

**“Estudio para el rediseño
de la red de monitoreo de
la calidad del aire de
Monterrey”**

Informe final

Marzo 2021



CENTRO MARIO MOLINA PARA ESTUDIOS ESTRATÉGICOS
SOBRE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE A.C.

Dr. Mario Molina
Presidente

Ing. Carlos Mena
Director Ejecutivo

Dr. Antonio Mediavilla Sahagún
Coordinador de Proyectos

Integrantes del Proyecto

M. en C. Hugo Alberto Barrera Huertas
M. en C. Adriana Barradas Gimete
M. en I. Martín Danilo Gómez Sánchez

Consultor externo
Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Marzo 2021

ÍNDICE

1. Resumen Ejecutivo.....	6
2. Introducción.....	8
3. Antecedentes.....	12
4. Objetivos	21
5. Metodología.....	21
5.1 Caracterización del entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2020.....	21
5.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo	28
5.2.1 Identificación y recopilación de la información a usar en la evaluación de Aptitud y generación de mapas individuales por variable	30
5.2.2 Transformación de datos vectoriales a datos a nivel de celda (RASTER) ...	33
5.2.3 Reclasificación de datos.....	34
5.2.4 Ponderación de capas de información y combinación de capas.....	38
5.3 Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.	40
5.4 Determinación de sitios de monitoreo de calidad del aire con base en dosificación ambiental.....	42
6. Resultados.....	54
6.1 Caracterización de entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2020.....	54
6.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo	68
6.3 Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire como base en el riesgo a la salud humana.....	88
7. Análisis de resultados.....	105
8. Conclusiones y recomendaciones	126
9. Referencias	136

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Estaciones que conforman el SMCA del Área Metropolitana de Monterrey en el año 2020 y capacidades de medición de contaminantes.....	12
Tabla 5.1.A. Resumen de los criterios de localización de toma de muestra o trayectoria de muestreo.....	25
Tabla 5.1.B. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal para la medición de monóxido de carbono.....	26
Tabla 5.1.C. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal y urbana para la medición de ozono (O ₃) y óxidos de nitrógeno (NO, NO ₂ , NO _x y NO _y).....	26
Tabla 5.2. Escenarios de ponderación de variables en la modelación de Aptitud del terreno para la ubicación de estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el AMM.....	38
Tabla 6.1. Escala espacial de representatividad por contaminantes en cada una de las estaciones de monitoreo que conforman el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey.....	56
Tabla 6.2 Población por municipio en el año 2010 en el Área Metropolitana de Monterrey. Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010).....	67
Tabla 6.3. Distribución de fuentes puntuales de emisión de PM2.5, por giro, en el Área Metropolitana de Monterrey en el año 2016.....	71
Tabla 6.4. Inventario de emisiones de PM2.5 del Área Metropolitana de Monterrey para el año 2016 (Toneladas/año).....	73
Tabla 6.5. Contribución de las fuentes puntuales a la emisión de partículas PM2.5 por categoría de fuente (ton/año) y municipio, en el Área Metropolitana de Monterrey en el año 2016.....	75
Tabla 6.6 Área en Km2 por nivel de Aptitud estimada en el Área Metropolitana de Monterrey para cada escenario evaluado.....	77
Tabla 6.7 Superficie en Km2 por nivel de Aptitud y por municipio para cada escenario evaluado en el Área Metropolitana de Monterrey.....	80
Tabla 6.8. Nivel de Aptitud de la ubicación actual de las estaciones de monitoreo existentes en el Área Metropolitana de Monterrey conforme a las condiciones de cada uno de los escenarios evaluados.....	86
Tabla 6.9. Sitios potenciales de monitoreo de PM2.5 de acuerdo con la metodología de dosificación ambiental de Noll y Mitsutomi (1983).....	103
Tabla 7.1. Edificios públicos propuestos para la instalación de las estaciones de monitoreo de PM2.5 al interior de cada celda potencial de modelación en el Área Metropolitana de Monterrey.....	121
Tabla 8.1. Propuesta de ubicación/reubicación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey para mejorar la caracterización de los riesgos a la salud por exposición a partículas suspendidas PM2.5.....	126
Tabla 8.2. Recomendaciones a considerar para mantener en operación las estaciones Apodaca, Juárez, Pueblo Serena, Cadereyta y Universidad.....	128

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 SMCA del Área Metropolitana de Monterrey en el año 2020.....	13
Figura 3.2. Porcentaje de días al año en que se rebasó cualquier norma vigente de calidad del aire por ciudad y zona metropolitana en 2018.....	15
Figura 3.3. Distribución de los días con calidad del aire buena, regular y mala, por estación de monitoreo en el Área Metropolitana de Monterrey, en el año 2018.....	17
Figura 3.4. Tendencia del porcentaje de días, por año, con concentraciones superiores al límite normado de 24 horas de PM2.5 en el periodo 2003 – 2018.....	18
Figura 3.5. Frecuencia de ocurrencia de días con concentraciones superiores al límite normado de 24 horas de PM2.5 en ciudades y zonas metropolitanas de México (2018).....	18
Figura 5.1. Distancia recomendada, en metros, de muestreadores de partículas respecto a vialidades según intensidad de tráfico.....	26
Figura 5.2. Elementos de información y criterios empleados para caracterizar el entorno inmediato de una estación de monitoreo y definir su escala espacial de representatividad.....	27
Figura 5.3. Aproximación conceptual usada para desarrollar una evaluación de Aptitud.....	29
Figura 5.4. Criterios usados para definir la mayor Aptitud de un sitio para instalar una nueva estación de monitoreo de calidad del aire.....	31
Figura 5.5. Reclasificación de datos de población.....	34
Figura 5.6. Reclasificación de datos de distancia respecto a la ubicación de las fuentes puntuales de emisión.....	34
Figura 5.7. Reclasificación de datos de distancia respecto a la ubicación de vialidades.....	35
Figura 5.8. Reclasificación de datos de pendiente del terreno.....	36
Figura 5.9. Reclasificación de datos de emisiones de PM2.5.....	36
Figura 5.10 Identificación de sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire de acuerdo con su habilidad para representar el patrón de dosificación ambiental.....	41
Figura 5.11 Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de PM2.5 en el AMM.....	43
Figura 5.12. Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de PM2.5 en el AMM.....	44
Figura 5.13. Tendencia mensual de las concentraciones horarias de PM2.5 en el AMM, 2003-2018.....	45
Figura 5.14. Identificación de sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire en el AMM con base en la dosificación ambiental.....	52
Figura 6.1. Distribución espacial por AGEB de la población en el Área Metropolitana de Monterrey.....	68
Figura 6.2. Distribución espacial de las fuentes puntuales de emisión de PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey en el año 2016.....	69
Figura 6.3. Distribución espacial de la red vial en el Área Metropolitana de Monterrey.....	70

