujo fue constante e ininterrumpida durante el período de muestreo.

Precauciones

- La calibración puede ser afectada por las fluctuaciones de voltaje.
- No se debe realizar la calibración bajo condiciones de altas velocidades de viento, ya que éstas pueden provocar fluctuaciones de presión en los manómetros.
- No deben realizarse estas operaciones en condiciones de mal tiempo (lluvia, tormentas, neblina, etc.).

Equipos y accesorios

- Orificio transmisor de flujo normal calibrado. La relación de calibración de este orificio transmisor de flujo normal debe ser referenciada anualmente y estar dentro de un $\pm 2\%$ del estándar primario trazable al NIST. Nota: Las placas de resistencia variable suministradas con el orificio de transferencia normal puede que tengan que modificarse para la calibración de muestreadores PM₁₀. Los huecos de las placas pueden tener que ampliarse o que haya necesidad de abrir huecos adicionales para obtener tasas de flujo dentro del rango aceptable.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 400 mm (0 - 16 in) y escala mínima de 2 mm

- (0.1in).
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 1000 mm (0 - 36in) y escala mínima de 2 mm (0.1in) u otro mecanismo de medición de presión para medir la presión de estagnación o estancamiento del muestreador. Idealmente este manómetro debería estar asociado con el muestreador.
- Termómetro capaz de medir de una manera precisa temperaturas del aire ambiente en un rango de 0 - 50 °C con exactitud de 0.1 °C y trazable con una precisión de 0.1 °C a un termómetro certificado por NIST.
- Barómetro capaz de medir de una manera precisa presión barométrica ambiental en un rango de 500 - 800 mmHg (66 a 106 KPa) con precisión al mmHg. Debe estar referenciado a un estándar de precisión conocida dentro de ± 5 mm Hg. Para mediciones en campo, un barómetro aneroide portátil (ej. un altímetro de escalador o de ingeniero) es apropiado.
- Hoja de cálculo de la calibración y cinta aislante de 51mm.
- Un filtro limpio.

Procedimiento de calibración

- Registre en el formato de calibración el lugar de calibración, la fecha, el responsable de la calibración y la identificación de los equipos (número de serial y modelo).
- Registre la temperatura ambiente promedio y la presión barométrica promedio en la cercanía del equipo muestreador.
- El fabricante del equipo VFC puede especificar que el muestreador sea calibrado con un filtro instalado, lo cual generalmente lleva a tasa de flujo más altas que la tasa de flujo operativo normal. Tasas de flujo de calibración adicionales sin un filtro pueden ser apropiadas como se muestra más adelante.
- Instale el orificio de transferencia normal y su adaptador de placa frontal en el muestreador; primero inspeccione todos los empaques y sellos y reemplace aquellos que parezcan dudosos.

Precaución: Las tuercas deben ser aseguradas uniformemente en esquinas alternas para alinear y asentar el empaque correctamente. Las tuercas solo deben asegurarse manualmente porque mucha compresión puede dañar el empaque sellante.

- Inserte la placa o plato de resistencia variable número 1 (o sin placa en el primer caso), encienda el equipo y déjelo operar por lo menos dos minutos para restablecer el equilibrio térmico. Cada placa dará un valor de tasa de flujo de calibración y el procedimiento requiere al menos cuatro tasas de flujo para definir la relación de calibración, debiendo estar tres de estas en el rango aceptable (ej. 1.02 a 1.24 m³/min) para la entrada del muestreador. Para orificios con placas de resistencia, asegúrese que los empaques del orificio y de las placas de resistencia variable están en su sitio y que el orificio no esté mal enroscado en su placa frontal.
- Encienda el equipo y asegúrese de no existan fugas en el sistema. Esto se logra tapando totalmente la entrada de aire del calibrador y conectando el manómetro a la salida del motor. Si no hay caída de presión, se comprueba que no hay fugas en el equipo. Evite mantener encendido el equipo con la entrada de aire bloqueada por más de 30 segundos, ya que puede dañar el motor. Cerciórese que no esté conectado el manómetro diferencial al calibrador.
- Inspeccione que la tubería que conecta a los manómetros no tenga irregularidades o fisuras. Abra las válvulas del manómetro (si las tiene) y sople suavemente a través del tubo del manómetro mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste la escala corrediza de los manómetros de modo que sus líneas de cero estén en el fondo de sus meniscos.
- Apague el equipo y conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 16 in de agua a la toma de presión del orificio.

- Conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 36 in de agua a la derivación de presión que se encuentra en la pared lateral de la carcasa del equipo (puerto de presión de estancamiento). Asegúrese que un lado de cada manómetro esté abierto a la presión atmosférica. Asegúrese que los tubos conectores ajustan adecuadamente a los puertos de presión y a los manómetros.
- Encienda el equipo y permita que se caliente a la temperatura de operación (3 a 5 minutos).

Nota: La entrada del muestreador puede bajarse parcialmente sobre el orificio de transferencia normal para actuar como un protector de succión (si no se provee un protector) Use un bloqueo para dar al menos dos pulgadas de espacio libre al fondo para flujo de aire y para la tubería del manómetro.

- Lea y registre la caída de presión a través del orificio de transferencia normal (ΔH_2O) en in de agua, al igual que el valor de la presión de estancamiento (ΔP_{stg}) en pulgadas de agua.

Nota: Asegúrese de convertir ΔP_{stg} de in H_2O a mmHg usando la ecuación siguiente antes de registrar la lectura en la hoja de cálculo:

$$mm\ Hg = 25.4(in\ H_2O/13.6)$$

- Repita los dos pasos anteriores para los diferentes platos de resistencia. En el caso de tener un calibrador del tipo de resistencia de flujo variable, se deben reemplazar los pasos anteriores para cinco posiciones, desde una máxima hasta una mínima abertura. Por lo menos tres valores de flujo deberán estar dentro del rango aceptable de flujo (es decir 1.02 a 1.24m³/min para muestreadores de PM₁₀).
- Pueden tenerse dificultades en obtener tasas de flujo en el rango aceptable. Incluso con placas de resistencia modificadas instaladas (o sin placas) puede ser imposible obtener tres tasas de flujo con un filtro montado en el muestreador. En este caso, se deben usar puntos de calibración con tasas de flujo más bajos, o deben tomarse puntos de calibración adicionales sin filtro instalado en el muestreador. Si se toman puntos adicionales con un filtro, deben examinarse cuidadosamente para constatar que sean consistentes con los puntos de calibración obtenidos con un filtro (es decir que caigan en una curva suave trazada para todos los puntos de calibración).
- Grafique los datos de calibración del modo que se indica más adelante. Esta gráfica es importante que se haga en campo a medida que ocurre la calibración, en vez de hacerse luego en el laboratorio. Se puede proceder a correr puntos adicionales con otras tasas de flujo o repetir los puntos de calibración con las tasas ya usadas para mejorar la precisión de la calibración.
- Apague el equipo, retire el kit de calibración e instale un filtro limpio, luego encienda el equipo, permita que se caliente a la temperatura de operación y registre la lectura del valor de la presión de estancamiento (ΔP_{stg}) convertida a mm Hg, este valor se utiliza para calcular la rata de flujo operativa del equipo.
- Realice los siguientes cálculos en el momento de la calibración, de esta forma se podrán tomar puntos de calibración adicionales si surgen dudas en caso de los datos ya obtenidos.
- Calcule el caudal real a través del calibrador para cada punto utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{orificio}) = \left[\left[\Delta H_2O(T_a/P_a) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

$Q_a(\text{orificio})$ = Caudal real a través del calibrador (m^3/min).

ΔH_2O = Caída de presión a través del orificio calibrador (in de agua).

P_a = Presión barométrica ambiente durante la calibración (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente durante la calibración (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio (Si es PM_{10} , a condiciones reales)

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio (Si es PM_{10} , a condiciones reales)

- Calcule y registre el valor de la presión de estancamiento absoluta, P_1 para cada punto de calibración:

$$P_1 = P_a - \Delta P_{stg}$$

Donde:

P_1 = presión de estancamiento absoluta, mm Hg

P_a = presión barométrica ambiente, mm Hg

ΔP_{stg} = presión de estancamiento relativa, mm Hg

- Calcule y registre la relación de presión de estancamiento:

$$\text{Relación de presión de estancamiento} = P_1/P_a$$

- En una hoja de cálculo, trace el gráfico de las tasas de flujo calculadas para el orificio de transferencia normal $Q_a(\text{orificio})$ en el eje x, versus las correspondientes relaciones de presión de estancamiento P_1/P_a en el eje y. Trace una curva con los datos y si es necesario extrapole la curva para que incluya el rango de flujo aceptable.
 - Determine el caudal real del equipo ($Q_a(\text{muestreador})$) utilizando la tabla de calibración del equipo (Look Up Table). Para hacerlo se debe entrar en la tabla con el valor de la temperatura ambiente (T_a) y con la relación de presión de estancamiento (P_1/P_a).

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{P_a - \Delta P_{stg}}{P_a}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica, mm Hg

ΔP_{stg} = Presión de estancamiento, mm Hg

- Calcule la diferencia porcentual entre varios de los caudales calculados $Q_a(\text{orificio})$ y $Q_a(\text{muestreador})$ a partir de la Look up table usando la siguiente expresión:

$$\% \text{ dif} = \left[\frac{Q_a(\text{muestreador}) - Q_a(\text{orificio})}{Q_a(\text{orificio})} \right] \cdot 100$$

Donde:

$Q_a(\text{orificio})$ = Caudal real a través del calibrador (m^3/min).

$Q_a(\text{muestreador})$ = Caudal real del equipo (m^3/min).

Este porcentaje de diferencia debe dar valores inferiores a $\pm 4\%$ para que la calibración de fábrica sea válida. En caso contrario revisar equipo, conexiones y repetir calibración.

- Generación de la curva de calibración.
Dado el caso que no se cuente con la tabla de calibración del equipo (Look Up Table), se deberá construir la curva de calibración del equipo. En primer lugar calcule para cada punto la relación:

$$Q_a(\text{orificio})/(T_a)^{0.5}$$

Donde:

Q_a (orificio) = Tasa de flujo volumétrica real a través del calibrador (m^3/min).

T_a = Temperatura ambiente (K).

- Calcule para cada punto la relación de presiones P_1/P_a .

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{P_a - \Delta P_{stg}}{P_a}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica (mm Hg).

ΔP_{stg} = Presión de estancamiento (mm Hg).

- Construir la curva de calibración del equipo graficando la relación $Q_a/(T_a)^{0.5}$ en el eje x, versus la relación de presiones P_1/P_a en el eje y. Calcular la pendiente (m), el intercepto (b) y el coeficiente de correlación (r) de la curva. El coeficiente de correlación nunca debe ser menor a 0.990.

Verificación de la rata de flujo operacional

Este procedimiento compara la rata de flujo normal de operación del muestreador con la rata de flujo de diseño ($1.13 \text{ m}^3/\text{min}$); para realizar esta verificación deben realizarse los siguientes pasos:

- Calcule la relación de presiones $P_{1_{OFR}}/P_a$, utilizando el valor de presión de estancamiento (ΔP_{stg}) determinado con el filtro instalado.
-

$$P_{1_{OFR}} = P_a - \Delta P_{stg}$$

Donde la presión de estancamiento (ΔP_{stg}) corresponde a la hallada para la tasa de flujo operativa (con el filtro instalado).

- Determine el valor del caudal real del equipo Q_a (muestreador) que corresponde al valor de P_1/P_a , utilizando la tabla de calibración del equipo (Look Up Table), en caso de no contar con ésta, utilizar la relación de la curva de calibración hallada anteriormente.

$$Q_a(\text{muestreador}) = \left[\left(\frac{P_{1_{OFR}}}{P_a} \right) - b \right] \cdot T_a^{1/2} \cdot (1/m)$$

- Calcule la diferencia porcentual entre el el caudal real del equipo (Q_a (muestreador)) y el valor

del caudal de diseño (1.13 m³/min).

$$\% \text{ dif} = [(Q_a(\text{muestreador}) - 1.13) / 1.13] \cdot 100$$

Este porcentaje de diferencia debe dar valores inferiores a $\pm 10\%$, y preferiblemente inferior a $\pm 7\%$ con el fin de permitir variaciones en la temperatura ambiente. En caso contrario se debe proceder a revisar si en el muestreador hay escapes, si hay escobillas dañadas en el motor, si hay empaques faltantes, si hay un tipo de motor incorrecto o si hay un voltaje anormalmente bajo, y si es el caso proceder a recalibrar.

11.1.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES (PST) EN LA ATMÓSFERA - MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN (HI VOL)

11.1.2.1. Calibración del equipo para PST

El equipo muestreador de alto volumen está provisto de un dispositivo de control de flujo, cuya acción sobre el circuito eléctrico conectado al motor regula su velocidad y por lo tanto su capacidad de succión. La calibración se fundamenta en la posición del dispositivo de control de flujo que permita una aspiración de aire en el rango deseado, de 1.1 a 1.7 m³/min, por lo tanto la calibración del equipo consiste básicamente en una verificación de flujo.

El equipo debe ser calibrado en los siguientes casos o eventos:

- Una vez sea instalado y cada vez que se realice un cambio en el sitio de muestreo.
- Después de cambio de motor o de realizar el cambio de escobillas
- Periódicamente, por lo menos cada tres meses.
- Después de 360 horas de monitoreo.

La calibración del equipo se realiza con un kit de calibración, el cual puede ser un juego de platos o un sistema con resistencia de flujo variable. El juego de platos consiste en un tubo metálico y cinco platos intercambiables, con diferentes números de orificios que permiten varios flujos. El sistema de resistencia de flujo variable es un tubo metálico con un par de discos que permiten obtener varias aberturas al girar uno de los discos. Cada uno de estos kits de calibración posee su ecuación de calibración con su respectiva curva, la cual se obtiene a través de un patrón primario o medidor de volumen estándar de desplazamiento positivo, Rootsmeter.

La calibración del equipo depende del tipo, si es volumétrico o másico. Los procedimientos de calibración y los respectivos formatos de acuerdo al Quality Assurance Handbook Vol II, Part II pueden ser implementados cabalmente en las hojas de cálculo utilizadas para el desarrollo de estos procedimientos en campo. A continuación se muestran dichos procedimientos:

Procedimiento de calibración para equipos PST con controlador de flujo másico (MFC)

Precauciones

- La calibración puede ser afectada por las fluctuaciones de voltaje.
- No se debe realizar la calibración bajo condiciones de altas velocidades de viento, ya que éstas pueden provocar fluctuaciones de presión en los manómetros.
- No deben realizarse estas operaciones en condiciones de mal tiempo (lluvia, tormentas, neblina, nieve, etc.)

Equipos y accesorios

- Orificio transmisor de flujo normal calibrado. La relación de calibración de este orificio transmisor de flujo normal debe ser referenciada anualmente y estar dentro de un $\pm 2\%$ del estándar primario trazable al NIST.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 400 mm (0 - 16 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in)
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 200 mm (0 - 8 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in).
- Termómetro capaz de medir de una manera precisa temperaturas del aire ambiente en un rango de 0 - 50 °C con exactitud de 0.1 °C y trazable con una precisión de 0.1 °C a un termómetro certificado por NIST.
- Barómetro capaz de medir de una manera precisa presión barométrica ambiental en un rango de 500 - 800 mm Hg (66 a 106 KPa) con precisión al mm Hg. Debe estar referenciado a un estándar de precisión conocida dentro de ± 5 mm Hg. Para mediciones en campo, un barómetro aneroide portátil (ej. un altímetro de escalador o de ingeniero) es apropiado.
- Herramientas manuales varias, hoja de cálculo y cinta aislante de 51 mm.

Procedimiento de calibración

- Registre en el formato de calibración el lugar de calibración, la fecha, el responsable de la calibración y la identificación de los equipos.
- Registre la temperatura ambiente promedio en la cercanía del equipo muestreador.
- Registre la presión barométrica promedio del sitio de calibración.
- Instale un filtro limpio y opere el equipo durante 5 minutos para establecer equilibrio térmico antes de la calibración.
- Apague el equipo y retire el filtro.
- Desconecte el motor del controlador de flujo y conéctelo directamente a una fuente de energía estable.
- Coloque el kit de calibración.
- Encienda nuevamente el equipo y asegúrese de que no existan fugas en el sistema. Esto se logra tapando totalmente la entrada de aire del calibrador y conectando el manómetro a la salida del motor. Si no hay caída de presión, se comprueba que no hay fugas en el equipo. Evite mantener encendido el equipo con la entrada de aire bloqueada por más de 30 segundos, ya que puede dañar el motor. Antes de realizar esta operación cerciórese que no esté conectado el manómetro diferencial al calibrador.
- Apague el equipo y conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 8 in de agua a la toma de presión del kit de calibración.
- Conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 18 in de agua a la derivación de presión que se encuentra en la parte inferior de la carcasa del motor.
- Inserte el plato número 1, encienda el equipo y déjelo operar entre 3 y 5 minutos para restablecer el equilibrio térmico.
- Lea y registre la caída de presión a través del orificio estándar de transferencia (ΔH) en pulgadas de agua, al igual que la deflexión en el manómetro del muestreador (ΔP) en pulgadas de agua (o la lectura I en la carta registradora de flujo).
- Repita los dos pasos anteriores para los diferentes platos de resistencia. En el caso de tener un calibrador del tipo de resistencia de flujo variable, se deben reemplazar los pasos anteriores para cinco posiciones, desde una máxima hasta una mínima abertura. Se requieren por lo menos cuatro ratas de flujo de calibración y por lo menos tres valores deberán estar dentro del rango aceptable de flujo (1.1 a 1.7 m³/min para muestreadores de PST).
- Apague el equipo, retire el kit de calibración y conecte nuevamente el motor al controlador de flujo.

- Calcule la rata de flujo a condiciones estándar a través del calibrador para cada punto utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{std}(\text{orificio}) = \left[\left[\Delta H (P_a / P_{std}) (T_{std} / T_a) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

ΔH = Caída de presión a través del calibrador (in de agua).

P_{std} = Presión estándar (760 mm Hg).

T_{std} = Temperatura estándar (298 K).

P_a = Presión barométrica (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio (a condiciones estándar para PST).

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio (a condiciones estándar para PST).

Nota: Este caudal debe estar en el rango de 1.1 a 1.7 m³/min.

Calcule el valor de la lectura manométrica transformada (ΔP_{ext}) para cada punto utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{ext} = \left[\Delta P_{ex} (P_a / P_{std}) (T_{std} / T_a) \right]^{0.5}$$

Donde:

ΔP_{ext} = Lectura de presión transformada del manómetro del muestreador.

ΔP_{ex} = Lectura de presión en el manómetro del muestreador (in de agua).

P_{std} = Presión estándar (760 mm Hg).

T_{std} = Temperatura estándar (298 K).

P_a = Presión barométrica (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente (K).

Si se usa un registrador de flujo continuo, calcule y registre la cantidad I_t así:

$$I_t = I \left[(P_a / P_{std}) (T_{std} / T_a) \right]^{0.5}$$

Donde:

I_t = Lectura transformada de la carta record.

I = Lectura de la carta record de flujo.

Nota: Si se usa un registrador de flujo con escala lineal, use $I^{1/2}$ en vez de I en la ecuación anterior.

- Construir la curva de calibración del equipo graficando el caudal a condiciones estándar ($Q_{std}(\text{orificio})$) en el eje x, versus la lectura de presión transformada del manómetro del muestreador (ΔP_{ext}) en el eje y. Calcular la pendiente, el intercepto y el coeficiente de correlación de la curva:

$$\Delta P_{ext} = m \cdot Q_{std}(\text{orificio}) + b$$

El coeficiente de correlación nunca debe ser menor a 0.990 y ningún punto puede desviarse

más de $\pm 0.04 \text{ m}^3/\text{min}$ del valor pronosticado por la ecuación de regresión.

- Para períodos de muestreo subsiguientes, la tasa de flujo operativa estándar promedio del muestreador, $Q_{std}(\text{media})$ se calcula con la pendiente y el intercepto de la calibración usando la siguiente ecuación:

$$Q_{std}(\text{media}) = \left[\left[\Delta P_{ex}(\text{media}) \left(P_a / P_{std} \right) \left(T_{std} / T_a \right) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

$Q_{std}(\text{media})$ = Tasa de flujo estándar promedio del muestreador (m^3/min).

$\Delta P_{ex}(\text{media})$ = Promedio de las lecturas inicial y final del manómetro del muestreador, expresada de la siguiente manera:

$$\Delta P_{ex}(\text{media}) = \frac{\Delta P_i + \Delta P_f}{2} \text{ expresada en in de agua}$$

Donde:

P_{std} = Presión estándar (760 mm Hg).

T_{std} = Temperatura estándar (298 K).

P_a = Presión barométrica (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador.

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador.

Nota: m y b son a condiciones estándar para el caso de PST.

Para el caso de registradores de flujo:

$$Q_{std}(\text{media}) = \left[I_m \left[\left(P_a / P_{std} \right) \left(T_{std} / T_a \right) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde I_m es la lectura del registrador de flujo media para el período de muestreo. En caso de emplear un registrador de flujo con escala lineal, use $I^{1/2}$ en vez de I en la ecuación anterior.

Procedimiento de calibración para equipos PST con controlador de flujo volumétrico (VFC)

El procedimiento de calibración a utilizar relaciona tasas de flujo conocidas (Q_a^{54*} determinadas por el orificio de transferencia normal) con la relación de presión de estancamiento y la presión barométrica (P_1/P_a). La presión de estancamiento (P_1) es la presión del aire dentro del muestreador en el área justo bajo el filtro. Los muestreadores VFC tienen un puerto de presión de estancamiento a través del cual puede medirse dicha presión. Un muestreador VFC también puede tener un orificio de salida bajo el motor similar al de los muestreadores MFC. En tal caso, la tasa de flujo del muestreador puede medirse y equilibrarse usando la presión plena del orificio de salida como se describió en el procedimiento de calibración para equipos PM_{10} con controlador de flujo másico (MFC). Sin embargo, el uso de la presión de estancamiento generalmente da una indicación más precisa de la tasa de flujo del muestreador. Adicionalmente, puede conectarse un registrador de flujo continuo al puerto de presión del orificio de salida para determinar de modo

⁵⁴ *Nota:* Se recomienda chequear el manual del fabricante del equipo, pues los muestreadores PST con controlador de flujo volumétrico (VFC) en ciertos casos se calibran con condiciones estándar en vez de condiciones reales de flujo.

no cuantitativo que la tasa de flujo fue constante e ininterrumpida durante el período de muestreo.

Precauciones

- La calibración puede ser afectada por las fluctuaciones de voltaje.
- No se debe realizar la calibración bajo condiciones de altas velocidades de viento, ya que éstas pueden provocar fluctuaciones de presión en los manómetros.
- No deben realizarse estas operaciones en condiciones de mal tiempo (lluvia, tormentas, neblina, etc.).

Equipos y accesorios

- Orificio transmisor de flujo normal calibrado. La relación de calibración de este orificio transmisor de flujo normal debe ser referenciada anualmente y estar dentro de un $\pm 2\%$ del estándar primario trazable al NIST.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 400 mm (0 - 16 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in).
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 1000 mm (0 - 36 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in) u otro mecanismo de medición de presión para medir la presión de estagnación o estancamiento del muestreador. Idealmente este manómetro debería estar asociado con el muestreador.
- Termómetro capaz de medir de una manera precisa temperaturas del aire ambiente en un rango de 0 - 50 °C con exactitud de 0.1 °C y trazable con una precisión de 0.1 °C a un termómetro certificado por NIST.
- Barómetro capaz de medir de una manera precisa presión barométrica ambiental en un rango de 500 - 800 mmHg (66 a 106 KPa) con precisión al mm Hg. Debe estar referenciado a un estándar de precisión conocida dentro de ± 5 mm Hg. Para mediciones en campo, un barómetro aneroide portátil (ej. un altímetro de escalador o de ingeniero) es apropiado.
- Hoja de cálculo de la calibración y cinta aislante de 51 mm.
- Un filtro limpio.

Procedimiento de calibración

- Registre en el formato de calibración el lugar de calibración, la fecha, el responsable de la calibración y la identificación de los equipos (número de serial y modelo).
- Registre la temperatura ambiente promedio y la presión barométrica promedio en la cercanía del equipo muestreador.
- El fabricante del equipo VFC puede especificar que el muestreador sea calibrado con un filtro instalado, lo cual generalmente lleva a tasa de flujo más altas que la tasa de flujo operativo normal. Tasas de flujo de calibración adicionales sin un filtro pueden ser apropiadas como se muestra más adelante.
- Instale el orificio de transferencia normal y su adaptador de placa frontal en el muestreador; primero inspeccione todos los empaques y sellos y reemplace aquellos que parezcan dudosos.

Precaución: Las tuercas deben ser aseguradas uniformemente en esquinas alternas para alinear y asentar el empaque correctamente. Las tuercas solo deben asegurarse manualmente porque mucha compresión puede dañar el empaque sellante.

- Inserte la placa o plato de resistencia variable número 1 (o sin placa en el primer caso), encienda el equipo y déjelo operar por lo menos dos minutos para restablecer el equilibrio térmico. Cada placa dará un valor de tasa de flujo de calibración y el procedimiento requiere al menos cuatro tasas de flujo para definir la relación de calibración, debiendo estar tres de estas en el rango aceptable (ej. 1.02 a 1.24 m³/min) para la entrada del muestreador. Para
- 

orificios con placas de resistencia, asegúrese que los empaques del orificio y de las placas de resistencia variable están en su sitio y que el orificio no esté mal enroscado en su placa frontal.

- Encienda el equipo y asegúrese de no existan fugas en el sistema. Esto se logra tapando totalmente la entrada de aire del calibrador y conectando el manómetro a la salida del motor. Si no hay caída de presión, se comprueba que no hay fugas en el equipo. Evite mantener encendido el equipo con la entrada de aire bloqueada por más de 30 segundos, ya que puede dañar el motor. Cerciórese que no esté conectado el manómetro diferencial al calibrador.
- Inspeccione que la tubería que conecta a los manómetros no tenga irregularidades o fisuras. Abra las válvulas del manómetro (si las tiene) y sople suavemente a través del tubo del manómetro mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste la escala corregida de los manómetros de modo que sus líneas de cero estén en el fondo de sus meniscos.
- Apague el equipo y conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 16 in de agua a la toma de presión del orificio.
- Conecte el manómetro diferencial con rango de 0 - 36 pulgadas de agua a la derivación de presión que se encuentra en la pared lateral de la carcasa del equipo (puerto de presión de estancamiento). Asegúrese que un lado de cada manómetro esté abierto a la presión atmosférica. Asegúrese que los tubos conectores ajustan adecuadamente a los puertos de presión y a los manómetros.
- Encienda el equipo y permita que se caliente a la temperatura de operación (3 a 5 minutos).

Nota: La entrada del muestreador puede bajarse parcialmente sobre el orificio de transferencia normal para actuar como un protector de succión (si no se provee un protector) Use un bloqueo para dar al menos dos pulgadas de espacio libre al fondo para flujo de aire y para la tubería del manómetro.

- Lea y registre la caída de presión a través del orificio de transferencia normal (ΔH_2O) en pulgadas de agua, al igual que el valor de la presión de estancamiento (ΔP_{stg}) en pulgadas de agua.

Nota: Asegúrese de convertir ΔP_{stg} de in H_2O a mmHg usando la ecuación siguiente antes de registrar la lectura en la hoja de cálculo:

$$mm\ Hg = 25.4(in\ H_2O/13.6)$$

- Repita los dos pasos anteriores para los diferentes platos de resistencia. En el caso de tener un calibrador del tipo de resistencia de flujo variable, se deben reemplazar los pasos anteriores para cinco posiciones, desde una máxima hasta una mínima abertura. Por lo menos tres valores de flujo deberán estar dentro del rango aceptable de flujo (es decir 1.1 a 1.7 m³/min para muestreadores de PST).
- Pueden tenerse dificultades en obtener tasas de flujo en el rango aceptable. Incluso con placas de resistencia modificadas instaladas (o sin placas) puede ser imposible obtener tres tasas de flujo con un filtro montado en el muestreador. En este caso, se deben usar puntos de calibración con tasas de flujo más bajos, o deben tomarse puntos de calibración adicionales sin filtro instalado en el muestreador. Si se toman puntos adicionales con un filtro, deben examinarse cuidadosamente para constatar que sean consistentes con los puntos de calibración obtenidos con un filtro (es decir que caigan en una curva suave trazada para todos los puntos de calibración).
- Grafique los datos de calibración del modo que se indica más adelante. Esta gráfica es importante que se haga en campo a medida que ocurre la calibración, en vez de hacerse luego en el laboratorio. Se puede proceder a correr puntos adicionales con otras tasas de flujo o

repetir los puntos de calibración con las tasas ya usadas para mejorar la precisión de la calibración.

- Apague el equipo, retire el kit de calibración e instale un filtro limpio, luego encienda el equipo, permita que se caliente a la temperatura de operación y registre la lectura del valor de la presión de estancamiento (ΔP_{stg}) convertida a mm Hg, este valor se utiliza para calcular la tasa de flujo operativa del equipo.
- Realice los siguientes cálculos en el momento de la calibración, de esta forma se podrán tomar puntos de calibración adicionales si surgen dudas en caso de los datos ya obtenidos.
- Calcule el caudal real a través del calibrador para cada punto utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{orificio}) = \left[\left[\Delta H_2O(T_a/P_a) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

$Q_a(\text{orificio})$ = Caudal real a través del calibrador (m^3/min).

ΔH_2O = Caída de presión a través del orificio calibrador (in de agua).

P_a = Presión barométrica ambiente durante la calibración (mm Hg).

T_a = Temperatura ambiente durante la calibración (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio (a condiciones reales⁵⁵).

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio (a condiciones reales³²).

- Calcule y registre el valor de la presión de estancamiento absoluta, P_1 para cada punto de calibración:

$$P_1 = P_a - \Delta P_{stg}$$

Donde:

P_1 = presión de estancamiento absoluta, mm Hg.

P_a = presión barométrica ambiente, mm Hg.

ΔP_{stg} = presión de estancamiento relativa, mm Hg.

- Calcule y registre la relación de presión de estancamiento:

$$\text{Relación de presión de estancamiento} = P_1/P_a$$

- En una hoja de cálculo, trace el gráfico de las tasas de flujo calculadas para el orificio de transferencia normal $Q_a(\text{orificio})$ en el eje x, versus las correspondientes relaciones de presión de estancamiento P_1/P_a en el eje y. Trace una curva con los datos y si es necesario extrapole la curva para que incluya el rango de flujo aceptable.
 - Determine el caudal real del equipo ($Q_a(\text{muestreador})$) utilizando la tabla de calibración del equipo (Look Up Table). Para hacerlo se debe entrar en la tabla con el valor de la temperatura ambiente (T_a) y con la relación de presión de estancamiento (P_1/P_a).

⁵⁵ Nota: Para el caso de PST, los parámetros m y b pueden ser a condiciones reales o estándar, por lo cual es necesario verificar en el manual del fabricante.

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{P_a - \Delta P_{stg}}{P_a}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica, mm Hg

ΔP_{stg} = Presión de estancamiento, mm Hg

- Calcule la diferencia porcentual entre varios de los caudales calculados $Q_a(\text{orificio})$ y $Q_a(\text{muestreador})$ a partir de la Look up table usando la siguiente expresión:

$$\% \text{ dif} = \left[\frac{Q_a(\text{muestreador}) - Q_a(\text{orificio})}{Q_a(\text{orificio})} \right] \cdot 100$$

Donde:

$Q_a(\text{orificio})$ = Caudal real a través del calibrador (m^3/min).

$Q_a(\text{muestreador})$ = Caudal real del equipo (m^3/min).

Este porcentaje de diferencia debe dar valores inferiores a $\pm 4\%$ para que la calibración de fábrica sea válida. En caso contrario revisar equipo, conexiones y repetir calibración.

- Generación de la curva de calibración.
Dado el caso que no se cuente con la tabla de calibración del equipo (Look Up Table), se deberá construir la curva de calibración del equipo. En primer lugar calcule para cada punto la relación:

$$Q_a(\text{orificio}) / (T_a)^{0.5}$$

Donde:

$Q_a(\text{orificio})$ = Tasa de flujo volumétrica real a través del calibrador (m^3/min).

T_a = Temperatura ambiente (K).

- Calcule para cada punto la relación de presiones P_1/P_a .

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{P_a - \Delta P_{stg}}{P_a}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica (mm Hg).

ΔP_{stg} = Presión de estancamiento (mm Hg).

- Construir la curva de calibración del equipo graficando la relación $Q_a/(T_a)^{0.5}$ en el eje x, versus la relación de presiones P_1/P_a en el eje y. Calcular la pendiente (m), el intercepto (b) y el coeficiente de correlación (r) de la curva. El coeficiente de correlación nunca debe ser menor a 0.990.

11.1.3. MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO (PM₁₀ Ó PST) POR MUESTREADOR DE ALTO VOLUMEN

11.1.3.1. Descripción del principio de operación

Un equipo muestreador de alto volumen obtiene una cantidad conocida de aire el cual se hace pasar a través de una entrada selectiva y un filtro en exposición. Las partículas son recolectadas en el filtro durante el período especificado por el programa de monitoreo, generalmente de 24 horas. Cada filtro es pesado antes y después del muestreo para determinar el peso neto obtenido de la muestra de material recolectado.

El volumen total de aire muestreado es determinado de la proporción de flujo volumétrico conocido y el tiempo expuesto. La concentración de material particulado en el aire se mide como la masa total de las partículas acumuladas en el filtro, clasificado según el rango de tamaño, dividido por el volumen de aire de muestra. Esta concentración generalmente se expresa como microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Un equipo muestreador de alto volumen está conformado por dos componentes básicos: una entrada diseñada para permitir el ingreso selectivo de partículas y un sistema de control de flujo capaz de mantener una proporción de flujo constante dentro de las especificaciones planteadas en la normatividad vigente.

11.1.3.2. Resumen de la operación de muestreo

El procedimiento de operación del muestreador de alto volumen consiste en el retiro y custodia de los filtros expuestos y en la instalación de los nuevos filtros que recolectarán las muestras para el siguiente período de medición. La información relativa a la identificación del filtro, del sitio de exposición, la fecha del monitoreo, así como también aquellas observaciones que estiman ser razones por las cuales el filtro extraído debe ser desechado, deben ser registradas en el formato de campo.

11.1.3.3. Equipos y accesorios

- Muestreador de alto volumen PM₁₀ o PST.
- Filtros PM₁₀ o PST.
- Envoltura y rótulo para filtro.
- Guantes de látex.
- Formato de campo.
- Manómetro diferencial en U.
- Brocha de Limpieza.

11.1.3.4. Procedimiento de monitoreo de material particulado utilizando equipos con controlador de flujo másico (MFC)

El procedimiento que se describe a continuación se utilizará para el monitoreo de material particulado con diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 μm (PM₁₀) o para monitoreo de

partículas suspendidas totales (PST) mediante el uso de equipos Hi-Vol con controlador de flujo másico.

Operaciones antes del muestreo: preparación del filtro

Inicialmente en el laboratorio de análisis, los filtros deben ser inspeccionados con el fin de detectar imperfectos. Los operadores deben usar guantes protectores al manipular los filtros para evitar la contaminación de estos con grasas naturales de la piel y humedad. Antes de determinar el peso inicial de los filtros, estos deben equilibrarse en un ambiente estable por lo menos 24 horas antes. Esto puede hacerse en una cámara de equilibrio o en un salón de pesaje controlado ambientalmente. La humedad relativa debe estar en un valor entre 20 y 45%, con una variabilidad de no más de $\pm 5\%$. El valor de temperatura ambiente debe mantenerse constante con un valor medio entre 15 y 30 °C, y una variabilidad de no más de $\pm 3\%$. Después del equilibrio se pesa cada filtro y se registra el peso inicial o del filtro limpio junto con un número de identificación del filtro. Los filtros se deben mantener en sobres protectores y nunca deben estar o ser doblados antes de su instalación.

Operaciones generales previas al muestreo (Procedimiento de instalación del filtro)

- Al iniciar el proceso de muestreo, registre en el formato de campo el nombre y código de la estación, número serial del equipo, temperatura ambiente, presión barométrica y nombre del operador a cargo (ver ejemplos de formatos empleados, en la Figura 56 y Figura 57).



FORMATO DE CAMPO MONITOREO DE PM10

MUNICIPIO:
DEPARTAMENTO:

ESTACIÓN:
S/N MUESTREADOR:

COORDENADA NORTE:

COORDENADA ESTE:

FILTRO Nº	PESO	DATOS INICIALES						DATOS FINALES						OBSERVACIONES		
		Fecha	Hora	ΔH in H2O	Tamb (°C)	Pamb (mm Hg)	HOROMETRO	PESO FIN	Fecha	Hora	ΔH in H2O	Tamb (°C)	Pamb (mm Hg)		HOROMETRO	Precipitación (mm)

NOMBRE OPERADOR _____

FIRMA _____

FECHA _____

OBSERVACIONES _____

Cambio de Custodia	
Entregado por:	Fecha:
Recibido por:	Hora:
Razones del cambio:	
Observaciones:	

Figura 56. Ejemplo de formato de campo para el monitoreo de PM₁₀ empleado por la firma consultora K2 Ingeniería Ltda.



FORMATO DE CAMPO MONITOREO DE TSP

MUNICIPIO:
DEPARTAMENTO:

ESTACIÓN:
S/N MUESTREADOR:

COORDENADA NORTE:

COORDENADA ESTE:

FILTRO Nº	DATOS INICIALES							DATOS FINALES							OBSERVACIONES	
	PESO INI (g)	Fecha	Hora	ΔH (in H2O)	Tamb (°C)	Pamb (mm Hg)	HOROMETRO	PESO FIN (g)	Fecha	Hora	ΔH (in H2O)	Tamb (°C)	Pamb (mm Hg)	HOROMETRO		Precipitación (mm)

NOMBRE OPERADOR _____

FIRMA _____

FECHA _____

OBSERVACIONES _____

Cambio de Custodia	
Entregado por: _____	Fecha: _____
Recibido por: _____	Hora: _____
Razones del cambio: _____	
Observaciones: _____	

Figura 57. Ejemplo de formato de campo para el monitoreo de PST empleado por la firma consultora K2 Ingeniería Ltda.