Figura 6.4. Relieve del Área Metropolitana de Monterrey.....	72
Figura 6.5. Distribución espacial de las emisiones de PM2.5 en el año 2016 en el Área Metropolitana de Monterrey.....	76
Figura 6.6. Resultados de la modelación de Aptitud para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey bajo cuatro distintos escenarios.....	78
Figura 6.7. Ubicación geográfica de las colonias, pueblos, barrios y fraccionamientos con mayor Aptitud en los escenarios 2, 3 y 4 para la instalación de estaciones de monitoreo en AMM.....	85
Figura 6.8. Ubicación de estaciones actualmente en operación en el AMM y áreas de Aptitud correspondiente en cada escenario evaluado.....	87
Figura 6.9. Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR para el periodo del 11 al 17 de Enero 2016.....	89
Figura 6.10. Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR para el periodo del 23 al 29 de Mayo 2016.....	90
Figura 6.11. Conglomerados por día formados a partir de celdas con MI > VR para el periodo del 20 al 26 de Junio 2016.....	91
Figura 6.12. Ejemplo del cálculo de la Dosificación de Área con conglomerados del día 11 de enero de 2020.....	93
Figura 6.13. Representación de Dosificación de Estación, en la cual los valores de dosificación de área han sido acumulados por celda.....	94
Figura 6.14. Dosificación total acumulada estimada en la zona de estudio.....	95
Figura 6.15. Resultado del cálculo de la Eficiencia de la Estación.....	96
Figura 6.16. Celdas disponibles para la selección del segundo sitio potencial de monitoreo.....	97
Figura 6.17. Ubicación, eficiencia y cobertura del primer sitio potencial de monitoreo.....	97
Figura 6.18. Ubicación, eficiencia y cobertura del segundo sitio potencial de monitoreo.....	98
Figura 6.19. Ubicación, eficiencia y cobertura del tercer sitio potencial de monitoreo.....	98
Figura 6.20. Ubicación, eficiencia y cobertura del cuarto sitio potencial de monitoreo.....	99
Figura 6.21. Ubicación, eficiencia y cobertura del quinto sitio potencial de monitoreo.....	99
Figura 6.22. Ubicación, eficiencia y cobertura del sexto sitio potencial de monitoreo.....	100
Figura 6.23. Ubicación, eficiencia y cobertura del séptimo sitio potencial de monitoreo.....	100
Figura 6.24. Ubicación, eficiencia y cobertura del octavo sitio potencial de monitoreo.....	101
Figura 6.25. Coberturas geográficas de cada sitio determinado y de la red que propuesta para el monitoreo de PM2.5, en el Área Metropolitana de Monterrey.....	102
Figura 7.1. Entorno inmediato a las estaciones Pueblo Serena, Universidad, La Pastora, Juárez y Apodaca.....	110
Figura 7.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo actualmente en operación respecto a los sitios potenciales identificados con la metodología de Noll y Mitsutom1.....	112
Figura 7.3. Colonias más aptas para el monitoreo de la calidad del aire dentro de cada celda o punto potencial de monitoreo.....	118

Figura 7.4. Instalaciones públicas identificadas al interior de cada sitio (celda) potencial de monitoreo.....	119
Figura 8.1. Propuesta de configuración de la red de monitoreo de partículas suspendidas PM2.5 en el Área Metropolitana de Monterrey.....	127

1. Resumen Ejecutivo

Los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) se han convertido en una herramienta que permite conocer, con niveles aceptables de confiabilidad, la calidad del aire con respecto a contaminantes específicos y formular, con base en los datos obtenidos, las estrategias de control y las medidas adecuadas para una efectiva gestión ambiental.

Una vez que un SMCA está operando, es conveniente llevar a cabo evaluaciones periódicas del mismo a fin de determinar si sigue cumpliendo con el objetivo con el que fue originalmente diseñado, si son necesarios nuevos sitios de monitoreo, si alguno de los sitios de monitoreo existentes ya no son necesarios o si nuevas tecnologías son apropiadas para su incorporación al mismo. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA por sus siglas en inglés), sugiere que dicha evaluación se realice cada cinco años.

Actualmente, en el territorio del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) existen un total de 14 estaciones de monitoreo de la calidad del aire, distribuidas en los municipios de Monterrey (Obispado - CE, San Bernabé - NO y Pueblo Serena - S), San Nicolás de los Garza (San Nicolás - NE y Universidad - N2), Apodaca (Apodaca - NE2), General Escobedo (Escobedo - N), García (García - NO2), Cadereyta (Cadereyta - SE3), Juárez (Juárez SE2), Guadalupe (La Pastora - SE), San Pedro Garza García (San Pedro - SO2), Santa Catarina (Santa Catarina - SO) y Pesquería (NE3).

De acuerdo con la información proporcionada por personal de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, sólo se tiene registro de un estudio realizado en 1992 por la empresa RADIANT Corporation con el objetivo identificar sitios para la ubicación de estaciones de monitoreo en el Área Metropolitana de Monterrey. Como resultado de dicho trabajo, en una primera fase se instalaron sólo 5 estaciones de monitoreo: San Nicolás, La Pastora, Obispado, San Bernabé y Santa Catarina; tres de ellas permanecen actualmente en el mismo

sitio en el que fueron instaladas en 1992. Estas estaciones son La Pastora, Obispado y San Bernabé. La estación San Nicolás, está ubicada en un sitio distinto al referido en el estudio de RADIANT, pero se ignora si dicho sitio es el mismo desde que esta estación inició su operación. La estación Santa Catarina fue reubicada al sitio actual desde abril de 2014, pero no se tiene documentación que explique el motivo del cambio ni los criterios empleados para definir la nueva ubicación. Respecto al resto de las estaciones se ignora si fueron instaladas en sus sitios actuales atendiendo a las recomendaciones derivadas del estudio realizado por RADIANT Corporation o algún otro estudio.

En este contexto general, el presente trabajo tuvo por objeto evaluar la Red de Monitoreo de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ del Área Metropolitana de Monterrey a través de: 1) la caracterización del entorno inmediato de cada estación de monitoreo actualmente en operación; 2) la evaluación de la aptitud del terreno donde se ubican las estaciones para realizar el monitoreo de la calidad del aire; y, 3) de la aplicación de una metodología basada en el riesgo a la salud para identificar los sitios o áreas donde potencialmente se presentan los mayores riesgos a la salud por exposición a altos niveles de concentración de este contaminante.

A partir de los resultados obtenidos en cada una de las actividades antes enunciadas y estableciendo como objetivo prioritario de la red de monitoreo, la caracterización de la calidad del aire a la que está expuesta la población, se pudo establecer que, en general, el Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey tiene una buena cobertura en cuanto al número y distribución espacial de las estaciones de monitoreo que la conforman actualmente; sin embargo, se identificaron algunas áreas de oportunidad para mejorar la caracterización de los riesgos a la salud de la población por exposición a altos niveles de concentración de partículas suspendidas $PM_{2.5}$. Estas áreas de oportunidad incluyen acciones tanto de reubicación de estaciones de monitoreo como de reacondicionamiento de su entorno.

De acuerdo con los resultados de este trabajo, se identificó la necesidad de contar con ocho estaciones de monitoreo para caracterizar la calidad del aire por partículas

suspendidas $PM_{2.5}$ en los sitios del área metropolitana donde se presume se presentan los mayores riesgos a la salud, tanto por la densidad de población como por los niveles de concentración de este contaminante. Estos sitios se ubican en los municipios de Monterrey (4 estaciones), San Nicolás de los Garza (1), Guadalupe (1), Santa Catarina (1) y García (1).

En tres de estos ocho sitios existen estaciones de monitoreo actualmente en operación (San Nicolás, San Pedro y Santa Catarina), en tanto que para cubrir la necesidad de medición de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en los cinco puntos restantes, se plantea la posibilidad de reubicar cinco estaciones de monitoreo que operan actualmente en la proximidad de dichos puntos (La Pastora, San Bernabé, Escobedo, Obispado y García). Con respecto al resto de las estaciones de monitoreo actualmente en operación (Pueblo Serena, Apodaca, Cadereyta, Juárez y Universidad) se recomienda mantenerlas en operación, atendiendo a las recomendaciones de reubicación y/o reacondicionamiento de su entorno inmediato, a fin de apoyar la caracterización de los riesgos a la salud en áreas donde, de acuerdo con la metodología empleada, actualmente dichos riesgos son menos significativos.

Finalmente, se incluyen algunas recomendaciones generales, a fin que sean consideradas para mejorar la gestión operativa del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de Monterrey, entre las que destacan tanto consideraciones relativas a las actividades de mantenimiento y calibración de equipos como de evaluación periódica de las estaciones de monitoreo y de la red de monitoreo en su conjunto. Igualmente se destacan algunas consideraciones con respecto a las necesidades de personal y costos operativos, como elementos a considerar en cualquier reconfiguración asociada a un sistema de monitoreo de calidad del aire.

2. Introducción

La evolución y el desarrollo de las zonas urbanas a nivel nacional, han venido acompañados por la proliferación de problemas ambientales debidos al incremento en la concentración de población, actividad industrial, vehicular, doméstica y de dotación de servicios. La contaminación que se genera en una cuenca y sus efectos traen como consecuencia la necesidad de mantener una vigilancia constante, no sólo en los lugares en que se originan los contaminantes, sino en zonas aledañas. La atención a la necesidad de los gobiernos locales y de la comunidad de incrementar sus esfuerzos para obtener información confiable de la concentración de contaminantes, sus fuentes y sus efectos en estos sitios, es imperativa y fundamental para la toma de decisiones en materia de protección a la salud de la población y de los ecosistemas. Es evidente el requerimiento de más información confiable y de calidad respecto a los niveles de contaminación del aire, lo que implica la necesidad de instrumentar y modernizar los sistemas de monitoreo a fin de incrementar la representatividad, compatibilidad y validez de la información que se colecta (SEMARNAT, 2012).

El monitoreo de la calidad del aire toma una importancia fundamental para identificar y proveer la información necesaria a fin de evaluar la calidad del aire de cada región y sus tendencias, así como una herramienta para desarrollar estrategias de prevención y control, planes de manejo de la calidad del aire y políticas ambientales integrales, entre otras aplicaciones. En este contexto, los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), se han convertido en una herramienta que permite conocer, con niveles aceptables de confiabilidad, la calidad del aire con respecto a contaminantes específicos y formular, con base en los datos obtenidos, las estrategias de control y las medidas adecuadas para una efectiva gestión ambiental. En general, entre los objetivos del monitoreo de la calidad del aire destacan (Martínez y Romieu, 1997):

1. Evaluar el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de salud ambiental.

2. Evaluar el estado de la calidad del aire con respecto a la concentración de contaminantes criterio.
3. Cuantificar los niveles de exposición de la población a la contaminación del aire ambiente.
4. Proporcionar información inmediata para la activación o desactivación de alertas o procedimientos de emergencia, derivados de una concentración de contaminantes asociada a actividades humanas y/o a fuentes naturales, que pueda representar un riesgo para la salud o el medio ambiente.
5. Informar de manera oportuna a la población sobre el estado que guarda la calidad del aire.
6. Generar información para la evaluación de la distribución espacial y el transporte de los contaminantes atmosféricos.
7. Generar datos confiables para la evaluación y seguimiento de las estrategias de gestión de la calidad del aire.