- Afloje las tuercas que aseguran la entrada a la base y suavemente incline hacia atrás la entrada para permitir acceso a la pantalla que da apoyo al filtro. Si la pantalla está sucia, límpiela.
- Usando guantes tome un filtro numerado, teniendo cuidado de no doblarlo. Verifique que se encuentre en buen estado, y que no presente partículas u otras imperfecciones. No debe utilizarse un filtro con imperfecciones visibles. Debe tenerse mucho cuidado de no dañar o ensuciar los filtros pesados, antes de su instalación en el muestreador de alto volumen. A fin de reducir a un mínimo los daños al filtro, podrán usarse cassettes o cartuchos porta-filtros que puedan montarse o desmontarse en el laboratorio.
- Coloque en el muestreador el filtro previamente pesado y numerado. Coloque el filtro directamente en la pantalla, con el lado áspero hacia arriba. Siempre use guantes al manejar un filtro sin protector. Asegúrese en todo momento que el filtro quede debidamente alineado. O bien si utiliza cartucho porta-filtros, instale el cartucho con el nuevo filtro en su interior.
- Apriete las cuatro tuercas en el muestreador de alto volumen apenas lo suficiente para impedir una fuga. Las tuercas deben ser aseguradas uniformemente en esquinas alternas para alinear y asentar el empaque correctamente. El filtro podría atorarse o el empaque podría sufrir un daño permanente si se aprietan demasiado.
- Instale con cuidado una nueva carta de registro de flujo, registre el número de serial del muestreador, el número de identificación del filtro, localización del sitio y fecha de muestreo al reverso de la carta nueva. Remueva cualquier humedad dentro limpiándola con un paño limpio. Mientras instale la carta, no doble el brazo del lapicero más allá de sus límites de extensión. Levante la tapa del lapicero. Asegúrese que la etiqueta de la carta esté centrada en la unidad perforada para permitir una rotación completa de 360° en 24 horas. Asegúrese que los límites de la carta estén situados apropiadamente debajo de los retenedores. Baje el brazo del lapicero y golpee suavemente hacia el lado del registrador para asegurarse que el lapicero esté libre.

Nota: Durante períodos de clima inclemente, la carta tiende a pegarse a la cara del registrador. Pueden instalarse simultáneamente dos cartas para permitir a la carta del muestreador (la de encima, la de anotación) rotar libremente.

- Usando una moneda o un destornillador ranurado, adelante la carta y chequee para ver que el lapicero permanece en cero -el diámetro del círculo más pequeño. Si es necesario, ajuste el tornillo puesto en cero mientras golpea suavemente a un lado del registrador de flujo. Si usa una carta con escala de función lineal puede ser deseable algún desplazamiento hacia el lado positivo de cero para permitir variaciones normales en las lecturas de puesta a cero.
- Encienda el equipo y déjelo funcionar durante cinco minutos con el fin de establecer equilibrio térmico, verifique que el registrador del flujo esté operando.
- Inspeccione que el manómetro no tenga rizados o fracturas en su tubo conector. Abra las válvulas y sople suavemente a través del tubo del manómetro mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste la escala corrediza del manómetro de modo que su línea de cero esté en el fondo de sus meniscos.
- Utilizando el manómetro diferencial lea y registre en el formato de campo la indicación de la rata de flujo inicial a través del muestreador en pulgadas de agua (ΔP_{ex} inicial). Si ΔP_{ex} es sustancialmente diferente de previos muestreos o parece anormal lleve a cabo un chequeo de flujo de control de calidad. {Observe la lectura del registrador de flujo y confirme que el equipo se encuentra operando dentro del rango aceptable de volumen de flujo. Si nota que éste es sustancialmente diferente a los de muestreos previos o si parece anormal, lleve a cabo un chequeo de flujo o ajuste mediante calibración}
- Apague el muestreador. {Chequee el tiempo que muestra el indicador de tiempo en el registrador de flujo. Si hay un error, rote la carta en sentido horario insertando un

destornillador o una moneda en el orificio en el centro de la carta hasta que indique el tiempo correcto}

- Ajuste el cronómetro. Fije el temporizador para empezar el muestreo en el horario y fecha predeterminada y para finalizar 24 horas después.

Operaciones después del muestreo (Procedimiento de recuperación del filtro)

- Encienda el muestreador y deje que se equilibre a la temperatura de operación (3 a 5 minutos). Utilizando un manómetro diferencial lea y registre en el formato de campo la indicación de la rata de flujo final a través del muestreador en pulgadas de agua (ΔP_{ex} final). Si al momento de llegar a la estación de monitoreo el equipo se encuentra apagado, para realizar ésta medición encienda el equipo y déjelo operar cinco minutos con el fin de establecer equilibrio térmico.
- Registre el tiempo total de monitoreo en el formato de campo, así como la temperatura ambiente y la presión barométrica del lugar al final del monitoreo. Las lecturas de tiempo se utilizarán posteriormente en calcular la concentración de partículas muestreadas por lo que estos registros deben ser lo más exactos posibles.
- Remueva la carta de registro de flujo y examínela por posibles anomalías. Verifique cualquier cambio en los valores de flujo registrados. Registre en el formato de campo cualquier cambio abrupto en el flujo de aire. Investigue el origen de estas fallas y regístrelas.
- Retire cuidadosamente el filtro en exposición. Use guantes de látex para retirar el filtro. Verifique si existe alguna fuga de aire. Una fuga podría ser el resultado de un empaque desgastado o de un filtro mal instalado. Si nota alguna fuga, anule la muestra, determine la causa de la fuga y tome las medidas correctivas necesarias antes de iniciar otro período de muestreo.
- Revise el filtro expuesto en busca de daño físico que pudo haber ocurrido durante o después del muestreo. Daños físicos después del muestreo no invalidan la muestra si todas las piezas del filtro se recuperan y pesan. Sin embargo, pérdidas atribuibles a fugas durante el período de muestreo o la pérdida de partículas después del muestreo invalidan la muestra.
- Verifique la apariencia de las partículas, cualquier cambio de su color normal podría indicar una nueva fuente de emisión en el área y tal hecho debe registrarse en el formato de campo.
- Registre en el formato de campo cualquier observación que pueda sugerir que la muestra obtenida en el proceso no es representativa del área muestreada (por ejemplo, presencia de quemaduras y/o construcciones cercanas), así como cualquier otra información que indique que la muestra no es válida.
- Introduzca la carta de registro, el filtro expuesto y el formato de campo dentro de un sobre y almacénelos para su posterior análisis. Si las muestras no serán analizadas en periodos cortos de tiempo, se debe almacenar el filtro dentro de un revestimiento protector para reducir al mínimo la pérdida de partículas volátiles. Se recomienda el uso de una carpeta y de un sobre protector de tamaño proporcional al del filtro.
- Instale el nuevo filtro así como la carta de registro de flujo para un nuevo periodo de monitoreo siguiendo las indicaciones mencionadas anteriormente.

11.1.3.5. Procedimiento de monitoreo de material particulado utilizando equipos con controlador de flujo volumétrico (VFC)

El procedimiento que se describe a continuación se utilizará para el monitoreo de material particulado con diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 μm (PM_{10}) o para monitoreo de partículas suspendidas totales (PST) mediante el uso de equipos Hi-Vol con controlador de flujo volumétrico.

Operaciones antes del muestreo

Preparación del filtro. Inicialmente en el laboratorio de análisis, los filtros deben ser inspeccionados con el fin de detectar imperfectos. Los operadores deben usar guantes protectores al manipular los filtros para evitar la contaminación de estos con grasas naturales de la piel y humedad. Antes de determinar el peso inicial de los filtros, estos deben equilibrarse en un ambiente estable por lo menos 24 horas antes. Esto puede hacerse en una cámara de equilibrio o en un salón de pesaje controlado ambientalmente. La humedad relativa debe estar en un valor entre 20 y 45%, con una variabilidad de no más de $\pm 5\%$. El valor de temperatura ambiente debe mantenerse constante con un valor medio entre 15 y 30 °C, y una variabilidad de no más de $\pm 3\%$. Después del equilibrio se pesa cada filtro y se registra el peso premuestreo junto con un número de identificación del filtro. Los filtros se deben mantener en sobres protectores y nunca deben estar o ser doblados antes de su instalación.

Operaciones generales previas al muestreo (procedimiento de instalación de filtro)

- Antes de comenzar el proceso de muestreo, registre en el formato de campo el nombre y código de la estación, número serial y modelo del equipo, temperatura ambiente, presión barométrica y nombre del operador a cargo (ver Figura 56 y Figura 57).
 - Afloje las tuercas que aseguran la entrada a la base y suavemente incline hacia atrás la entrada para permitir acceso a la pantalla que da apoyo al filtro. Si la pantalla está sucia, límpiela.
 - Usando guantes tome un filtro numerado, teniendo cuidado de no doblarlo. Verifique que se encuentre en buen estado, y que no presente partículas u otras imperfecciones. No debe utilizarse un filtro con imperfecciones visibles. Debe tenerse mucho cuidado de no dañar o ensuciar los filtros pesados, antes de su instalación en el muestreador de alto volumen. A fin de reducir a un mínimo los daños al filtro, podrán usarse casetes o cartuchos porta-filtros que puedan montarse o desmontarse en el laboratorio.
 - Coloque en el muestreador el filtro previamente pesado y numerado. Coloque el filtro directamente en la pantalla, con el lado áspero hacia arriba. Siempre use guantes al manejar un filtro sin protector. Asegúrese en todo momento que el filtro quede debidamente alineado. O bien si utiliza cartucho porta-filtros, instale el cartucho con el nuevo filtro en su interior.
 - Apriete las cuatro tuercas en el muestreador de alto volumen apenas lo suficiente para impedir una fuga. Las tuercas solo deben asegurarse manualmente porque mucha compresión puede dañar el empaque sellante. Las tuercas deben ser aseguradas uniformemente en esquinas alternas para alinear y asentar el empaque correctamente. El filtro podría atorarse o el empaque podría sufrir un daño permanente si se aprietan demasiado. Chequear que el empaque esté en buenas condiciones y no se haya deteriorado.
 - Baje la entrada del muestreador. Inspeccione la entrada para asegurarse que está apoyada en el casete del filtro y no en el marco del muestreador. Asegure la entrada del muestreador a la base del muestreador.
 - Encienda el equipo y déjelo funcionar durante tres a cinco minutos con el fin de establecer equilibrio térmico.
 - Aliste un manómetro de agua o aceite al lado del muestreador. Este manómetro debería tener un rango de 0 a 1000 mm (0 a 36 in) y una división de escala mínima de 2 mm (0.1 in)
 - Inspeccione que el manómetro no tenga rizados o fracturas en su tubo conector. Abra las válvulas y sople suavemente a través del tubo del manómetro mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste la escala corrediza del manómetro de modo que su línea de cero esté en el fondo de sus meniscos.
 - Quite la tapa de vacío del puerto de la presión de estancamiento situada al lado de la base del muestreador. Usando el tubo conector, una un lado del manómetro al puerto. Deje el otro lado del manómetro abierto a la presión atmosférica. Asegúrese que los tubos ajustan adecuadamente al puerto y al manómetro.
- 

- Utilizando un manómetro diferencial lea y registre en el formato de campo el valor de la presión de estancamiento inicial (ΔP_{stg} inicial) en el muestreador en pulgadas de agua. Este valor se toma utilizando el puerto de presión que se encuentra en un costado del equipo muestreador.
- Apague el muestreador, desconecte el manómetro y vuelva a colocar la tapa de vacío en el puerto de la presión de estancamiento.
- Ajuste el cronómetro. Fije el temporizador para empezar el muestreo en el horario y fecha predeterminada y para finalizar 24 horas después.

Operaciones después del muestreo (Procedimiento de recuperación del filtro)

- Encienda el muestreador y deje que se equilibre a la temperatura de operación (3 a 5 minutos).
 - Registre el tiempo total de monitoreo en el formato de campo, así como la temperatura ambiente y la presión barométrica del lugar al final del monitoreo. Las lecturas de tiempo se utilizarán posteriormente en calcular la concentración de partículas muestreadas por lo que estos registros deben ser lo más exactos posibles.
 - Inspeccione que el manómetro no tenga irregularidades o fracturas en su tubo conector. Abra las válvulas y sople suavemente a través del tubo del manómetro mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste la escala corregida del manómetro de modo que su línea de cero esté en el fondo de sus meniscos.
 - Quite la tapa de vacío del puerto de la presión de estancamiento situada al lado de la base del muestreador. Usando el tubo conector una un lado del manómetro al puerto. Deje el otro lado del manómetro abierto a la presión atmosférica. Asegúrese que los tubos ajustan adecuadamente al puerto y al manómetro. Deje el otro lado abierto a la presión atmosférica.
 - Utilizando el manómetro diferencial lea y registre en el formato de campo el valor de la presión de estancamiento final (ΔP_{stg} final) en el muestreador en pulgadas de agua. Este valor se toma utilizando el puerto de presión que se encuentra en un costado del equipo muestreador.
 - Retire cuidadosamente el filtro en exposición. Use guantes de látex para retirar el filtro. Verifique si existe alguna fuga de aire. Una fuga podría ser el resultado de un empaque desgastado o de un filtro mal instalado. Si nota alguna fuga, anule la muestra, determine la causa de la fuga y tome las medidas correctivas necesarias antes de iniciar otro período de muestreo.
 - Revise el filtro expuesto en busca de daño físico que pudo haber ocurrido durante o después del muestreo. Daños físicos después del muestreo no invalidan la muestra si todas las piezas del filtro se recuperan y pesan. Sin embargo, pérdidas atribuibles a fugas durante el período de muestreo o la pérdida de partículas después del muestreo invalidan la muestra. Para evitar la pérdida de partículas, sea cuidadoso de mantener el casete lo más nivelado posible.
 - Verifique la apariencia de las partículas, cualquier cambio de su color normal podría indicar una nueva fuente de emisión en el área y tal hecho debe registrarse en el formato de campo.
 - Registre en el formato de campo cualquier observación que pueda sugerir que la muestra obtenida en el proceso no es representativa del área muestreada (por ejemplo, presencia de quemas y/o construcciones cercanas), así como cualquier otra información que indique que la muestra no es válida.
 - Introduzca la carta registro, el filtro expuesto y el formato de campo dentro de un sobre y almacénelos para su posterior análisis. Si las muestras no serán analizadas en periodos cortos de tiempo, se debe almacenar el filtro dentro de un revestimiento protector para reducir al mínimo la pérdida de partículas volátiles. Se recomienda el uso de una carpeta y de un sobre protector de tamaño proporcional al del filtro.
 - Instale el nuevo filtro para un nuevo periodo de monitoreo siguiendo las indicaciones mencionadas en el procedimiento de instalación de filtro.
- 

11.1.3.6. *Control de calidad de las muestras*

- Registre todos los datos requeridos en el formato de campo. La documentación debe incluir la identificación del sitio de monitoreo, número de identificación de filtro, la fecha de la muestra, el tiempo transcurrido, nombre del operador, comentarios respecto al estado del filtro de exposición y todo lo que se solicite en dicho formato.
- Los muestreadores deben funcionar entre 23 y 25 horas. Avise a su supervisor si los muestreadores funcionan fuera de estos límites o si se encuentran funcionamientos de manera defectuosa.
- Para muestreadores PM₁₀ después de cada periodo de muestreo calcule el porcentaje de diferencia entre el Q_a de acuerdo a los cálculos mostrados más adelante y la rata de flujo de diseño (1.13 m³/min), usando la siguiente fórmula:

$$\% \text{ dif} = [(Q_a - 1.13)/1.13] \cdot 100$$

- Registre este valor en la hoja de cálculo. Un flujo aceptable es aquel que se encuentre entre un 90 y 110% del flujo de diseño (1.13 m³/min ± 10%), si este limite es excedido investigue y determine las potenciales fuentes de error inmediatamente, corrija y recalibre el equipo.

11.1.3.7. *Desechado de filtros expuestos*

Los filtros se deben examinar antes de pasar al laboratorio para su análisis respectivo, se debe determinar si se ha incluido toda la información requerida de la muestra y evaluar la condición física de cada filtro con el fin de establecer si es conveniente dicho análisis. Las razones más importantes para anular los filtros expuestos se detallan a continuación:

- Filtro rasgado antes o durante el muestreo.
- Fecha de monitoreo desconocida.
- Flujo o proporción de flujo desconocido.
- Tiempo transcurrido desconocido.
- Más de un filtro para el mismo sitio y fecha.
- Contaminación inusual (ejemplo: deposiciones de pájaros).
- No funcionó el sistema.
- Filtro instalado incorrectamente.

11.1.4. PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE FILTROS

Uno de los factores primordiales de la exactitud de un programa de monitoreo de material particulado es la aplicación adecuada de las técnicas de laboratorio por parte del equipo analítico. Esta sección señala algunas pautas para fortalecer la exactitud de las operaciones de laboratorio y, por lo tanto, de las determinaciones totales en las concentraciones de material particulado.

11.1.4.1. *Manejo de filtros*

Debido a la fragilidad del material de los filtros, los operadores de campo y de laboratorio deben realizar un manejo adecuado de estos. Una medida práctica de relacionar y controlar los filtros es



asignar a cada filtro un número identificador (ID del filtro) correlativo y apilarlos en la misma secuencia de asignación numérica a fin de asegurar que el filtro a utilizar corresponda al primero dentro de la asignación numérica. Una manera de asignar nombre a los filtros es por ejemplo: ZM-PST-001, donde ZM significa Zona Minera, PST indica el contaminante, y 001 el número consecutivo del filtro.

Luego de la exposición, si las muestras van a ser enviadas a laboratorio, el operador de campo debe proveerse de sobres y carpetas adecuadas para la protección de los filtros expuestos durante el transporte al laboratorio analítico. Es importante a la vez asegurar que el reporte de muestreo correspondiente al filtro expuesto permanezca con él en todo momento durante el proceso.

11.1.4.2. *Inspección visual del filtro*

Antes del proceso de pesaje de los filtros, estos deben ser examinados visualmente para asegurar que los filtros defectuosos sean desechados y devueltos al proveedor. Los defectos específicos a buscar son:

- **Agujero pequeño:** un agujero pequeño que aparece como un punto luminoso distinto o brillante cuando es examinado sobre una tabla de luz o una mancha oscura cuando es visualizado encima de una superficie negra.
- **Material sobrepuesto:** cualquier material ajeno o partículas de suciedad en el filtro que requieren ser removidos antes de pesar.
- **Decoloración:** cualquier decoloración visible que podría ser evidencia de un contaminante.
- **Filtro no uniforme:** cualquier no uniformidad visible en la apariencia del filtro que podrían indicar variaciones en la porosidad del filtro.
- **Otro:** un filtro con cualquier imperfección no descrita anteriormente, como superficies irregulares u otros resultados que pudieran ser causales de interferencia en la ejecución.

11.1.4.3. *Acondicionamiento del filtro*

Antes de ser pesados, los filtros deben someterse a un proceso de acondicionamiento por lo menos 24 horas antes. Esto puede hacerse en una cámara de equilibrio o en un salón de pesaje controlado ambientalmente. La humedad relativa se debe establecer en un valor medio constante entre 20 y 45%, con una variabilidad de no más de $\pm 5\%$ y la temperatura en un valor medio constante entre 15 y 30 °C, con una variabilidad de no más de ± 3 °C. La humedad relativa y la temperatura deben ser verificadas y registradas en los días de acondicionamiento (manualmente o por un sistema de programación) para asegurar la conformidad con estos valores señalados. Junto con estos valores, registre en el formato de registro de laboratorio las situaciones de mal funcionamiento, discrepancias en los rangos antes señalados y las actividades de mantenimiento efectuadas.

11.1.4.4. *Procedimiento de pesaje inicial*

Los filtros deben ser pesados en una balanza analítica con una resolución mínima de 0.1 mg y una precisión de 0.5 mg. Se recomienda que cada balanza utilizada en el procedimiento de pesaje sea identificada por un código. A cada balanza se le debe asignar un número determinado de filtros identificados en forma secuencial. El siguiente es el procedimiento recomendado para la determinación de la masa inicial de los filtros:

- Verifique en el formato de registro de laboratorio que la balanza haya sido calibrada (por lo menos anualmente) y mantenida acorde con las recomendaciones del fabricante. Si la balanza no ha sido calibrada dentro del período señalado calíbreala si sus responsabilidades lo
- 

permiten, de acuerdo a lo señalado por el fabricante, o bien, indíquelo en la bitácora para que personal adecuado realice esta operación.

- Coloque a cero la balanza según las indicaciones del fabricante.
- Realice un chequeo de control de calidad usando las masas estándar de referencia en la balanza analítica. (Refiérase al ítem 11.1.4.5).
- Si los filtros deben ser pesados fuera del compartimiento acondicionado, evite interferencias con las partículas higroscópicas ambientales y comience el procedimiento de pesaje en no más de 30 segundos. Pese el filtro según las indicaciones del fabricante y cerciórese de obtener lecturas estables. A intervalos rutinarios, verifique el cero y la calibración de la balanza conforme al ítem 11.1.4.5.

Nota: Tenga cuidado al cargar y descargar la balanza con los filtros, las esquinas y los bordes del filtro no deben topar la puerta de la balanza debido a que el filtro se puede dañar o perder material en el proceso.

- Coloque el filtro pre-pesado, en una carpeta permitiendo visualizar el ID del filtro.
- Registre la identificación de la balanza, el número de identificación del filtro y el peso de la tara en el formato de registro de laboratorio. Cualquier peso del filtro fuera del rango normal debe ser investigado inmediatamente (3.7 a 4.7 g para filtros PM₁₀, y 2.2 a 3.2 g para filtros PST). Recuerde numerar el formulario en forma secuencial.
- Realice los chequeos de control de calidad de los pesos según lo señalado en la sección 11.1.4.5. y entregue la información obtenida al supervisor de QC para revisión.

La hoja de cálculo mostrada en el formato de la Figura 58 (ver sección 11.1.4.5), corresponde a un ejemplo de registro par el pesaje inicial y final de los filtros empleado por la firma consultora.

11.1.4.5. Control de calidad en laboratorio

Verificación de peso estándar. Antes de pesar el primer filtro, verifique que la balanza entregue valores de masa apropiados y fidedignos. Esto, se efectúa pesando un par de masas estándar (valor de masa conocido de referencia) con pesos entre 1 y 5 g. Si los valores reales de referencia y los medidos difieren por más de ± 0.5 mg, se debe informar al supervisor antes de proceder con el pesaje de los filtros definitivos. Si la diferencia entre los valores reales y los medidos se encuentran dentro de ± 0.5 mg, cada filtro se debe pesar al miligramo más cercano.

Verificación de cero y calibración. Cada 5 a 10 operaciones de pesaje, se debe inspeccionar el cero de la balanza y reportar estos valores en el registro interno de control de calidad (Figura 59). Valores entre ± 0.5 mg se consideran aceptables. La calibración de la balanza debe ser verificada por lo menos diariamente y si es posible cada 15 pesajes de filtros. Este chequeo de calibración se hace con las dos masas estándar con pesos entre 1 y 5 g. Cuando los chequeos de cero y de calibración exceden límites aceptables, los filtros previamente pesados deben ser vueltos a revisar.

Verificación de pesos de tara y total. Cada día de operación, se deben volver a pesar entre cinco y siete filtros expuestos y no expuestos. Para filtros de PM₁₀ los pesos de los filtros no expuestos (filtros limpios) deben estar dentro de ± 2.8 mg de los valores originales; en caso contrario se debe investigar la causa del problema y volver a pesar. Debido a la pérdida de componentes volátiles, no se fija ningún límite de aceptación para los filtros expuestos; sin embargo, si la diferencia excede en ± 5.0 mg, el supervisor de QC de laboratorio debe investigar inmediatamente.

Registro de información. Es importante mantener un registro de control de calidad. El libro o



Chequeo de QC para el pesaje

Control de calidad interno del laboratorio



Numero del lote del filtro		Analista	
Numero de Balanza		Supervisor de calidad	

Fecha de Análisis (mm/dd/aa)	Cero (Tara) Peso de Chequeo (mg)	Peso Estandar 1 (mg)	Peso Estandar 2 (mg)

Primera Fecha	Segunda Fecha	Numero de Filtro (Tare or Gross)	Primer pesaje (g)	Segundo Pesaje (g)

Comentarios :

Figura 59. Ejemplo de formato de control de calidad interno de pesaje.

11.1.4.6. Recepción de las muestras provenientes de campo

- Al recibir el filtro expuesto se debe seguir el siguiente procedimiento:
- Examine el formato de campo. Determine si están registrados todos los datos que se necesitan

para verificar la validez de la muestra y para calcular la concentración de material particulado (ejemplo: volumen total, temperatura ambiente, presión barométrica, y tiempo transcurrido). Anule la muestra si faltan datos o si se registró un mal funcionamiento del muestreador.

- Compare el ID del filtro con los datos consignados en el formato de registro de datos de laboratorio, en el que aparece la identificación de la balanza utilizada en el pesaje inicial, el ID del filtro, el peso de la tara del filtro y otra información. Se debe agrupar los filtros según la identificación de la balanza, esto disminuirá la probabilidad de error que podría resultar por el uso de diversas balanzas en el proceso de pesaje inicial y pesaje final del filtro.
- Remueva el filtro de su sobre protector y examine el interior del sobre. Si el material de la muestra se ha desalojado del filtro, recupere tanto como sea posible empleando un cepillo suave. Examine el filtro para verificar si se ha dañado durante el muestreo.
- Coloque los filtros sin defecto en sobres protectores y remítalos al laboratorio para el proceso de pesaje y análisis.
- Coloque los filtros defectuosos en nuevos sobres y limpie de partículas, etiquetándolos con los defectos encontrados para ser analizados por el supervisor.

11.1.4.7. Procedimiento de pesaje final

Los pasos a seguir para el pesaje final de los filtros que han superado el control de calidad son:

- Efectúe el proceso de acondicionamiento de filtro descrito en el ítem 11.1.4.3.
- Repita los pasos descritos en el procedimiento de pesaje inicial del filtro, ítem 11.1.4.4. Registre el peso total en el formato de datos del laboratorio.
- Realice los chequeos internos de QC descritos en la sección 11.1.4.5.
- Coloque el filtro dentro de un sobre protector y archive.

11.1.5. PROCEDIMIENTOS DE CÁLCULO

La metodología de cálculo que se presenta a continuación asume que los muestreadores han sido calibrados oportunamente, siguiendo las pautas establecidas anteriormente en éste documento y que los valores de temperatura y presión barométrica promedios son determinados para cada período de muestreo. Se debe recordar que las medidas de concentración de material particulado en la atmósfera se deben expresar en unidades de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

11.1.5.1. Metodología de cálculo de los niveles de concentración de PM_{10}

Equipos de PM_{10} con controlador de flujo másico MFC

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones reales. El caudal real promedio para el período de muestreo es determinado mediante la siguiente expresión:

$$Q_a = \left[\left[\Delta P_{ex}(\text{media}) \cdot (T_a + 30) / P_a \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

$\Delta P_{ex}(\text{media})$ = Promedio en las lecturas del manómetro del muestreador (pulgadas de agua) =

$$\Delta P_{ex}(media) = \frac{\Delta P_{ex_i} + \Delta P_{ex_f}}{2} \text{ expresada en in de H}_2\text{O}$$

P_a = Presión barométrica ambiente para el día de muestreo (mm Hg)

T_a = temperatura ambiente promedio para el día de muestreo (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador (a condiciones reales)

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador (a condiciones reales)

Si se usa registrador de flujo con escala de raíz cuadrada:

$$Q_a = [I_{media} [(T_a + 30)/P_a]^{0.5} - b] / m$$

Si la carta del registrador de flujo es de escala lineal:

$$Q_a = [I_{media} (T_a + 30)/P_a]^{0.5} - b] / m$$

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones estándar. Para calcular el caudal de aire a condiciones estándar para el periodo de muestreo utilice la siguiente fórmula:

$$Q_{std} = Q_a (P_a / P_{std}) (T_{std} / T_a)$$

Donde:

Q_{std} : Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m³/min

Q_a : Caudal de aire muestreado a condiciones reales en m³/min.

P_a : Presión barométrica promedio durante el periodo de muestreo en mm Hg

T_a : Temperatura ambiente promedio durante el periodo de muestreo en K

P_{std} : Presión barométrica estándar, 760 mm Hg

T_{std} : Temperatura ambiente promedio, 298 K

Cálculo del volumen de aire muestreado a condiciones estándar. El volumen de aire muestreado se calcula mediante el producto del caudal de aire muestreado con el tiempo total de muestreo así:

$$V_{std} = Q_{std} \cdot t$$

Donde:

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m³

Q_{std} = Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m³/min

t = Tiempo total de muestreo en min

Cálculo de la concentración de PM₁₀.

$$C_{PM_{10}} = 10^6 \cdot (W_f - W_i) / V_{std}$$

Donde:

$C_{PM_{10}}$ = Concentración de PM₁₀ en µg/m³.

W_f, W_i = Masas final e inicial del filtro de exposición en g.

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m³.

Equipos de PM₁₀ con controlador de flujo volumétrico (VFC)

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones actuales. El caudal o flujo real promedio para el período de muestreo es calculado determinando el cociente del promedio de la presión absoluta de estancamiento y el promedio de la presión barométrica ambiental (P_1/P_a) y la temperatura ambiental promedio (T_a) para el período de muestreo.

Nota: Recuerde convertir las lecturas del manómetro de pulgadas de agua a milímetros de mercurio, usando la ecuación siguiente:

$$\Delta P_{stg} (mm Hg) = 25.4 \cdot \Delta P_{stg} (in H_2O) / 13.6$$

Determine el valor de la relación de presión de estancamiento P_1/P_a .

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{P_a - \Delta P_{stg} (media)}{P_a}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica promedio para el periodo de muestreo (mm Hg).

$\Delta P_{stg}(media)$ = Promedio de las lecturas inicial y final de presión de estancamiento (mm Hg).

Si posee la tabla de calibración del equipo determine Q_a para el período de muestreo, ingresando con los valores de P_1/P_a y T_a . Este dato corresponde al valor del caudal volumétrico promedio para el periodo de muestreo.

En caso que no cuente con la tabla de calibración del equipo, utilice la relación de calibración del equipo muestreador, determinada durante el proceso de calibración del mismo, para determinar el valor de Q_a de la siguiente forma:

$$Q_a = [(P_1/P_a) - b] \cdot T_a^{0.5} / m$$

Donde:

P_1/P_a = Relación de presión de estancamiento como aparece más arriba.

T_a = temperatura ambiente promedio para el periodo de muestreo (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador (a cond. reales).

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador (a cond. reales).

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones estándar. Para calcular el caudal de aire a condiciones estándar para el periodo de muestreo utilice la siguiente fórmula:

$$Q_{std} = Q_a (P_a / P_{std}) (T_{std} / T_a)$$

Donde:

Q_{std} = Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m³/min

Q_a = Caudal de aire muestreado a condiciones reales en m³/min.

P_a = Presión barométrica promedio durante el periodo de muestreo en mm Hg
 T_a = Temperatura ambiente promedio durante el periodo de muestreo en K
 P_{std} = Presión barométrica estándar, 760 mm Hg
 T_{std} = Temperatura ambiente promedio, 298 K

Cálculo del volumen de aire muestreado a condiciones estándar. El volumen de aire muestreado se calcula mediante el producto del caudal de aire muestreado con el tiempo total de muestreo así:

$$V_{std} = Q_{std} \cdot t$$

Donde:

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m^3
 Q_{std} = Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m^3/min
 t = Tiempo total de muestreo en min

Cálculo de la concentración de PM_{10} .

$$C_{PM_{10}} = 10^6 \cdot (W_f - W_i) / V_{std}$$

Donde:

$C_{PM_{10}}$ = Concentración de PM_{10} en $\mu g/m^3$
 W_f, W_i = Masas final e inicial del filtro de exposición en g
 V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m^3

11.1.5.2. Metodología de cálculo de los niveles de concentración de PST

Equipos de PST con controlador de flujo másico (MFC)

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones reales. El caudal real promedio para el período de muestreo es determinado mediante la siguiente expresión:

$$Q_{std}(media) = \left[\left[\Delta P_{ex}(media) \left(P_a / P_{std} \right) \left(T_{std} / T_a \right) \right]^{0.5} - b \right] / m$$

Donde:

$Q_{std}(media)$: Tasa de flujo estándar promedio del muestreador (m^3/min), (o caudal de aire muestreado a condiciones estándar)
 $\Delta P_{ex}(media)$: Promedio de las lecturas inicial y final del manómetro del muestreador (in de agua).
 P_{std} : Presión estándar (760 mm Hg).
 T_{std} : Temperatura estándar (298 K).
 P_a : Presión barométrica (mm Hg).
 T_a : Temperatura ambiente (K).
 m : Pendiente de la relación de calibración del muestreador (a condiciones estándar para PST)
 b : Intercepción de la relación de calibración del muestreador (a condiciones estándar para PST)

Cálculo del volumen de aire muestreado a condiciones estándar. El volumen de aire muestreado se calcula mediante el producto del caudal de aire muestreado con el tiempo total de muestreo:

$$V_{std} = Q_{std} \cdot t$$

Donde:

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m^3

Q_{std} = Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m^3/min

t = Tiempo total de muestreo en min

Cálculo de la concentración de PST

$$C_{PST} = 10^6 \cdot (W_f - W_i) / V_{std}$$

Donde:

C_{PST} = Concentración de PST en $\mu g/m^3$

W_f, W_i = Masas final e inicial del filtro de exposición en g

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m^3

Equipos de PST con controlador de flujo volumétrico (VFC)

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones actuales. El caudal o flujo real promedio para el período de muestreo es calculado determinando el cociente del promedio de la presión absoluta de estancamiento y el promedio de la presión barométrica ambiental (P_1/P_a) y la temperatura ambiental promedio (T_a) para el período de muestreo.

Nota: Recuerde convertir las lecturas del manómetro de pulgadas de agua a milímetros de mercurio, usando la ecuación siguiente:

$$\Delta P_{stg} (mm Hg) = 25.4 \cdot \Delta P_{stg} (in H_2O) / 13.6$$

Determine el valor de la relación de presión de estancamiento P_1/P_a .

$$\frac{P_1}{P_a} = \frac{P_a - \Delta P_{stg} (media)}{P_a}$$

Donde:

P_a = Presión atmosférica promedio para el periodo de muestreo (mm Hg)

$\Delta P_{stg} (media)$ = Promedio de las lecturas inicial y final de presión de estancamiento (mm Hg)

Si posee la tabla de calibración del equipo determine Q_a para el período de muestreo, ingresando con los valores de P_1/P_a y T_a . Este dato corresponde al valor del caudal volumétrico promedio para el periodo de muestreo.

En caso que no cuente con la tabla de calibración del equipo, utilice la relación de calibración del equipo muestreador, determinada durante el proceso de calibración del mismo, para determinar el valor de Q_a de la siguiente forma:

$$Q_a = [(P_1/P_a) - b] \cdot T_a^{0.5} / m$$

Donde:

P_1/P_a = Relación de presión de estancamiento como aparece más arriba.

T_a = temperatura ambiente promedio para el periodo de muestreo (K).

m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador (a cond. reales)

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador (a cond. reales)

Cálculo del caudal o rata de flujo a condiciones estándar. Para calcular el caudal de aire a condiciones estándar para el periodo de muestreo utilice la siguiente fórmula:

$$Q_{std} = Q_a (P_a / P_{std}) (T_{std} / T_a)$$

Donde:

Q_{std} = Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m^3/min .

Q_a = Caudal de aire muestreado a condiciones reales en m^3/min .

P_a = Presión barométrica promedio durante el periodo de muestreo en mm Hg.

T_a = Temperatura ambiente promedio durante el periodo de muestreo en K.

P_{std} = Presión barométrica estándar, 760 mm Hg.

T_{std} = Temperatura ambiente promedio, 298 K.

Cálculo del volumen de aire muestreado a condiciones estándar. El volumen de aire muestreado se calcula mediante el producto del caudal de aire muestreado con el tiempo total de muestreo así:

$$V_{std} = Q_{std} \cdot t$$

Donde:

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m^3

Q_{std} = Caudal de aire muestreado a condiciones estándar en m^3/min

t = Tiempo total de muestreo en min

Cálculo de la concentración de PST

$$C_{PST} = 10^6 \cdot (W_f - W_i) / V_{std}$$

Donde:

C_{PST} = Concentración de PST en $\mu g/m^3$.

W_f, W_i = Masas final e inicial del filtro de exposición en g.

V_{std} = Volumen total de aire muestreado a condiciones estándar en m^3 .

11.1.6. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE CONCENTRACIÓN

Los datos necesarios para calcular las concentraciones tanto de PST como de PM_{10} se originan en dos fuentes de datos: operaciones de campo y de laboratorio. Estos datos deben validarse para asegurar que las mediciones de PM_{10} y PST reportadas son los adecuados con respecto al programa

global de aseguramiento de calidad. Cuando las concentraciones máscas finales de PST o PM_{10} se han calculado, el procedimiento de validación no solo chequeará estos cálculos, sino que ayudará a detectar las concentraciones cuestionables (ejemplo: valores extremadamente altos o bajos).

Los pasos del procedimiento de validación de datos son los siguientes:

1. Recolectar la siguiente información para cada muestra:

- Tiempo total de muestreo en minutos
- Tasa de flujo volumétrica real Q_a (m^3/min) para el caso de muestreadores de PM_{10} o tasa de flujo volumétrica estándar Q_{std} (m^3/min) en caso de muestreadores de PST con controlador de flujo máscico. Los equipos de PST con controlador de flujo volumétrico pueden trabajar con Q_a o Q_{std} , debe consultarse el manual del fabricante. Sin embargo en todos los casos las concentraciones máscas de PM_{10} o PST deben calcularse para condiciones estándar de 760mmHg y 25 °C.
- Peso inicial y final de los filtros, W_i y W_f .

2. Recalcular las concentraciones de PM_{10} y PST para uno de cada quince datos. Esta frecuencia puede ajustarse basado en la experiencia y en el nivel de calidad de los datos. Además el uso de hoja de cálculo al hallar las concentraciones evita el hecho de tener que recalcular sino simplemente se verificará que la fórmula y los enlaces de la celda de cálculo coincidan con las fórmulas del manual del fabricante o con las del Quality Assurance Handbook, Vol II, Part II. La frecuencia de recálculo de datos puede disminuirse si se estima que los datos son de buena calidad, o incrementarse si los datos son de dudosa calidad. Es más importante asegurarse que el chequeo de validación es representativo de las diversas condiciones que pueden influenciar la calidad de los datos que acogerse a una frecuencia fija.

3. Comparar cada concentración validada de PM_{10} o de PST con el valor original reportado. Corregir los errores encontrados e indicar la fecha de corrección. Si se encontrara un alto porcentaje de errores se deben chequear datos adicionales calculados o todo el bloque de datos y proceder a investigar y corregir la causa.

4. Escanear visualmente todos los valores de concentraciones; notar aquellos que parezcan excesivamente altos o bajos e investigar. Repetir los pasos 2 y 3 para estas muestras.

5. Si los cálculos de concentración parecen correctos y sin embargo se tienen valores cuestionablemente muy altos o muy bajos, se procederá a revisar todos los datos originales (ejemplo: tiempo de muestreo, tasa de flujo volumétrica real y su subsiguiente corrección a condiciones estándar) con el fin de asegurar integridad y que se tengan concentraciones correctas.

11.1.7. PROCEDIMIENTOS DE CONTROL DE CALIDAD EN CAMPO

Como se ha mencionado en el plan de calidad, para muestreadores de PM_{10} de alto volumen, el Quality Assurance Handbook, Vol II, Part II de la EPA aconseja realizar un chequeo de calibración en campo de la tasa de flujo operativa al menos una vez al mes. El propósito de este chequeo es revisar la estabilidad de la calibración del muestreador. Se deberá mantener una gráfica de control como el de la Figura 60 en el que se presente la diferencia en porcentaje entre las tasas de flujo medidas e indicadas. Este cuadro da una rápida referencia de problemas en cambios en la tasa de flujo del instrumento y es útil para revisar el desempeño del muestreador. Se mantendrá en una hoja de cálculo para documentar la información del chequeo de flujo. Esta información incluye,



pero no se limita a, números de serial y modelo del instrumento y del orificio de transferencia normal, condiciones de presión y temperatura ambiente, y datos del chequeo de flujo tomados.

En esta sección se asume lo siguiente:

- La tasa de flujo a través de un muestreador equipado con un controlador de flujo másico se indica por la presión plena del orificio de salida. Esta presión se mide con un manómetro (o registrador de flujo).
- La tasa de flujo a través de un muestreador equipado con un controlador de flujo volumétrico se indica por la presión de estancamiento. Esta presión se mide con un manómetro.
- Ambos tipos de modelos de muestreador están diseñados para operar a una tasa de flujo de $1.13 \text{ m}^3/\text{min}$, con un rango de fluctuación de la tasa de flujo de un 10% de este valor.
- El mecanismo de transferencia normal será un orificio equipado con un manómetro de agua o aceite.
- La relación de calibración del orificio de transferencia normal está en términos de la tasa de flujo volumétrica real (Q_a).

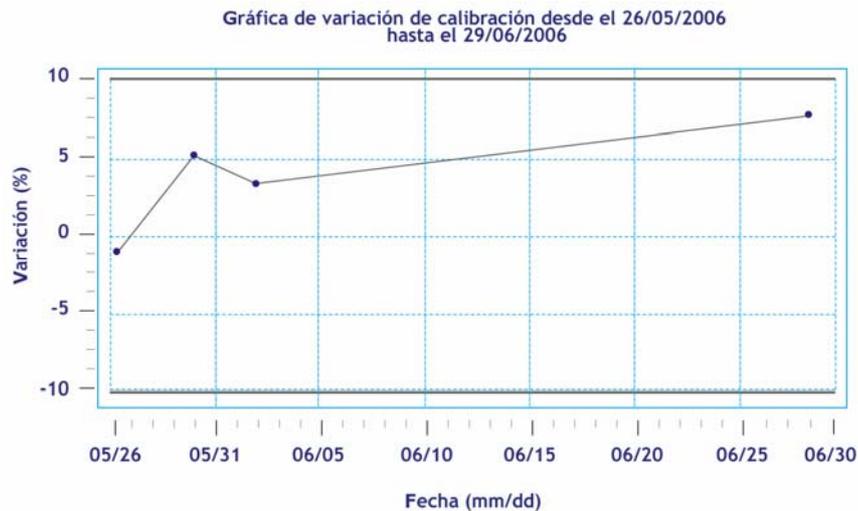


Figura 60. Ejemplo de gráfica de control de calidad para validación en campo de tasas de flujo.

11.1.7.1. Procedimiento de chequeo de flujo (QC) - Muestreadores MFC

La tasa de flujo indicada para muestreadores MFC ($Q_a(\text{muestreador})$) se calcula determinando primero la lectura en el manómetro de la presión plena del orificio de salida (o la lectura del registrador de flujo), luego, la temperatura ambiente (T_a), y finalmente la presión barométrica (P_a) durante el chequeo de flujo. Estos valores son aplicados a la relación de calibración del muestreador. Los registradores de presión (flujo) de 4 pulgadas que generalmente se suministran con los muestreadores de alto volumen de PM_{10} no son por lo general lo suficientemente precisos y no se recomiendan para hallar presiones del muestreador cuantitativas o medidas del flujo. El registrador de flujo puede conectarse en paralelo con el manómetro u otro mecanismo que mida presión, usando una conector tubular en “T” o “Y”.

Nota: No intente llevar a cabo un chequeo de flujo de muestreadores PM_{10} bajo condiciones atmosféricas con viento. Fluctuaciones en la velocidad del viento de corto plazo producirán lecturas de presión variables en el manómetro del orificio de transferencia normal. El chequeo

de flujo será menos preciso debido a estas variaciones.

Un procedimiento de control de calidad de chequeo de flujo alterno puede tenerse en el manual de operación del fabricante. Se recomienda leer y revisar el manual y que se evalúen los diferentes métodos. El equipo que se disponga y la simplicidad de los procedimientos deben tenerse en cuenta al determinar cuál método utilizar.

El siguiente procedimiento podrá hacerse mediante un registro en una hoja de cálculo:

1. Aliste el siguiente equipo y transpórtelo a la estación de monitoreo. Este equipo puede ser el mismo usado para las calibraciones.

- Orificio transmisor de flujo normal calibrado y su relación de calibración.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 400 mm (0 - 16 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in) para medición en el orificio de transferencia normal.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 200 mm (0 - 8 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in) para medición de la presión plena en el orificio de salida del muestreador. Este manómetro debería ser el mismo al usado habitualmente para mediciones de la tasa de flujo del muestreador.
- Termómetro capaz de medir de una manera precisa temperaturas del aire ambiente en un rango de 0 - 50 °C y precisión de 0.1 °C. El termómetro debe ser trazable con una precisión de 0.1 °C a un termómetro certificado por NIST o a un termómetro ASTM.
- Barómetro aneroide portátil (ej. un altímetro de escalador o de ingeniero) capaz de medir de una manera precisa presión barométrica ambiental en un rango de 500 - 800 mmHg (66 a 106KPa) con precisión al mmHg.
- La información de calibración del muestreador.
- Filtro limpio para el chequeo del flujo.
- Hoja de cálculo de chequeo de flujo para muestreador MFC.

2. Registre el número de serial del muestreador, número de identificación del filtro, localización del sitio y fecha de muestreo al reverso de una carta limpia e instale la carta en el registrador de flujo. Mientras instale la carta, no doble el brazo del lapicero más allá de sus límites de extensión. Levante la tapa del lapicero presionando en la parte superior de este (o usando el botón) y simultáneamente inserte la carta.⁵⁶

3. Baje el brazo del lapicero y golpee suavemente hacia el lado del registrador para asegurarse que el lapicero esté libre.³³

4. Usando una moneda o un destornillador ranurado, adelante la carta y chequee que el lapicero permanece en cero (el diámetro del círculo más pequeño). Si es necesario, ajuste el tornillo puesto en cero mientras golpea suavemente a un lado del registrador de flujo. Un cuarto de giro del tornillo colocado usualmente genera desplazamientos grandes; ajuste con cuidado el tornillo colocado.³³

5. Instale un filtro limpio en el muestreador. Coloque el filtro directamente sobre la pantalla del filtro del muestreador. No use un casete de filtro. Nunca debería usarse un filtro para el chequeo de flujo para muestreos posteriores puesto que partículas > 10 µm pueden colectarse en el filtro mientras que se levanta la entrada. La masa muestreada será sesgada como resultado de usar un filtro para tanto el chequeo de flujo como para un muestreo posterior.

⁵⁶ *Nota: Los pasos 2, 3 y 4 solamente se realizan si se cuenta con registrador de flujo.*



6. Instale el orificio de transferencia normal y su placa de recubrimiento al muestreador. No restrinja la tasa de flujo a través del orificio (usando placas de resistencia fija o cerrando la válvula de resistencia variable).

Precaución: Asegure las tuercas de la placa de recubrimiento en esquinas alternas para eliminar fugas y para asegurar que se asegura de una manera uniforme. Las tuercas solo deben asegurarse manualmente porque mucha compresión puede dañar el empaque sellante. Asegúrese que el empaque del orificio de transferencia normal está en su sitio y que el orificio de transferencia normal no está mal enroscado sobre la placa de recubrimiento.

7. Conecte el manómetro del orificio al puerto de presión del orificio de transferencia normal y el manómetro del muestreador al orificio de salida de este. Inspeccione las tuberías que conectan los manómetros no tengan irregularidades o fracturas. Abra las válvulas del manómetro y sople suavemente a través del tubo mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste la escala de los manómetros de modo que sus líneas de cero estén en el fondo de sus meniscos. Asegúrese que el tubo conector encaja cómodamente el manómetro y el puerto de presión.

8. Encienda el muestreador y permita que se equilibre a la temperatura ambiente (3 a 5 minutos).

Nota: La entrada del muestreador puede bajarse parcialmente sobre el orificio de transferencia estándar para actuar como protección contra la corriente de aire (si no se tiene tal protección). Use un bloqueo para dar al menos 2 pulgadas de espacio libre en el fondo para flujo del aire y para la tubería del manómetro.

9. Lea y registre los siguientes parámetros en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador MFC:

- Fecha y ubicación del muestreador.
- Modelo y número de serial del muestreador.
- Temperatura ambiente en grados centígrados (°C) y en Kelvin (K).
- Presión barométrica ambiente (P_a) en mmHg o KPa.
- Condiciones inusuales del clima.
- Número serial del orificio de transferencia normal S/N y la relación de calibración.
- Firma del operador.

10. Registre el ΔH_2O del orificio mediante la lectura de deflexión en el manómetro. Registre el dato en la hoja de cálculo.

11. Mida la presión plena en el orificio de salida (ΔP_{ex}) leyendo la deflexión del manómetro. Registre el dato en la hoja de cálculo.

12. Usando una moneda o un destornillador pequeño, avance la carta registradora para leer la respuesta correspondiente del muestreador (I) y registre el dato en la hoja de cálculo. Un leve golpe en la cara del registrador es usualmente necesario para asegurar que el lapicero no se pegue a la carta.⁵⁷

13. Apague el muestreador y remueva el orificio de transferencia normal, pero no el filtro. Encienda el muestreador y repita los pasos 11 (o 12, en caso de tener un registrador de flujo) para chequear la tasa de flujo bajo condiciones de operación normales. Registre los datos de ΔP_{ex} o I,

⁵⁷ *Nota:* El paso 12 solamente se realiza si se cuenta con registrador de flujo.

sin orificio instalado en la hoja de cálculo.

14. Calcule y registre $Q_a(\text{orificio})$ a condiciones reales usando la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{orificio}) = \left\{ [(\Delta H_2O)(T_a/P_a)]^{0.5} - b \right\} \cdot (1/m)$$

Donde:

Q_a = Tasa de flujo volumétrica real como la indica el orificio de transferencia normal (m^3/min).

ΔH_2O = Caída de presión en el orificio medida en mm (milímetros) o pulgadas (in) de agua.

P_a = Presión ambiente durante el chequeo (mmHg).

T_a = Temperatura ambiente durante el chequeo (K) ($K = ^\circ\text{C} + 273$).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio.

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio.

r = Coeficiente de correlación de la relación de calibración del orificio.

15. Calcule y registre la tasa de flujo del muestreador a condiciones reales y regístrela:

$$Q_a(\text{muestreador}) = \left\{ [(\Delta P_{ex}(T_a + 30)/P_a)]^{0.5} - b \right\} \cdot (1/m)$$

O si se usa un registrador de flujo para medir la presión plena en el orificio de salida,

$$Q_a(\text{muestreador}) = \left\{ [I(T_a + 30)/P_a]^{0.5} - b \right\} \cdot (1/m)$$

Donde:

$Q_a(\text{muestreador})$ = Tasa de flujo real del muestreador (m^3/min).

ΔP_{ex} = Lectura de presión en el manómetro del muestreador medida en mm (milímetros) o pulgadas (in) de agua.

I = Lectura de la carta record de flujo, unidades arbitrarias.

P_a = Presión ambiente durante el chequeo (mmHg).

T_a = Temperatura ambiente durante el chequeo (K) ($K = ^\circ\text{C} + 273$).

m = Pendiente de la relación de calibración del muestreador.

b = Intercepto de la relación de calibración del muestreador MFC.

r = Coeficiente de correlación de la relación de calibración del muestreador.

Nota: Si se usan cartas record con escalas de función lineales, sustituya $I^{1/2}$ por I .

16. Usando esta información y las fórmulas dadas en la hoja de cálculo, calcule la diferencia en porcentaje del chequeo de QC:

$$\text{Diferencia en \% del chequeo de QC} = 100 \cdot (Q_a(\text{muestreador}) - Q_a(\text{orificio})) / Q_a(\text{orificio})$$

Donde: $Q_a(\text{orificio})$ es medida con el orificio de transferencia normal instalado.

Registre este valor en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador MFC y trace el punto en el gráfico de control de calidad del muestreador. Si la tasa de flujo del muestreador está entre 90 y 110 por ciento ($\pm 10\%$ de diferencia) de la tasa de flujo calculada $Q_a(\text{orificio})$ en unidades volumétricas reales, la calibración del muestreador es aceptable. Si la diferencia supera $\pm 10\%$

Investigue y corrija cualquier funcionamiento defectuoso. Recalibre el muestreador antes de continuar. Las diferencias que excedan de ± 10 por ciento pueden dar como resultado invalidar todos los datos recolectados posteriores a la última calibración o chequeo de flujo válido. Antes de invalidar cualquier dato, verifique la calibración del orificio de transferencia normal y los cálculos.

17. Calcule la tasa de flujo del muestreador corregida, $Q_a(\text{muestreador corregida})$ usando la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{muestreador corregida}) = Q_a(\text{muestreador}) \cdot (100 - \% \text{ de diferencia}) / 100$$

Donde: $Q_a(\text{muestreador})$ es medido sin el orificio de transferencia normal instalado y donde el porcentaje (%) diferencia corresponde al obtenido en el paso 16.

18. Calcule y registre en la hoja de cálculo la diferencia en porcentaje entre la tasa de flujo de diseño de entrada (ej. $1.13 \text{ m}^3/\text{min}$) y la tasa de flujo del muestreador corregida como:

$$\text{Diferencia en \% con la tasa de flujo de diseño} = 100 \cdot (Q_a(\text{muestreador}) - 1.13) / 1.13$$

En esta sección se asume que la entrada está diseñada para operar a una tasa de flujo real de $1.13 \text{ m}^3/\text{min}$. Si la diferencia en porcentaje de la tasa de flujo de diseño es menor o igual a $\pm 10\%$, la calibración del muestreador es aceptable. Si la diferencia supera $\pm 10\%$ investigue fuentes de error potenciales y corrija cualquier funcionamiento defectuoso. Recalibre el muestreador antes de continuar con un muestreo. Las diferencias que excedan de ± 10 por ciento pueden dar como resultado invalidar todos los datos recolectados posteriores a la última calibración o chequeo de flujo válido. Antes de invalidar cualquier dato, chequee la calibración del muestreador y la calibración del orificio de transferencia normal y los cálculos.

Nota: Las desviaciones de la tasa de flujo de diseño pueden deberse en parte a desviaciones de la temperatura y presión en sitio de las condiciones promedio estacionales (en caso de aplicar). Vuelva a calcular el SSP estacional para determinar si el controlador de flujo debería ajustarse.

19. Coloque el muestreador para el siguiente período de muestreo de acuerdo al procedimiento de muestreo.

11.1.7.2. Procedimiento de chequeo de flujo (QC) - Muestreadores VFC

La tasa de flujo indicada para muestreadores VFC ($Q_a(\text{muestreador})$) se calcula determinando los siguientes valores y en el siguiente orden: (1) la presión de estancamiento relativa (ΔP_{stg}), (2) la temperatura ambiente (T_a), y (3) la presión barométrica (P_a) durante el chequeo de flujo. Estos valores luego se aplican a la relación de calibración del muestreador.

Nota: No intente llevar a cabo un chequeo de flujo de muestreadores PM_{10} bajo condiciones atmosféricas con viento. Fluctuaciones en la velocidad del viento de corto plazo producirán lecturas de presión variables en el manómetro del orificio de transferencia normal. El chequeo de flujo será menos preciso debido a estas variaciones.

Un procedimiento de control de calidad de chequeo de flujo alterno puede tenerse en el manual de operación del fabricante. Se recomienda leer y revisar el manual y que se evalúen los

diferentes métodos. El equipo que se disponga y la simplicidad de los procedimientos deben tenerse en cuenta al determinar cuál método utilizar.

El procedimiento siguiente podrá hacerse mediante un registro en una hoja de cálculo.

1. Aliste el siguiente equipo y transpórtelo a la estación de monitoreo.

- Orificio transmisor de flujo normal calibrado y su relación de calibración en unidades de flujo volumétrico real o Q_a .
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 400 mm (0 - 16 in) y escala mínima de 2 mm (0.1in) para medición en el orificio de transferencia normal.
- Manómetro de agua o aceite con rango de 0 - 1000 mm (0 - 36 in) y escala mínima de 2 mm (0.1 in) u otro mecanismo de medición de presión para medir la presión de estagnación o estancamiento del muestreador. Lo ideal es que este manómetro estuviera asociado al muestreador. *Nota: Los manómetros usados para chequeos de QC de flujo pueden estar sujetos a daños o funcionamientos defectuosos y por lo tanto deben chequearse constantemente.*
- Termómetro capaz de medir de una manera precisa temperaturas del aire ambiente en un rango de 0 - 50 °C y precisión de 0.1 °C. El termómetro debe ser trazable con una precisión de 0.1 °C a un termómetro certificado por NIST o a un termómetro ASTM.
- Barómetro aneroide portátil (ej. un altímetro de escalador o de ingeniero) capaz de medir de una manera precisa presión barométrica ambiental en un rango de 500 - 800 mmHg (66 a 106 KPa) con precisión al mmHg.
- La información de calibración del muestreador.
- Un filtro de chequeo de flujo limpio cargado en un casete para filtro
- Hoja de cálculo de chequeo de flujo para muestreador VFC.

2. Monte el sistema de chequeo de flujo. A los muestreadores VFC normalmente se les hace el chequeo de flujo con un casete cargado con filtro en línea (es decir entre el orificio de transferencia normal y el motor). El orificio de transferencia normal debería instalarse sin placas de resistencia fijas o con la válvula de resistencia variable totalmente abierta.

Nunca debería usarse un filtro para el chequeo de flujo para muestreos posteriores puesto que partículas mayores a 10 μm pueden colectarse en el filtro mientras que se levanta la entrada. La masa muestreada será sesgada como resultado de usar un filtro para tanto el chequeo de flujo como para un muestreo posterior.

Precaución: Asegure las tuercas de la placa de recubrimiento en esquinas alternas para eliminar fugas y para asegurar que se asegura de una manera uniforme. Las tuercas solo deben asegurarse manualmente porque mucha compresión puede dañar el empaque sellante. Asegúrese que el empaque del orificio de transferencia normal está en su sitio y que el orificio de transferencia normal no está mal enroscado sobre la placa de recubrimiento.

3. Encienda el muestreador y permita que se equilibre a la temperatura ambiente (3 a 5 minutos). *Nota:* la entrada del muestreador puede bajarse parcialmente sobre el orificio de transferencia normal para actuar como un protector de succión (si no se provee de un protector). Use un bloqueo para dar al menos 2 pulgadas libres al fondo para el flujo de aire y para la tubería del manómetro.

4. Lea y registre los siguientes parámetros en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador MFC:

- Fecha y ubicación del muestreador.
 - Modelo y número de serial del muestreador.
- 

- Temperatura ambiente en grados centígrados (°C) y en Kelvin (K).
- Presión barométrica ambiente (P_a) en mmHg o kPa.
- Condiciones inusuales del clima.
- Número serial del orificio de transferencia normal S/N y la relación de calibración
- Firma del operador.

5. Inspeccione que el manómetro no tenga irregularidades o fracturas en su tubo conector. Abra las válvulas y sople suavemente a través del tubo del manómetro mientras observa que haya flujo libre del fluido. Ajuste las escalas corredizas de los manómetros de modo que sus líneas de cero estén en el fondo de sus meniscos.

6. Conecte el manómetro del orificio al orificio de transferencia normal, y el manómetro del muestreador al puerto de presión de estancamiento del muestreador situado a un lado de la base del muestreador. Asegúrese que un lado de cada manómetro esté abierto a la presión atmosférica. Asegúrese que los tubos conectores ajustan adecuadamente a los puertos de presión y a los manómetros.

7. Lea la caída de presión como la indica el manómetro del orificio (ΔH_2O) y regístrela en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador VFC. Lea la caída de presión de estancamiento ΔP_{stg} (mmHg) (con orificio instalado) y regístrela en la hoja de cálculo.

Nota: Asegúrese de convertir ΔP_{stg} a mmHg usando la ecuación siguiente antes de registrar la lectura en la hoja de cálculo:

$$mmHg = 25.4(in H_2O/13.6)$$

8. Apague el muestreador y quite el orificio de transferencia normal

9. Con únicamente un casete de filtro cargado en línea, encienda el muestreador y permita que se caliente a la temperatura de operación.

10. Lea y registre la caída de la presión de estancamiento (ΔP_{stg}) para la tasa de flujo operativa normal (sin orificio instalado). Apague el muestreador. Reemplace la tapa de vacío sobre el puerto de la presión de estancamiento.

11. Calcule y registre la tasa de flujo Q_a (orificio) para el punto de chequeo de flujo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_a(\text{orificio}) = \left\{ [(\Delta H_2O)(T_a/P_a)]^{0.5} - b \right\} \cdot (1/m)$$

Donde:

Q_a (orificio)= Flujo volumétrico real como lo indica el orificio de transferencia normal (m^3/min).

ΔH_2O = Caída de presión en el orificio medida en mm (milímetros) o in (pulgadas) de agua.

P_a = Presión ambiente durante el chequeo (mmHg).

T_a = Temperatura ambiente durante el chequeo (K) ($K = ^\circ C + 273$).

m = Pendiente de la relación de calibración del orificio.

b = Intercepto de la relación de calibración del orificio.

r = Coeficiente de correlación de la relación de calibración del orificio.

12. Calcule y registre el valor de P_1 (mmHg) para las mediciones con y sin el orificio instalado.

$$P_1 = P_a - \Delta P_{stg}$$

Donde:

P_1 = presión de estancamiento, mmHg.

P_a = presión ambiente barométrica, mmHg.

ΔP_{stg} = caída en la presión de estancamiento, mmHg.

13. Calcule y registre la relación de la presión de estagnación o estancamiento para las mediciones con y sin orificio instalado.

$$\text{Relación presión de estancamiento} = P_1/P_a$$

Donde

P_1 = Presión de estagnación, mmHg.

P_a = presión barométrica ambiente, mmHg.

14. Refiérase a la tabla look up del fabricante del instrumento (o la relación de calibración alterna) y determine las tasas de flujo Q_a (muestreador) para las mediciones con y sin el orificio instalado como se indica con la relación de P_1/P_a y la temperatura ambiente en grados centígrados o grados Celsius (°C). Registre estos valores en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador VFC.

15. Usando Q_a (orificio) y Q_a (muestreador) para las mediciones con el orificio instalado, calcule la diferencia en porcentaje del chequeo de QC así:

$$\text{Diferencia en \% del chequeo de QC} = 100 \cdot (Q_a(\text{muestreador}) - Q_a(\text{orificio})) / Q_a(\text{orificio})$$

Registre este valor en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador VFC y grafique el punto en la gráfica de control de chequeos de flujo de QC. Si la diferencia en porcentaje es menor que $\pm 10\%$, la calibración del muestreador es aceptable. Si la diferencia en porcentaje supera $\pm 10\%$ se requiere una nueva calibración. Se debe investigar entonces y corregir cualquier funcionamiento defectuoso. Recalibre el muestreador antes de continuar. Las diferencias que excedan de ± 10 por ciento pueden dar como resultado invalidar todos los datos recolectados posteriores a la última calibración o chequeo de flujo válido. Antes de invalidar cualquier dato chequee la calibración del muestreador, la calibración del orificio de transferencia normal y todas las calibraciones.

16. Usando esta diferencia en porcentaje y Q_a (muestreador) de las mediciones sin el orificio instalado (es decir, para la tasa de flujo operativa normal), calcule la tasa de flujo del muestreador corregida como:

$$Q_a(\text{correigda del muestreador}) = Q_a(\text{muestreador}) (100 - \% \text{ diferencia}) / 100$$

Registre Q_a (correigda del muestreador) en la hoja de cálculo de chequeos de flujo del muestreador VFC.

17. Determine la diferencia en porcentaje entre la tasa de flujo de diseño de entrada y la tasa de flujo del muestreador corregida.

Diferencia en % con la tasa de flujo de diseño = $100 \cdot (Q_a(\text{corregida del muestreador}) - 1.13) / 1.13$

Registre este valor en la hoja de cálculo de chequeo de flujo del muestreador VFC y grafique el punto en la gráfica de control de validación en campo de tasas de flujo. Cuando grafique este valor, use un símbolo diferente al usado normalmente al graficar valores obtenidos en los muestreos. Si la diferencia en porcentaje es $< \pm 10\%$, la calibración del muestreador es aceptable. Si la diferencia supera $\pm 10\%$ entonces se requerirá recalibración. Proceda a investigar fuentes de error potenciales y corrija cualquier funcionamiento defectuoso. Las diferencias que excedan de ± 10 por ciento pueden dar como resultado invalidar todos los datos recolectados posteriores a la última calibración o chequeo de flujo válido. Antes de invalidar cualquier dato, chequee la calibración del muestreador, la calibración del orificio de transferencia normal y todos los cálculos.

11.2. MÉTODO DE REFERENCIA PARA LA DETERMINACIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN LA ATMÓSFERA (MÉTODO PARARROSANILINA)

11.2.1. APLICABILIDAD

Este método proporciona una medida de la concentración de dióxido de azufre (SO_2) en el ambiente para determinar el cumplimiento de los límites máximos permisibles de calidad del aire para óxidos de azufre (dióxido de azufre). El método es aplicable a la medición de concentraciones de SO_2 en el ambiente usando períodos de toma de muestra de 30 minutos a 24 horas.

11.2.2. PRINCIPIO

Un volumen medido de aire es burbujeadado por una solución de 0.04 M de *tetracloromercurato de potasio (TCM)*. El SO_2 presente en la corriente de aire, reacciona con la solución TCM para formar el compuesto estable monoclorsulfonatomercuroso. Una vez formado, este compuesto resiste la oxidación del aire y es estable en la presencia de oxidantes fuertes como el ozono y los óxidos de nitrógeno. Durante el análisis subsiguiente, el compuesto es reaccionado con el tinte de ácido blanqueado de pararrosanilina y formaldehído para formar un ácido sulfónico metilo de pararrosanilina intensamente coloreado. La densidad óptica de esta especie es determinada espectrofotométricamente a 548 nm y está directamente relacionado con la cantidad de SO_2 colectado. El volumen total de aire muestreado, corregido a condiciones de referencia (25 °C, 760mmHg [101.325 KPa]), es determinado de la tasa de flujo medida y el tiempo de muestra. La concentración de SO_2 en el aire ambiente es calculada y expresada en microgramos por metro cúbico estándar ($\mu\text{g}/\text{std m}^3$).

11.2.3. RANGO

El límite inferior de detección de SO_2 en 10 ml de TCM es 0.75 μg (basado en resultados de pruebas en colaboración). Esto representa una concentración de 25 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ (0.01 ppm) en una muestra de aire de 30 litros estándar (prueba de corta duración) y una concentración de 13 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ (0.005 ppm) en una muestra de aire de 288 litros estándar (prueba de larga duración). Las concentraciones menores a 25 $\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ pueden ser medidas muestreando volúmenes más grandes de aire ambiente; sin embargo, la eficiencia recolección disminuye rápidamente a concentraciones bajas. La *Ley de Beer* se adhiere hasta 34 μg de SO_2 en 25 ml de solución final. Este límite superior



del rango de análisis representa una concentración de $1.130 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ (0.43 ppm) en una muestra de aire de 30 litros estándar y una concentración de $590 \mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$ (0.23 ppm) en una muestra de aire de 288 litros estándar. Concentraciones más altas pueden ser medidas recogiendo un volumen de aire menor, aumentando el volumen de absorción de la solución, o diluyendo una parte conveniente de la muestra recolectada con solución absorbente antes del análisis.

11.2.4. INTERFERENCIAS

Los efectos de las interferencias potenciales principales han sido reducidas al mínimo o eliminadas de la siguiente manera: adición de óxidos de nitrógeno por la de ácido sulfúrico, metales pesados por la adición de sal de etilendiamina tetracético de ácido disódico (EDTA) y ácido fosfórico y ozono por el tiempo de retraso. Hasta $60 \mu\text{g}$ de Fe (III), $22 \mu\text{g}$ de V (V), $10 \mu\text{g}$ de Cu (II), $10 \mu\text{g}$ de Mn (II), y $10 \mu\text{g}$ de Cr (III) en 10 ml del reactivo absorbente pueden ser tolerados en el procedimiento. No se han encontrado ninguna interferencia significativa con $2.3 \mu\text{g}$ de NH_3 .

11.2.5. PRECISIÓN Y EXACTITUD

La precisión del análisis es de 4.6% (con un intervalo de confianza del 95%) basada en el análisis de muestras de sulfato estándar.

Resultados de prueba de colaboración basados en el análisis de atmósferas de prueba sintéticas (SO_2 en aire lavado) usando el procedimiento de muestreo de 24 horas y el procedimiento de calibración de sulfato-TCM muestran que:

- El error de réplica varía linealmente con la concentración desde $\pm 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a concentraciones de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $\pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a concentraciones de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- La variabilidad cotidiana dentro de un laboratorio individual (repetibilidad) varía linealmente con la concentración desde $\pm 18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a niveles de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $\pm 50.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a niveles de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- La variabilidad cotidiana entre dos o más laboratorios (reproducibilidad) varía linealmente con la concentración desde $\pm 36.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a niveles de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta $\pm 103.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a niveles de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- El método tiene un sesgo dependiente de la concentración, que se hace significativo a un nivel de confianza del 95% al nivel de concentración alto. Los valores observados tienden a ser inferiores al nivel concentración esperado de SO_2 .

11.2.6. ESTABILIDAD

Muestreando en un ambiente de temperatura controlada $15 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, mas del 98,9% del compuesto SO_2 -TCM es retenido al completar el muestreo. Si se mantiene a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ después de terminar la toma de la muestra, esta permanecerá estable hasta por 30 días. La presencia de EDTA mejora la estabilidad de SO_2 en la solución TCM y la tasa de decaimiento es independiente de la concentración de SO_2 .

11.2.7. EQUIPOS

11.2.7.1. Toma de muestra

Sonda para toma de muestra: Una sonda para toma de muestra que cumpla los requerimientos de la sección 7 del apéndice E de la Parte 40 del Título 40 del Código Federal de Regulaciones (US-EPA, CFR 40) (Teflón® o vidrio con tiempo de residencia menor a 20 segundos) es usada para transportar aire ambiente a la ubicación del tren de toma de muestra. La parte final de la sonda debe estar diseñada u orientada para evitar precipitación o grandes partículas en la muestra, etc. Una sonda adecuada puede ser construida en tubería de Teflón® conectada a un embudo invertido.

Absorbente - Toma de muestra de corta duración: Un impactador mediano de vidrio con una capacidad para 30 ml de solución y una distancia del tubo hasta la base del recipiente de 4 ± 1 mm es usado para periodos de toma de muestras de 30 minutos y 1 hora (o cualquier periodo considerablemente menor que 24 horas). Dicho impactador se muestra en la Figura 61, estos impactadores se consiguen comercialmente.

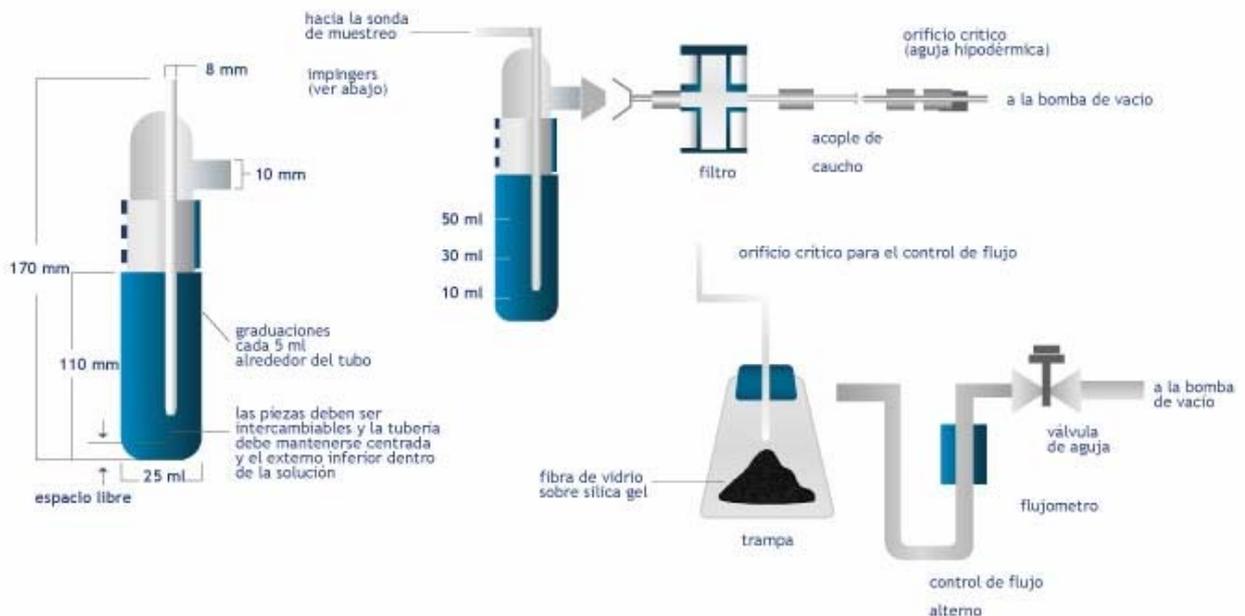


Figura 61. Tren de toma de muestra para periodos cortos.

Absorbente - Toma de muestra de 24 horas: Un tubo de polipropileno de 32 mm de diámetro y 164 mm de longitud (que se consigue comercialmente) es usado como absorbente. La tapa del absorbente debe ser de polipropileno con dos puertos (tapones de caucho son inaceptables porque el reactivo absorbente puede reaccionar con el caucho y llevar a concentraciones erróneamente altas de SO_2). Un tubo de vidrio del impactador, de 6 mm de diámetro y 158 mm de longitud se inserta en uno de los puertos de la tapa del absorbente. La punta del tubo se reduce hasta un orificio de diámetro menor (0.4 ± 0.1 mm) de manera que una broca de joyero número 79 pueda pasar a través del orificio pero una broca número 78 no lo pueda hacer. La distancia desde la base del absorbente hasta la punta del tubo debe ser de 6 ± 2 mm. Los tubos de vidrio pueden ser fabricados por cualquier soplador de vidrio acreditado o se pueden obtener de una firma de suministros científicos. Durante la recepción, se debe realizar la prueba al orificio para verificar su tamaño. El nivel de volumen de 50 ml debe ser marcado permanentemente en el absorbente. El

montaje del absorbente se muestra en la Figura 62.

Trampa de humedad: Una trampa de humedad construida de fibra de vidrio y sílica gel (como se muestra en la Figura 61) ó un tubo de polipropileno (como se muestra en la Figura 62) se coloca entre el tubo de absorción y el elemento de control de flujo para evitar que líquido entrante alcance el elemento de control de flujo. El tubo está empacado con sílica gel indicadora como se muestra en la Figura 62. La lana de vidrio puede ser un sustituto de la sílica gel cuando se recolecten muestras de corta duración (una hora o menos) como se muestra en la Figura 61, o para muestras de larga duración (24 horas) si no se encuentran rutinariamente cambios en el flujo.

Sellos de la tapa: Las tapas del absorbente y de la trampa de humedad deben sellar firmemente para evitar fugas durante el uso. Material que se encoja con el calor como se muestra en la Figura 62 puede ser usado para mantener el sello de la tapa si existe algún riesgo de que las tapas se suelten durante la toma de muestra, el transporte o el almacenamiento.

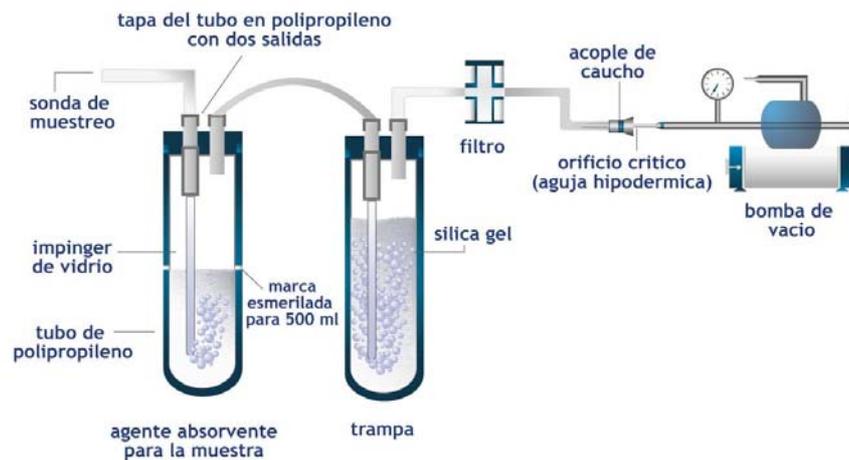


Figura 62. Sistema de toma de muestra para 24 horas.

Dispositivo de control de flujo: Una combinación de rotámetro calibrado y válvula de aguja capaz de mantener la medición del flujo de aire dentro del $\pm 2\%$ es adecuada para toma de muestras de corta duración pero puede no ser usada para toma de muestras de larga duración. Un orificio crítico puede ser usado para regular la tasa de flujo tanto para la toma de muestra de corta duración como para la toma de muestra de larga duración. Una aguja hipodérmica No. 22 de 25 mm de longitud puede ser usada como orificio crítico para mantener una tasa de flujo aproximada de 1 l/min por un periodo de toma de muestra de 30 minutos. Cuando se toma la muestra por una hora, una aguja hipodérmica No. 23 de 16 mm de longitud suministrará una tasa de flujo de aproximadamente 0.5 l/min. El control de flujo para una muestra de 24 horas puede ser suministrada por un orificio crítico de una aguja hipodérmica No. 27 de 9.5 mm de longitud. La tasa de flujo debería estar en un rango de 0.18 a 0.22 l/min.

Dispositivo de medición de flujo: Un dispositivo calibrado como se menciona en el numeral 11.2.9.4 (donde se detallan las características de los dispositivos para calibración), y usado para medir la tasa de flujo de la muestra en el sitio de monitoreo.

Filtro de membrana para partículas: Un filtro de membrana con porosidad de 0.8 a 2 μm es usado para proteger el controlador de flujo de las partículas durante la toma de muestra de larga duración. Este elemento es opcional para la toma de muestra de corta duración.

Bomba de vacío: Una bomba de vacío equipada con un medidor de vacío y capaz de mantener al menos 70 kPa (0.7 atm) de vacío diferencial a través del elemento de control de flujo en la tasa de flujo especificada se requiere para la toma de muestra.

Dispositivo de control de temperatura: La temperatura de la solución absorbente durante la toma de la muestra debe mantenerse a 15 ± 10 °C. Tan pronto como sea posible después de la toma de la muestra y hasta el análisis, la temperatura de la muestra recolectada debe mantenerse a 5 ± 5 °C. Cuando el periodo de tiempo en el que la muestra recolectada sea movida a un almacenamiento de menor temperatura sea muy extenso, debe ser garantizada una temperatura de recolección cercana al límite inferior del rango de 15 ± 10 °C para minimizar las pérdidas y el deterioro de la muestra durante este periodo. Enfriadores termoeléctricos diseñados específicamente para este control de temperatura se consiguen comercialmente y normalmente operan entre 5 y 15 °C. Adicionalmente, pueden ser modificados los refrigeradores pequeños para suministrar el control de temperatura requerido; sin embargo, hay que tener presente que las líneas de entrada deben estar aisladas de las temperaturas más bajas para evitar condensación cuando se tome la muestra bajo condiciones de humedad. Una pequeña almohada de calefacción puede ser necesaria cuando se tome la muestra a bajas temperaturas (< 7 °C) para evitar que la solución absorbente se congele.