Una vez que un SMCA está operando, es conveniente llevar a cabo evaluaciones periódicas del mismo a fin de determinar si sigue cumpliendo con el objetivo para el que fue originalmente diseñado, si se requieren nuevos sitios de monitoreo, si alguno de los sitios de monitoreo existentes ya no son necesarios o si nuevas tecnologías son apropiadas para su incorporación al mismo. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, por sus siglas en inglés), sugiere que dicha evaluación se realice cada cinco años (USEPA, 40 CFR 58.10).

Esta evaluación periódica tiene su fundamento en el hecho de que a través del tiempo pueden presentarse una serie de factores que contribuyen a replantear los objetivos del monitoreo en un lugar determinado, por ejemplo: cambios en la calidad del aire, modificaciones en el tamaño, distribución y/o estructura de la población, modificaciones en los patrones de emisión de contaminantes provenientes de las diferentes fuentes, en la aparición o actualización de nuevas regulaciones ambientales, o el mejor entendimiento de la dinámica atmosférica. Situaciones que

pueden motivar la reorientación de los recursos disponibles para el monitoreo de la calidad del aire, de tal forma que éste sea más eficiente y efectivo para alcanzar los objetivos del mismo.

En este contexto general y en el marco del proyecto “Caracterización química de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ y evaluación de la red de monitoreo de $PM_{2.5}$ del Área Metropolitana de Monterrey”, el presente reporte describe los resultados del trabajo desarrollado con el objeto de evaluar el diseño de la actual red de monitoreo de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey.

3. Antecedentes

Por las características geográficas, actividad económica y número de habitantes, el Área Metropolitana de Monterrey enfrenta el reto de contar con un SMCA confiable como herramienta de gestión para el diseño de medidas y acciones que reduzcan la contaminación del aire en beneficio de la protección de la salud de la población. Por este motivo, desde el año 1992, la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado opera la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), registrando contaminantes criterio y parámetros meteorológicos que se reportan de manera periódica. Actualmente este SMCA está constituido por 14 estaciones de monitoreo automático. Tres estaciones se localizan en el municipio de Monterrey, dos en San Nicolás de los Garza y una más en cada uno de los siguientes municipios: Apodaca, General Escobedo, García, Cadereyta, Juárez, Guadalupe, San Pedro Garza García, Santa Catarina y Pesquería. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las estaciones de monitoreo que operan en el territorio del AMM, su capacidad de medición de contaminantes y el año en que cada una de ellas inició su operación. Por otra parte, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, muestra la ubicación geográfica de cada una de las estaciones antes referidas.

Tabla 3.1. Estaciones que conforman el SMCA del Área Metropolitana de Monterrey en el año 2020 y capacidades de medición de contaminantes.

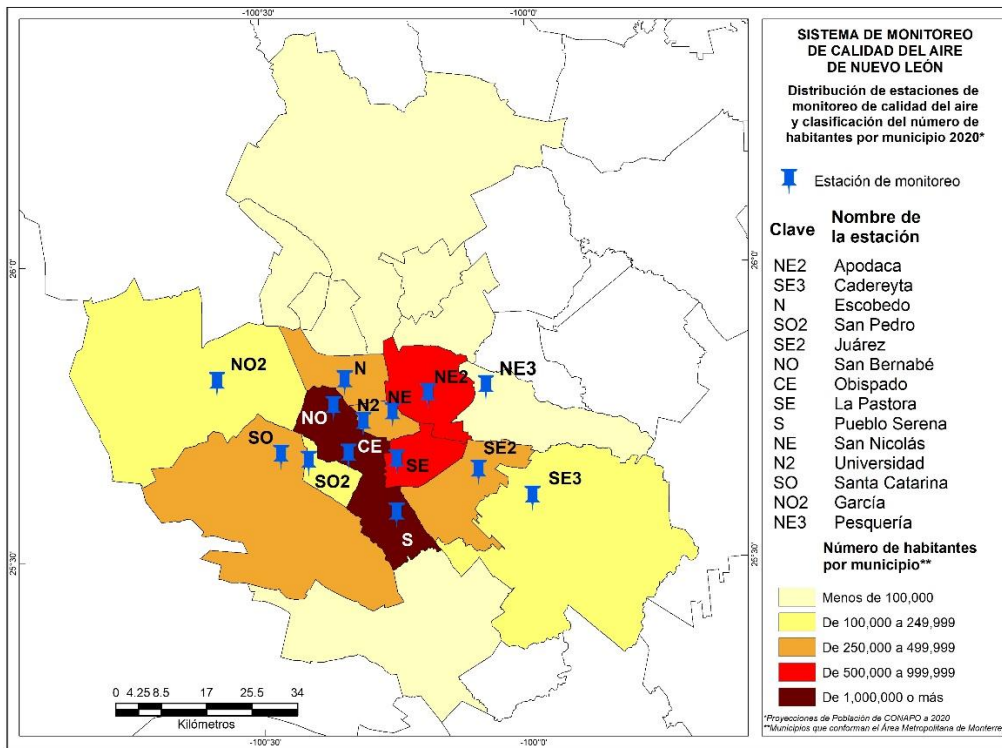
Municipio	Población 2020 (Proyección CONAPO, 2018*)	Estación	Clave	Tipo de equipo y año de inicio de operación	Contaminantes					
					PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	SO ₂	NO ₂	CO
Monterrey	1,239,812	Obispado	CE	Automático (1992)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		San Bernabé	NO	Automático (1992)	✓	✓	✓	✓		✓
		Pueblo Serena	S	Automático (2017)	✓	✓	✓	✓		✓
Apodaca	657,912	Apodaca	NE2	Automático (2012)	✓	✓			✓	✓
General Escobedo	440,045	Escobedo	N	Automático (2009)	✓	✓				✓
García	213,744	García	NO2	Automático (2009)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cadereyta	103,459	Sureste 3	SE3	Automático (2017)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Juárez	379,742	Juárez	SE2	Automático (2012)	✓	✓		✓	✓	✓
Guadalupe	735,384	La Pastora	SE	Automático (1992)	✓	✓	✓	✓		✓
San Nicolás	466,913	San Nicolás	NE	Automático (1992)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Municipio	Población 2020 (Proyección CONAPO, 2018*)	Estación	Clave	Tipo de equipo y año de inicio de operación	Contaminantes					
					PM ₁₀	PM _{2.5}	O ₃	SO ₂	NO ₂	CO
		Universidad	N2	Automático (2017)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
San Pedro	138,287	San Pedro	SO2	Automático (2014)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Santa Catarina	304,148	Santa Catarina	SO	Automático (1992)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pesquería	31,420	Pesquería	NE3	Automático (2020)	✓		✓	✓	✓	✓

*CONAPO (2018). Proyecciones de la población de los municipios de México, 2015-2030. Consejo Nacional de Población, México. Recuperado de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-v>.
 ✓= Se cuenta con equipo de monitoreo de este contaminante.

Fuente: Elaboración propio con información proporcionada por la Secretaría de desarrollo Sustentable de Nuevo León.

Figura 3.1 SMCA del Área Metropolitana de Monterrey en el año 2020

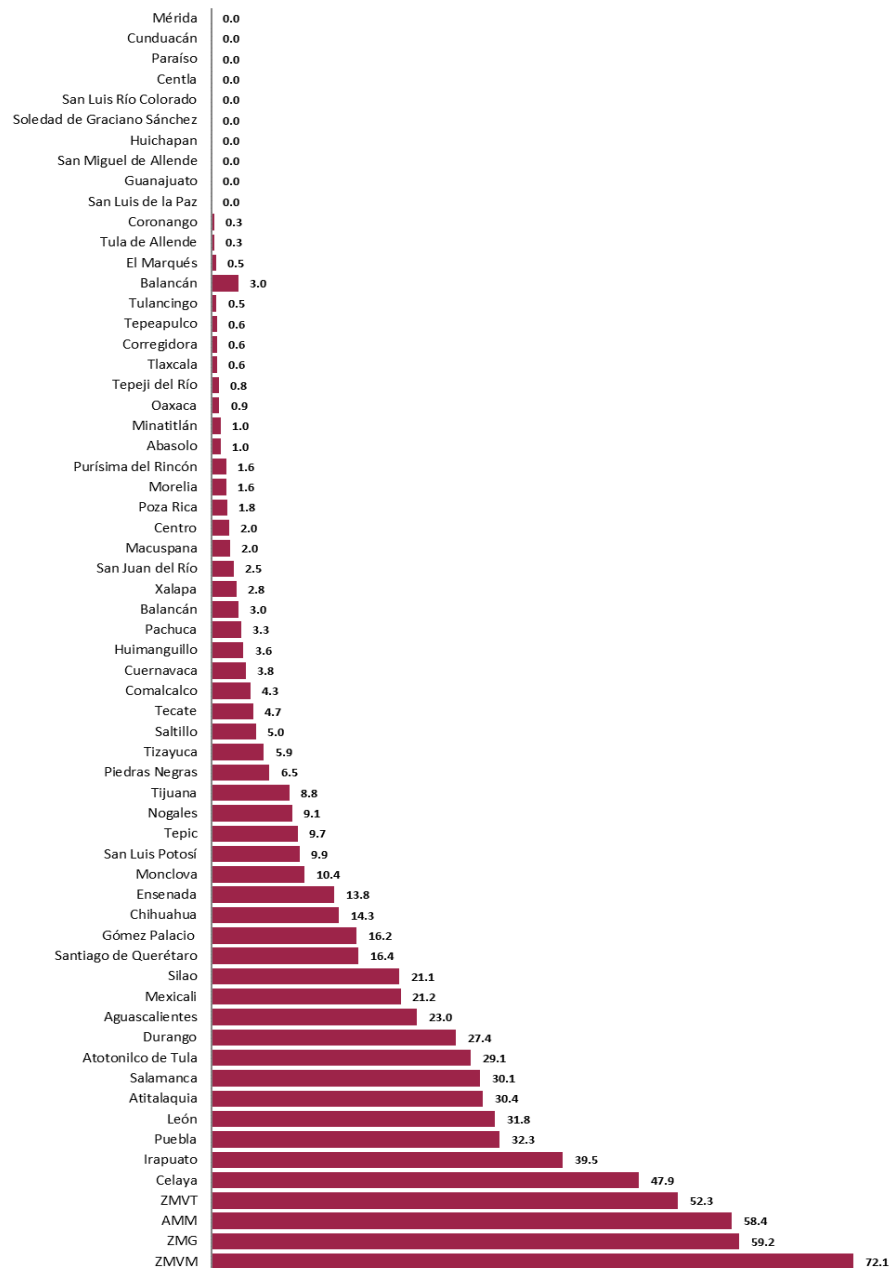


Como se puede apreciar en la Tabla 3.1, de las 13 estaciones que conforman este SMCA en la actualidad; 5 iniciaron operación en 1992 (Obispado, San Bernabé, La Pastora, San Nicolás y Santa Catarina), dos en 2009 (Escobedo y García), dos más en 2012 (Apodaca y Juárez), una en 2014 (San Pedro) y tres más en 2017 (Pueblo Serena, Cadereyta y Universidad). En general, todas las estaciones se realiza monitoreo exclusivamente automático y cuentan con capacidad para medir partículas suspendidas, tanto PM₁₀ como PM_{2.5}.