Contenedor del tren de toma de muestra: La solución absorbente debe estar protegida de la luz durante y después de la toma de la muestra. La mayoría de los trenes de toma de muestra que se consiguen comercialmente están encerrados en una caja a prueba de luz.

Temporizador: Un temporizador es recomendado para iniciar y detener la toma de muestras para el periodo de 24 horas. El temporizador no es una pieza de equipo requerida; sin embargo, sin un temporizador se requeriría un técnico para iniciar y detener la toma de muestra manualmente. Un medidor de tiempo transcurrido también es recomendado para determinar la duración del periodo de toma de muestra.

11.2.7.2. *Transporte*

Contenedor para transporte: Un contenedor para transporte que pueda mantener una temperatura de 5 ± 5 °C es usado para transportar la muestra del sitio de recolección al laboratorio ambiental. Enfriadores de hielo o contenedores de transporte refrigerados se han encontrado satisfactorios. Paquetes eutécticos enfriados en lugar de hielo darán un control de temperatura más estable. Dicho equipo se puede conseguir comercialmente.

11.2.7.3. *Análisis*

Espectrofotómetro: Un espectrofotómetro adecuado para la medición de absorbancia a 548 nm con un ancho de banda espectral efectivo de menos de 15 nm es requerido para el análisis. Si las lecturas del espectrofotómetro lee en transmitancia, convierta a absorbancia como sigue:

$$A = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right)$$

Donde:

A = Absorbancia

T = Transmitancia ($0 \leq T \leq 1$)

Un filtro de longitud de onda trazable a la Agencia Nacional de Estándares es usado para verificar la calibración de la longitud de onda de acuerdo al procedimiento incluido con el filtro. La calibración de longitud de onda debe ser verificada durante el recibo inicial del instrumento y después de cada 160 horas de empleo normal o cada 6 meses, lo que ocurra primero.

Celdas del espectrofotómetro: Un juego de celdas de longitud de trayectoria de 1 cm conveniente para su uso en la región visible es usado durante el análisis. Si las celdas son incomparables, un factor de corrección de comparación debe ser determinado de acuerdo a lo señalado en la Sección 11.2.10.1 del presente documento.

Dispositivo de control de temperatura: El paso del desarrollo de color durante el análisis debe ser conducido en un ambiente que esté en el rango de 20 a 30 °C y controlado a ± 1 °C. Tanto la calibración como el análisis de la muestra deben ser realizados en condiciones idénticas (dentro de 1°C). El control adecuado de la temperatura puede ser obtenido mediante baños constantes de temperatura, baños de agua con control manual de temperatura, o cuartos de temperatura controlada.

Vidriería: Vidriería volumétrica “Clase A” de varias capacidades es requerida para preparar y estandarizar reactivos y estándares y para distribuir soluciones durante el análisis. Dentro de este material se incluyen pipetas, matraces volumétricos y buretas.

Receptáculo para residuos de TCM: Un receptáculo de vidrio para residuos se requiere para el almacenamiento de la solución de TCM gastada. Este recipiente se debe tapar y almacenar en una campana todo el tiempo.

11.2.8. REACTIVOS

11.2.8.1. Toma de muestra

Agua destilada: El agua destilada es empleada en la preparación de diversas soluciones y también para la limpieza del material de vidrio después de ser utilizados. La pureza del agua destilada se debe verificar con el siguiente procedimiento:

- Colocar 0.20 ml de la solución de permanganato de potasio (0.316 g/l), 500 ml de agua destilada, y 1 ml de ácido sulfúrico concentrado en una botella de vidrio químicamente resistente, tapar la botella, y dejarlo en reposo.
- Si el color del permanganato (rosado) no desaparece totalmente después de un período de 1 hora en la temperatura ambiente, el agua es conveniente para el uso.
- Si desaparece el color del permanganato, el agua puede ser purificada por redistilación con un cristal de hidróxido de bario y uno de permanganato de potasio en un destilador de vidrio.

Reactivo absorbente (0.04 M de tetracloromercurato de potasio (TCM): Disuelva 10.86 g de cloruro mercuríco de 0.066 g de EDTA, y 6.0 g cloruro de potasio en agua destilada y diluya a volumen con agua destilada en un matraz volumétrico de 1000 ml. (*Precaución: El cloruro mercuríco es sumamente venenoso. De ser derramado sobre la piel, limpie con agua inmediatamente*). El pH de este reactivo debe estar entre 3.0 y 5.0. Compruebe el pH de la solución absorbente usando papel indicador de pH o un medidor de pH. Si el pH de la solución no está entre 3.0 y 5.0, elimine la solución de acuerdo a una de las técnicas de disposición descritas en la Sección 11.2.13. El reactivo absorbente es normalmente estable durante 6 meses. Si se forma precipitado, elimine el reactivo según uno de los procedimientos descritos en la Sección 11.2.13.



11.2.8.2. *Preparación de reactivos y análisis de las muestras*

Ácido Sulfímico (0.6 %): Disuelva 0.6 g de ácido sulfímico en 100 ml de agua destilada. Prepárese diariamente.

Formaldehído (0.2%): Diluya 5 ml de solución de formaldehído (36 a 38%) a 1000 ml con el agua destilada. Prepárese diariamente.

Solución de yodo de reserva (0.1 N): Coloque 12.7 g de yodo resublimado en un beaker de 250 ml y añada 40 g de yoduro de potasio y 25 ml de agua. Revuelva hasta disolver, transfiera a un matraz volumétrico de 1000 ml y diluya a volumen con el agua destilada.

Solución de yodo (0.01 N): Prepare aproximadamente una solución de yodo 0.01, diluyendo 50 ml de solución de yodo de reserva (mencionada anteriormente) en 500 ml con agua destilada.

Solución indicadora de almidón: Triture 0.4 g de almidón soluble y 0.002 g de mercurio yodado (preservativo) con bastante agua destilada para formar una pasta. Añada la pasta lentamente a 200 ml de agua destilada hirviendo y continúe hirviendo hasta que aclare finalmente permita que la temperatura disminuya y transfiera la solución a una botella de vidrio con tapa.

Ácido Hidroclórico 1N: Lentamente y revolviendo, añada 86 ml de ácido hidroclórico concentrado a 500 ml de agua destilada. Permita que se enfríe y diluya a 1000 ml con agua destilada.

Solución de yodato de potasio: Con exactitud pese al 0.1 mg más cercano, 1.5 g (registre el peso) de yodato de potasio de estándar primario que ha sido previamente secado a 180 °C durante al menos 3 horas y enfriado en un desecador. Disuelva, luego diluya a volumen en un matraz volumétrico de 500 ml con agua destilada.

Solución de Sodio Tiosulfato de reserva (0.1 N): Prepare una solución de reserva, disolviendo 25 g de sodio tiosulfato ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) en 1000 ml de agua destilada recientemente hervida y enfriada y añada 0.1 g de carbonato de sodio a la solución. Permita que la solución repose al menos 1 día antes de la estandarización. Para estandarizar, se deben medir exactamente 50 ml de solución de yodato de potasio con la pipeta, transferirlos a un matraz con 500 ml de yodo y añadir 2.0 g de yodato de potasio y 10 ml de 1 N HCl. Tape el matraz y deje reposar por 5 minutos. Titule la solución con la solución de sodio tiosulfato de reserva a un color amarillo pálido. Añada 5ml de solución de almidón y titule hasta que el color azul apenas desaparezca. Calcule la normalidad (N_s) de la solución de sodio tiosulfato de reserva así:

$$N_s = \frac{W}{M} \cdot 2.8$$

Donde:

M = Volumen de tiosulfato requerido en ml

W = Peso de yodato de potasio en g (peso registrado en la preparación de la solución de yodato de potasio).

$$2.80 = \frac{10^3(\text{conversión de g a mg}) \times 0.1(\text{fracción usada de yodato})}{35.67(\text{peso equivalente de yodato de potasio})}$$

Titulante de trabajo de sodio tiosulfato (0.01 N): Mida exactamente 100 ml de solución de sodio tiosulfato de reserva (con la pipeta), transvase esta solución a un matraz volumétrico de 1000 ml y diluya a volumen con agua destilada recién hervida y enfriada. Calcule la normalidad del titulante de trabajo de sodio tiosulfato (N_T) así:

$$N_T = N_s \cdot 0.1$$

Solución estándar de sulfato para la preparación de solución de trabajo de sulfato-TCM: Disuelva 0.30 g de metabisulfato de sodio ($Na_2S_2O_5$) o 0.40 g de sulfato de sodio (Na_2SO_3) en 500 ml de agua destilada recientemente hervida y enfriada. (La solución de sulfato es inestable; por lo tanto es importante usar agua de la más alta pureza para reducir al mínimo esta inestabilidad). Esta solución contiene el equivalente de 320 a 400 $\mu g SO_2/ml$. La concentración real de la solución es determinada añadiendo exceso de yodo y titulando inversamente con la solución de sodio tiosulfato estándar. Para titular inversamente, pipetee 50 ml de solución de yodo 0.01 N (cuyo procedimiento de preparación ya fue descrito en esta misma sección) en dos matraz de yodo de 500 ml cada uno (A y B). Al matraz A (blanco) añada 25 ml de agua destilada y al matraz B (muestra) pipetee 25 ml de solución de sulfato. Tape los matraces y déjelos en reposo por 5 minutos. Prepare la solución de trabajo de sulfato-TCM inmediatamente antes de añadir la solución de yodo a los matraces volumétricos. Usando una bureta con titulante tiosulfato estandarizado de 0.01 N, titule la solución en cada matraz a un color amarillo pálido. Luego añada 5 ml de solución de almidón y siga la titulación hasta que el color azul apenas desaparezca.

Solución de trabajo de sulfato-TCM: Con exactitud pipetee 5 ml la solución estándar de sulfato en un matraz volumétrico de 250 ml y diluya a volumen con 0.04 M TCM. Calcule la concentración de dióxido de azufre en la solución de trabajo así:

$$C_{\frac{TCM}{SO_2}} \left(\frac{\mu g SO_2}{mL} \right) = \frac{(A - B) \cdot (N_T) \cdot (32000)}{25} \cdot 0.02$$

Donde

A = Volumen de titulante de tiosulfato requerido para el blanco, ml.

B = Volumen de titulante de tiosulfato requerido para la muestra, ml.

N_T = Normalidad del titulante de tiosulfato.

32000 = Constante que representa el peso miliequivalente de SO_2 , μg .

25 = Constante que representa el volumen de la solución estándar de sulfato, ml.

0.02 = Constante que representa el factor de dilución.

Esta solución es estable durante 30 días si se mantiene a 5 °C. De lo contrario prepárese diariamente.

Solución de reserva de pararosanilina purificada (PARA) (0.2% nominal):

Las especificaciones del tinte son:

- El tinte debe tener un máximo de absorbancia a una longitud de onda de 540 nm cuando se prueba en una solución de almacenamiento de ácido acético de acetato de sodio 0.1 M.
- La absorbancia del reactivo blanco, que es sensible a la temperatura (0.015 unidades de absorbancia/°C), no debe exceder 0.170 a 22 °C con un camino óptico de 1 cm de longitud cuando el blanco se prepara de acuerdo al procedimiento especificado;
- La curva de calibración (ver procedimiento en la Sección 11.2.10 del presente documento) debe tener una pendiente igual a 0.030 ± 0.002 unidades de absorbancia / $\mu g SO_2$ con 1 cm de longitud de camino óptico cuando el tinte es puro y la solución de sulfato está estandarizada

adecuadamente.

Una solución de pararosanilina (PARA) especialmente purificada (99 a 100% de pureza), que cumpla con las especificaciones anteriores, se encuentra disponible en el comercio en la concentración requerida de 0.20%. O bien, el tinte puede ser purificado, una solución de reserva preparada y luego probada de acuerdo al procedimiento descrito a continuación.

El proceso de purificación de la solución de pararosanilina (PARA) tiene los siguientes pasos:

- Coloque 100 ml de 1-butanol y de 1 N HCl en un embudo separador grande (250 ml) y permita que se equilibre. Tenga en cuenta que ciertos lotes de 1-butanol contienen oxidantes que crean una demanda de SO₂ por eso, antes de su utilización, compruébelo colocando 20 ml de butanol y 5 ml de una solución yoduro de potasio al 20% (KI) en un embudo separador de 50 ml y sacuda vigorosamente. Si aparece un color amarillo en la fase de alcohol, destile de nuevo el 1-butanol del óxido de plata y recoja la fracción media o compre un nuevo suministro de 1-butanol.
- Pese 100 mg de tinte de hidrocloreto pararosanilina (PARA) en un beaker pequeño. Añada 50 ml del ácido equilibrado (drene el ácido del fondo del embudo separador en 1) a el beaker y déjelo en reposo por varios minutos. Deseche la fase ácida restante en el embudo separador.
- A un embudo separador de 125 ml, añada 50 ml de 1-butanol equilibrado (retire el 1-butanol de la cima del embudo separador en 1). Transfiera la solución ácida (de 2) que contiene el tinte al embudo y sacuda con cuidado para extraer. La impureza violeta se transferirá a la fase orgánica.
- Transfiera la fase inferior acuosa en otro embudo separador, añada 20 ml de 1-butanol equilibrado y el extraiga de nuevo.
- Repita el procedimiento de extracción con tres partes más de 10 ml de 1-butanol equilibrado.
- Después de la extracción final, filtre la fase ácida colocando un algodón dentro de un matraz volumétrico de 50 ml y lleva a volumen con 1 N HCl. Este reactivo de reserva será de un rojo amarillento.
- Para comprobar la pureza del PARA, realice un ensayo y ajuste de la concentración (ver el siguiente procedimiento que se detallará a continuación) y prepare un reactivo blanco (ver Sección 14.2.11.2 relacionada con el análisis de la muestra); la absorbancia de este reactivo blanco a 540 nm debería ser menor a 0.170 en 22 °C. Si el absorbancia es mayor a 0.170 en estas condiciones, extracciones adicionales deben ser realizadas.

Procedimiento de ensayo del PARA: La concentración de hidrocloreto de pararosanilina (PARA) necesita ser ensayado sólo una vez después de la purificación. También se recomienda que las soluciones comerciales de pararosanilina se ensayen cuando se compran por primera vez. El procedimiento de ensayo es así:

- Prepare la solución de reserva de almacenamiento ácida de acetato acética 1M con un pH de 4.79 disolviendo 13.61 g de acetato de sodio tri-hidratado en agua destilada en un matraz volumétrico de 100 ml. Añada 5.70 ml de ácido glacial acético y diluya a volumen con agua destilada.
 - Pipetee 1 ml de solución de almacenamiento PARA obtenida del proceso de purificación o de una fuente comercial en un matraz volumétrico de 100 ml y diluya a volumen con agua destilada.
 - Transfiera una alícuota de 5 ml de la solución PARA diluida en 2 dentro de un matraz volumétrico de 50 ml. Añada 5mL de la solución de reserva de almacenamiento ácida de acetato acética 1 M de 1 y diluya la mezcla a volumen con agua destilada. Deje la mezcla en reposo por 1 hora.
- 

- Mida la absorbancia de la solución anterior a 540 nm con un espectrofotómetro contra una referencia de agua destilada. Calcule el porcentaje de concentración nominal de PARA así:

$$\% PARA = \frac{A \cdot K}{W}$$

Donde

A = Absorbancia medida de la mezcla final (unidades de absorbancia);

W = Peso en gramos del tinte de PARA usado en el ensayo para preparar 50 ml de solución de reserva (por ejemplo, 0.100 g de tinte fue usado para preparar 50 ml de la solución en el procedimiento de purificación; cuando lo obtenga de fuentes comerciales, use la concentración indicada para calcular W; para el 98 % PARA, W =0.098 g.); y

K = 21.3 para espectrofotómetros que tienen un ancho de banda espectral de menos de 15 nm y una longitud de camino de 1 cm.

Reactivo de Pararosanilina: En un matraz volumétrico de 250 ml, añada 20 ml de la solución PARA de reserva. Añada 0.2 ml adicionales de solución de reserva por cada porcentaje que se ensaye la reserva por debajo del 100%. Luego añada 25 ml de ácido fosfórico 3 M y diluya a volumen con agua destilada. El reactivo es estable durante al menos 9 meses. Almacene lejos del calor y la luz.

11.2.9. PROCEDIMIENTO DE TOMA DE MUESTRA

11.2.9.1. Condiciones generales

Los procedimientos son descritos para toma de muestras de corta duración (30 minutos y 1 hora) y para toma de muestras de larga duración (24 horas). Diferentes combinaciones de volumen de reactivo de absorbente, tasa de toma de muestra y tiempo de toma de muestra pueden ser seleccionados para solucionar necesidades especiales. Para combinaciones diferentes a las descritas específicamente, las condiciones deben ser ajustadas de modo que la linealidad sea mantenida entre absorbancia y concentración sobre el rango dinámico. Volúmenes menores a 10ml de reactivo absorbente, no son recomendados. La eficiencia de recolección esta por encima del 98% para las condiciones descritas; sin embargo, la eficiencia puede ser considerablemente inferior cuando se toman muestras con concentraciones inferiores a 25 µg SO₂/m³.

11.2.9.2. Toma de muestra de 30 minutos y 1 hora

Coloque 10 ml del reactivo absorbente TCM en un impactador mediano y selle el impactador con una película delgada de grasa de silicona (alrededor de la junta esmerilada). Inserte el impactador sellado en el tren de toma de muestra como se observa en la Figura 61, asegurando que todas las conexiones entre los diferentes componentes estén ajustadas y a prueba de fugas. Pueden ser empleados accesorios de bola sin grasa, tubería de Teflón® encogible con el calor o accesorios en tubería de Teflón® para lograr las condiciones libre de fugas para partes del tren de muestreo que entren en contacto con el aire que contiene SO₂. Es importante proteger el reactivo absorbente de la luz solar directa cubriendo el impactador con papel aluminio o encerrando el tren de toma de muestra en una caja a prueba de luz. Determine la tasa de flujo de acuerdo al procedimiento de determinación de la tasa de flujo en el sitio de toma de muestra detallado en la Sección 11.2.9.4 en este mismo documento. Recoja la muestra a 1 ± 0.10 l/minuto para una toma de muestra de 30 minutos ó 0.500±0.05l/minuto para una toma de muestra de 1 hora. Registre el tiempo exacto de toma de muestra en minutos, ya que el volumen de la muestra será determinado posteriormente

usando la tasa de flujo de la muestra y el tiempo la misma. Registre la presión y temperatura atmosférica.

11.2.9.3. Toma de muestra de 24 horas

Coloque 50 ml de la solución absorbente TCM en un absorbedor grande, cierre el tapón y de ser necesario, aplique el material encogible con el calor como lo muestra la Figura 63. Verifique que el nivel del reactivo está en la marca de 50 ml sobre el absorbedor. Inserte el absorbedor sellado en el tren de toma de muestra como se indica en la Figura 61. En este momento, verifique que la temperatura de absorbedor es controlada a 15 ± 10 °C. Durante la toma de la muestra, la temperatura de absorbedor debe ser controlada para evitar la descomposición del compuesto recolectado. Desde el inicio de la toma de la muestra hasta el análisis, la solución de absorbente debe ser protegida de la luz solar directa. Determine la tasa de flujo de acuerdo al procedimiento de determinación de la tasa de flujo en el sitio de toma de muestra detallado en la Sección 11.2.9.4 en este mismo documento. Recolecte la muestra durante 24 horas de medianoche a medianoche a una tasa de flujo de 0.200 ± 0.020 l/minuto. Un temporizador para iniciar y terminar es útil para iniciar y parar la toma de la muestra y un medidor de tiempo transcurrido será útil para determinar el tiempo de toma de muestra.



Figura 63. Absorbedor (toma de muestra de 24 horas) lleno y ensamblado para enviar.

11.2.9.4. Medición de Flujo

Calibración: Los dispositivos requeridos en la medición de flujos en el sitio del muestreo, deben ser calibrados contra un estándar de flujo o volumen confiable como un flujómetro de burbuja trazable a NBS o un medidor de prueba húmeda calibrado. Los rotámetros u orificios críticos usados en el tren de toma de muestra pueden ser calibrados, si se desea, con una prueba de control de calidad, pero tal calibración no puede sustituir las mediciones de flujo en sitio requeridas en el procedimiento que a continuación se describirá. Los rotámetros en línea, si están calibrados, deben ser calibrados en sitio, con el volumen apropiado de solución en el absorbedor.

Determinación de la tasa de flujo en el sitio de toma de muestra: Para muestras de corta duración, la tasa de flujo estándar es determinada en el sitio de toma de muestra al iniciar y terminar la recolección de la muestra con un dispositivo para medir flujo calibrado conectado a la entrada del absorbedor. Para muestras de 24 horas, la tasa de flujo estándar es determinada en el momento en que el absorbedor es colocado en el tren de toma de muestra y otra vez cuando el absorbedor es quitado del tren para el envío al laboratorio ambiental con un dispositivo de medición de flujo calibrado conectado a la entrada del tren de toma de muestra. La determinación de la tasa de flujo debe ser realizada con todos los componentes del sistema de toma de muestra en operación (por ejemplo, el controlador de temperatura del absorbedor y cualquier calentador de la caja de toma de muestra deben estar operando). La ecuación de abajo puede ser usada para determinar el la tas de flujo estándar cuando un medidor de desplazamiento positivo calibrado es usado como dispositivo medidor de flujo. Otros tipos de dispositivos medidores de flujo calibrados también pueden ser usados para determinar la tasa de flujo en el sitio de toma de muestra siempre que el usuario aplique cualquier corrección apropiada a los dispositivos para los cuales la salida es dependiente de la temperatura o la presión.

$$Q_{std} = Q_{act} \cdot \frac{P_b - (1 - RH)P_{H_2O}}{P_{std}} \cdot \frac{298.16}{T_{meter} + 273.16}$$

Donde:

Q_{std} = Tasa de flujo a condiciones estándar, l std /min (25 °C y 760 mmHg).

Q_{act} = Tasa de flujo a las condiciones del sitio de toma de muestra, l/min.

P_b = Presión barométrica a las condiciones del sitio de toma de muestra, mmHg o KPa.

RH = Humedad relativa fraccional del aire siendo medido.

P_{H_2O} = Presión de vapor del agua a la temperatura del aire en el flujo o estándar de volumen, en las mismas unidades que P_b , (para estándares de volumen húmedo solamente, por ejemplo: flujómetro de burbuja o medidor de prueba húmeda. Para estándares secos, por ejemplo: medidor de prueba seca entonces $P_{H_2O} = 0$).

P_{std} = Presión barométrica estándar, en las mismas unidades que P_b (760 mmHg o 101.325 KPa);

T_{meter} = Temperatura del aire en el flujo o estándar de volumen, °C (por ejemplo: flujómetro de burbuja).

Si no se tiene disponible un barómetro, alguna de las siguientes ecuaciones puede ser utilizada en la determinación de la presión barométrica, dependiendo de las unidades en las que se desee expresar:

$$P_b = 760 - 0.76H \text{ encontrando } P_b \text{ en mmHg; ó también puede emplearse:}$$

$$P_b = 101 - 0.01H \text{ encontrando } P_b \text{ en KPa}$$

Donde:

H = Elevación sobre el nivel del mar del sitio de toma de muestra en metros

Si la tasa de flujo inicial (Q_i) difiere de la tasa de flujo del orificio crítico o de la tasa de flujo indicado por el flujómetro en el tren de toma de muestra (Q_c) por más del 5% como se determina por la siguiente ecuación, verifique fugas y determine de nuevo Q_i .

$$\% Dif = \frac{Q_i - Q_c}{Q_c} \cdot 100$$

Invalide la muestra si la diferencia entre la tasa de flujo inicial (Q_i) y la final (Q_f) es mayor al 5% como lo determina la siguiente ecuación:

$$\% Dif = \frac{Q_i - Q_f}{Q_f} \cdot 100$$

11.2.9.5. Almacenamiento y envío de la muestra

Remueva el impactador o absorbedor del tren de toma de muestra y tápelo inmediatamente. Verifique que la temperatura del absorbedor no esté por encima de 25 °C. Marque el nivel de la solución con un señal temporal (lápiz de grasa). Si la muestra no será analizada antes de 12 horas, se debe almacenar a 5° ± 5 °C hasta el análisis. El análisis debe ocurrir dentro de 30 días. Si la muestra es transportada o enviada durante un período superior a 12 horas, se recomienda el uso de refrigeradores térmicos con compresas de hielo eutécticas, contenedores de envío con refrigeración, etc., para períodos hasta de 48 horas. Mida la temperatura de la solución absorbente cuando se reciban las muestras. Invalide la muestra si la temperatura está por encima de 10°C. Almacene la muestra a 5° ± 5 °C hasta que sea analizada.

11.2.10. CALIBRACIÓN ANALÍTICA

11.2.10.1. Compatibilidad de las celdas del espectrofotómetro

Si se usan celdas de espectrofotómetro incompatibles, un factor de corrección de absorbancia debe ser determinado así:

- Llène todas las celdas con agua destilada y designe la que tiene la absorbancia más baja a 548 nm como la "celda de referencia". (Esta celda de referencia debe ser marcada como tal y continuamente usada para este propósito en todos los análisis futuros).
- calibre el cero del espectrofotómetro con la celda de referencia.
- Determine la absorbancia de cada una de las celdas restantes (A_c) en relación con la celda de referencia y registre estos valores para un uso futuro. Marque todas las celdas de una manera que identifique adecuadamente la corrección.

La absorbancia corregida para futuros análisis usando cada celda previamente identificada y determinada su respectiva A_c , es determinada así:

$$A = A_{obs} - A_c$$

Donde

A = Absorbancia corregida

A_{obs} = Absorbancia observada, sin corregir

A_c = Corrección de la celda

11.2.10.2. Procedimiento de Calibración Estático (Opción 1).

Prepare una solución diluida de trabajo de sulfato-TCM diluyendo 10 ml de la solución de trabajo de sulfato-TCM (ver procedimiento de preparación en la Sección 11.2.8.2 en el ítem donde se hace mención a la solución de trabajo de sulfato-TCM) a 100 ml con reactivo absorbente TCM. Siguiendo los parámetros y medidas de la Tabla 36, pipetee exactamente los volúmenes indicados de las soluciones sulfato-TCM en una serie de matraz volumétricos de 25ml. Añada reactivo absorbente TCM como se indica para llevar el volumen en cada matraz a 10 ml.

Tabla 36. Volúmenes de reactivos a emplear para la preparación de los diferentes tipos de soluciones de sulfato-TCM.

SOLUCIÓN DE SULFATO - TCM	VOLUMEN DE SOLUCIÓN DE SULFATO-TCM	VOLUMEN DE TCM, ML	µg SO ₂ TOTALES (APROX.)*
De trabajo	4.0	6.0	28.8
De trabajo	3.0	7.0	21.6
De trabajo	2.0	8.0	14.4
De trabajo diluido	10.0	0.0	7.2
De trabajo diluido	5.0	5.0	3.6
	0.0	10.0	0.0

* Basado en una concentración de la solución de trabajo de sulfato-TCM de 7.2 µg SO₂/ml; el total real de µg de SO₂ debe ser calculado usando la ecuación de abajo.

A cada matraz volumétrico, añada 1 ml de ácido sulfímico al 0.6 % (ver procedimiento de preparación en la Sección 11.2.8.2 del presente protocolo), pipetee exactamente 2 ml de solución de formaldehído al 0,2% (ver Sección 11.2.8.2), luego añada 5 ml de solución pararosanilina (ver Sección 11.2.8.2). Inicie un temporizador de laboratorio que haya sido establecido para 30 minutos. Lleve todos los matraz a volumen con agua destilada recientemente hervida y enfriada y mezcle vigorosamente. El color debe ser desarrollado (durante el período de 30 minutos) en un ambiente a temperatura en el rango de 20 a 30 °C, controlado a ± 1 °C. Para aumentar la precisión, se recomienda un baño a temperatura constante durante la etapa de desarrollo de color. Después de 30 minutos, determine la absorbancia corregida de cada estándar a 548 nm contra una referencia de agua destilada (de acuerdo al procedimiento descrito en la Sección 11.2.10.1). Denote esta absorbancia como (A). El agua destilada es usada en la celda de referencia en lugar del reactivo blanco debido a la sensibilidad de temperatura del reactivo blanco. Calcule los microgramos totales de SO₂ en cada solución:

$$\mu g SO_2 = V_{TCM/SO_2} \cdot C_{TCM/SO_2} \cdot D$$

Donde:

V_{TCM/SO_2} = Volumen de solución de sulfato-TCM usada, ml;

C_{TCM/SO_2} = Concentración de dióxido de azufre en la sulfato-TCM de trabajo, µg SO₂/ ml;

D = Factor de dilución (D = 1 para la solución de trabajo de sulfato-TCM; D = 0.1 para la solución diluida de trabajo de sulfato-TCM).

La ecuación de calibración es determinada usando el método de mínimos cuadrados (Sección 11.2.12.1 del presente documento). Los microgramos totales contenidos de SO₂ en cada solución son la variable x, y la absorbancia corregida asociada con cada solución es la variable y. Para que

la calibración sea válida, la pendiente debe estar en el rango de 0.030 ± 0.002 unidades de absorbancia / $\mu\text{g SO}_2$, el intercepto determinado por el método de mínimos cuadrados debe ser igual o menor de 0.170 unidades de absorbancia cuando el color es desarrollado a $22\text{ }^\circ\text{C}$ (añada 0.015 a esta especificación de 0.170 por cada $^\circ\text{C}$ encima de $22\text{ }^\circ\text{C}$) y el coeficiente de correlación debe ser mayor a 0.998. Si estos criterios no se cumplen, puede ser el resultado de un tinte impuro y/o una solución de sulfato-TCM incorrectamente estandarizada. Un factor de calibración (B_s) es determinado calculando el recíproco de la pendiente y posteriormente es usado para calcular la concentración de la muestra (Sección 11.2.12.3).

11.2.10.3. Procedimientos de Calibración Dinámicos (Opción 2)

Atmósferas que contienen concentraciones conocidas con exactitud de dióxido de azufre son preparadas usando dispositivos de infiltración. En los sistemas para generar estas atmósferas, el dispositivo de infiltración emite SO_2 gaseoso a una tasa conocida, baja, constante, ya que la temperatura del dispositivo es mantenida constante ($\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$) y el dispositivo ha sido calibrado con exactitud a la temperatura de uso. El SO_2 infiltrado del dispositivo es llevado por un flujo bajo de gas de transporte seco a una cámara de mezclado donde es diluido con el aire limpio a la concentración deseada y suministrado a un colector de descarga. Un sistema típico se muestra esquemáticamente en la Figura 64. Los dispositivos de infiltración pueden ser preparados o comprados y en ambos casos deben ser trazables a cualquier Material de Referencia Estándar (SRM 1625, SRM 1626, SRM 1627) de una Oficina de Estándares Nacional (NBS) o a un Material de Referencia Certificado (CRM) aprobado por NBS/EPA y disponible en el comercio. Tasas de infiltración del dispositivo de 0.2 a 0.4 $\mu\text{g}/\text{min}$, flujos de gas inerte de aproximadamente 50ml/min y tasas de flujo de aire de dilución de 1.1 a 15 l/min convenientemente presentan atmósferas estándar en el rango de 25 a 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.010 a 0.230 ppm).

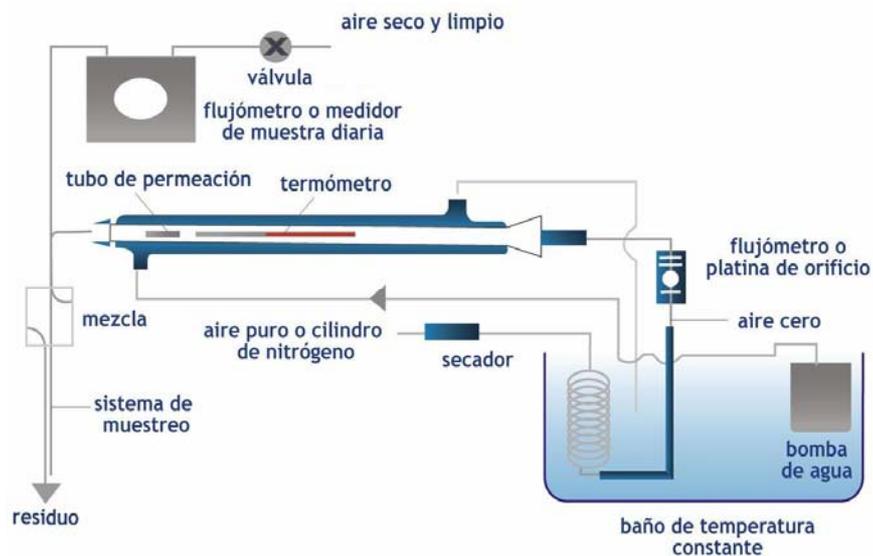


Figura 64. Tubo de infiltración esquemático para uso en laboratorio

Opción de calibración 2A (Muestras de 30 minutos y de 1 hora): Genere una serie de seis atmósferas estándar de SO_2 (por ejemplo, 0, 50, 100, 200, 350, 500, 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ajustando las tasas de flujo de dilución de manera apropiada. La concentración de SO_2 en cada atmósfera es

calculada así:

$$C_a = \frac{P_T \cdot 10^3}{Q_d + Q_p}$$

Donde:

C_a = Concentración de SO_2 a condiciones estándar, $\mu g/m^3$;

P_T = Tasa de infiltración, $\mu g/\text{minuto}$;

Q_d = Tasa de flujo de aire de dilución, std l/minuto;

Q_p = Tasa de flujo de gas portador a través del dispositivo de infiltración, std l/minuto.

Asegúrese que la tasa de flujo total del estándar excede la demanda de flujo del tren de toma de muestra, con el flujo de exceso venteado a presión atmosférica. Tome muestra de cada atmósfera usando aparatos similares a los mostrados en la Figura 61 y a las mismas condiciones que la toma de muestra en campo (p. ej., use el mismo volumen de reactivo absorbente y tome la muestra al mismo volumen de aire a una tasa de flujo equivalente). Debido a la longitud de los períodos de toma de muestra requeridos, este método no se recomienda para toma de muestras de 24 horas. A la terminación de la toma de la muestra, cuantitativamente transfiera los contenidos de cada impactador a una serie de matraces volumétricos de 25 ml (si fueron usados 10 ml de la solución absorbente) usando pequeñas cantidades de agua destilada para el lavado (<5 ml). Si se utilizaron más de 10 ml de solución absorbente, lleve la solución absorbente en cada impactador al volumen original con H_2O destilada y pipetee partes de 10 ml de cada impactador a una serie de matraces volumétricos de 25 ml. Si las etapas de desarrollo del color no comienzan 12 horas después de la muestra, almacene las soluciones a 5 ± 5 °C. Calcule los microgramos totales de SO_2 en cada solución así:

$$\mu g SO_2 = \frac{C_a \cdot Q_s \cdot t \cdot V_a \cdot 10^{-3}}{V_b}$$

Donde

C_a = Concentración de SO_2 en la atmósfera, $\mu g/m^3$;

Q_s = Tasa de flujo de toma de muestra, std l/minuto;

t = Tiempo de toma de muestra, minuto;

V_a = Volumen de solución absorbente usada para el desarrollo del color (10 ml);

V_b = Volumen de solución absorbente usada para la toma de la muestra, ml.

Añada los reactivos restantes para el desarrollo del color de la misma manera que en la Sección 11.2.10.2 para soluciones estáticas. Calcule la ecuación de calibración y un factor de calibración (B_g) según la Sección 11.2.10.2, siguiendo todos los criterios especificados en dicho aparte de este documento.

Opción de calibración 2B (toma de muestra de 24 horas): Genere una atmósfera estándar que contenga aproximadamente $1050 \mu g SO_2/m^3$ y calcule la concentración exacta según la ecuación anterior. Establezca una serie de seis absorbentes según la Figura 62 y conéctelos a un colector común para tomar la muestra de la atmósfera estándar. Asegúrese que la tasa de flujo total del estándar exceda la demanda de flujo en el colector de la muestra, con el exceso de flujo venteado a presión atmosférica. Luego permita a los absorbentes tomar la muestra de la atmósfera variando los períodos de tiempo para acceder a soluciones que contengan 0, 0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8, y $2.2 \mu g SO_2/ml$. Los tiempos de toma de muestra requeridos para lograr estas concentraciones de solución son calculadas así:

$$t = \frac{V_b \cdot C_s}{C_a \cdot Q_s \cdot 10^{-3}}$$

Donde

t = tiempo de toma de muestra, min.

V_b = volumen de la solución absorbente usada para la toma de muestra (50 ml).

C_s = Concentración deseada de SO₂ en la solución absorbente, µg/ml.

C_a = Concentración de la atmósfera estándar calculada de acuerdo a la ecuación, µg/m³.

Q_s = Tasa de flujo de la toma de muestra, std l/minuto.

Después de terminar la toma de la muestra, lleve las soluciones absorbentes al volumen original con agua destilada. Pipetee una porción de 10 ml de cada absorbente en una serie de matraces volumétricos de 25 ml. Si las etapas de desarrollo de color no comienzan 12 horas después de la toma de la muestra, almacene las soluciones a 5 ± 5 °C. Añada los reactivos restantes para el desarrollo en color de la misma manera que en la Sección 11.2.10.2 para soluciones estáticas. Calcule el total de µg de SO₂ en cada estándar así:

$$\mu gSO_2 = \frac{C_a \cdot Q_s \cdot t \cdot V_a \cdot 10^{-3}}{V_b}$$

Donde:

V_a = volumen de solución absorbente usada para el desarrollo de color (10 ml).

Todos los otros parámetros son definidos en la ecuación anterior

Calcule la ecuación de calibración y un factor de calibración (B_t) según la Sección 11.2.10.2 y 11.2.12.1 fijándose a todos los criterios especificados.

11.2.11. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA Y ANÁLISIS

11.2.11.1. Preparación de la muestra

Remueva las muestras del contenedor de transporte. Si el período de transporte excede 12 horas después de la terminación de la muestra, verifique que la temperatura esté por debajo de 10 °C. También, compare el nivel de la solución con la señal de nivel temporal sobre el absorbedor. Si la temperatura está por encima de 10 °C o hubo pérdida significativa (más de 10 ml) de la muestra durante el transporte, haga una notación apropiada en el registro e invalide la muestra. Prepare las muestras para el análisis así:

- Para muestras de 30 minutos o de 1 hora: Cuantitativamente transfiera la cantidad entera de 10 ml de solución absorbente a un matraz volumétrico de 25 ml y lave con una pequeña cantidad (<5 ml) de agua destilada.
- Para muestras de 24 horas: Si el volumen de la muestra es menor que el volumen original de 50 ml (la señal permanente sobre el absorbedor), ajuste el volumen al volumen original con

agua destilada para compensar el agua perdida por evaporación durante la toma de la muestra. Si el volumen final es mayor que el volumen original, el volumen debe ser medido usando un cilindro graduado. Para analizar, pipetee 10 ml de la solución en un matraz volumétrico 25 ml.

11.2.11.2. *Análisis de la muestra*

Para cada juego de determinaciones, prepare un reactivo blanco añadiendo 10 ml de la solución absorbente TCM a un matraz volumétrico de 25 ml, y dos estándares de control que contienen aproximadamente 5 y 15 μg de SO_2 , respectivamente. Es importante recordar que los estándares de control están preparados según los procedimientos descritos en las secciones 11.2.10.2 o 11.2.10.3. El análisis es realizado de la siguiente forma:

- Permita que la muestra repose por 20 minutos después de la terminación de la toma de la muestra para permitir la descomposición de cualquier ozono (si es aplicable).
- A cada matraz volumétrico de 25 ml que contiene el reactivo blanco, la muestra, o el estándar de control, añada 1 ml de ácido sulfúrico al 0.6 % (ver Sección 11.2.8.2 donde se describe las características y métodos de preparación de los reactivos necesarios para el análisis) y permítale reaccionar por 10 minutos.
- Pipetee exactamente 2 ml de solución de formaldehído al 0.2 % (ver la preparación de este reactivo en la Sección 11.2.8.2) y luego 5 ml de solución pararosanilina (ver la preparación de este reactivo en la Sección 11.2.8.2) en cada matraz. Active el temporizador de laboratorio por 30 minutos.
- Lleve cada matraz a volumen con agua destilada recientemente hervida y enfriada y mezcle vigorosamente.
- Durante los 30 minutos, las soluciones deben estar en un ambiente de temperatura controlada en el rango de 20 a 30 °C mantenidos a $\pm 1^\circ\text{C}$. Esta temperatura también debe ser dentro de 1°C de la usada durante la calibración.
- Después de 30 minutos y antes de 60 minutos, determine las absorbancias corregidas de cada solución a 548 nm usando celdas de longitud de caminos ópticos de 1 cm contra una referencia de agua destilada (ver “Compatibilidad de las celdas del espectrofotómetro”, Sección 11.2.10.1). (El agua destilada es usada como referencia en vez del reactivo blanco debido a la sensibilidad del reactivo blanco a la temperatura).
- No permita que la solución coloreada se mantenga en las celdas porque una película puede ser depositada. Limpie las celdas con el alcohol isopropílico después del uso.
- El reactivo blanco debe estar dentro de 0.03 unidades absorbancia del intercepto de la ecuación de calibración determinada en la Sección 11.2.10.

11.2.11.3. *Rango de Absorbancia*

Si la absorbancia de la solución está entre 1.0 y 2.0, la muestra puede ser diluida 1:1 con una parte del reactivo blanco y la absorbancia redeterminada dentro de 5 minutos. Las soluciones con absorbancias más altas pueden ser diluidas hasta un séxtuplo con el reactivo blanco para obtener lecturas de escala de menos de una unidad de absorbancia. Sin embargo, se recomienda que una pequeña parte (<10 ml) de la muestra original sea analizada de nuevo (si es posible) si la muestra requiere una dilución mayor que 1:1.

11.2.11.4. *Disposición del reactivo*

Todos los reactivos que contengan compuestos de mercurio deben estar almacenados y eliminados usando uno de los procedimientos contenidos en la Sección 11.2.13. Hasta la disposición, las soluciones desechadas pueden ser almacenadas en contenedores cerrados de vidrio y deben ser dejadas en una campana de humo.

11.2.12. CÁLCULOS

11.2.12.1. *Pendiente de Calibración, intercepto, y Coeficiente de Correlación.*

El método de mínimos cuadrados es usado para calcular la ecuación de calibración en forma de:

$$y = mx + b$$

Donde:

y = absorbancia corregida.

m = pendiente, unidad de absorbancia / $\mu\text{g SO}_2$.

x = microgramos de SO_2 .

b = intercepto con el eje vertical o eje y (unidades de absorbancia).

La pendiente (m), intercepto (b), y el coeficiente de correlación (r) son calculados así:

$$m = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y - m \sum x}{n}$$

$$r = \sqrt{\frac{m(\sum x \sum y / n)}{\sum y^2 - (\sum y)^2 / n}}$$

Donde n es el número de puntos de calibración.

Un formato (Tabla 37) es suministrado para organizar fácilmente los datos de calibración cuando la pendiente, intercepto, y el coeficiente de correlación son calculados a mano.

11.2.12.2. *Volumen total de la Muestra*

Determine el volumen de la toma de muestra a condiciones estándar así:

$$V_{std} = \frac{Q_i + Q_f}{2} \cdot t$$

Donde:

V_{std} = Volumen de la toma de muestra en l std

Q_i = Tasa de flujo estándar determinado en la iniciación de la toma de la muestra en l std/minuto

Q_f = Tasa de flujo estándar determinado en la terminación de toma de la muestra l std /minuto

t = Tiempo total de toma de la muestra, minuto.

11.2.12.3. Concentración de Dióxido de azufre

Calcule y reporte la concentración de cada muestra así:

$$\mu gSO_2 / m^3 = \frac{(A - A_o)(B_x)(10^3)}{V_{std}} * \frac{V_b}{V_a}$$

Donde:

A = Absorbancia corregida de la solución de la muestra;

A_o = Absorbancia corregida del reactivo blanco;

B_x = Factor de calibración igual al B_s , B_g , o B_t dependiendo del procedimiento de calibración usado, el recíproco de la pendiente de la ecuación de calibración;

V_a = Volumen de solución absorbente analizada, ml;

V_b = Volumen total de solución en el absorbedor (mirar secciones 11.2.11.1 y 11.2.11.2), ml;

V_{std} = Volumen estándar de aire muestreado, l std (de la Sección 11.2.12.2).

Tabla 37. Formato de datos para cálculos a mano

PUNTOS DE CALIBRACION	SO ₂ (µg)	UNIDADES DE ABSORBANCIA	x ²	xy	y ²
	x	y			
1					
2					
3					
4					
5					
6					
$\sum x = _ : \sum y = _ : \sum x^2 = _ : \sum xy = _ : \sum y^2 = _ :$					
$n = _ (\text{número de pares de coordenadas})$					

11.2.12.4. Estándares de Control

Calcule los microgramos analizados de SO₂ en cada estándar de control así:

$$C_q = (A - A_o) \cdot x \cdot B_x$$

Donde:

C_q = μg de SO_2 analizados en cada estándar de control.

A = Absorbancia corregida del estándar de control.

A_o = Absorbancia corregida del reactivo blanco.

La diferencia entre los valores verdaderos y los valores analizados de los estándares de control no debe ser mayor a 1 μg . Si la diferencia es mayor a 1 μg , la fuente de la discrepancia debe ser identificada y corregida.

11.2.12.5. Conversión de $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a ppm (v/v)

De ser deseado, la concentración de dióxido de azufre a condiciones de referencia puede ser convertida a ppm SO_2 (v/v) así:

$$\text{ppm } \text{SO}_2 = \frac{\mu\text{g } \text{SO}_2}{\text{m}^3} \cdot 3.82 \cdot 10^{-4}$$

11.2.13. TRATAMIENTO Y ELIMINACIÓN DE RESIDUOS QUE CONTIENEN MERCURIO

La solución de absorción TCM y cualquier reactivo que contenga compuestos de mercurio debe ser tratado y eliminada por uno de los métodos discutidos abajo. Ambos métodos remueven más del 99.99 % del mercurio.

11.2.13.1. Método para formar una Amalgama

Los pasos para tratar los residuos con contenido de mercurio por este procedimiento, se detallan a continuación:

- Coloque la solución residual en un recipiente sin tapa en una campana.
- Para cada litro de solución residual, añada aproximadamente 10 g de carbonato de sodio hasta que la neutralización haya ocurrido (NaOH debe ser usado).
- Siguiendo a la neutralización, añada 10 g de zinc granular o magnesio.
- Agite la solución en una campana durante 24 horas. Precaución debe ser tenida ya que gas de hidrógeno es desarrollado por este proceso de tratamiento.
- Después de 24 horas, permita a la solución reposar sin agitar para que la amalgama de mercurio (el material sólido negro) se ubique en el fondo del receptáculo de residuos.
- Después de organizarlo, decante y deseche el líquido flotante.
- Cuantitativamente transfiera el material sólido a un contenedor y permita que se seque.
- El material sólido puede ser enviado a una planta de mercurio. No debe ser desechado.

11.2.13.2. Método que usa tiras de papel de aluminio

A través del empleo de papel aluminio se puede tratar los residuos de los reactivos que contienen mercurio, el proceso es el siguiente:

- Coloque la solución residual en un recipiente destapado en una campana.

- Para cada litro de solución residual, añade aproximadamente 10 g de tiras de papel aluminio. Si todo el aluminio es consumido y ningún gas es desarrollado, añade 10 g adicional de papel aluminio. Repita hasta que el papel aluminio no se consuma y permita que el gas se desarrolle durante 24 horas.
- Decante el líquido flotante y deseche.
- Transfiera el mercurio elemental que se ha colocado en el fondo del recipiente a un contenedor de almacenamiento.
- El mercurio puede ser enviado a una planta de mercurio. No debe ser desechado.

11.3. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA (FOTOMETRÍA INFRARROJA NO DISPERSIVA)

11.3.1. PRINCIPIO DE MEDICIÓN

Las mediciones se basan en la absorción de la radiación infrarroja del monóxido de carbono (CO) en un fotómetro no dispersivo. La energía infrarroja de una fuente se pasa a través de una celda que contiene la muestra de gas a ser analizada, y la absorción cuantitativa de energía por el CO en la celda de muestreo es medida por un detector apropiado. El fotómetro es sensibilizado para el CO empleando gas de CO, ya sea en el detector o en una celda filtro en el camino óptico, limitando así la absorción medida en una o más longitudes de onda características en la que se absorbe CO fuertemente. Filtros ópticos u otros medios también pueden ser utilizados para limitar la sensibilidad del fotómetro a una banda estrecha de interés. Diversos esquemas pueden utilizarse para proporcionar un adecuado cero de referencia en el fotómetro. La absorción medida es convertida a una señal de salida eléctrica, que está relacionada con la concentración de CO en la celda de medición.

Un analizador basado en este principio será considerado un método de referencia sólo si se ha designado como un método de referencia de conformidad con el capítulo 53 del Título 40 del Código Federal de Regulaciones de la EPA.

11.3.2. CONSIDERACIONES DE LA TOMA DE MUESTRA.

La utilización de un filtro de partículas en la línea de entrada de la muestra de un analizador de CO NDIR es opcional y se deja a discreción del usuario o del fabricante. El uso del filtro debe depender de la susceptibilidad del analizador a la interferencia, mal funcionamiento o daño debido a las partículas.

11.3.3. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

11.3.3.1. Principio.

Cualquiera de los dos métodos se puede utilizar para la calibración dinámica multipunto de los analizadores de CO:

- Un método utiliza un único cilindro estándar de CO certificado, diluido con aire cero en caso de ser necesario, para obtener las diferentes concentraciones de calibración necesarias.
- 

- El otro método utiliza cilindros estándar individuales de CO certificados para cada concentración necesitada.

11.3.3.2. Equipos.

Los principales componentes y configuraciones típicas de los sistemas de calibración para los dos métodos de calibración se muestran en la Figura 65 y la Figura 66.

Controladores de flujo. Dispositivo capaz de adaptar y de regular flujos. Los flujos para el método de dilución (Figura 65) deben ser regulados a $\pm 1\%$.

Medidores de flujo. Medidor de flujo calibrado capaz de medir y monitorear flujos. Los flujos para el método de dilución (Figura 65) deberán medirse con una precisión de $\pm 2\%$ del valor medido.

Reguladores de presión para cilindros estándar de CO. El regulador debe tener un diafragma y partes internas no reactivas y una adecuada presión de entrega.

Cámara de mezcla. Una cámara diseñada para proporcionar homogeneización de la mezcla de CO y el aire de dilución para el método de dilución.

Colector de salida. El colector de salida debe ser del diámetro suficiente para asegurar una caída de presión insignificante en la conexión del analizador. El sistema debe tener un venteo diseñado para asegurar presión atmosférica en el colector y prevenir la entrada de aire ambiente al colector.

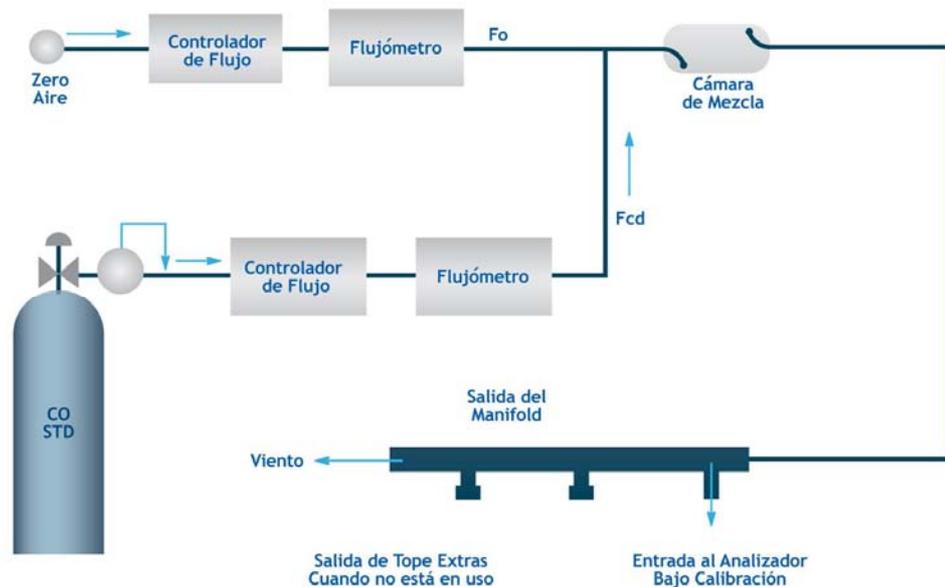


Figura 65. Método de Dilución para calibración de analizadores de CO.

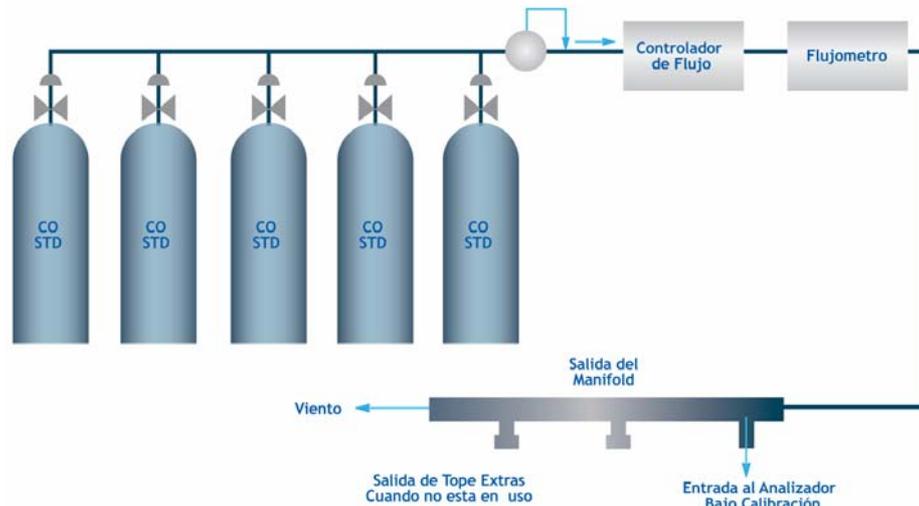


Figura 66. Método de cilindros múltiple para calibración de analizadores de CO.

11.3.3.3. Reactivos.

Concentración estándar CO. Cilindro(s) de CO en aire con concentraciones adecuadas de CO para el rango de operación seleccionado en el analizador en calibración; estándares de CO para el método de dilución puede estar contenidos en una matriz de nitrógeno si la proporción del aire cero de dilución no es menor de 100:1. La composición del cilindro debe ser trazable ya sea a un Material de Referencia Estándar (SRM) de CO en aire de la Oficina Nacional de Estándares (NBS) o a un Material de Referencia Certificado (CRM) comercialmente disponible aprobado por la EPA o NBS. Los cilindros de gas CO deben volver a certificarse en forma periódica según lo determina el programa local de control de la calidad.

Gas de dilución (aire cero). Aire, libre de contaminantes que cause una respuesta detectable en el analizador de CO. El aire cero debe contener < 0.1 ppm de CO.

11.3.3.4. Procedimiento utilizando el método de dilución dinámica.

- Ensamble un sistema dinámico de calibración como el que se muestra en la Figura 65. Todos los gases de calibración, incluido el aire cero, deben ser introducidos en la entrada de muestra del sistema del analizador. Para instrucciones específicas de funcionamiento se debe referir al manual del fabricante.
- Asegúrese que todos los flujómetros estén debidamente calibrados, de acuerdo con las condiciones de uso, o si es adecuado, contra un estándar primario como un medidor de burbuja de jabón o un medidor de prueba húmeda. Todos los flujos deben corregirse a 25 °C y 760 mm Hg (101 kPa). Una discusión sobre la calibración de flujómetros se presenta en la Referencia 1 (ver sección 11.3.4).
- Seleccione el rango de funcionamiento del analizador de CO a ser calibrado.
- Conecte la señal de salida del analizador de CO a la entrada del registrador gráfico u otro

dispositivo de recolección de datos. Todos los ajustes en el analizador deben basarse en el gráfico adecuado o dispositivo de lectura de datos. Las referencias a las respuestas del analizador en el procedimiento que se detalla a continuación se refieren a las respuestas del registrador o dispositivo de datos.

- e. Ajuste el sistema de calibración para entregar aire cero en el colector de salida. El flujo total de aire debe ser superior a la demanda total del analizador conectado al colector de salida para asegurar que no ingresa aire ambiente al venteo del colector. Permita al analizador muestrear aire cero hasta que se obtenga una respuesta estable. Después que la respuesta se haya estabilizado, ajustar el control del cero del analizador. Se recomienda adecuar los ajustes del cero del analizador a +5% de la escala para facilitar la observación de la deriva negativa del cero. Registre la respuesta estable del aire cero como Z_{CO} .
- f. Ajuste el flujo de aire cero y el flujo de CO a partir del cilindro estándar de CO para proporcionar una concentración de CO diluida aproximadamente del 80% del límite superior del rango (URL) de operación del analizador. El flujo total de aire debe ser superior a la demanda total del analizador conectado al colector de salida para asegurar que no ingresa aire ambiente al venteo del colector. La concentración de CO exacta se calcula a partir de:

$$[CO]_{OUT} = \frac{[CO]_{STD} * F_{CO}}{F_D + F_{CO}}$$

Donde:

$[CO]_{OUT}$: Concentración de CO diluida en el colector de salida, ppm.

$[CO]_{STD}$: Concentración del estándar de CO sin diluir, ppm.

F_{CO} : Flujo del estándar de CO corregido a 25 °C y 760 mm Hg, (101 kPa), l/min.

F_D : Flujo del aire de dilución corregido a 25 °C y 760 mm Hg, (101 kPa), l/min.

Muestree esta concentración de CO hasta que se obtenga una respuesta estable. Ajuste el control de span del analizador para obtener una respuesta registrada como se indica a continuación:

$$\text{Respuesta registrada (\% de la escala)} = \frac{[CO]_{OUT}}{URL} * 100 + Z_{CO}$$

Donde:

URL: Límite superior del rango nominal del rango de operación del analizador

Z_{CO} : Respuesta del analizador al aire cero, % de la escala

Si se requiere el ajuste sustancial del control de span del analizador, puede ser necesario volver a revisar los ajustes de cero y span repitiendo los pasos e. y f. Registre la concentración de CO y la respuesta del analizador.

- g. Genere varias concentraciones adicionales (se recomiendan por lo menos tres puntos espaciados de manera uniforme a través de la escala restante para verificar la linealidad) disminuyendo F_{CO} o aumentando F_D . Asegúrese que el flujo total es superior a la demanda total de flujo del analizador. Para cada concentración generada, calcule la concentración de CO exacta usando la ecuación a partir de la cual se determina la concentración exacta de CO. Registre la concentración y la respuesta del analizador para cada concentración. Grafique la respuesta del analizador contra las correspondientes concentraciones de CO y dibuje o calcule la curva de calibración.

11.3.3.5. *Procedimiento utilizando el método de cilindros múltiples.*

Utilice el procedimiento para el método de dilución dinámica con los siguientes cambios:

- Utilice un sistema de varios cilindros como el típico que se muestra en la Figura 66.
- El flujómetro no necesita ser calibrado con exactitud, siempre que el flujo en el colector de salida exceda la demanda de flujo del analizador.
- Las diversas concentraciones de calibración de CO requeridas en los pasos f. y g. se obtienen sin dilución, seleccionando correspondiente cilindro estándar certificado.

11.3.4. REFERENCIAS.

1. Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II—Ambient Air Specific Methods, EPA-600/4-77-027a, U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Research Triangle Park, NC 27711, 1977.
2. A procedure for Establishing Traceability of Gas Mixtures to Certain National Bureau of Standards Standard Reference Materials. EPA-600/7-81-010, U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory (MD-77), Research Triangle Park, NC 27711, January 1981.

11.4. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DEL DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA ATMÓSFERA (QUIMIOLUMINISCENCIA EN FASE GASEOSA)

11.4.1. PRINCIPIO Y APLICABILIDAD

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de nitrógeno (NO₂) son medidas indirectamente por fotometría midiendo la intensidad de luz, en longitudes de onda mayor a 600 nanómetros, como resultado de la reacción quimioluminiscente de óxido nítrico (NO) con ozono (O₃). (1, 2, 3) NO₂ se reduce primero cuantitativamente a NO (4, 5, 6) mediante un convertidor. El NO, que comúnmente existe en el aire ambiente junto con el NO₂, pasa a través del convertidor sin cambiar causando una concentración total resultante de NO_x igual a NO+NO₂. Una muestra del aire de entrada también es medida sin haber pasado por el convertidor. Esta última medición de NO es restada de la medición previa (NO+NO₂) para llegar finalmente a la medición de NO₂. Las mediciones de NO y NO+NO₂ puede ser hechas simultáneamente con sistemas duales, o cíclicamente con el mismo sistema siempre y cuando el tiempo del ciclo no exceda 1 minuto.

11.4.2. CONSIDERACIONES DE LA TOMA DE MUESTRA

11.4.2.1. *Los analizadores*

Los analizadores de quimioluminiscencia para NO/ NO_x /NO₂ responderán a otros compuestos que contengan nitrógeno como Peroxiacetil Nitrato (PAN), que pueda ser reducido a NO en el convertidor térmico (7). Las concentraciones en el ambiente de estas interferencias potenciales



son generalmente bajas en relación con el NO₂ y las mediciones válidas de NO₂ que se puedan obtener. En ciertas áreas geográficas, donde la concentración de estas interferencias es conocida o se sospeche que sean altas con relación al NO₂, se recomienda el uso de un método equivalente para la medición de NO₂.

11.4.2.2. *Matraces integradores*

El empleo de matraces integradores en la línea de entrada de la muestra de los analizadores de quimioluminiscencia para NO/NO_x/NO₂ es opcional y se ha dejado de promover. El tiempo de residencia en el punto de muestreo y el analizador debe ser reducido al mínimo para evitar medidas erróneas de NO₂ como resultado de la reacción de los niveles ambientales de NO y O₃ en el sistema de muestreo.

11.4.2.3. *Filtros de partículas*

El empleo de filtros de partículas en la línea de entrada de la muestra de los analizadores de quimioluminiscencia para NO/NO_x/NO₂ es opcional y se deja a discreción del usuario o del fabricante.

El uso del filtro debe depender de la susceptibilidad del analizador a la interferencia, el malfuncionamiento, o el daño debido a partículas. Los usuarios son advertidos que el material particulado concentrado en un filtro puede causar medidas erróneas NO₂ y por lo tanto los filtros deben ser cambiados frecuentemente.

Un analizador basado en este principio será considerado un método de referencia sólo si ha sido designado como un método de referencia de acuerdo a la Parte 53 del Capítulo 40 del Código Federal de Regulaciones (40 CFR Parte 53).

11.4.3. CALIBRACIÓN ALTERNATIVA A TITULACIÓN EN FASE GASEOSO (GPT) DE UN ESTÁNDAR DE NO CON O₃.

Equipo principal requerido:

- Generador de O₃ estable
- Analizador de quimioluminiscencia para NO/NO_x/NO₂ con registradores de tira
- Concentración estándar de NO

11.4.3.1. *Principio.*

Esta técnica de calibración está basada en la reacción rápida en fase gaseosa entre el NO y el O₃ para producir cantidades estequiométricas de NO₂ conforme a la siguiente ecuación: (8)



La naturaleza cuantitativa de esta reacción es tal que cuando no se conoce la concentración de NO, la concentración de NO₂ puede ser determinada. El ozono es añadido para exceder el NO en un sistema de calibración dinámico, y el canal NO del analizador de quimioluminiscencia para



NO/NO_x/NO₂ es usado como un indicador de cambios de concentración de NO. Ante la adición de O₃, la disminución observada en la concentración de NO en el canal de NO calibrado de NO es equivalente a la concentración de NO₂ producido. La cantidad de NO₂ generado puede variar agregando cantidades variables de O₃ desde un generador de O₃ estable sin calibración (9).

11.4.3.2. Equipos.

La Figura 67, un esquema de un equipo GPT típico, muestra la configuración sugerida de los componentes catalogados más adelante. Todas las conexiones entre componentes en el sistema de calibración corriente abajo del generador de O₃ debe ser vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo.

Controladores del flujo de aire. Dispositivos capaces de mantener flujos constantes de aire dentro del ± 2 % del flujo requerido.

Controlador de flujo de NO. Un dispositivo capaz de mantener flujos constantes de NO dentro del ± 2 % del flujo requerido. Las partes componentes en contacto con el NO deben ser de un material no reactivo.

Flujómetros de aire. Flujómetros calibrados capaces de medir y monitorear flujos de aire con una exactitud del ± 2 % del flujo medido.

Flujómetro de NO. Un flujómetro calibrado capaz de medir y monitorear flujos de NO con una exactitud del ± 2 % del flujo medido. (Se ha reportado que los rotámetros operan con poca confiabilidad cuando miden bajos flujos de NO y no son recomendables.)

Regulador de presión para el cilindro con el estándar de NO. Este regulador debe tener un diafragma y partes internas no reactivas y una presión de entrega conveniente.

Generador de ozono. El generador debe ser capaz de generar niveles suficientes y estables de O₃ para la reacción con NO para generar concentraciones de NO₂ en el rango requerido. Los generadores de ozono del tipo de descarga eléctrica pueden producir NO y NO₂ y no son recomendables.

Válvula. Una válvula puede ser usada como se muestra en la Figura 67 para desviar el flujo de NO cuando se requiera aire cero en el colector. La válvula debe estar construida en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo.

Cámara de reacción. Una cámara, construida en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo, para la reacción cuantitativa de O₃ con exceso de NO. La cámara debe ser de volumen suficiente (V_{RC}) tal que el tiempo de residencia (t_R) cumpla con las exigencias especificadas en 11.4.3.4. Por razones prácticas, t_R debe ser menor a 2 minutos.

Cámara de Mezcla. Una cámara construida en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo y diseñado para proporcionar mezclas completas de los productos de reacción y el aire de dilución. El tiempo de residencia no es crítico cuando la especificación del parámetro dinámico dado en 11.4.3.4 se cumpla.

Colector de salida. El colector de salida debe estar construido en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo y debe ser de diámetro suficiente para asegurar una caída de presión insignificante en la conexión del analizador. El sistema debe tener una ventilación diseñada para asegurar la presión



atmosférica en el colector e impedir que el aire ambiental entre en el colector.

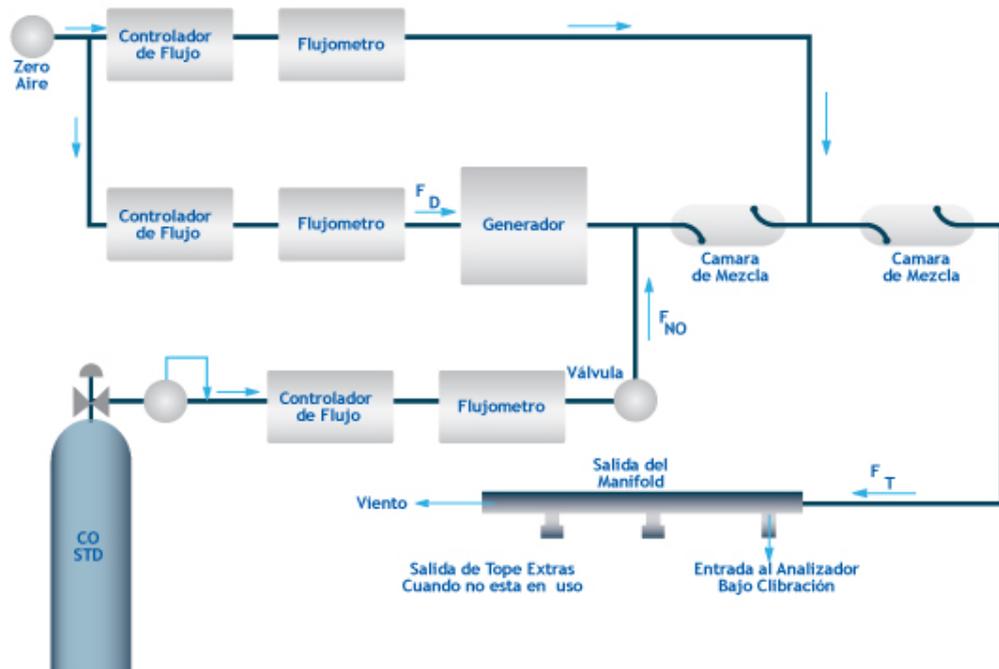


Figura 67. Diseño esquemático de un sistema GPT Sistema de Calibración.

11.4.3.3. Reactivos

Concentración estándar de NO. Cilindro de gas estándar que contenga de 50 a 100 ppm de NO en N₂ con menos de 1 ppm de NO₂. Este estándar debe ser trazable a un Material Estándar de Referencia de NO en N₂ (SRM 1683 o SRM 1684), un Material Estándar de Referencia de NO₂ (SRM 1629) o a un Material de Referencia Certificado (CRM) disponible comercialmente y aprobado por NBS/EPA. Los CRM se describen en la Referencia 14 y una lista de fuentes de CRM está disponible en las direcciones mostradas en la Referencia 14. Un protocolo recomendado para certificar cilindros de gas de NO contra un NO SRM o CRM se presenta en la sección 2.0.7 de la Referencia 15. La Referencia 13 presenta procedimientos para certificar un cilindro de gas de NO contra un NBS NO₂ SRM y para determinar la cantidad de impureza de NO₂ en un cilindro de NO.

Aire cero. Aire, libre de contaminantes que causen una respuesta detectable en el analizador de NO/NO_x/NO₂ o que puedan reaccionar con NO, O₃, o NO₂ en la titulación en fase gaseosa. Un procedimiento para generar aire cero se presenta en la Referencia 13.

11.4.3.4. Especificación del parámetro dinámico

El flujo de aire del generador de O₃ (F_O) y el flujo del NO (F_{NO}) (Ver Figura 66) deben ser ajustados de tal manera que la siguiente relación se mantenga:

$$P_R = [NO]_{RC} * t_R 2.75 \text{ ppm} - \text{min} \quad (2)$$

$$[NO]_{RC} = [NO]_{STD} \left(\frac{F_{NO}}{F_o + F_{NO}} \right) \quad (3)$$

$$t_R = \frac{V_{RC}}{F_o + F_{NO}} < 2 \text{ min} \quad (4)$$

Donde:

P_R : Especificación del parámetro dinámico, determinado empíricamente, para asegurar la reacción completa de O_3 disponible, ppm-minuto.

$[NO]_{RC}$: Concentración de NO en la cámara de reacción, ppm.

R : Tiempo de residencia de los gases reactantes en la cámara de reacción, minutos.

$[NO]_{STD}$: Concentración del estándar de NO sin dilución, ppm.

F_{NO} : Flujo de NO, scm^3 /minuto.

F_o : Flujo de aire del generador de O_3 , scm^3 /minuto.

V_{RC} : Volumen de la cámara de reacción, scm^3 .

Las condiciones de flujo a ser usadas en el sistema GPT están determinadas por el siguiente procedimiento:

- Determine F_T , el flujo total requerido en el colector de salida ($F_T = a$ la demanda del analizador más un exceso de 10 a 50%).
- Establezca $[NO]_{OUT}$ como la concentración de NO más alta (ppm) que se requerirá en el colector de salida. $[NO]_{OUT}$ debe ser aproximadamente equivalente al 90% del límite superior del rango (URL) de medición de concentración de NO_2 a ser cubierto.
- Determine F_{NO} como:

$$F_{NO} = \frac{[NO]_{OUT} * F_T}{[NO]_{STD}} \quad (5)$$

- Seleccione un volumen de cámara de reacción conveniente o disponible. Al principio, un V_{RC} de prueba puede ser seleccionado para estar en el rango de aproximadamente 200 a 500 scm^3 .

- Calcule F_o como

$$F_o = \sqrt{\frac{[NO]_{STD} * F_{NO} * V_{RC}}{2.75}} - F_{NO} \quad (6)$$

- Calcule t_R como

$$t_R = \frac{V_{RC}}{F_o + F_{NO}} \quad (7)$$

Verifique que $t_R < 2$ minutos. De lo contrario, seleccione una cámara de reacción con un V_{RC} más

pequeño.

(g) Calcule el flujo de aire de dilución como

$$F_D = F_T ' F_o ' F_{NO} \quad (8)$$

Donde:

F_D : Flujo del aire de dilución, scm³/minuto

(h) Si F_O se vuelve poco práctico para el sistema deseado, seleccione una cámara de reacción con un V_{RC} diferente y calcule F_O y F_D .

Nota: Un parámetro dinámico más abajo que 2.75 ppm-minuto puede ser usado si este puede ser determinado empíricamente de manera que ocurra la reacción cuantitativa de O_3 con NO . Un procedimiento para realizar esta determinación así como una discusión más detallada de los requerimientos anteriores y otras consideraciones relacionadas se presentan en la Referencia 13.

11.4.3.5. Procedimiento.

1. Ensamble un sistema de calibración dinámico como el que se muestra en la Figura 67.
2. Asegure que todos los flujómetros estén calibrados bajo las condiciones de uso contra un estándar confiable como un medidor de burbujas de jabón o un medidor de ensayo húmedo. Todos los flujómetros volumétricos deben ser corregidos a 25 °C y 760 mm Hg. Una discusión sobre la calibración de flujómetros se presenta en la referencia 13.
3. Se deben tomar precauciones para remover el O_2 y otros contaminantes del regulador de presión de NO y del sistema de entrega antes de iniciar la calibración para evitar cualquier conversión del estándar de NO a NO_2 . No hacer esto puede causar errores significativos en la calibración. Este problema puede ser minimizado (1) evacuando cuidadosamente el regulador, cuando sea posible, después de que el regulador ha sido conectado al cilindro y antes de abrir la válvula del cilindro; (2) lavando completamente el regulador y el sistema de entrega con NO después de abrir la válvula de cilindro; (3) no removiendo el regulador del cilindro entre calibraciones a menos que sea absolutamente necesario. Una discusión adicional de estos procedimientos se presenta en la referencia 13.
4. Seleccione el rango de operación del analizador de $NO/NO_x/NO_2$ a ser calibrado. Para obtener máxima precisión y exactitud en la calibración de NO_2 , los tres canales del analizador deben estar ajustados en el mismo rango. Si se desea la operación de los canales de NO y NO_x en rangos más altos, se recomienda una recalibración subsecuente de los canales de NO y NO_x en los rangos más altos.

Nota: Algunos diseños de analizadores pueden requerir rangos idénticos para NO , NO_x y NO_2 durante la operación del analizador.

5. Conecte los cables de salida del registro del analizador de $NO/NO_x/NO_2$ a los terminales de entrada del registrador de tira. Todos los ajustes al analizador deben ser realizados basados en las lecturas apropiadas del registrador de tira. Las referencias a las respuestas del analizador en los procedimientos mostrados más adelante se refieren a las respuestas del registrador.
- 

6. Determine las condiciones de flujo del GPT requeridas para alcanzar la especificación de parámetro dinámico como se indica en 11.4.3.4.

7. Ajuste los flujos del aire de dilución y del aire del generador de O₃ para obtener los flujos determinados en la sección 11.4.3.4. El flujo de aire total debe exceder la demanda total del analizador(es) conectado al colector de salida para asegurar que no entra aire ambiente al venteo del colector. Permita al analizador muestrear aire cero hasta que se obtengan respuestas estables de NO, NO_x, y NO₂. Después de que las respuestas se han estabilizado, ajuste el control(es) cero del analizador.

Nota: Algunos analizadores pueden tener controles separados de cero para NO, NO_x, y NO₂. Otros analizadores pueden tener controles separados de cero sólo para NO y NO_x, mientras que otros pueden tener sólo un control de cero común para los tres canales.

Variar los ajustes de cero del analizador a +5% de la escala es recomendable para facilitar la observación de la deriva negativa del cero. Registre las respuestas estables del cero como Z_{NO}, Z_{NO_x}, y Z_{NO₂}.

8. Preparación de las curvas de calibración de NO y NO_x.

a. Ajuste del control de span del NO. Ajuste el flujo de NO del cilindro de NO estándar para generar una concentración de NO aproximadamente de 80% del límite superior del rango de NO (URL). Esta concentración exacta de NO se calcula de:

$$[NO]_{OUT} = \frac{F_{NO} * [NO]_{STD}}{F_{NO} + F_O + F_D} \quad (9)$$

Donde:

[NO]_{OUT}: Concentración de NO diluida en el colector de salida, ppm

Muestree esta concentración de NO hasta que las respuestas de NO y NO_x se hayan estabilizado. Ajuste el control de span de NO para obtener una respuesta del registrador como es indicado a continuación:

$$\text{Respuesta del Registrador (porcentaje de la escala)} = \left(\frac{[NO]_{OUT} * 100}{URL} \right) + Z_{NO} \quad (10)$$

Donde:

URL: Límite nominal del rango superior del canal de NO, ppm.

Nota: Algunos analizadores pueden tener controles separados de span para NO, NO_x, y NO₂. Otros analizadores pueden tener controles separados de span sólo para NO y NO_x, mientras que otros pueden tener sólo un control común de span para los tres canales. Cuando un sólo control de span está disponible, el ajuste de span se realiza sobre el canal de NO del analizador.

Si un ajuste sustancial del control de span del NO es necesario, puede ser necesario comprobar de nuevo los ajustes de cero y span repitiendo los pasos 7. y 8. a. Registre la concentración de NO y la respuesta de NO del analizador.

- b. Ajuste del control de span del NO_x. Al ajustar el control de span del NO_x del analizador, la presencia de cualquier impureza de NO₂ en el cilindro de NO estándar debe ser tomada en cuenta. Los procedimientos para determinar la cantidad de impurezas de NO₂ en el cilindro de NO estándar se presentan en la referencia 13. La concentración exacta de NO_x se calcula de:

$$[NO_x]_{OUT} = \frac{F_{NO} * ([NO]_{STD} + [NO_2]_{IMP})}{F_{NO} + F_O + F_D} \quad (11)$$

Donde:

[NO_x]_{OUT}: Concentración de NO_x diluido en el colector de salida, ppm.

[NO₂]_{IMP}: Concentración de la impureza de NO₂ en el cilindro de NO estándar, ppm.