De acuerdo con información disponible sobre la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey para el año 2018, el contaminante que con mayor frecuencia determina una condición de mala calidad del aire son las partículas suspendidas PM_{10} , seguidas del ozono (O_3) y de las partículas suspendidas $PM_{2.5}$. El límite normado diario (promedio de 24 horas) de PM_{10} se rebasó en el 53% de los días del año 2018, en tanto que el límite normado de $PM_{2.5}$ (promedio de 24 horas) y de ozono (promedio de 1 hora) se excedió el 10% de los días. El monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre no representaron un problema de calidad del aire al no registrar días con concentraciones superiores al límite normado correspondiente (INECC, 2019).

En general, en 2018 el número de días en que se incumplió al menos una norma de salud ambiental fue de 213, lo que significa el mejor registro en los últimos 19 años. Esta estadística, sin embargo, es un buen indicador de la severidad del problema de la calidad del aire en la región pues destaca que sólo en el 42% de los días del año se registraron niveles de contaminación inferiores a los límites recomendados para la protección de la salud de la población de acuerdo con la normatividad mexicana vigente en la materia (INECC, 2019). Este indicador ubica al Área Metropolitana de Monterrey como una de las regiones del país con problemas más serios de calidad del aire (Figura 3.2).

Figura 3.2. Porcentaje de días al año en que se rebasó cualquier norma vigente de calidad del aire por ciudad y zona metropolitana en 2018.



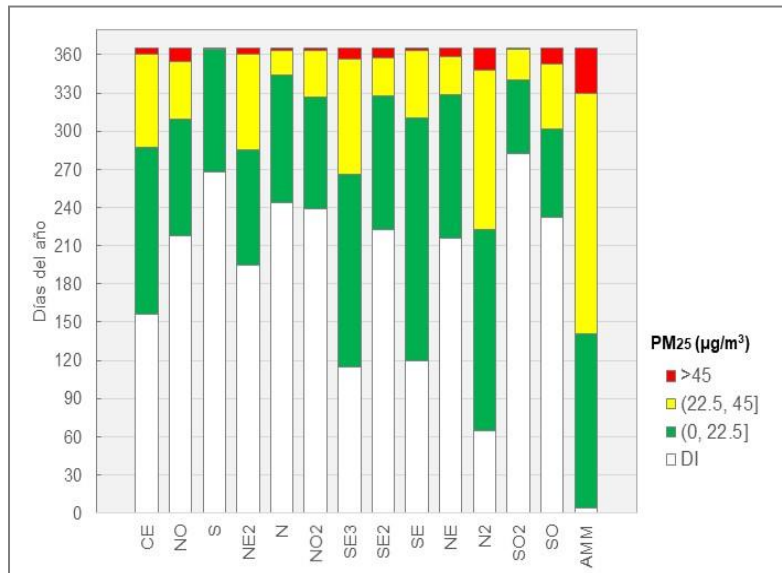
Fuente: INECC, 2019

Con respecto a las partículas PM_{2.5}, en el Informe Nacional de Calidad del Aire 2018, que es el más reciente disponible, se indica que en 2018 la evaluación de cumplimiento de norma sólo se pudo llevar a cabo en la estación Universidad (N2),

que se localiza en el municipio de San Nicolás. En dicha estación, se superaron los dos límites normados de protección a la salud (promedio de 24 horas y promedio anual). La máxima concentración promedio de 24 horas registrada en esta estación fue de $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que el promedio anual fue de $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los límites normados de protección a la salud son: $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual. En las 12 estaciones restantes, que operaron en 2018, no se obtuvo información suficiente para cumplir con el criterio de suficiencia de datos establecido en la propia regulación.

A pesar de lo anterior, la información disponible deja ver la problemática de este contaminante en la región, pues salvo en la estación Pueblo Serena (S), en las 12 restantes se registraron días con concentraciones superiores al límite normado de 24 horas (Figura 3.3), siendo esto más frecuente en San Nicolás (N2), Santa Catarina (SO) y Monterrey (NO), con 17, 12 y 10 días en esta condición, respectivamente. A nivel de toda el área metropolitana, aun con la escasa información disponible se registraron 35 días con concentraciones superiores al límite normado de este contaminante. Esta situación indica un riesgo potencial a la salud de la población, pese a que no se puede establecer incumplimiento de NOM por la escasez de datos (INECC, 2019).

Figura 3.3. Distribución de los días con calidad del aire buena, regular y mala, por estación de monitoreo en el Área Metropolitana de Monterrey, en el año 2018.



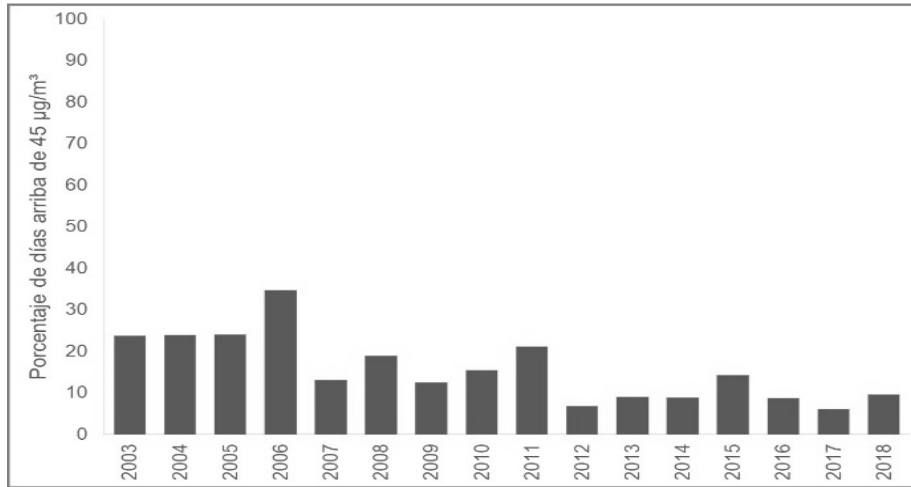
DI= Datos insuficientes

Fuente: INECC, 2019

En cuanto al comportamiento histórico de este contaminante, la Figura 3.4, muestra que el porcentaje de días por año con concentraciones superiores al límite normado vigente se ha mantenido por debajo del 10% en los tres años más recientes y aunque se observa una tendencia a la baja entre los años 2015 a 2017, en 2018 se registró un ligero repunte.