Ajuste el control de span de NO_x para obtener una respuesta del registrador como se indica a continuación:

$$\text{Respuesta del registrador (\% de la escala)} = \left(\frac{[NO_x]_{OUT} * 100}{URL} \right) + Z_{NO_x} \quad (12)$$

Nota: Si el analizador tiene sólo un control de span, el ajuste de span se realiza sobre el canal de NO y ningún ajuste posterior se realiza aquí para el NO_x.

Si es necesario un ajuste sustancial sobre el control de span del NO_x, puede ser necesario comprobar de nuevo los ajustes de cero y span repitiendo los pasos 7. y 8. b. Registre la concentración de NO_x y la respuesta de NO_x del analizador.

- c. Genere varias concentraciones adicionales (se recomiendan al menos cinco puntos uniformemente espaciados a través de la escala restante para verificar la linealidad) disminuyendo F_{NO} o aumentando F_D. Para cada concentración generada, calcule las concentraciones exactas de NO y NO_x utilizando las ecuaciones (9) y (11), respectivamente. Registre las respuestas de NO y NO_x del analizador para cada concentración. Grafique las respuestas del analizador contra las respectivas concentraciones calculadas de NO y NO_x y trace o calcule las curvas de calibración para NO y NO_x. Para calibraciones subsiguientes donde la linealidad pueda ser asumida, estas curvas pueden ser revisadas con una calibración de dos puntos consistente en un punto de aire cero y concentraciones de NO y NO_x de aproximadamente 80% del URL.

9. Preparación de la curva de calibración de NO₂

- a. Asumiendo que el cero de NO₂ ha sido ajustado adecuadamente mientras se muestrea aire cero en el paso 7., ajuste F_O y F_D como se determina en la sección 11.4.3.4. Ajuste F_{NO} para generar una concentración de NO cercana al 90% del URL del rango de NO. Muestree esta concentración de NO hasta que las respuestas de NO y NO_x se hayan estabilizado. Usando la curva de calibración del NO obtenida en la sección 8., mida y registre la concentración de NO como [NO]_{orig}. Usando la curva de calibración de NO_x obtenida en la sección 1.5.8, mida y registre la concentración de NO_x como [NO_x]_{orig}.
- b. Ajuste el generador de O₃ para generar suficiente O₃ para producir una disminución en la concentración de NO equivalente aproximadamente al 80% del URL del rango de NO₂. La

disminución no debe exceder el 90% de concentración de NO determinada en el paso 1.5.9.1. Después de que las respuestas del analizador se hayan estabilizado, registre concentraciones resultantes de NO y NO_x como [NO]_{rem} y [NO_x]_{rem}.

c. Calcule la concentración de NO₂ resultante de:

$$[NO_2]_{OUT} = [NO]_{orig} - [NO]_{rem} + \frac{F_{NO} * [NO_2]_{IMP}}{F_{NO} + F_O + F_D} \quad (13)$$

Donde:

[NO₂]_{OUT}: Concentración de NO₂ diluido en el colector de salida, ppm

[NO]_{orig}: Concentración original de NO, antes de adicionar O₃, ppm

[NO]_{rem}: Concentración de NO que permanece después de la adición de O₃, ppm

Ajuste el control de span de NO₂ para obtener una respuesta del registrador como se indica a continuación:

$$\text{Respuesta del registrador (\% de la escala)} \equiv \left(\frac{[NO_2]_{OUT}}{URL} * 100 \right) + Z_{NO_2} \quad (14)$$

Nota: Si el analizador tiene sólo un o dos controles de span, los ajustes de span son hechos sobre el canal de NO o los canales de NO y NO_x y ningún ajuste posterior se debe hacer aquí para NO₂.

Si es necesario un ajuste sustancial en el control de span de NO₂, puede ser necesario comprobar de nuevo los ajustes de cero y span repitiendo los pasos 7. y 9. c. Registre la concentración de NO₂ y las correspondientes respuestas de NO₂ y NO_x del analizador.

d. Manteniendo el mismo F_{NO}, F_O, y F_D de la sección 9. a., ajuste el generador de ozono para obtener varias otras concentraciones de NO₂ sobre el rango de NO₂ (se recomienda al menos cinco puntos uniformemente espaciados a través de la escala restante). Calcule cada concentración de NO₂ usando la ecuación (13) y registre las correspondientes respuestas de NO₂ y NO_x del analizador. Grafique las respuestas de NO₂ del analizador contra las correspondientes concentraciones calculadas de NO₂ y dibuje o calcule la curva de calibración de NO₂.

10. Determinación de la eficiencia del convertidor.

a. Para cada concentración de NO₂ generada durante la preparación de la curva de calibración de NO₂ (Ver sección 1.5.9) calcule la concentración de NO₂ convertida de:

$$[NO_2]_{CONV} = [NO_2]_{OUT} * ([NO_x]_{orig} / [NO_x]_{rem}) \quad (15)$$

Donde:

[NO₂]_{CONV}: Concentración de NO₂ convertida, ppm.

[NO_x]_{orig}: Concentración original de NO_x antes de la adición de O₃, ppm.

[NO_x]_{rem}: Concentración de NO_x restante después de la adición de O₃, ppm.

Nota: Información suplementaria sobre la calibración y otros procedimientos en este método se presentan en la referencia 13.

- b. Grafique $[\text{NO}_2]_{\text{CONV}}$ (eje y) contra $[\text{NO}_2]_{\text{OUT}}$ (eje x) y dibuje o calcule la curva de eficiencia del convertidor. La pendiente de la curva multiplicada por 100 es el promedio de la eficiencia del convertidor, E_c . El promedio de la eficiencia del convertidor debe ser mayor a 96%; si es menor a 96%, reemplace o revise el convertidor.

11.4.4. CALIBRACIÓN ALTERNATIVA B - DISPOSITIVO DE PERMEACIÓN DE NO_2

Equipo principal requerido:

- Generador estable de O_3 .
- Analizador de quimioluminiscencia de $\text{NO}/\text{NO}_x/\text{NO}_2$ con registrador de tira.
- Concentración estándar de NO .
- Concentración estándar de NO_2 .

11.4.4.1. Principio.

Atmósferas con concentraciones conocidas con exactitud de dióxido de nitrógeno son generadas mediante un dispositivo de permeación (10). El dispositivo de permeación emite NO_2 a una tasa constante conocida manteniendo la temperatura del dispositivo constante (± 0.1 °C) y el dispositivo ha sido calibrado con exactitud a la temperatura de uso. El NO_2 emitido del dispositivo es diluido con aire cero para producir concentraciones de NO_2 convenientes para la calibración del canal de NO_2 del analizador de $\text{NO}/\text{NO}_x/\text{NO}_2$. Una concentración estándar de NO es usada para la calibración de los canales de NO y NO_x del analizador.

11.4.4.2. Equipos.

Un sistema típico conveniente para generar las concentraciones de NO y NO_2 requeridas se muestra en la Figura 68. Todas las conexiones entre componentes corriente abajo del dispositivo de permeación deben ser de vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo.

Controladores de flujo de aire. Dispositivos capaces de mantener flujos de aire constantes dentro del ± 2 % del flujo requerido.

Controlador de flujo de NO . Un dispositivo capaz de mantener flujos de NO constantes dentro del ± 2 % del flujo requerido. Las partes componentes en contacto con el NO deben ser de un material no reactivo.

Flujómetros de aire. Flujómetros calibrados capaces de medir y monitorear flujos de aire con una exactitud del ± 2 % del flujo medido.

Flujómetro de NO . Un flujómetro calibrado capaz de medir y monitorear flujos de NO con una exactitud del ± 2 % del flujo medido. (Se ha reportado que los rotámetros operan con poca confiabilidad cuando miden bajos flujos de NO y no son recomendables.)

Regulador de presión para el cilindro con el estándar de NO . Este regulador debe tener un diafragma y partes internas no reactivas y una presión de entrega conveniente.



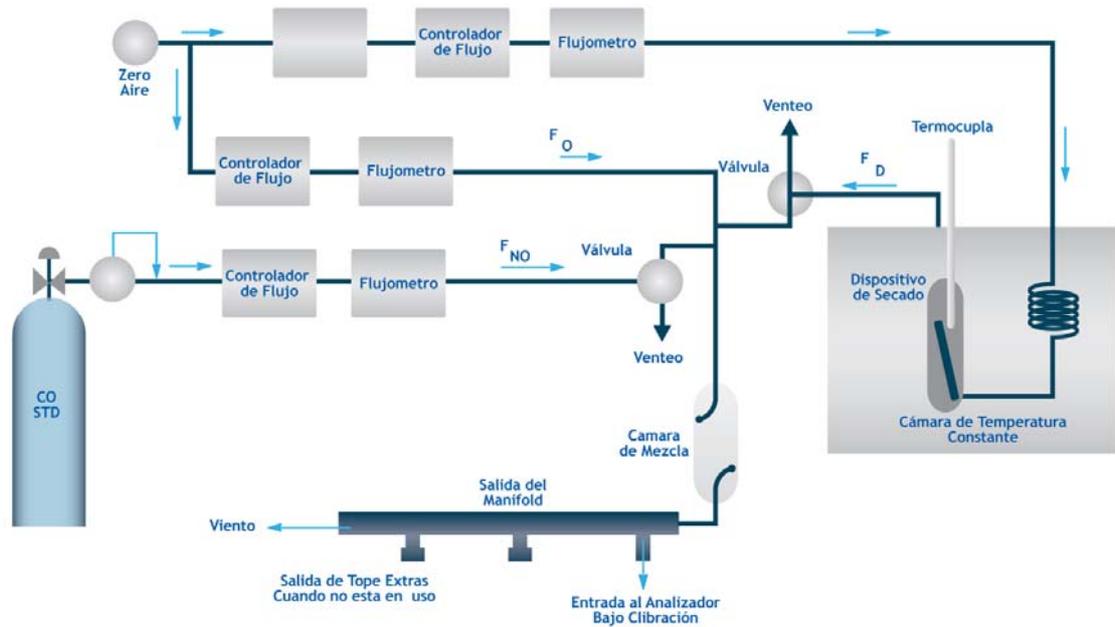


Figura 68. Diseño esquemático de un Sistema de Calibración.

Secador. Lavador para remover la humedad del sistema de aire del dispositivo de permeación. El uso del secador es opcional con dispositivos de permeación de NO₂ no sensibles a la humedad. (Refiérase a las instrucciones del proveedor para el uso del dispositivo de permeación).

Cámara de temperatura constante. Cámara capaz de almacenar el dispositivo de permeación de NO₂ y mantener su temperatura dentro de ± 0.1 °C.

Dispositivo para medir temperatura. Dispositivo capaz de medir y monitorear la temperatura del dispositivo de permeación de NO₂ con una exactitud de ± 0.05 °C.

Válvulas. Una válvula puede ser usada como se muestra en la Figura 68 para desviar el NO₂ del dispositivo de permeación cuando se requiera aire cero o NO en el colector. Una segunda válvula puede ser usada para desviar el flujo de NO cuando se requiera aire cero o NO₂ en el colector.

Las válvulas deben estar construidas en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo.

Cámara de Mezcla. Una cámara construida en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo y diseñada para proporcionar mezclas completas de las corrientes de gases contaminantes y el aire de dilución.

Colector de salida. El colector de salida debe estar construido en vidrio, Teflón®, u otro material no reactivo y debe ser de diámetro suficiente para asegurar una caída de presión insignificante en la conexión del analizador. El sistema debe tener una ventilación diseñada para asegurar la presión atmosférica en el colector e impedir que el aire ambiental entre en el colector.

11.4.4.3. *Reactivos.*

Estándares de calibración. Estándares de calibración se requieren tanto para NO como NO₂. El estándar de referencia para la calibración debe ser trazable a un Material Estándar de Referencia de NO en N₂ (SRM 1683 o SRM 1684), un Material Estándar de Referencia de NO₂ (SRM 1629) o a un Material de Referencia Certificado (CRM) disponible comercialmente y aprobado por NBS/EPA. Los CRM se describen en la Referencia 14 y una lista de fuentes de CRM está disponible en las direcciones mostradas en la Referencia 14. La referencia 15 presenta procedimientos recomendados para certificar un cilindro de gas de NO contra un NO SRM o CRM y para certificar dispositivos de permeación de NO₂ contra un NO₂ SRM. La Referencia 13 presenta procedimientos para certificar un cilindro de gas de NO contra un SRM NO₂ y para certificar un dispositivo de permeación de NO₂ contra un NO SRM o CRM. Un procedimiento para determinar la cantidad de impureza de NO₂ en un cilindro de NO se incluye también en la Referencia 13. El estándar de NO o NO₂ seleccionado como el estándar de referencia debe ser usado para certificar el otro estándar para asegurar la consistencia entre los dos estándares.

Concentración estándar de NO₂. Un dispositivo de permeación conveniente para generar concentraciones de NO₂ a los flujos requeridos sobre el rango de concentración requerida. Si el dispositivo de permeación es usado como el estándar de referencia, debe ser trazable a un SRM O CRM como se especifica en el parrafo anterior. Si un cilindro de NO es usado como el estándar de referencia, el dispositivo de permeación de NO₂ debe ser certificado contra el estándar de NO según el procedimiento dado en la Referencia 13. El empleo del dispositivo de permeación debe estar en estricto acuerdo con las instrucciones suministradas con el dispositivo. Información adicional en cuanto al empleo de dispositivos de permeación se presenta en Scaringelli et al. (11) y Rook et al. (12).

Concentración estándar de NO. Cilindro de gas que contenga de 50 a 100 ppm de NO en N₂ con menos de 1 ppm de NO₂. Si este cilindro es usado como el estándar de referencia, el cilindro debe ser trazable a un SRM o CRM como se especifica en los Estándares de calibración. Si un dispositivo de permeación de NO₂ es usado como estándar de referencia, el cilindro de NO debe ser certificado contra el estándar de NO₂ según el procedimiento dado en la Referencia 13. El cilindro debe ser certificado de nuevo en una base regular como lo determine el programa de control de calidad local.

Aire cero. Aire, libre de contaminantes que puedan reaccionar con NO o NO₂ o que causen una respuesta detectable en el analizador de NO/NO_x/NO₂. Cuando se usen dispositivos de permeación que sean sensibles a la humedad, el aire cero que pase a través del dispositivo de permeación debe estar seco para evitar reacciones superficiales sobre el dispositivo. (Refiérase a las instrucciones del proveedor para el uso del dispositivo de permeación.) Un procedimiento para generar aire cero se presenta en la Referencia 13.

11.4.4.4. *Procedimiento*

1. Ensamble el equipo de calibración como el que se muestra en la Figura 68.
 2. Asegure que todos los flujómetros estén calibrados bajo las condiciones de uso contra un estándar confiable como un medidor de burbujas de jabón o un medidor de ensayo húmedo. Todos los flujómetros volumétricos deben ser corregidos a 25 °C y 760 mm Hg. Una discusión sobre la calibración de flujómetros se presenta en la referencia 13.
 3. Instale el dispositivo de permeación en la cámara de temperatura constante. Suministre un
- 

pequeño flujo de aire fijo (200-400 scm³/minuto) a través del dispositivo. El dispositivo de permeación siempre debe tener un flujo de aire continuo a través de él para prevenir gran acumulación de NO₂ en el sistema y un consecuente período de nueva estabilización. Registre el flujo como F_p. Permita al dispositivo estabilizarse en la temperatura de calibración durante al menos 24 horas. La temperatura debe ser ajustada y controlada dentro de ±0,1 °C o menos de la temperatura de calibración a medida que se monitorea con el aparato para medir de temperatura.

4. Se deben tomar precauciones para remover el O₂ y otros contaminantes del regulador de presión de NO y del sistema de entrega antes de iniciar la calibración para evitar cualquier conversión del estándar de NO a NO₂. No hacer esto puede causar errores significativos en la calibración. Este problema puede ser minimizado

- a. Evacuando cuidadosamente el regulador, cuando sea posible, después de que el regulador ha sido conectado al cilindro y antes de abrir la válvula del cilindro.
- b. Lavando completamente el regulador y el sistema de entrega con NO después de abrir la válvula de cilindro.
- c. No removiendo el regulador del cilindro entre calibraciones a menos que sea absolutamente necesario. Una discusión adicional de estos procedimientos se presenta en la referencia 13.

5. Seleccione el rango de operación del analizador de NO/NO_x/NO₂ a ser calibrado. Para obtener máxima precisión y exactitud en la calibración de NO₂, los tres canales del analizador deben estar ajustados en el mismo rango. Si se desea la operación de los canales de NO y NO_x en rangos más altos, se recomienda una recalibración subsecuente de los canales de NO y NO_x en los rangos más altos.

Nota: Algunos diseños de analizadores pueden requerir rangos idénticos para NO, NO_x y NO₂ durante la operación del analizador.

6. Conecte los cables de salida del registro del analizador de NO/NO_x/NO₂ a los terminales de entrada del registrador de tira. Todos los ajustes al analizador deben ser realizados basados en las lecturas apropiadas del registrador de tira. Las referencias a las respuestas del analizador en los procedimientos mostrados más adelante se refieren a las respuestas del registrador.

7. Gire la válvula para ventear el flujo del dispositivo de permeación y ajuste el flujo del aire de dilución, F_D, para suministrar aire cero al colector de salida. El flujo de aire total debe exceder la demanda total del analizador(es) conectado al colector de salida para asegurar que no entra aire ambiente al venteo del colector. Permita al analizador muestrear aire cero hasta que se obtengan respuestas estables de NO, NO_x, y NO₂. Después de que las respuestas se han estabilizado, ajuste el control(es) cero del analizador.

Nota: Algunos analizadores pueden tener controles separados de cero para NO, NO_x, y NO₂. Otros analizadores pueden tener controles separados de cero sólo para NO y NO_x, mientras que otros pueden tener sólo un control de cero común para los tres canales.

Variar los ajustes de cero del analizador a +5% de la escala es recomendable para facilitar la observación de la deriva negativa del cero. Registre las respuestas estables del cero como Z_{NO}, Z_{NO_x}, y Z_{NO₂}.

8. Preparación de las curvas de calibración de NO y NO_x.



- a. Ajuste del control de span del NO. Ajuste el flujo de NO del cilindro de NO estándar para generar una concentración de NO aproximadamente de 80% del límite superior del rango de NO (URL). Esta concentración exacta de NO se calcula de:

$$[NO]_{OUT} = \frac{F_{NO} * [NO]_{STD}}{F_{NO} + F_D} \quad (16)$$

Donde:

[NO]_{OUT}: Concentración de NO diluida en el colector de salida, ppm.

F_{NO}: Flujo de NO, scm³/minuto.

[NO]_{STD}: Concentración del estándar de NO sin dilución, ppm.

F_D: Flujo del aire de dilución, scm³/minuto.

Muestree esta concentración de NO hasta que las respuestas de NO y NO_x se hayan estabilizado. Ajuste el control de span de NO para obtener una respuesta del registrador como es indicado a continuación:

$$\text{Respuesta del Registrador (porcentaje de la escala)} = \left(\frac{[NO]_{OUT} * 100}{URL} \right) + Z_{NO} \quad (17)$$

Donde:

URL: Límite nominal del rango superior del canal de NO, ppm.

Nota: Algunos analizadores pueden tener controles separados de span para NO, NO_x, y NO₂. Otros analizadores pueden tener controles separados de span sólo para NO y NO_x, mientras que otros pueden tener sólo un control común de span para los tres canales. Cuando un sólo control de span está disponible, el ajuste de span se realiza sobre el canal de NO del analizador.

Si un ajuste sustancial del control de span del NO es necesario, puede ser necesario comprobar de nuevo los ajustes de cero y span repitiendo los pasos 7 y 8. Registre la concentración de NO y la respuesta de NO del analizador.

- b. Ajuste del control de span del NO_x. Al ajustar el control de span del NO_x del analizador, la presencia de cualquier impureza de NO₂ en el cilindro de NO estándar debe ser tomada en cuenta. Los procedimientos para determinar la cantidad de impurezas de NO₂ en el cilindro de NO estándar se presentan en la referencia 13. La concentración exacta de NO_x se calcula de:

$$[NO_x]_{OUT} = \frac{F_{NO} * ([NO]_{STD} + [NO_2]_{IMP})}{F_{NO} + F_D} \quad (18)$$

Donde:

[NO_x]_{OUT}: Concentración de NO_x diluido en el colector de salida, ppm

[NO₂]_{IMP}: Concentración de la impureza de NO₂ en el cilindro de NO estándar, ppm

Ajuste el control de span de NO_x para obtener una respuesta del registrador como se indica a continuación:

$$\text{Respuesta del registrador (\% de la escala)} \equiv \left(\frac{[NO_x]_{OUT}}{URL} * 100 \right) + Z_{NOx} \quad (19)$$

Nota: Si el analizador tiene sólo un control de span, el ajuste de span se realiza sobre el canal de NO y ningún ajuste posterior se realiza aquí para el NO_x.

Si es necesario un ajuste sustancial sobre el control de span del NO_x, puede ser necesario comprobar de nuevo los ajustes de cero y span repitiendo los pasos 7. y b. Registre la concentración de NO_x y la respuesta de NO_x del analizador.

- c. Genere varias concentraciones adicionales (se recomiendan al menos cinco puntos uniformemente espaciados a través de la escala restante para verificar la linealidad) disminuyendo F_{NO} o aumentando F_D. Para cada concentración generada, calcule las concentraciones exactas de NO y NO_x utilizando las ecuaciones (16) y (18), respectivamente. Registre las respuestas de NO y NO_x del analizador para cada concentración. Grafique las respuestas del analizador contra las respectivas concentraciones calculadas de NO y NO_x y trace o calcule las curvas de calibración para NO y NO_x. Para calibraciones subsiguientes donde la linealidad pueda ser asumida, estas curvas pueden ser revisadas con una calibración de dos puntos consistente en un punto de aire cero y concentraciones de NO y NO_x de aproximadamente 80% del URL.

9. Preparación de la curva de calibración de NO₂

- a. Remueva el flujo de NO. Asumiendo que el cero de NO₂ ha sido ajustado correctamente mientras se muestreó aire cero en el paso 7, gire la válvula para suministrar NO₂ en el colector de salida.
- b. Ajuste F_D para generar una concentración de NO₂ aproximadamente de 80% del URL del rango de NO₂. El flujo de aire total debe exceder la demanda del analizador (es) durante la calibración. La concentración real de NO₂ se calcula de:

$$[NO_2]_{OUT} = \frac{R * K}{F_p + F_D} \quad (20)$$

Donde:

[NO₂]_{OUT}: Concentración de NO₂ diluido en el colector de salida, ppm.

R: Tasa de permeación, µg/minuto.

K: 0.532 µl NO₂ / µg NO₂ (a 25 °C y 760 mm Hg).

F_p: Flujo a través del dispositivo de permeación, scm³ /minuto.

F_D: Flujo del aire de dilución, scm³ /minuto.

Muestree esta concentración de NO₂ hasta que las respuestas de NO_x y NO₂ se hayan estabilizado. Ajuste el control de span de NO₂ para obtener una respuesta del registrador como se indica a continuación:

$$\text{Respuesta del registrador (\% de la escala)} \equiv \left(\frac{[NO_2]_{OUT}}{URL} * 100 \right) + Z_{NO2} \quad (21)$$

Nota: Si el analizador tiene sólo un o dos controles de span, los ajustes de span son hechos sobre el canal de NO o los canales de NO y NO_x y ningún ajuste posterior se debe hacer aquí para NO₂.

Si es necesario un ajuste sustancial en el control de span de NO₂, puede ser necesario comprobar de nuevo los ajustes de cero y span repitiendo los pasos 7. y 9. b. Registre la concentración de NO₂ y las correspondientes respuestas de NO₂ del analizador. Usando la curva de calibración de NO_x obtenida en el paso 8., mida y registre la concentración de NO_x como [NO_x]_M.

- c. Ajuste el F_D para obtener varias concentraciones de NO₂ sobre el rango de NO₂ (se recomienda al menos cinco puntos uniformemente espaciados a través de la escala restante). Calcule cada concentración de NO₂ usando la ecuación (20) y registre las correspondientes respuestas de NO₂ y NO_x del analizador. Grafique las respuestas de NO₂ del analizador contra las correspondientes concentraciones calculadas de NO₂ y dibuje o calcule la curva de calibración de NO₂.

10. Determinación de la eficiencia del convertidor.

Grafique [NO_x]_M (eje y) contra [NO₂]_{OUT} (eje x) y dibuje o calcule la curva de eficiencia del convertidor. La pendiente de la curva multiplicada por 100 es el promedio de la eficiencia del convertidor, E_C. El promedio de la eficiencia del convertidor debe ser mayor a 96%; si es menor a 96%, reemplace o revise el convertidor.

Nota: Información suplementaria sobre la calibración y otros procedimientos en este método se presenta en la referencia 13.

11.4.5. FRECUENCIA DE CALIBRACIÓN.

La frecuencia de calibración, así como el número de puntos necesarios para establecer la curva de calibración y la frecuencia de otras pruebas de desempeño, varía de un analizador a otro. El programa de control de calidad del usuario debe proporcionar directrices para el establecimiento inicial de estas variables y para modificaciones subsiguientes a medida que se acumula experiencia operacional. Los fabricantes de analizadores deben incluir en sus manuales de instrucción/operación información y guía relacionada con estas variables y sobre otros asuntos de operación, calibración y control de calidad.

11.4.6. REFERENCIAS.

1. A. Fontijn, A. J. Sabadell, and R. J. Ronco, "Homogeneous Chemiluminescent Measurement of Nitric Oxide with Ozone," *Anal. Chem.*, 42, 575 (1970).
 2. D. H. Stedman, E. E. Daby, F. Stuhl, and H. Niki, "Analysis of Ozone and Nitric Oxide by a Chemiluminiscent Method in Laboratory and Atmospheric Studies of Photochemical Smog," *J. Air Poll. Control Assoc.*, 22, 260 (1972).
 3. B. E. Martin, J. A. Hodgeson, and R. K. Stevens, "Detection of Nitric Oxide Chemiluminescence at Atmospheric Pressure," Presented at 164th National ACS Meeting, New York City, August 1972.
 4. J. A. Hodgeson, K. A. Rehme, B. E. Martin, and R. K. Stevens, "Measurements for Atmospheric Oxides of Nitrogen and Ammonia by Chemiluminescence," Presented at 1972 APCA Meeting, Miami, FL, June 1972.
- 

5. R. K. Stevens and J. A. Hodgeson, "Applications of Chemiluminescence Reactions to the Measurement of Air Pollutants," *Anal. Chem.*, 45, 443A (1973).
 6. L. P. Breitenbach and M. Shelef, "Development of a Method for the Analysis of NO₂ and NH₃ by NO-Measuring Instruments," *J. Air Poll. Control Assoc.*, 23, 128 (1973).
 7. A. M. Winer, J. W. Peters, J. P. Smith, and J. N. Pitts, Jr., "Response of Commercial Chemiluminescent NO-NO₂ Analyzers to Other Nitrogen-Containing Compounds," *Environ. Sci. Technol.*, 8, 1118 (1974).
 8. K. A. Rehme, B. E. Martin, and J. A. Hodgeson, Tentative Method for the Calibration of Nitric Oxide, Nitrogen Dioxide, and Ozone Analyzers by Gas Phase Titration," EPA-R2-73-246, March 1974.
 9. J. A. Hodgeson, R. K. Stevens, and B. E. Martin, "A Stable Ozone Source Applicable as a Secondary Standard for Calibration of Atmospheric Monitors," *ISA Transactions*, 11, 161 (1972).
 10. A. E. O'Keefe and G. C. Ortman, "Primary Standards for Trace Gas Analysis," *Anal. Chem.*, 38, 760 (1966).
 11. F. P. Scaringelli, A. E. O'Keefe, E. Rosenberg, and J. P. Bell, "Preparation of Known Concentrations of Gases and Vapors with Permeation Devices Calibrated Gravimetrically," *Anal. Chem.*, 42, 871 (1970).
 12. H. L. Rook, E. E. Hughes, R. S. Fuerst, and J. H. Margeson, "Operation Characteristics of NO₂ Permeation Devices," Presented at 167th National ACS Meeting, Los Angeles, CA, April 1974.
 13. E. C. Ellis, "Technical Assistance Document for the Chemiluminescence Measurement of Nitrogen Dioxide," EPA-E600/4-75-003 (Available in draft form from the United States Environmental Protection Agency, Department E (MD-76), Environmental Monitoring and Support Laboratory, Research Triangle Park, NC 27711).
 14. A Procedure for Establishing Traceability of Gas Mixtures to Certain National Bureau of Standards Standard Reference Materials. EPA-600/7-81-010, Joint publication by NBS and EPA. Available from the U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory (MD-77), Research Triangle Park, NC 27711, May 1981.
 15. *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems, Volume II, Ambient Air Specific Methods*. The U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Research Triangle Park, NC 27711. Publication No. EAP-600/4-77-027a.
- 

11.5. PRINCIPIO DE MEDICIÓN Y PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE OZONO EN LA ATMÓSFERA

Principio de medición

1. Aire ambiente y etileno son liberados simultáneamente a una zona de mezcla donde el ozono en el aire reacciona con el etileno para emitir luz, la cual es detectada por un tubo fotomultiplicador. La corriente de fotones resultante es amplificada y puede ser leída directamente o desplegada en un registrador.
2. Un analizador basado en este principio será considerada un método de referencia sólo si se ha designado como un método de referencia de conformidad con la parte 53 del capítulo 40 del CFR de la EPA y calibrado de la siguiente manera:

Procedimiento de calibración

11.5.1. PRINCIPIO

El procedimiento de calibración está basado en el análisis fotométrico de concentraciones de ozono (O_3) en un sistema de flujo dinámico. La concentración de O_3 en una celda de absorción es determinada a partir de una medición de la cantidad de luz de 254 nm absorbida por la muestra. Esta determinación requiere el conocimiento de (1) el coeficiente de absorción (α) de O_3 a 254 nm, (2) la longitud de trayectoria óptica (l) a través de la muestra, (3) la transmitancia de la muestra a una longitud de onda de 254 nm, y (4) la temperatura (T) y la presión (P) de la muestra.

La transmitancia se define como la relación I/I_0 , donde I es la intensidad de luz que pasa a través de la celda y es detectada por el detector cuando la celda contiene una muestra de O_3 , e I_0 es la intensidad de luz que pasa a través de la celda y es detectada por el detector cuando la celda contiene "aire cero". Se supone que todas las condiciones del sistema, excepto por los contenidos de las celdas de absorción, son idénticos durante la medición de I e I_0 . Las cantidades definidas arriba están relacionadas por la ley de absorción de Beer-Lambert,

$$\text{Transmitancia} = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha c l} \quad (1)$$

Donde:

α = coeficiente de absorción de O_3 a 254 nm = $308 \pm 4 \text{ atm}^{-1}\text{cm}^{-1}$ a 0°C y 760 torr.³ (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

c = concentración de O_3 en atmósferas

l = longitud de trayectoria óptica en cm

En la práctica, un generador estable de O_3 es usado para producir concentraciones de O_3 sobre el rango requerido. Cada concentración de O_3 es determinada a partir de la medición de la transmitancia (I/I_0) de la muestra a 254 nm con un fotómetro de longitud de trayectoria (l) y calculada a partir de la ecuación,

$$c(atm) = -\frac{1}{\alpha l} (\ln I / I_0) \quad (2a)$$

or

$$c(ppm) = -\frac{10^6}{\alpha l} (\ln I / I_0) \quad (2b)$$

Las concentraciones de O₃ calculadas deben ser corregidas por pérdidas de O₃ las cuales pueden ocurrir en el fotómetro y por la temperatura y presión de la muestra.

11.5.2. APLICABILIDAD

Este procedimiento es aplicable a la calibración de analizadores de O₃ en el aire ambiente, ya sea directamente o mediante un estándar de transferencia certificado por este procedimiento.

11.5.3. EQUIPOS

Un sistema completo de calibración UV consiste en un generador de ozono, un puerto de salida o manifold, un fotómetro, una fuente apropiada de aire cero y otros componentes necesarios. La configuración debe proveer una concentración estable de ozono en la salida del sistema y permitir que el fotómetro analice la concentración de salida con la precisión especificada por el mismo (11.5.3.1). La Figura 69 muestra una configuración comúnmente usada y sirve para ilustrar el procedimiento de calibración que sigue a continuación. Otras configuraciones pueden requerir variaciones apropiadas en las etapas del procedimiento. Todas las conexiones entre componentes en el sistema de calibración posterior al generador de O₃ deben ser de vidrio, teflón u otros materiales relativamente inertes. Información adicional relacionada con el sistema de un equipo de calibración fotométrica UV se presenta en la referencia 9. Para la certificación de estándares de transferencia que pueden suministrar su propia fuente de O₃, el estándar de transferencia puede reemplazar el generador de O₃ y posiblemente otros componentes mostrados en la Figura 1; ver la referencia 8 como guía.

11.5.3.1 Fotómetro UV El fotómetro consiste en una lámpara de descarga de mercurio de baja presión, colimación óptica (opcional), una celda de absorción, un detector y un procesador de señales electrónicas, como se ilustra en la Figura 1. Debe ser capaz de medir la transmitancia, I/I_0 , a una longitud de onda de 254 nm con suficiente precisión de tal forma que la desviación estándar de las mediciones de concentración no exceda la máxima de 0,005 ppm o 3% de la concentración. Debido a que la lámpara de mercurio de baja presión irradia a muchas longitudes de onda, el fotómetro debe tener medios adecuados para asegurar que no se genere O₃ en la celda por la lámpara, y que al menos 99,5% de la radiación detectada por el detector sea de radiación a 254 nm. (Esto puede lograrse fácilmente con una selección prudente del filtro óptico y las características de respuesta del detector). La longitud de la trayectoria de luz a través de la celda de absorción debe ser conocida con una exactitud de al menos 99,5%. Adicionalmente, la celda y los tubos asociados deben ser designados para minimizar pérdidas de O₃ por contacto con las paredes de la celda y los componentes de manejo de gas. Ver la Referencia 9 para información adicional.

11.5.3.2 Controladores del flujo de aire. Elementos capaces de regular los flujos de aire como sea necesario para reunir los requerimientos de estabilidad de la salida y de precisión del fotómetro.

11.5.3.3 Generador de ozono. Elemento capaz de generar niveles estables de O₃ sobre el rango de concentración requerido.



11.5.3.4 *Manifold de salida.* El manifold de salida debería ser de vidrio, teflón u otros materiales relativamente inertes, y debería tener un diámetro suficiente para asegurar una caída de presión despreciable en la conexión del fotómetro y los otros puertos de salida. El sistema debe tener un venteo diseñado para asegurar la presión atmosférica en el manifold y prevenir que el aire ambiente entre al manifold.

11.5.3.5 *Válvula de dos vías.* Válvula manual o automática, u otros medios para activar el flujo del fotómetro entre el aire cero y la concentración de O₃.

11.5.3.6 *Indicador de temperatura.* Exactitud de ±1°C.

11.5.3.7 *Barómetro o indicador de presión.* Exactitud de ±2 torr.

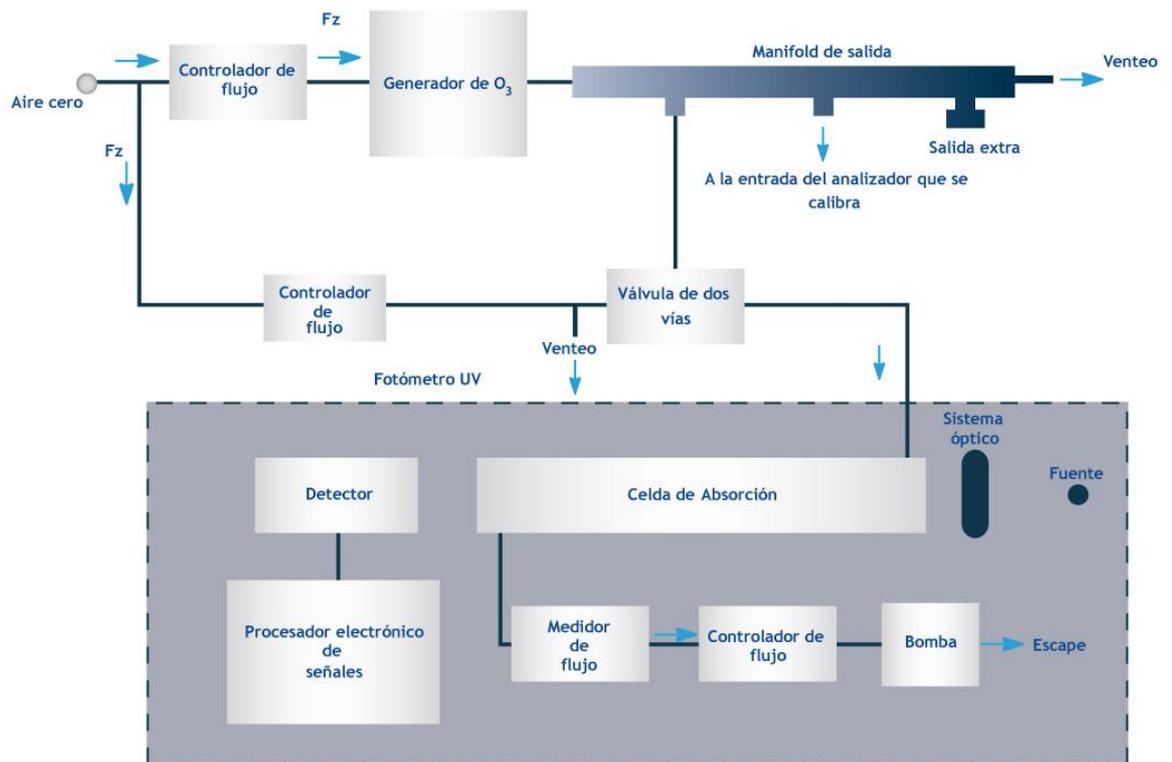


Figura 69. Diagrama esquemático de un sistema típico de calibración fotométrica UV

11.5.4. REACTIVOS

4.1 Aire cero. El aire cero debe estar libre de contaminantes que puedan causar una respuesta detectable en el analizador de O₃, y debe estar libre de NO, C₂H₄, y otras especies que pueden reaccionar con el O₃. Un procedimiento adecuado para generar aire cero se presenta en la Referencia 9. Como se muestra en la Figura 1, el aire cero suministrado a la celda del fotómetro para la medición de lo de referencia debe ser derivado de la misma fuente de aire cero usado para la generación de la concentración de ozono a ser analizada (medición de I).

11.5.5. PROCEDIMIENTO

11.5.5.1 Operación general. El fotómetro de calibración debe dedicarse exclusivamente para ser usado como estándar de calibración. Debe usarse siempre con gases de calibración limpios y filtrados y nunca usarse con muestras de aire ambiente. El fotómetro de calibración debe ubicarse en un laboratorio limpio donde pueda estar en un sitio fijo, protegido de choques físicos, operado por un analista responsable y usado como un estándar común para todas las calibraciones de campo vía estándares de transferencia.

11.5.5.2 Preparación. La operación propia del fotómetro es de importancia crítica para la exactitud de este procedimiento. Los siguientes pasos ayudarán a verificar la operación. Estos pasos no son necesariamente requeridos antes de cada uso del fotómetro. Una vez se empiece a usar el fotómetro, estos pasos deben seguirse frecuentemente, con todos los resultados cuantitativos o indicaciones registradas en orden cronológico bien sea a manera de tabla o en forma gráfica. Cuando se han establecido los registros de desempeño y estabilidad del fotómetro, la frecuencia de estos pasos puede reducirse en forma consistente con la estabilidad documentada del fotómetro.

1. Manual de instrucciones: Realice todos los procedimientos de instalación y ajuste o verificación como se describe en el manual de operación o instrucciones del fotómetro.

2 Revisión del sistema: Revise el sistema del fotómetro para integridad, escapes, limpieza, tasas de flujo apropiadas, entre otros. Mantenga o reemplace filtros y lavadores de aire cero u otros materiales consumibles, cuando sea necesario.

3 Linealidad: Verifique que el fabricante del fotómetro haya establecido adecuadamente que el error de linealidad del fotómetro sea menor al 3%, o determine la linealidad por dilución de la siguiente manera: Genere y analice una concentración de O₃ cercana al límite superior del rango del sistema (0,5 o 1,0 ppm), luego diluya exactamente esa concentración con aire cero y analice nuevamente. Repita el procedimiento con diferentes relaciones de dilución. Compare el análisis de la concentración original con el análisis de la concentración diluida dividida por la relación de dilución, como sigue

$$E = \frac{A_1 - A_2 / R}{A_1} \times 100\% \quad (3)$$

donde:

E = error de linealidad, (%)

A1 = análisis de la concentración original

A2 = análisis de la concentración diluida

R = relación de dilución = flujo de la concentración original dividida por el flujo total

El error de linealidad debe ser menor al 5%. Ya que la exactitud de las tasas de flujo medidas afectará el error de linealidad medida de esta manera, la prueba no es necesariamente concluyente. Información adicional para verificar la linealidad puede encontrarse en la Referencia 9.

4 Intercomparación: Cuando sea posible, el fotómetro debe ser intercomparado ocasionalmente, bien sea directamente o vía estándares de transferencia, con fotómetros de calibración usados por otros laboratorios.

5 Pérdidas de ozono: Alguna parte de O₃ puede perderse por contacto con las paredes de la celda del fotómetro y los componentes para el manejo de gas. La magnitud de estas pérdidas debe determinarse para corregir la concentración de O₃ calculada. Estas pérdidas no deben exceder el 5%. Algunas guías para determinar cuantitativamente esta pérdida se discuten en la Referencia 9.

11.5.5.3 Análisis de las concentraciones de O₃

1. Deje calentar y estabilizar el sistema del fotómetro
 2. Verifique que la tasa de flujo a través de la celda de absorción del fotómetro, F, permita a la celda ser limpiada en un periodo corto de tiempo (2 litros/min es un flujo típico). La precisión de las mediciones se relaciona inversamente con el tiempo requerido para limpieza, puesto que la desviación del error del fotómetro se incrementa con el tiempo.
 3. Asegure que la tasa de flujo en la salida del manifold es al menos 1 litro/min mayor que la tasa de flujo total requerida por el fotómetro y cualquier otra demanda de flujo conectada al manifold.
 4. Asegure que la tasa de flujo de aire cero, F_z, es al menos 1 litro/min mayor que la tasa de flujo requerida por el fotómetro.
 5. Con aire cero fluyendo en la salida del manifold, active la válvula de dos vías para permitir que el fotómetro muestree primero el aire cero del manifold, denominado F_z. Las dos lecturas del fotómetro deben ser iguales (I = I_o).
- Nota: En algunos fotómetros disponibles comercialmente, la operación de la válvula de dos vías y algunas otras operaciones de la sección 11.5.5.3 pueden realizarse automáticamente por el fotómetro.
6. Ajuste el generador de O₃ para producir la concentración de O₃ que se necesite.
 7. Active la válvula de dos vías para permitir que el fotómetro muestree aire cero hasta que la celda de absorción sea limpiada a fondo y registre el valor estable medido de I_o.
 8. Active la válvula de dos vías para permitir que el fotómetro muestree la concentración de ozono hasta que la celda de absorción sea limpiada a fondo y registre el valor estable medido de I.
 9. Registre la temperatura y presión de la muestra en la celda de absorción del fotómetro. (Ver la Referencia 9 para guía).
 10. Calcule la concentración de O₃ a partir de la ecuación 4. Un promedio de muchas determinaciones dará mejor precisión.

$$[O_3]_{OUT} = \left(\frac{-1}{\alpha l} \ln \frac{I}{I_o} \right) \left(\frac{T}{273} \right) \left(\frac{760}{P} \right) \times \frac{10^6}{L} \quad (4)$$

donde:

- [O₃]_{OUT} = concentración de O₃, ppm
 α = coeficiente de absorción de O₃ a 254 nm = 308 atm⁻¹cm⁻¹ a 0°C y 760 torr
 l = longitud de trayectoria óptica, cm

- T = temperatura de la muestra, K
 P = presión de la muestra, torr
 L = factor de corrección por pérdidas de O₃ de 5.2.5 = (1- fracción O₃ perdido).

Nota: Algunos fotómetros comerciales pueden evaluar automáticamente toda o parte de la ecuación 4. Es responsabilidad del operador verificar que toda la información requerida por la ecuación 4 sea obtenida, bien sea automáticamente por el fotómetro o en forma manual. Para fotómetros "automáticos" que evalúan el primer término de la ecuación 4 basados en una aproximación lineal, se puede requerir una corrección manual, particularmente a niveles altos de O₃. Como guía consulte el manual de instrucción del fotómetro y la Referencia 9.

11. Obtenga estándares adicionales de concentración de O₃ como sea necesario repitiendo los pasos 6 al 10 o por la opción 1.

11.5.5.4 Certificación de estándares de transferencia. Un estándar de transferencia es certificado relacionando la salida del estándar de transferencia a uno o más estándares de ozono como se determine de acuerdo a la sección 11.5.5.3. El procedimiento exacto varía dependiendo de la naturaleza y diseño del estándar de transferencia. Consulte la Referencia 8 como guía.

11.5.5.5 Calibración de analizadores de ozono. Los analizadores de ozono se calibran de la siguiente manera, empleando estándares de ozono obtenidos directamente según la sección 11.5.5.3 o por medio de un estándar de transferencia certificado.

1 Deje suficiente tiempo para que el analizador de O₃ y el fotómetro o estándar de transferencia se calienten y estabilicen.

2 Permita que el analizador de O₃ muestree aire cero hasta que se obtenga una respuesta estable y ajuste el control cero del analizador de O₃. Se recomienda compensar el ajuste cero del analizador a +5% de la escala para facilitar la observación de la desviación negativa del cero. Registre la respuesta estable del aire cero como "Z".

3 Genere un estándar de concentración de O₃ de aproximadamente 80% del límite de rango superior deseado (URL) del analizador de O₃. Permita que el analizador de O₃ muestree este estándar de concentración de O₃ hasta que se obtenga una respuesta estable.

4 Ajuste el control de la escala total (span) del analizador de O₃ hasta obtener una respuesta del registrador conveniente como se indica a continuación:

Respuesta del registrador (% de la escala) =

$$\left(\frac{[O_3]_{\text{act}}}{URL} \times 100 \right) + Z \quad (5)$$

donde:

- URL = límite del rango superior del analizador de O₃, ppm
 Z = respuesta del registrador con aire cero, % escala

Registre la concentración de O₃ y la respuesta correspondiente del analizador. Si se necesita un ajuste sustancial del control de la escala total (span), revise los ajustes del cero y la escala total (span), repitiendo los pasos 2 al 4.

5 Genere otros estándares de concentración de O₃ (al menos otros 5 son recomendados) sobre el rango del analizador de O₃ ajustando la fuente de O₃ o mediante la opción 1. Para cada estándar de concentración de O₃, registre el O₃ y la correspondiente respuesta del analizador.

6 Realice un diagrama de las respuestas del analizador de O₃ versus las correspondientes concentraciones de O₃ y elabore la curva de calibración del analizador de O₃ o calcule el apropiado factor de respuesta.

7 Opción 1: Las diferentes concentraciones de O₃ requeridas en los pasos 11.5.5.3-11 y 11.5.5.5-5 pueden obtenerse por dilución de la concentración de O₃ generada en los pasos 11.5.5.3-6 y 11.5.5.5-3. Con esta opción, se requiere que las mediciones de flujo sean exactas. El sistema de calibración dinámico puede ser modificado como se muestra en la Figura 70 para permitir que el aire de dilución pueda ser medido después de pasar por el generador de O₃. También se requiere de una cámara de mezcla entre el generador de O₃ y el manifold de salida. La tasa de flujo a través del generador de O₃ (F_O) y la tasa de flujo del aire de dilución (F_D) son medidos con un flujo confiable o un volumen estándar trazable a estándares nacionales o internacionales. Cada concentración de O₃ generada por dilución es calculada de la siguiente forma:

$$[O_3]'_{OUT} = [O_3]_{OUT} \left(\frac{F_O}{F_O + F_D} \right) \quad (6)$$

donde:

[O₃]'_{OUT} = concentración de O₃ diluido, ppm
 F_O = tasa de flujo a través del generador de O₃, litros/min
 F_D = tasa de flujo del aire diluyente, litros/min

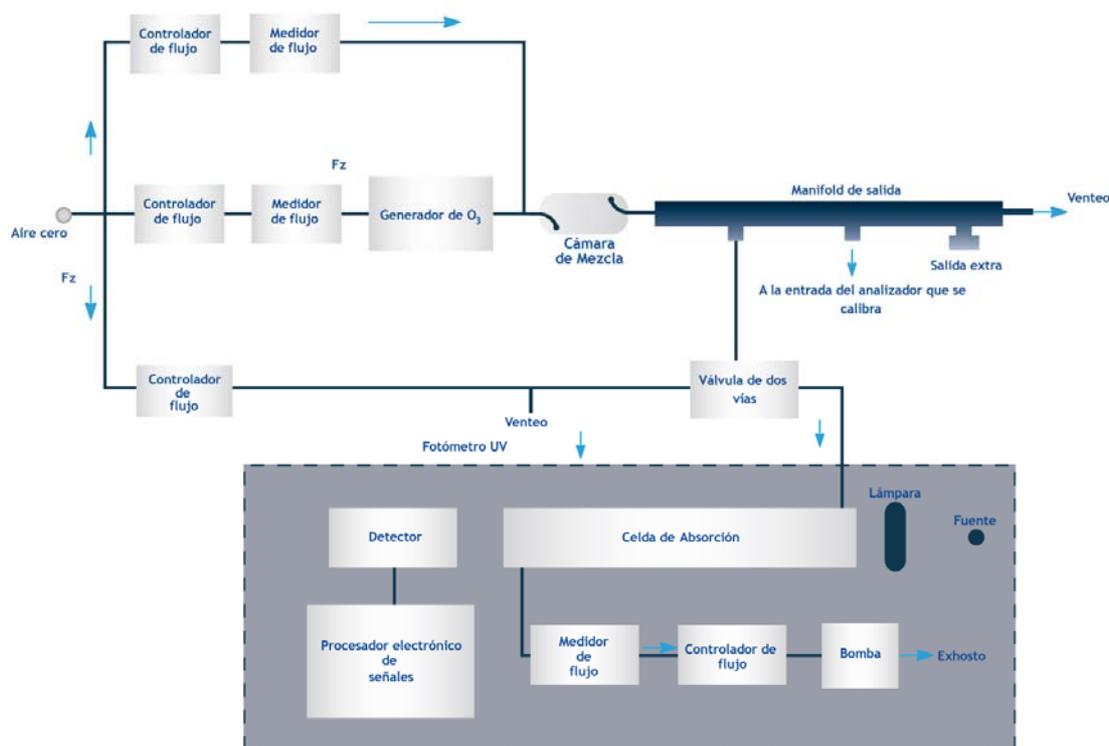


Figura 70. Diagrama esquemático de un sistema típico de calibración fotométrica UV (opción1)

Referencias

1. E.C.Y. Inn and Y. Tanaka, "Absorption coefficient of Ozone in the Ultraviolet and Visible Regions", *J. Opt. Soc. Am.*, 43, 870 (1953).
2. A. G. Hearn, "Absorption of Ozone in the Ultraviolet and Visible Regions of the Spectrum", *Proc. Phys. Soc. (London)*, 78, 932 (1961).
3. W. B. DeMore and O. Raper, "Hartley Band Extinction Coefficients of Ozone in the Gas Phase and in Liquid Nitrogen, Carbon Monoxide, and Argon", *J. Phys. Chem.*, 68, 412 (1964).
4. M. Griggs, "Absorption Coefficients of Ozone in the Ultraviolet and Visible Regions", *J. Chem. Phys.*, 49, 857 (1968).
5. K. H. Becker, U. Schurath, and H. Seitz, "Ozone Olefin Reactions in the Gas Phase. 1. Rate Constants and Activation Energies", *Int'l Jour. of Chem. Kinetics*, VI, 725 (1974).
6. M. A. A. Clyne and J. A. Coxom, "Kinetic Studies of Oxy-halogen Radical Systems", *Proc. Roy. Soc.*, A303, 207 (1968).
7. J. W. Simons, R. J. Paur, H. A. Webster, and E. J. Bair, "Ozone Ultraviolet Photolysis. VI. The Ultraviolet Spectrum", *J. Chem. Phys.*, 59, 1203 (1973).

8. Transfer Standards for Calibration of Ambient Air Monitoring Analyzers for Ozone, EPA publication number EPA-600/4-79-056, EPA, National Exposure Research Laboratory, Department E, (MD-77B), Research Triangle Park, NC 27711.

9. Technical Assistance Document for the Calibration of Ambient Ozone Monitors, EPA publication number EPA-600/4-79-057, EPA, National Exposure Research Laboratory, Department E, (MD-77B), Research Triangle Park, NC 27711.



11.6. DETERMINACION DE LA CONCENTRACIÓN MASICA DE OZONO. METODO DE QUIMIOLUMINISCENCIA

11.6.1. GENERALIDADES

Este protocolo especifica un método de quimioluminiscencia para la determinación de la concentración másica de ozono en el aire ambiente entre 2 g/m^3 [0,001 ppm (V/V)] y 10 mg/m^3 [5 ppm (V/V)] a las condiciones de referencia de 25°C y $101,3 \text{ kPa}$.

La fotometría ultravioleta (UV) se especifica como el método de calibración primario debido a su exactitud comprobada y a su especificidad para el ozono. El uso de estándares de transferencia se permite si han sido calibrados previamente contra el método de calibración primario.

11.6.2. LIMITACIONES

La reacción quimioluminiscente del ozono con el etileno no está sujeta a interferencia de ninguno de los contaminantes de aire comunes. Sin embargo, si no se retira el material particulado, se acumulará en la línea de muestreo y puede causar destrucción mensurable del ozono. Si se deja penetrar material particulado a la cámara de reacción del analizador, no solo dispersará la luz emitida, sino que se acumulará en la ventana óptica, causando con ello una mayor atenuación de la luz emitida. De igual forma, el óxido de nitrógeno (II) presente en el aire al que se ha hecho la muestra, reaccionará en alguna medida con el ozono del ambiente; por lo tanto, el tiempo durante el cual el aire del ambiente permanece en la línea de muestreo deberá ser lo suficientemente corto para mantener este efecto en el mínimo.

Nota: Algunos investigadores han reportado que a una humedad relativa del 80% y a 22°C , las respuestas para algunos analizadores de quimioluminiscencia comerciales fueron alrededor del 10% más altas que para aire seco. Sin embargo, las comparaciones de las mediciones del ozono del ambiente utilizando analizadores de quimioluminiscencia comerciales y fotométricos UV no presentaron diferencias significativas. Esto sugiere que en la práctica cualquier error asociado con calibraciones utilizando aire seco, se compensa por otros efectos.

11.6.3. DEFINICIÓN

Para este protocolo se aplica la siguiente definición: “*Estándar de transferencia*: Aparato (portátil) con procedimientos operacionales asociados, que es capaz de medir con exactitud o de reproducir los estándares de concentración de ozono que están relacionados cuantitativamente con el estándar primario certificado”.



11.6.4. PRINCIPIO

La muestra de aire se extrae continuamente a una tasa de flujo constante a través de un filtro de partículas antes de entrar en el analizador de quimioluminiscencia. Entonces fluye a una cámara de reacción en donde es mezclada con el flujo excedente de etileno. El ozono y el etileno reaccionan inmediatamente para producir luz en la región visible a una longitud de onda máxima de aproximadamente 400 nm. La intensidad de la luz emitida es proporcional a la concentración de ozono en la muestra de aire y se mide con un tubo fotomultiplicador. La tensión resultante se amplifica, se revela y calibra en términos de la concentración de ozono del ambiente.

11.6.5. REACTIVOS Y MATERIALES

11.6.5.1. Línea de muestreo

La línea de muestreo se debe fabricar de un material inerte al ozono, tal como el vidrio o un polímero de fluorocarbono y deberá ser lo más corta posible para reducir al mínimo el tiempo que la muestra de aire permanece allí. Cualquier óxido de nitrógeno (II) del ambiente presente en la muestra de aire reaccionará con parte del ozono durante el tiempo que permanece en la línea de muestreo. Esta reducción del ozono es una función complicada de la relación de concentración másica $\rho(\text{O}_3)/\rho(\text{NO})$, y la diferencia de concentraciones de masa $\rho(\text{O}_3) - \rho(\text{NO})$. Los cálculos han demostrado que si el tiempo de residencia es menor de 0,5 s, la reducción en el ozono inicial será menos del 1% para la mayor parte de las concentraciones de ozono del ambiente y de óxido de nitrógeno (II) encontradas. Por lo tanto se recomienda escoger la longitud de la línea de muestreo y la velocidad de bombeo, de manera que el tiempo que el aire permanece en la línea de muestreo sea menor de 0,5 s. Sin embargo, en situaciones de monitoreo de rutina se permite un tiempo hasta de 5 s.

Cualquier línea de muestreo o tubo múltiple antes del filtro deberán estar limpios. Se deberán tomar las precauciones apropiadas para evitar condensación dentro de la línea de muestreo, por ejemplo, calentando la línea.

11.6.5.2. Filtro de partículas.

El filtro y el soporte se deberán fabricar de un material inerte al ozono, tal como un polímero de fluorocarbono y deberá retirar todas las partículas que puedan alterar el funcionamiento del analizador. Se deberá cambiar con regularidad, dependiendo de las concentraciones de partículas del ambiente en el sitio del muestreo. Esto es necesario, debido a que la acumulación excesiva de partículas en el filtro puede ocasionar pérdida de ozono de la muestra de aire y una caída de presión excesiva a través del filtro.

Notas:

- Con frecuencia se utiliza un filtro con 5 m de tamaño de poro.
 - En general los filtros nuevos necesitan algún tiempo de acondicionamiento a la atmósfera del ambiente. Como resultado, se ha observado que las concentraciones másicas medidas de ozono se reducen temporalmente de un 5 a 10% en periodos de 5 a 15 min inmediatamente después de los cambios de filtro.
- 

11.6.5.3. Etileno

De 99,5% de pureza mínima.

Advertencia: El etileno tiene un límite explosivo menor de 27,5 L/m³. Cualquier exceso se deberá descargar al exterior o si es necesario se deberá retirar químicamente, especialmente en lugares en donde se están midiendo hidrocarburos. Se deben observar las precauciones normales cuando se utilice el gas inflamable.

11.6.5.4. Aire cero

Requerido en el procedimiento de calibración del analizador. Deberá estar libre de ozono, óxidos de nitrógeno y cualquier otra sustancia interferente que pueda causar una respuesta positiva o negativa indeseada, ya sea en el fotómetro ultravioleta o en el analizador de quimioluminiscencia. La respuesta del analizador de quimioluminiscencia del ozono se afecta por el contenido de oxígeno en la muestra de gas. Por lo tanto, si se utiliza aire sintético, el contenido de oxígeno deberá estar entre $\pm 2\%$ de la concentración atmosférica de 20,9%.

11.6.6. APARATOS

11.6.6.1. Analizador de quimioluminiscencia

Está compuesto de los sistemas de entrada de flujo de etileno y de muestra, una cámara de reacción a temperatura constante acoplada a un detector fotomultiplicador y un sistema electrónico de procesamiento de señal acompañante. Se deberá disponer de un medidor de flujo, si no es parte integral del analizador, para verificar que el flujo cumple las especificaciones del instrumento. En la Figura 71 se presenta un diagrama de un sistema típico.

11.6.6.2. Aparato para calibración

Se deberá utilizar un sistema de calibración de ozono (véase el diagrama esquemático simplificado de la Figura 72). Nota. Un sistema equivalente sería uno que utiliza solamente la línea de aire con el generador de ozono para llevar el aire cero y el ozonizado al tubo múltiple, eliminando con esto la necesidad de una válvula de dos pasos de cuatro entradas.

1 Fotómetro ultravioleta. Para calibración primaria consta únicamente de una lámpara de descarga de mercurio de baja presión, una celda de absorción sencilla o doble y un sistema electrónico para procesamiento de señal. Su mantenimiento se deberá realizar meticulosamente. Para evitar generación de ozono dentro de la celda de absorción se deberá insertar una ventana de vidrio con alto contenido de sílice (o equivalente) entre la lámpara de mercurio y la celda de absorción, para retirar la línea de 185 nm Hg pero transmitir la línea de medición de 253,7 nm Hg. El detector deberá estar en capacidad de medir la transmitancia a través de la celda de absorción en una longitud de onda de 253,7 nm con menos del 0,5% de la radiación detectada de otras longitudes de onda (los fotodiodos de vacío con telurio de cesio cumplen este requisito). La longitud de la trayectoria de la luz a través de la celda de absorción deberá tener una exactitud mayor del 0,5% y la celda y la instalación de guías de ondas se deberán diseñar para minimizar la pérdida de superficie del ozono. Se deberán tomar disposiciones para medir la temperatura y la presión del gas en la celda de absorción (véanse los numerales 6.2.8 y 6.2.9). En la Figura 72 se



presenta el esquema simplificado de un sistema de fotómetro.

2 Generador de ozono.

Para generar concentraciones de ozono estables que a su vez son medidas por el fotómetro calibrado (véase el numeral 6.2.1). El generador de ozono deberá estar en capacidad de producir concentraciones de ozono estables en el intervalo de medición a la tasa de flujo requerida y durante todo el periodo de calibración. Si no hay a disposición un generador de ozono variable, el sistema de calibración debe incluir un medio para diluir adecuadamente el ozono con el aire cero adicional (véase el numeral 5.4). En tal caso se deberá instalar una cámara de mezclado antes del tubo múltiple de salida.

Advertencia. El ozono es un gas tóxico con un valor límite permisible (VLP) en el aire de 0,1 ml/m³ y cualquier exceso se debe descargar en un depurador de carbón activado o en el exterior (en un sitio retirado de donde se toman muestras).

3 Controladores de flujo de aire

Deben tener capacidad para mantener un flujo de aire estable durante todo el periodo de calibración.

4 Medidores de flujo de aire

Deben ser de cualquier tipo adecuado para medir el flujo de aire requerido.

Nota. En los cálculos no se utiliza el flujo de aire real; éste se utiliza solamente para obtener las concentraciones normales requeridas en el proceso de calibración.

5 Bomba de aire

Se utiliza para extraer el flujo de muestra requerido a través de la celda de absorción.

6 Tubo múltiple de salida

Debe estar fabricado de materiales inertes al ozono, tales como el vidrio o un polímero de fluorocarbono. Debe tener el diámetro suficiente y debe tener un respiradero para asegurar una presión atmosférica igual adentro y afuera del tubo. El respiradero debe estar localizado de manera que se evite la intrusión de aire del ambiente.

7 Válvula de dos pasos con cuatro puertas

Su superficie interior debe ser fabricada de un material inerte al ozono, por ejemplo, un polímero de fluorocarbono. Cuando se utiliza un sistema de calibración como el que se presenta en la Figura 72, se deberá usar una válvula de dos pasos y cuatro puertas o algún sistema de válvulas equivalente para el intercambio de flujo entre aire cero y la atmósfera del ensayo de ozono, en el tubo múltiple.

8 Indicador de temperatura

Debe tener capacidad de medir la temperatura con una exactitud de 0,1°C.

9 Indicador de presión

Debe tener capacidad de medir la presión con una exactitud de ±0,1 kPa.



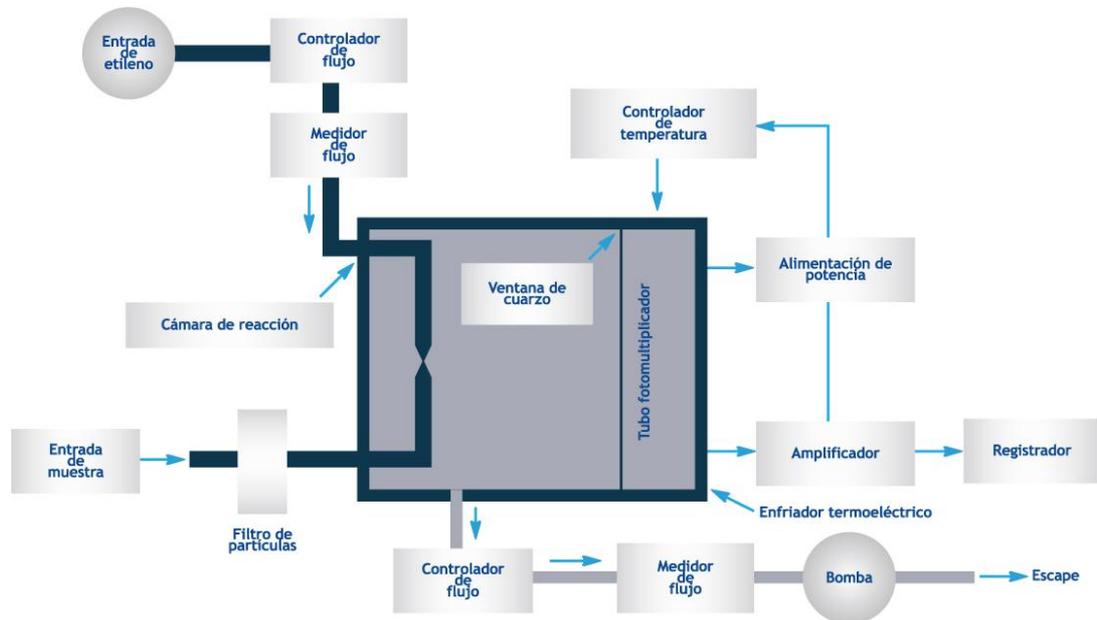


Figura 71. Diagrama esquemático de un analizador de ozono por quimioluminiscencia

11.6.7. PROCEDIMIENTO

11.6.7.1. Operación del analizador de quimioluminiscencia

Se instala el instrumento en un sitio adecuado y se siguen las instrucciones de operación del fabricante para el analizador específico que se utiliza, con el fin de ajustar los diferentes parámetros, incluyendo las tasas de flujo de etileno y de muestra. Es necesario realizar una verificación para asegurarse de que se cumplen o se superan las características de funcionamiento del fabricante. Si es necesario, la ubicación también deberá tener temperatura controlada, de manera que se minimice el efecto de la dependencia de temperatura del instrumento. (Véase el anexo A para las especificaciones de funcionamiento típico). Se introduce la muestra de aire en el instrumento y se registra la concentración de ozono por medio de un dispositivo de registro adecuado (por ejemplo, un cuadro de registro, un sistema de adquisición electrónica de datos, etc.).

Nota. Durante la operación continua del instrumento se recomienda llevar a cabo una calibración multipunto cada 3 meses. Además, llevar a cabo semanalmente revisiones operacionales de cero e intervalo total de la escala de los instrumentos.

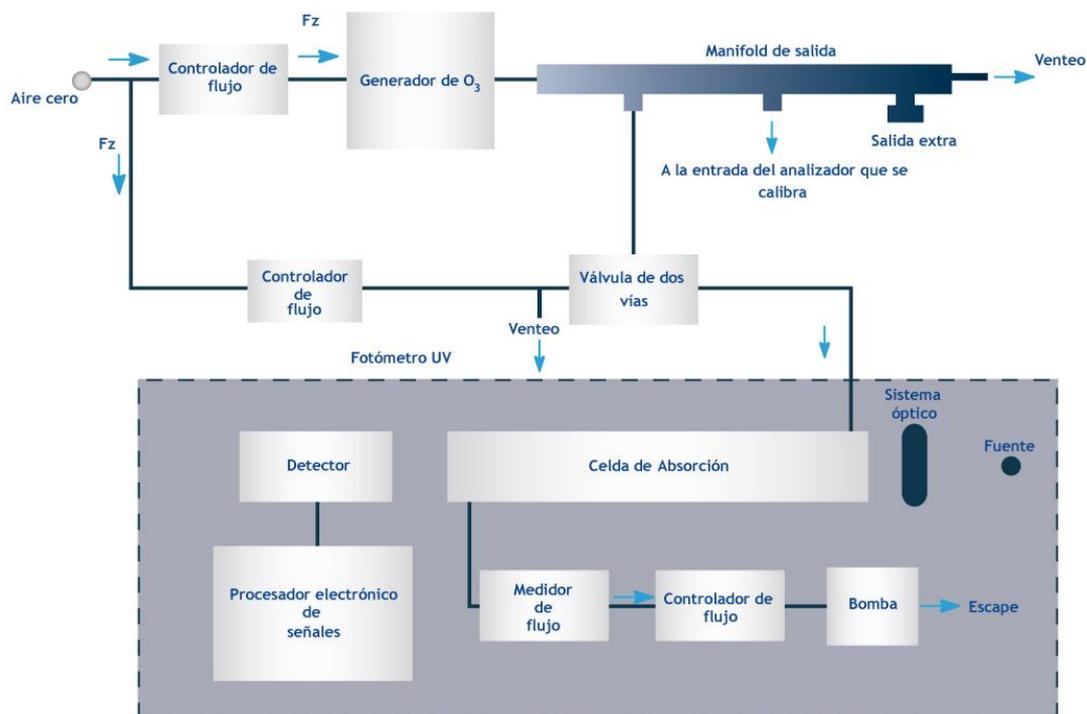


Figura 72. Diagrama de un sistema típico de calibración fotométrica UV.

11.6.7.2. Calibración del analizador de quimioluminiscencia

1 Principio

En la Figura 72 se presenta un diagrama esquemático de un sistema de calibración fotométrica ultravioleta. Se generan diferentes concentraciones de ozono (en el aire) y se miden con exactitud con un fotómetro ultravioleta de calibración primaria. El muestreo se hace a estas atmósferas de calibración del ozono simultáneamente con un analizador de quimioluminiscencia a través de un tubo múltiple común. Las respuestas del analizador se trazan contra las concentraciones de ozono medidas por el fotómetro ultravioleta. Alternativamente, un método de calibración que utiliza un estándar de transferencia se puede calibrar contra el fotómetro ultravioleta y usar para calibrar el analizador de quimioluminiscencia en el sitio del muestreo.

2 Procedimiento de calibración utilizando un estándar primario de UV

Durante el procedimiento de calibración el analizador de quimioluminiscencia se deberá operar a su temperatura y tasa de flujo correctos. La calibración incluye mediciones utilizando aire cero (véase el numeral 11.6.5.4) y al menos cuatro concentraciones de ozono (utilizando el generador descrito en el numeral 11.6.6.2-2) que deberán estar espaciadas razonablemente para cubrir el intervalo que se va a medir. Para todas las mediciones, el flujo de entrada al tubo múltiple deberá superar al menos en 10% el flujo total requerido por los instrumentos unidos a este tubo múltiple, con el exceso que descarga apropiadamente a presión atmosférica.

En el procedimiento de calibración detallada se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Ensamble del aparato, como se ilustra en la Figura 72.
- Se introduce aire cero en el tubo múltiple. Se ajusta el control cero del analizador de ozono que se está calibrando hasta que indique una lectura de cero y se ajusta a transmitancia del

fotómetro al 100%.

- Se ajusta la salida del generador de ozono para generar la atmósfera de ozono más concentrada que se requiere. -Se gira la válvula para introducir la atmósfera de ozono en el tubo múltiple. -Se registra la transmitancia en el fotómetro a 254 nm y también la temperatura y la presión en la celda fotométrica.
- Se ajusta el intervalo total de la escala sobre el analizador de ozono que se está calibrando, a la concentración de ozono calculada utilizando la ecuación 1 (véase el numeral 11.6.8.1).
- Se generan y miden al menos otras tres concentraciones de ozono sobre la escala del analizador de ozono, ajustando la intensidad del generador de ozono.
- Para cada concentración de ozono generada se registra la concentración de ozono y la respuesta del analizador correspondiente.
- Se grafican las respuestas del analizador de ozono vs. las concentraciones de ozono correspondientes en condiciones normalizadas, y se traza la curva de calibración del analizador de ozono o se calcula el factor de respuesta apropiado.

Notas:

-La repetición de esta calibración para estimar la incertidumbre de la calibración se considera opcional.

-Una pequeña fracción de ozono se puede perder al contacto con las paredes de la celda del fotómetro y otras superficies internas. Por lo tanto, para una máxima exactitud, esta pérdida de ozono se debe determinar cuantitativamente y usar para corregir la concentración de salida.

3 Procedimiento de calibración para el estándar de transferencia.

Se debe considerar la utilización de un estándar de transferencia cuando el fotómetro ultravioleta de calibración primaria no se encuentre a disposición, por ejemplo, en el sitio del analizador de quimioluminiscencia. Cuando se utiliza este procedimiento, se sigue la calibración descrita en el numeral 11.6.7.2-2 utilizando el estándar de transferencia en lugar del patrón del fotómetro UV. El estándar de transferencia deberá cumplir los siguientes requisitos:

- Se deberá establecer su exactitud contra el método fotométrico UV de calibración primaria y esta exactitud se deberá mantener dentro de $\pm 5\%$ entre calibraciones primarias sucesivas.
- La trazabilidad para el estándar fotométrico UV primario se deberá establecer mínimo una vez al año.

Notas:

- El método de calibración recomendado para el estándar de transferencia (portátil) es un sistema de fotómetro UV secundario con su propio aire cero y zona de suministro. Otros dos métodos de calibración aceptables para estándares de transferencia, aunque menos convenientes que el método fotométrico UV, son la titulación por fase gas del exceso de óxido nítrico (o viceversa) y el método de yoduro de potasio -bromuro de potasio (KIBR) con regulación neutra, con base en laboratorio.
- Existen otros métodos de calibración con base en laboratorio, para estándares de transferencia que son menos convenientes o posiblemente menos exactos. Dentro de ellos se encuentran:
 - El método de yoduro de potasio -bromuro de potasio tiosulfato (KIBRT) con regulación neutra
 - El método de yoduro de potasio regulado con ácido bórico (BAKI)
 - Una fuente de ozono estable con salida variable.

11.6.8. EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS

11.6.8.1. Concentración del ozono de calibración

La concentración másica del ozono $\rho(\text{O}_3)$ se calcula en microgramos por metro cúbico, en el tubo

múltiple a las condiciones de referencia (25°C y 101,3 kPa) utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho(\text{O}_3) = [-101.3 \times T \times \ln(I / I_0)] / [298 \times 1.44 \times 10^{-5}] \quad (1)$$

Donde,

b = es la longitud de la trayectoria óptica, en metros

I/I₀ = es la transmitancia de la muestra de ozono

P = es la presión en la celda del fotómetro, en kilopascales

T = es la temperatura de la celda del fotómetro, en kelvin

1,44 x 10⁻⁵ = es el coeficiente de absorción del ozono en metros cuadrados por microgramo

11.6.8.2. Concentración de ozono de la muestra

Se convierten las lecturas del analizador de quimioluminiscencia a las concentraciones máxicas, utilizando la curva de calibración apropiada. Los resultados se reportan en microgramos por metro cúbico (g/m³) a 25°C y 101,3 kPa, o como partes por millón en volumen (ppm (V/V)). Para el ozono, 1 ppm es equivalente a 1960 g/m³ a 25°C y 101,3 kPa.

11.6.8.3. Precisión

La precisión total con una probabilidad del 95% para la generación y medición fotométrica con UV de las atmósferas de calibración de ozono deberá ser superior al 5%; la misma precisión global se deberá aplicar para el método de calibración del estándar de transferencia.

Nota. Algunos estudios han demostrado que la precisión de las calibraciones con ozono para fotometría UV se puede encontrar entre ±1% si se tiene cuidado al operar el sistema. En combinación con el método de quimioluminiscencia y debido a la variabilidad en las técnicas de laboratorio, se espera que la precisión total del análisis de ozono del aire del ambiente se encuentre en ±3,5%.

11.6.8.4. Exactitud

La exactitud del método se estima que es superior a ±10% de la concentración medida.

Nota. La exactitud del método de quimioluminiscencia dependerá del método del fotómetro al cual se hace referencia. La exactitud de la referencia al fotómetro UV estará limitada por la exactitud del coeficiente de absorción (±1,5%) y las mediciones de transmitancia, presión, temperatura, pérdidas de ozono, etc. Cuando se utiliza un estándar de transferencia, se presentarán inexactitudes adicionales inherentes al mismo.

11.6.9. INFORME DE ENSAYO

El informe de ensayo deberá contener la siguiente información:

- Una referencia a este protocolo
 - La identificación completa de la muestra
 - Los resultados
- 

- Cualquier característica inusual percibida durante la determinación

11.6.10. REFERENCIA

International Organization for Standardization. ISO 10313. Ambient air. Determination of the mass concentration of ozone. Chemiluminescence method. Geneve, 1993

ANEXO A CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO TÍPICO Y ESPECIFICACIONES PARA EL ANALIZADOR DE OZONO PARA QUIMIOLUMINISCENCIA

Las especificaciones presentadas a continuación son informativas. No se deben interpretar como aplicables a ningún instrumento en particular.

- Tiempo de celda: 10 s
 - Tiempo de ascenso: 10 s
 - Tiempo de retraso: 3 s
 - Límite de detección inferior: 2 g/m³
 - Salida: 0 a 100 mV escala total
 - Intervalo: 0 a 10 mg/m³
 - Repetibilidad: 4%
 - Tasa de flujo de muestra: 0,5 L/min
 - Inestabilidad del intervalo de la escala total: 5% por semana, <3% en 24 h en un intervalo de 200 µg/m³
 - Período de operación sin atención: 7 d
 - Inestabilidad cero: igual a la inestabilidad del intervalo de la escala total
 - Intervalo de temperatura de operación: 10 a 40°C
 - Tiempo de calentamiento: 2 h
- 

11.7. METODO COLORIMETRICO PARA ANALISIS DE DIOXIDO DE NITROGENO EN LA ATMOSFERA (PROMEDIO DE 24 HORAS)⁵⁸

11.7.1. PRINCIPIO DEL MÉTODO

El dióxido de nitrógeno es absorbido del aire por una solución acuosa de trietanolamina y el análisis posterior es realizado usando un reactivo que forme un compuesto azo-colorante. El color producido por el reactivo es medido en un espectrofotómetro a 540 nm.

11.7.2. RANGO Y SENSIBILIDAD

1. El rango de la concentración en el aire para el cual este método puede ser usado con confianza, está entre 10 a 1000 g/m³ (0,005 a 0,50 ppm), tomando como base un periodo de muestreo de 24 horas. El comportamiento del método para niveles de NO₂ por encima de 1000 g/m³ (0,5 ppm) aún no ha sido establecido.

2. La sensibilidad del método depende del reactivo de Griess -Saltzman. Para celda de trayectoria óptica de 1 cm y 0,1 unidades de absorbancia es equivalente a 0,14 g/mL de NO₂ en la solución de absorción.