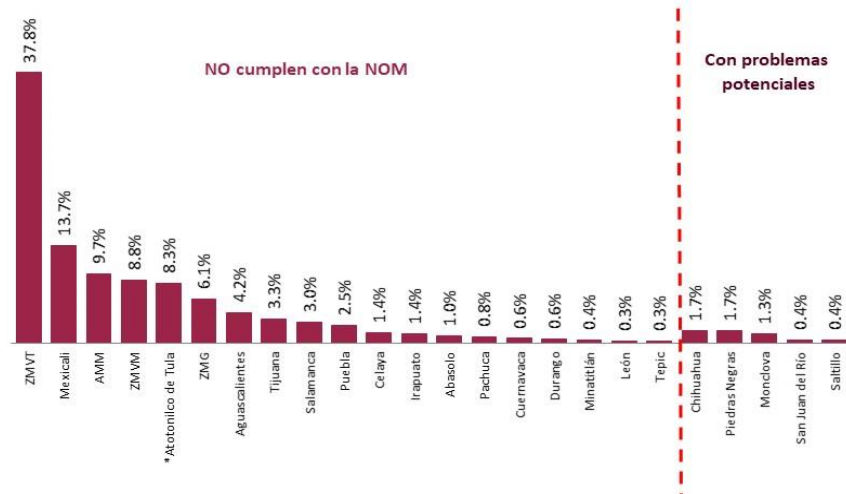
A pesar de la baja recuperación de datos obtenida para este contaminante en 2018, la información disponible indica que en el 9.7% de los días del año se superó el límite normado de 24 horas, lo que ubica al Área Metropolitana de Monterrey entre las regiones del país con mayor cantidad de días en esta condición (Figura 3.5)

Figura 3.4. Tendencia del porcentaje de días, por año, con concentraciones superiores al límite normado de 24 horas de PM_{2.5} en el periodo 2003 – 2018.



Fuente: INECC, 2019

Figura 3.5. Frecuencia de ocurrencia de días con concentraciones superiores al límite normado de 24 horas de PM_{2.5} en ciudades y zonas metropolitanas de México (2018).



No cumplen con la NOM = son aquellas estaciones en las que, con suficiencia de datos, se puede establecer incumplimiento de los límites normados establecidos.

Con problemas potenciales = son aquellas ciudades en las que no se puede establecer incumplimiento de norma por insuficiencia de datos, pero la información disponible indica la ocurrencia de días con concentraciones superiores a los límites normados.

Fuente: INECC, 2019

Los hallazgos recientes de estudios epidemiológicos realizados tanto en el contexto poblacional como ocupacional, además de estudios toxicológicos y de exposición en seres humanos, indican que las concentraciones de PM_{2.5} que hoy se observan

en numerosas ciudades implican riesgos para la salud. El espectro de efectos es amplio, pero afectan en particular a los sistemas respiratorio y cardiovascular. Toda la población puede ser afectada, aunque la susceptibilidad puede variar con el estado de salud o la edad, siendo los niños menores de 5 años, los adultos mayores de 65 y las personas con padecimientos previos, los grupos de mayor susceptibilidad.

La mayoría de los estudios apuntan a que el mayor impacto en la salud por partículas, lo originan compuestos altamente tóxicos y carcinogénicos como el carbono elemental, compuestos orgánicos (especialmente los hidrocarburos aromáticos policíclicos), sulfatos, nitratos y determinados metales (arsénico, cadmio, hierro, zinc y níquel). Por otro lado, estudios toxicológicos recientes sugieren que los metales contenidos en las partículas pueden estar relacionados con daño cerebral en respuesta a procesos inflamatorios con efectos adversos sobre el bulbo olfatorio, con alteraciones en la estructura cerebral de niños, con neuroinflamación, con patologías de la función olfatoria y alteraciones de la respuesta inmune.

Estudios epidemiológicos relacionan la exposición a PM_{10} y $PM_{2.5}$ con un incremento en la mortalidad, principalmente debido a complicaciones respiratorias, cardiovasculares, algunos tipos de cáncer y afecciones al desarrollo, todos ellos relacionados con la exposición a la fracción fina, ozono y sulfatos (Secretaría de Salud, 2014).

En este contexto general, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), estimaciones de 2016 indican que, la contaminación atmosférica en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 4.2 millones de defunciones prematuras (OMS, 2020). México no está a salvo de este problema y en 2017 el Instituto de Métricas y Evaluación de la Salud (IHME, por sus siglas en inglés), a través del estudio denominado Carga Global de la Enfermedad, estimó para nuestro país un total de 48,072 muertes prematuras a causa de la contaminación del aire (IHME, 2019). De ellas 1,822 fueron estimadas para el Estado de Nuevo León (IHME, 2019). Para este mismo año, el Sistema de Cuentas Nacionales de México determinó que en 2018 los costos por degradación ambiental

atribuible a la contaminación atmosférica fueron de 656,779 millones de pesos, que equivalen a 2.8% del PIB (INEGI, 2019).

4. Objetivos

Evaluar el desempeño y representatividad espacial de las estaciones que conforman actualmente la Red de Monitoreo de la Calidad del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) mediante distintas metodologías propuestas por la autoridad ambiental nacional e internacional, para identificar áreas de oportunidad en el monitoreo de la calidad del aire de la región.