11.7.3. INTERFERENCIAS

1. El dióxido de azufre en concentraciones hasta de 2000 µg/m³ (0,7 ppm) no interfiere si el peróxido de hidrógeno es añadido después del muestreo y antes del desarrollo del color (véase numeral 11.7.7.2).

El ozono no causa interferencias en los rangos de concentración atmosféricos (hasta de 1000 µg/m³).

El óxido nítrico en concentraciones hasta de 800 µg/m³ (0,6 ppm) como promedio de 24 horas no causa interferencias.

2. Los nitritos orgánicos y nitratos de peroxiacilo (PAN), que pueden estar presentes en el aire, podrían causar una interferencia positiva. No hay datos de la magnitud de la interferencia, sin embargo, en vista de las concentraciones promedio de 24 horas de los nitritos orgánicos y de los nitratos de peroxiacilo que han sido reportados en la literatura, parecería que esta interferencia podría ser despreciable.

11.7.4. PRECISIÓN Y EXACTITUD

1. La precisión del método en terreno expresado como la desviación estándar fue ±12 µg/m³ (± 0,006 ppm) en un muestreo de 24 horas, para una media de 81 µg/m³ (± 0,043 ppm) comparado con un analizador colorimétrico continuo.

2. En la actualidad no hay disponibilidad de datos de exactitud, sin embargo, la exactitud puede ser considerada comparable con la que se obtiene en un muestreo de corto término con el reactivo de Griess - Saltzman, la cual es menor que el 9% de desviación cuando se usa el factor 0,72 o menor que el 2% cuando se usa el factor 0,764.

⁵⁸ Equivalente al método Jacobs - Hocheiser fijado en el Decreto 02 de 1982



3. La eficiencia de la absorción es del 95 al 99% en los burbujeadotes plásticos con 50 mL de solución absorbente.

11.7.5. APARATOS

11.7.5.1. *Absorbedor*

La muestra es absorbida en un tubo de polipropileno de 163 x 32 mm de diámetro interno ajustado a una tapa de polipropileno con dos aberturas. El tubo que dispersa el gas con una porosidad entre 60 y 100 μm es usado en conjunto con el tubo. Alternativamente, todo un sistema de vidrio puede ser usado.

11.7.5.2. *Equipo para medición de aire*

Un rotámetro capaz de medir tasa de flujo hasta 0,4 L/min, calibrado contra un medidor de gas húmedo.

Orificios calibrados tales como agujas hipodérmicas pueden ser usados para controlar el flujo. En cada caso se requiere una presión mínima diferencial de 500 mm de Hg a través de la aguja. Debe colocarse un filtro de membrana en frente de la aguja hipodérmica para prevenir que las gotas de agua se adhieran a la aguja causando alteración en el flujo de gas.

11.7.5.3. *Líneas de muestreo*

Las líneas de muestreo deben ser construidas de teflón, vidrio o acero inoxidable.

11.7.5.4. *Bomba de aire*

Una bomba de vacío capaz de muestrear aire a través del absorbedor a la tasa requerida de 0,4 L/min durante 24 horas. La bomba debe estar equipada con una válvula de aguja para controlar que la tasa de muestreo sea exacta.

Si un orificio crítico es usado como sistema de control de flujo, la bomba debe ser capaz de mantener un vacío mínimo de 500 mm de Hg a través del orificio a la tasa requerida de 0,4 L/min.

11.7.5.5. *Espectrofotómetro*

El instrumento usado debe ser capaz de medir la absorbancia de una solución a 540 nm. Una celda de trayectoria óptica de 1 cm es la más adecuada.

11.7.6. REACTIVOS

1 Los reactivos químicos usados deben ser grado analítico. El agua debe estar libre de nitritos.

2 Líquido absorbedor

Añada 15 g de trietanolamina aproximadamente a 500 mL de agua destilada; luego adicione 3 mL de N-butanol. Mezcle bien y diluya hasta 1 L con agua destilada. El N-butanol actúa como un surfactante. Si se presenta formación de mucha espuma durante el muestreo, se debe disminuir la cantidad de N-butanol. El reactivo es estable por dos meses si se mantiene en una botella oscura y bajo refrigeración.

3 Peróxido de hidrógeno

Diluya 0,2 mL de peróxido de hidrógeno al 30% hasta 250 mL con agua destilada.

Precaución: El peróxido de hidrógeno es un oxidante fuerte y puede causar daño en la piel y en la ropa.



4 Solución de sulfanilamida.

Disuelva 10 g de sulfanilamida en 400 mL de agua destilada, luego adicione 25 mL de ácido fosfórico concentrado (85%) y complete hasta 500 mL. Esta solución es estable por varios meses si se almacena en un frasco oscuro y hasta por 1 año si se mantiene refrigerada.

5 N-(1 NAFTIL) - Etilendiamina Dihidrocloruros (NEDA)

Disuelva 0,1 g de NEDA en 100 mL de agua destilada. La solución es estable por 1 mes si se mantiene en una botella oscura y bajo refrigeración.

6 Solución Stock de nitrito

Disuelva 0,135 g de nitrito de sodio en agua destilada y complete hasta 1 L. El nitrito de sodio debe ser de pureza conocida o analizada antes del uso. La solución contiene 90 g de nitrito/mL, lo cual corresponde a 100 g de NO₂ (gas)/mL. La solución debe ser preparada una vez al mes.

11.7.7. PROCEDIMIENTO

11.7.7.1. *Muestreo*

Adicione 50 mL de la solución absorbente en el burbujeador. Conecte el burbujeador al tren de muestreo y prenda la bomba; ajuste la tasa de flujo rápidamente en 150 y 200 mL/min, si se usa válvula de aguja. Si se usa un orificio crítico verifique la tasa de flujo hasta determinar que esté conforme con la calibración, muestree por 24 horas y observe la tasa de flujo al final del periodo. Si la muestra está bien tapada puede ser almacenada por un periodo de 3 semanas antes de análisis sin pérdidas.

11.7.7.2. *Desarrollo del color*

Complete cualquier pérdida en la solución absorbente llevándola a 50 mL, con agua destilada. Transfiera una alícuota de 10 mL de la solución a un cilindro graduado de 25 mL; de manera similar transfiera una alícuota de 10 mL a la solución de absorción no expuesta, a un segundo cilindro de graduación de 25 mL. Adicione a cada cilindro 1 mL de solución de peróxido de hidrógeno diluido y mezcle bien. Luego añada 10 mL de solución de sulfanilamida y 1 mL de solución de NEDA a la muestra y al blanco, mezcle bien y permita que se desarrolle el color durante 10 min. Mida la absorbancia de la solución muestra contra el blanco a 540 nm. El NO₂ se determina luego con la curva de calibración.

11.7.8. CALIBRACIÓN Y ESTANDARIZACIÓN

1. La curva de calibración puede ser obtenida por dos métodos diferentes:

El método más simple y conveniente es la estandarización con soluciones de nitrito. Sin embargo, mezclas exactas de gas conocidas darían estándares más reales para calibración de todo el sistema analítico. Las mezclas de gas conocidas pueden ser preparadas usando un sistema de dilución de flujo o tubos de permeación.

2. Estandarización con solución de nitrito

Transfiera 1 mL de solución de nitrito almacenada a un matraz volumétrico de 50 mL y diluya hasta la marca con solución de absorción. La solución de trabajo así obtenida contiene 1,8 µg NO₂/mL (que corresponde a 2 µg NO₂ (gas)/mL). A una serie de cilindros graduados de 25 mL, introduzca 0, 1, 3, 5 y 7 mL de solución de trabajo de nitrito. Diluya a 10 mL con solución de absorción. Desde este punto trate los estándares como se describe en el numeral 11.7.7.2. Elabore una gráfica de absorbancia contra concentración de NO₂. Las verificaciones deben hacerse semanalmente para determinar si la respuesta de los reactivos ha cambiado.



11.7.9. CÁLCULOS

1 El volumen de aire muestreado es corregido a 25°C y 760 mm de Hg. La desviación normal de estas condiciones adiciona solamente pequeñas correcciones.

2 La estandarización por la solución de nitrito requiere el uso de un factor empírico que relaciona los microgramos de NO₂ (gas) con los microgramos de ión nitrito. El factor de conversión en este método es 0,90, esto es, el 90% de NO₂ en la muestra de aire es eventualmente convertido a ión nitrito, el cual reacciona con el color producido por el reactivo azo-colorante. Este factor ha sido incorporado en la solución stock de nitrito.

3 El cómputo de la concentración promedio de NO₂ en el aire en un periodo de muestreo de 24 horas puede ser efectuado como sigue:

Lea los µg de NO₂ directamente del gráfico.

$$c = \left[\frac{(\mu g NO_2 \times 10^3)}{(r \times t \times k)} \right] \mu g NO_2 / m^3$$

$$p = \frac{(\mu g NO_2 \times 0.532)}{(r \times t \times k)} = c \times 0.532 ppm / 10^3$$

donde,

c = concentración en µg NO₂/m³

P = concentración en ppm de NO₂ (µL/L)

r = tasa de muestreo en L/min

t = tiempo de muestreo en min

k = factor de dilución (0,2) si un quinto de la muestra es analizada

0,532 = µL NO₂ / µg NO₂ a 25°C y 760 mm de Hg

10³ = factor de conversión de L a m³

11.7.10. EFECTOS DE ALMACENAMIENTO

Después del muestreo, la solución absorbente puede ser almacenada hasta tres semanas sin pérdidas, si se mantiene tapada en la oscuridad. Sin embargo, después de que se produzca el color por los reactivos adicionados, la muestra debe ser analizada en pocas horas. La absorbancia de la solución coloreada decrece cerca del 4% por día.

11.7.11. REFERENCIA

MINISTERIO DE SALUD. Resolución No.03194 del 29 de marzo de 1983

11.8. RECOLECCION Y MEDICION DE PARTICULAS DE POLVO SEDIMENTABLES

11.8.1. APLICACIÓN

Este protocolo describe el procedimiento para la recolección de partículas de polvo y su medición, y un ensayo de partículas tanto solubles en agua como insolubles. No es apropiado para la determinación de la tasa de caída de polvo en pequeñas áreas afectadas por fuentes específicas.

11.8.2. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Material en partículas sedimentables: cualquier material compuesto de partículas provenientes del aire del ambiente, lo suficientemente pequeñas para pasar por un tamiz de 1 mm, y lo suficientemente grandes para asentarse en el recipiente, debido a su peso.

11.8.3. RESUMEN DEL ENSAYO

Se preparan y sellan en el laboratorio, recipientes de tamaño y forma estándar y luego se abren e instalan en los sitios escogidos apropiadamente, de manera que la materia en partículas se pueda asentar en ellos por periodos aproximados de 30 días. Posteriormente se cierran los recipientes y se devuelven al laboratorio, en donde se determinan, del material recolectado, las masas de componentes solubles e insolubles en agua. Los resultados se reportan en gramos por metro cuadrado por periodo de 30 días ($\text{g}/\text{m}^2/30$).

11.8.4. IMPORTANCIA Y USO

La ventaja de este ensayo es su gran sencillez. Es un ensayo ordinario, no específico, pero es de utilidad en el estudio de tendencias a largo plazo. Requiere poca inversión en equipo y se puede llevar a cabo con personal sin demasiada especialización técnica.

11.8.5. INTERFERENCIAS

Los resultados de este ensayo se obtienen por pesajes. Se puede considerar como interferente cualquier material que entra en el recipiente y que pasa a través del tamiz usado para el análisis, pero que no se asienta en el recipiente luego de incorporar aire.

11.8.6. APARATOS

- Recipiente

Un cilindro abierto en la parte superior, de mínimo 150 mm de diámetro, con una altura no superior al doble de su diámetro. Debe ser de acero inoxidable o de un plástico impermeable, y debe poder aceptar rotulado de identificación a prueba de agua. Cada recipiente debe tener una tapa que ajuste bien.

- Soporte para el recipiente

Debe sostener la parte superior del recipiente a 2 m sobre el piso. Debe tener una mampara, construida según las figuras 1 y 2. Algunos experimentos reportados indican que se obtiene más



precisión usando una sencilla paleta aerodinámica, y que a alturas menores de 2 m hay una amplia variabilidad en la concentración de partículas sujetas a sedimentación.

- Tamiz: de acero inoxidable, de 1 mm (No. 18)
- Horno de desecación: su temperatura debe ser controlada a 105°C
- Embudo Buchner: Se requiere un embudo Buchner y dos recipientes de filtrado de 2 L
- Papel de filtro: de filtrado rápido y de forma circular, para que se ajuste al embudo Buchner
- Platos de evaporación: de 100 mL de capacidad, cada uno bien diferenciado
- Desecadores
- Balanza analítica: para pesar con una precisión de $\pm 0,1$ mg
- Espátula flexible
- Cajón o armazón: para colocar los recipientes
- Cilindro graduado

Su capacidad debe ser de 1 L y se debe verificar la precisión de sus graduaciones de ± 5 mL, usando por ejemplo, frascos volumétricos o pipetas.

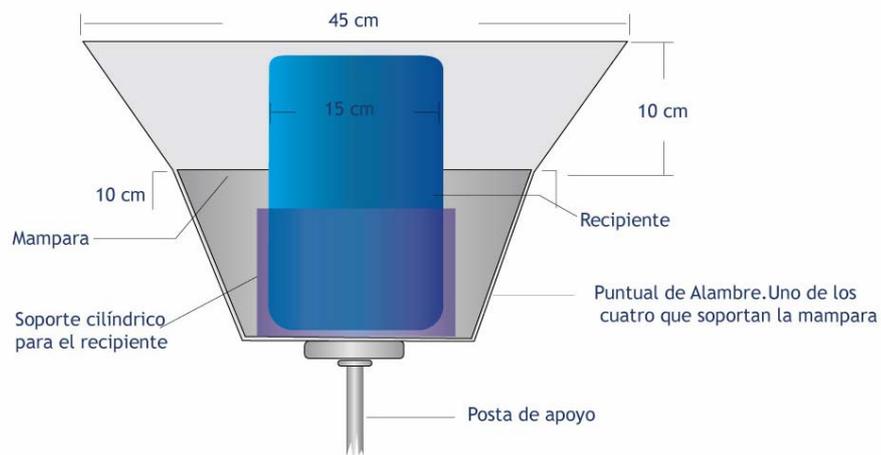


Figura 73. Mampara de recipiente para caída de polvo

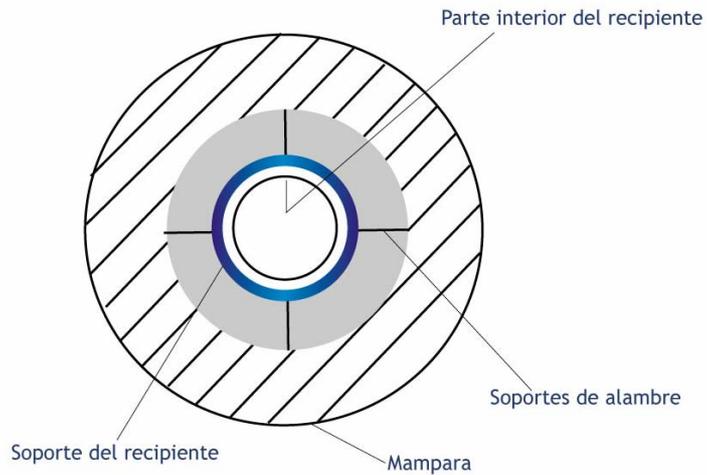


Figura 74. Sección de corte de la mampara

11.8.7. REACTIVOS

Agua: A menos que se indique de otra manera, las referencias que se hagan a agua se entenderán como agua destilada o desmineralizada.

11.8.8. MUESTREO

Sitios

Localización

Estas recomendaciones son una guía para seleccionar un sitio destinado al muestreo. En los casos en que no se pueden seguir estas recomendaciones, los resultados solo se deben presentar acompañados de la advertencia apropiada.

El sitio para el muestreo debe ser un área abierta, sin estructuras mayores de 1 m en un radio de 20 m del soporte del recipiente. Debe estar retirado de fuentes locales de contaminación y de objetos, por ejemplo árboles, escapes de aire y canales de ventilación, que puedan afectar la sedimentación de la materia. También son de gran importancia para el muestreo, cuestiones tales como la seguridad, accesibilidad y la prevención contra el vandalismo.

Las elevaciones hasta objetos más altos de 20 m no deben exceder 30 grados de la horizontal.

Se debe evitar colocar los recipientes cerca de chimeneas. Si es posible, el sitio para el muestreo deberá estar a más de 10 veces la longitud de un conducto en funcionamiento y contra el viento, de acuerdo con la dirección más frecuente de éste.

Nota: es necesario verificar efectivamente que los conductos no se encuentren en uso.

Número de sitios

Para cada región que se va a inspeccionar se deben suministrar mínimo 4 muestras, para tener en cuenta las muestras rechazadas y proporcionar alguna evidencia de las verificaciones de aseguramiento de calidad. Las estaciones se deben colocar en orden, aproximadamente en los

vértices de una malla en forma de triángulo equilátero. La disponibilidad del personal con frecuencia será un factor restrictivo, pero se sugiere que la distancia entre los sitios sea entre 5 y 8 km.

Se debe llevar un registro con la información específica para cada sitio, como por ejemplo la elevación aproximada sobre el nivel del mar y coordenadas cartográficas. Debe incluir una descripción detallada o fotografías del soporte del recipiente y alrededor de éste. También debe incluir fotografías o descripciones detalladas del área circundante, y se debe registrar la presencia de actividad inusual en el área vecina que arroje al aire una cantidad considerable de material particulado. Se deben registrar eventos tales como incendios, trabajos de construcción y demolición, desvíos del tráfico, etc. Los registros de estos eventos aumentarán considerablemente el valor de los datos obtenidos en este ensayo. Los registros de lluvias también pueden ser de utilidad en la interpretación de los resultados de este ensayo.

Preparación de los recipientes

Se limpian bien los contenedores y sus tapas con una solución detergente, y se enjuagan bien dos veces. Se cierran los recipientes con sus tapas, se les coloca una etiqueta con su número de identificación y se colocan en la caja o rejilla.

Recolección de la muestra

- Se colocan los recipientes en el sitio de recolección, se registran la fecha, hora y número de identificación de cada contenedor y se destapan los recipientes.

- Al finalizar el periodo de muestreo, se tapan nuevamente los recipientes, se colocan en las mallas y se llevan nuevamente al laboratorio para su análisis. Se debe registrar la fecha y hora de toma de la muestra y el número de identificación de los recipientes en cada sitio, a medida que se van recolectando las muestras.

- Durante el periodo de exposición también entrará agua en el recipiente, e igualmente se evaporará de él; puede haber líquido en los recipientes cuando se recogen. Este líquido se procesa posteriormente y por lo tanto no se debe desechar. Si existe la duda de que el recipiente se rebosó por lluvia, se debe invalidar la muestra correspondiente.

Periodo de muestreo

El periodo de muestreo deberá ser un mes calendario, con una tolerancia de ± 2 días permisibles cuando se escogen las fechas de colocación y retiro de las muestras. Los resultados se normalizan a un periodo de 30 días.

Manipulación

No se deberá intentar sacar el material recolectado en los recipientes en el sitio de toma de muestras.

Se debe llevar un registro escrito permanente del momento en que se colocan los recipientes en las mallas para llevarlos al campo y de nuevo cuando se regresan al laboratorio. Los registros de entrada y salida se deben confrontar inmediatamente y se debe investigar de inmediato cualquier discrepancia, de manera que las muestras que faltan se puedan tomar antes de que su periodo de exposición exceda los 32 días permisibles.

11.8.9. PROCEDIMIENTO

El procedimiento se describe en función de una sola muestra, pero normalmente se analizan muchas muestras utilizando múltiples platos de evaporación, filtros, etc.



11.8.9.1. Material insoluble

1. Se lava un plato de evaporación, se seca y se le coloca una etiqueta con el número de identificación.

2 Se coloca un papel de filtro doblado sobre el plato preparado y se seca en el horno mínimo durante 1 h. Se enfría en el desecador durante 1 h y se pesa el filtro en el plato con aproximación de 0,1 mg. El peso se registra como la tara para la materia insoluble

3 Se coloca el papel de filtro en el embudo Buchner y se humedece con un poco de agua. Se coloca el embudo sobre el frasco de filtrado. Si el recipiente que se va a analizar está seco o contiene menos de 200 mL, se agrega suficiente agua para completar un volumen de alrededor 200 mL. Se revuelve el agua para incorporar el material particulado asentado. Con una espátula flexible y limpia se enjuaga con agua para limpiar las paredes del recipiente y asegurar que se ha retirado todo el material particulado de las paredes y asiento del recipiente. Se vierte el líquido y el material particulado en el filtro del embudo, a través de un tamiz No. 18. El filtrado recogido en el frasco se usará posteriormente para la determinación del material soluble.

4 Se mide y registra el volumen del filtrado en el cilindro graduado y se guarda para la determinación del material soluble. Se enjuaga el recipiente con 100 mL de agua aproximadamente y se transfiere al filtro, a través del embudo, cualquier material sólido que haya quedado en el recipiente; se usa la espátula si es necesario. Se desecha el filtrado del enjuague y cualquier material retenido por el tamiz.

5 Se retira del embudo el filtro con el material insoluble, se coloca en el plato tarado y se introduce en el horno mínimo por 90 min. Se enfría en el desecador mínimo por 1 h. Se pesa el plato seco y el filtro con el material insoluble, con una aproximación de 0,1 mg. Se repite el procedimiento de secado hasta alcanzar peso constante.

6 Se calcula el peso del material particulado insoluble, restando la tara del filtro y del plato, del peso obtenido en el numeral 5.

11.8.9.2. Material soluble total

1. Se prepara un plato de evaporación, de acuerdo con el numeral 11.8.9.1-1
 2. Se coloca en un vaso de 100 mL todo el filtrado del numeral 11.8.9.1-4, o 500 mL de él, lo que sea menos. La solución se concentra muy despacio aproximadamente hasta 50 mL sobre un plato caliente, por evaporación del agua. Si el filtrado total fue menor de 500 mL, se debe tener presente esto.
 3. Se seca en el horno el plato de evaporación preparado, y se enfría en el desecador. Se pesa y registra como la tara el peso con aproximación de 0,1 mg.
 4. Se transfiere cuantitativamente el filtrado concentrado en el numeral 11.8.9.2-2 al plato tarado y se continúa muy despacio la evaporación, sobre un plato caliente, hasta secar. Se secan en el horno el plato y el contenido durante 2 h, y se enfrían en el desecador mínimo por 1 h. Se pesan el plato de evaporación y el contenido, y se registra su peso con aproximación de 0,1 mg. Se repite el secado y enfriado hasta obtener peso constante.
 5. Se calcula el peso neto del material disuelto en la solución tomada en el numeral 11.8.9.2-2 restando la tara del peso determinado en el numeral 11.8.9.2-3. Si el volumen total del filtrado no se tomó en el numeral 11.8.9.2-2, se normaliza el peso neto al volumen total. La cifra resultante se reporta como el material particulado soluble.
- 

11.8.10. CÁLCULOS

Se calcula la tasa de deposición, D, en gramos por metro cuadrado por periodo de 30 días ($\text{g}/\text{m}^2/30$), para los dos pesajes del material obtenido en el numeral 9:

$$D = W / A \quad (\text{g}/\text{m}^2/30)$$

Donde:

A = área de recolección, área transversal del diámetro interno de la parte superior del recipiente, m^2

W = pesos determinados en los numerales 9.2 y 9.3, normalizados, si es necesario, a un periodo de 30 d.

11.8.11. PRECISIÓN Y SESGO

En 1968 se realizó una investigación sobre la precisión de este método de ensayo como parte de un estudio interlaboratorio sobre los métodos de inspección de contaminación de aire llamado Project Threshold. El método de ensayo definido en ese entonces no el que se describe en este procedimiento; el recipiente no estaba equipado con la paleta aerodinámica establecida ahora, y la altura del recipiente estaba menos definida. Además, los criterios de aceptación para los sitios no eran tan estrictos como en este procedimiento; se consideraban aceptables los sitios localizados arriba de los techos. Meetham reporta una fuerte variación en la cantidad de muestra recolectada en el mismo sitio, en recipientes separados por alturas verticales. Los resultados del Project Threshold se presentan del numeral 11.8.11.2.

11.8.11.1. *Reproducibilidad*

La desviación estándar promedio de las variaciones entre mediciones únicas de caída de polvo, por diferentes laboratorios, es de $1,46 \text{ g}/\text{m}^2/30$ y está asociada con una caída media de $6,45 \text{ g}/\text{m}^2/30$. Las mediciones en tres tasas de caída, sobre el intervalo de $3,28$ a $10,47 \text{ g}/\text{m}^2/30$ no muestran una relación aparente entre la tasa de caída de polvo y la reproducibilidad.

11.8.11.2. *Repetibilidad*

- La desviación estándar promedio de las variaciones entre mediciones repetidas de caída de polvo en un laboratorio es de $1,03 \text{ g}/\text{m}^2/30$ y está asociada con una caída media de $6,45 \text{ g}/\text{m}^2/30$. Las mediciones en tres tasas de caída en el intervalo de $3,28$ a $10,47 \text{ g}/\text{m}^2/30$ no presentaron una relación aparente entre la tasa de caída de polvo y la repetibilidad.

- Se agregaron cantidades conocidas de material particulado, soluble e insoluble en agua, después de su recolección pero antes del análisis. La recuperación promedio de una espiga de polvo fue del 96% con base en todas las mediciones. La desviación estándar promedio de las mediciones de recuperación de espigas es del 16%.

- La desviación estándar promedio de las determinaciones intralaboratorios e interlaboratorios de la fracción soluble en agua, de muestras de polvo del ambiente, es de $1,18$ y $0,78 \text{ g}/\text{m}^2/30$, respectivamente y están asociadas con la medida de caída de polvo insoluble en agua de $3,50 \text{ g}/\text{m}^2/30$.



- La recuperación promedio de espigas de polvo insoluble en agua, en todos los laboratorios y todos los sitios, es del 91% y la desviación estándar de las mediciones de recuperación es del 18%.

- Las desviaciones estándar de las determinaciones intralaboratorios e interlaboratorios, de la fracción soluble en agua de las muestras de polvo del ambiente, son 1,64 y 0,59 g/m²/30, respectivamente.

- La recuperación promedio de espigas de polvo soluble en agua, en todos los laboratorios y todos los sitios, es del 95% y la desviación estándar de las mediciones de recuperación es del 37%.

Kohler y Fleck obtuvieron mejores resultados usando la paleta aerodinámica especificada en este ensayo.

11.8.12. REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials. ASTM D 1739. Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter), Philadelphia, 1989.

Kohler A. and Fleck W., "Comparative dust precipitation and dust concentration measurements", Staub, Reinhaltung der Luft, Vol. 26, No. 3, March 1996.

Meetham, A.R., Atmospheric Pollution: Its origins and prevention, Pergamon press, London, 3rd edition, Chapter 11, 1964.



12. ANEXO 2. ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DE AIRE

El Índice de Calidad del Aire (ICA) permitirá comparar los niveles de contaminación de calidad del aire, de las autoridades ambientales o entidades, que cuenten con un SVCA. El ICA corresponde a una escala numérica a la cual se le asigna un color, el cual a su vez tiene una relación con los efectos a la salud. El reporte de este indicador, será realizado de acuerdo a los lineamientos establecidos en el capítulo 9.6 del presente documento, donde se define el contenido de los diferentes tipos de informes que deberán ser presentados por los SVCA.

12.1. CONTAMINANTES DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE

Teniendo en cuenta los contaminantes que son monitoreados en el país, las características de los combustibles que se distribuyen y los equipos que actualmente se encuentran en las SVCA, los contaminantes a tener en cuenta son los denominados “contaminantes criterio” (PST, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ y CO).

12.2. RANGOS DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE

El ICA corresponde a un valor adimensional, que oscila entre 0 y 500. En la Tabla 39 se presentan los rangos cualitativos, los efectos a la salud y el valor del ICA y en la Tabla 40 se presentan las acciones preventivas que se deben tener en cuenta, de acuerdo al valor del ICA.

12.3. PUNTOS DE CORTE DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE

Teniendo en cuenta que el ICA tiene una correlación directa con los efectos en la salud, los puntos de corte del ICA son los límites correspondientes a efectos entre la salud y la calidad del aire. En este caso, se utiliza la información reportada por la US-EPA que presenta dichas relaciones. En la Tabla 38 se presentan los puntos de corte del ICA, de acuerdo con los efectos sobre la salud reportados por estudios de la US-EPA (2005).

Tabla 38. Puntos de corte del ICA.

ICA	COLOR	DESCRIPCIÓN	PST 24h µg/m ³	PM ₁₀ 24h µg/m ³	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm	O ₃ 1h ppm ⁵⁹	CO 8h ppm
0 - 100	Verde	Buena	0-260.4	0-154	0.000-0.144	60	61	0.0-9.4
101 - 150	Amarillo	Desfavorable para grupos sensibles	260.5-315.4	155-254	0.145-0.224	60	0.125-0.164	9.5-12.4
151 - 200	Naranja	Desfavorable	315.5-375.4	255-354	0.225-0.304	60	0.165-0.204	12.5-15.4
201 - 300	Rojo	Muy desfavorable	375.5-625.4	355-424	0.305-0.604	0.65-1.24	0.205-0.404	15.5-30.4
301 - 500	Púrpura	Peligroso	625.5-875.4	425-604	0.605-1.004	1.25-2.04	0.405-0.604	30.5-50.4

⁵⁹ En el caso del ozono, el AQI se calcula a partir de la concentración de O₃ medida en 8 horas, sin embargo, en algunas áreas se considera que el AQI calculado a partir de concentraciones de O₃ medidas en 1 hora es más preventivo.

⁶⁰ En el caso del NO₂ la EPA solamente proporciona valores del AQI por encima de 200.

⁶¹ En el caso del O₃ la EPA solamente proporciona valores del AQI por encima de 100 para concentraciones de 1 hora.

12.3.1. CÁLCULO DEL ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE PARA COLOMBIA

El ICA será calculado a partir de la siguiente ecuación, que corresponde a la metodología utilizada por la US-EPA para el cálculo del AQI y será reportado el mayor valor que se obtenga de las diferentes ecuaciones individuales.

$$I_P = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_P - BP_{Lo}) + I_{Lo}$$

Donde:

I_P = Índice para el contaminante p.

C_P = Concentración medida para el contaminante p.

BP_{Hi} = Punto de corte mayor o igual a C_P .

BP_{Lo} = Punto de corte menor o igual a C_P .

I_{Hi} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Hi} .

I_{Lo} = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al BP_{Lo} .



Tabla 39. Efectos a la salud de acuerdo al rango y al valor del Índice de Calidad del Aire.

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE	DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	COLOR	OXONO (ppm)	PM ₁₀ (µg/m ³)	MONÓXIDO DE CARBONO (ppm)	DIÓXIDO DE AZUFRE (ppm)	DIÓXIDO DE NITRÓGENO (ppm)
			1 hora	24 horas	8 horas	24 horas	1 hora
0-100	Bueno	Verde	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
101-150	Desfavorable para grupos sensibles	Amarillo	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas y molestias respiratorias en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias, como asma	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios y agravación de enfermedades pulmonares como asma	Incremento de la probabilidad de reducir la tolerancia al ejercicio debido al aumento de los síntomas cardiovasculares, tal como, dolores de pecho en personas con enfermedades cardiovasculares	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y dificultad al respirar, en personas con asma.	Ninguno
151-200	Desfavorable	Naranja	Mayor probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios y dificultad para respirar en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria, como asma; posibles efectos respiratorios de la población en general	Incremento de los síntomas respiratorios y recrudecimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Reducir la tolerancia al ejercicio debido al incremento de los síntomas cardiovasculares como dolor de pecho, en personas con enfermedad cardiovascular	Incremento de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y jadeo en personas con asma, posible recrudecimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares	Ninguno

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE	DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	COLOR	OZONO (ppm)	PM ₁₀ (µg/m ³)	MONÓXIDO DE CARBONO (ppm)	DIÓXIDO DE AZUFRE (ppm)	DIÓXIDO DE NITRÓGENO (ppm)
			1 hora	24 horas	8 horas	24 horas	1 hora
201-300	Muy desfavorable	Rojo	Síntomas cada vez más severos y respiración deteriorada probablemente en niños, adultos y personas activas con enfermedad respiratoria, como asma; incremento en la probabilidad de efectos respiratorios en la población en general	Aumento significativo en síntomas respiratorios y aumento de la gravedad de enfermedades pulmonares como asma, incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	Recrudescimiento significativo de los síntomas cardiovasculares, como dolores en el pecho en personas con enfermedades cardiovasculares	Aumento significativos en síntomas respiratorios tales como jadeo y respiración corta en personas con asma, recrudescimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios dificultad para respirar en niños y personas con enfermedades respiratorias como asma
301-500	Peligroso	Púrpura	Efectos respiratorios severos, daños respiratorios en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria como asma; incremento de los efectos respiratorios severos probables en la población en general	Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudescimiento de enfermedades pulmonares como asma, probables efectos respiratorios en la población en general	Agravación seria de los síntomas cardiovasculares, tal como dolor de pecho en personas con enfermedades cardiovasculares, deterioro de las actividades enérgicas en la población en general	Síntomas respiratorios severos, como jadeo y disminución de la respiración en personas con asma, incremento de la gravedad de enfermedades cardíacas y pulmonares, posibles efectos respiratorios en la población general	Mayor incremento de la probabilidad de síntomas respiratorios y dificultades respiratorias en niños y personas con enfermedades respiratorias como asma.

Fuente: US-EPA, 2005.

PROTOCOLO | 285

Tabla 40. Acciones preventivas de acuerdo al rango y al valor del Índice de Calidad del Aire.

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE	DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	COLOR	OZONO (ppm)	PM ₁₀ (µg/m ³)	MONÓXIDO DE CARBONO (ppm)	DIÓXIDO DE AZUFRE (ppm)	DIÓXIDO DE NITRÓGENO (ppm)
			1 hora	24 horas	8 horas	24 horas	1 hora
0-100	Bueno	Verde	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno
101-150	Desfavorable para grupos sensibles	Amarillo	Niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir la actividad física al aire libre	Personas con enfermedades respiratorias como asma deben reducir la actividad física al aire libre	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina deben reducir la actividad física y las fuentes de CO como el tráfico pesado	Personas con asma deben considerar reducir la actividad al aire libre	Ninguno
151-200	Desfavorable	Naranja	Niños y adultos activos, y personas con enfermedades respiratorias, deben reducir la actividad física prolongada al aire libre, especialmente los niños.	Personas con enfermedades respiratorias como asma deben reducir la actividad física al aire libre	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina, deben reducir moderadamente el esfuerzo y evitar la exposición a fuentes de CO como el tráfico pesado	Los niños, los asmáticos y las personas con enfermedades cardíacas y pulmonares deben reducir el esfuerzo al aire libre	Ninguno

ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE	DESCRIPCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	COLOR	OZONO (ppm)	PM ₁₀ (µg/m ³)	MONÓXIDO DE CARBONO (ppm)	DIÓXIDO DE AZUFRE (ppm)	DIÓXIDO DE NITRÓGENO (ppm)
			1 hora	24 horas	8 horas	24 horas	1 hora
201-300	Muy desfavorable	Rojo	Niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir la actividad física al aire libre; especialmente los niños	Personas con enfermedades respiratorias como asma deben evitar cualquier actividad al aire libre; todos los demás, especialmente los ancianos y niños, deben reducir el esfuerzo al aire libre	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina, deben reducir el esfuerzo y evitar la exposición a fuentes de CO como el tráfico pesado	Niños, asmáticos y personas con enfermedades cardíacas y pulmonares deben evitar el esfuerzo al aire libre; todos los demás deben reducir el esfuerzo al aire libre	Niños y personas con enfermedades respiratorias como asma deben reducir el esfuerzo al aire libre
301-500	Peligroso	Púrpura	Todos deben evitar el esfuerzo al aire libre	Todos deben evitar cualquier esfuerzo al aire libre, las personas con enfermedades respiratorias como asma no deben estar al aire libre	Personas con enfermedades cardiovasculares como la angina, deben reducir el esfuerzo y evitar la exposición a fuentes de CO como el tráfico pesado; todos los demás deben limitar el esfuerzo	Niños, asmáticos y personas con enfermedades cardíacas o pulmonares no deben estar al aire libre; todos los demás deben evitar el esfuerzo al aire libre	Niños y personas con enfermedades respiratorias como asma, deben reducir el esfuerzo moderado o pesado al aire libre

Fuente: US-EPA, 2005.

Los diferentes Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) que existen en el país, son el resultado de esfuerzos independientes de diferentes autoridades ambientales; persiguen objetivos de vigilancia diferentes y la mayoría no cuenta con programas de aseguramiento de calidad (AC) que permitan garantizar que los datos obtenidos por dichos SVCA sean comparables y compatibles. Por tanto, actualmente no es posible realizar comparaciones y evaluaciones significativas entre los resultados obtenidos por las diferentes RVCA, que aporten instrumentos de decisión a escala alguna.

La justificación de los recursos invertidos en los SVCA del país, requiere que se puedan armonizar los datos obtenidos y que se realicen las evaluaciones que orienten adecuadamente las políticas y medidas, a escala local, regional y nacional. Para lograrlo es necesario que cada uno de los SVCA alcance y reporte una calidad conocida y aceptable de los datos que genera.

Existen diversos enfoques para armonizar las mediciones de los SVCA. Un método que puede describirse como orientado al ingreso de datos, se basa en la especificación de las técnicas operativas y el instrumental requerido con un gran nivel de detalle. Los manuales operativos brindan instrucciones precisas en todos los aspectos del uso de instrumentos, de las prácticas de vigilancia, de las técnicas de apoyo y del manejo de datos. Generalmente, este esquema enfatiza la elaboración cuidadosa de documentos para garantizar el cumplimiento de las metodologías establecidas. Este enfoque puede funcionar adecuadamente para armonizar las mediciones de SVCA que operan con objetivos consistentes en líneas generales, con un nivel comparable de desarrollo técnico y de disponibilidad de recursos. Sin embargo, no resulta práctico ni apropiado para SVCA con diseños generales sustancialmente diferentes, que usan distintas técnicas genéricas de vigilancia o que tienen niveles variables de financiamiento y de personal calificado, como en el caso de nuestro País.

Si bien el IDEAM, que es la institución responsable de dar lineamientos técnicos para la elaboración de programas de aseguramiento y control de calidad, y de coordinar la centralización de los datos de vigilancia, desempeña un papel importante en asegurar la consistencia y la calidad general del ingreso de datos para dichos SVCA; debe enfatizarse que el punto crucial del aseguramiento de la calidad está en el nivel de los operadores locales (entes privados, CARS u otras autoridades ambientales) dado que las metodologías de aseguramiento de la calidad solo se pueden aplicar exitosamente con una participación directa y periódica, aunadas al conocimiento detallado de las condiciones y problemas locales.

A través de éste documento el IDEAM cumple parte de su papel, al emitir los lineamientos técnicos que deben guiar la implementación de programas de AC en las diferentes RVCA del país. Dichos lineamientos se basan en la normatividad desarrollada por entidades internacionales como la Red Europea de Control del Aire (EUROAIRNET), el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) Organización Mundial de la Salud (OMS), la Organización Internacional de Estándares (ISO), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (U.S. EPA).