5. Metodología

Para evaluar el diseño de la actual red de monitoreo de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey y, en su caso, proponer la reubicación y/o instalación de estaciones de monitoreo adicionales que mejoren la representatividad de los niveles de concentración a los que está expuesta la población a este contaminante, se realizaron las siguientes actividades: a) caracterización del entorno inmediato y determinación de la escala espacial de representatividad de cada una de las estaciones de monitoreo actualmente en operación, siguiendo criterios definidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2017); b) identificación de los sitios más aptos para la instalación de equipos de monitoreo a partir de la aplicación del método denominado Modelación de Aptitud (USEPA, 2007), y; c) determinación de la cantidad y ubicación de estaciones de monitoreo que se recomienda, debe conformar la red de monitoreo de $PM_{2.5}$ del AMM, con base en el riesgo a la salud de la población (Noll y Mitsutomi, 1983). A continuación, se describe brevemente en qué consistió cada actividad y la metodología empleada en cada caso.

5.1 Caracterización del entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2020.

Las estaciones de monitoreo de calidad del aire tienen una representatividad espacial característica dentro de una red y es un indicador a través del cual se refleja

alguna característica de una población, las variaciones de un parámetro en un punto de muestreo o las condiciones de un proceso. La escala de representatividad de una estación de monitoreo depende de la topografía del territorio, de su entorno, de la meteorología, de las fuentes de contaminación y del tipo de contaminante o parámetro meteorológico que midan. Esto es, la escala espacial de la representatividad de una estación de monitoreo se describe en términos de las dimensiones físicas de la parcela de aire más cercana a éste a lo largo de la cual las concentraciones de contaminantes son razonablemente similares. Entre más pequeña sea la escala de representatividad, más limitados y específicos son los objetivos de medición.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA, por sus siglas en inglés) ha definido la escala de una estación como micro, media, vecinal, urbana o regional, de acuerdo con las siguientes definiciones:

- **Escala micro:** define las concentraciones en los volúmenes de aire asociados con dimensiones de área que van desde varios metros hasta aproximadamente 100 metros.
- **Escala media:** define la concentración típica de áreas con dimensiones que varían desde aproximadamente 100 metros hasta 0.5 kilómetros.
- **Escala de vecindario:** Define las concentraciones para un área extendida de la ciudad que tiene un uso de suelo relativamente uniforme con dimensiones en el rango de 0.5 a 4.0 kilómetros.
- **Escala urbana:** define concentraciones dentro de un área de dimensiones tipo ciudad, del orden de 4 a 50 kilómetros.
- **Escala regional:** define generalmente un área rural de una geografía razonablemente homogénea sin grandes fuentes, y se extiende desde decenas hasta cientos de kilómetros.

Para establecer la escala espacial de representatividad de una estación de monitoreo, la propia USEPA ha definido algunos lineamientos básicos que contempla, entre otros, aspectos como: altura de la toma de muestra, distancia

horizontal o vertical entre la toma de muestra y estructuras de soporte, distancia entre la toma de muestra y áreas arboladas y distancia respecto a vialidades en función de su aforo vehicular. Dichos criterios están descritos en el Código Federal de Regulaciones (40 CFR Appendix E Part 58, probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring) y se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..A.**

Para obtener la información necesaria para aplicar los criterios descritos en la Tabla 5.1.A se desarrollaron las siguientes actividades:

- a. Acopio de información básica sobre las estaciones de monitoreo actualmente ubicadas en el Área Metropolitana de Monterrey (INECC, 2020), así como de su entorno inmediato (500 metros a la redonda). Esta información incluyó: coordenadas geográficas, uso de suelo (INEGI, 2017), pendiente del terreno (INEGI, 2013), comercios y servicios (DENUE, 2018) e inventario de emisiones a la atmósfera (SEMARNAT, 2019).
- b. Generación de mapas para ubicar las unidades económicas secundarias y terciarias cercanas a cada estación de monitoreo.
- c. Generación de mapas sobre uso de suelo considerando radios de 500 metros, 2 km y 4 km, tomando como punto de partida la ubicación de cada estación de monitoreo.
- d. Generación de mapas para ubicar fuentes fijas de emisión de PM_{2.5} en un radio de 2 km a la redonda de cada estación de monitoreo.
- e. Generación de mapas para ubicar todas las fuentes fijas de emisión, por sector de actividad, en el Área Metropolitana de Monterrey.
- f. Acopio y procesamiento de información meteorológica para generación de rosas de viento y de contaminantes para el periodo 2011 – 2018, de acuerdo con la información disponible en cada estación de monitoreo.
- g. Recopilación y procesamiento de información meteorológica y de calidad del aire para el periodo 2011 – 2018, de acuerdo con la información disponible en cada estación de monitoreo a fin de generar las rosas de contaminantes

- e identificar las áreas cuyas emisiones generan un mayor impacto en los niveles de concentración registrados en cada sitio.
- h. Realización de visitas de campo y levantamiento de datos para cada estación de monitoreo. En esta actividad se incluyó el registro de información relativa a:
- Altura de la toma de muestra
 - Distancia a las vialidades más cercanas
 - Distancia y altura de obstrucciones potenciales (p. ej. árboles y edificios)
 - Verificación y corrección de base de datos del DENUE, priorizando la identificación y ubicación de fuentes de emisión relevantes tales como:
 - Gasolineras,
 - Talleres de pintura,
 - Hornos e incineradores
 - Hoteles
 - Panaderías
 - Industria (p. ej. Química, Plástico, Metales, etc.)
 - Uso de solventes (p. ej. Artes gráficas, Tintorerías, etc.)
 - Áreas desprovistas de vegetación
 - Actividad agrícola
 - Construcciones
- i. Estimación del número total de vehículos que circulan por las principales vialidades alrededor de la estación de monitoreo. Para esta estimación se usó como primera fuente de información la plataforma SINTRÁFICO (<http://sintrafico.com/>).

La Figura 5.2 resume los principales elementos de información usados para caracterizar el entorno de una estación de monitoreo y definir su escala espacial de representatividad.

La metodología completa y los resultados detallados de esta actividad pueden ser consultados en el primer informe de este proyecto, el cual se incluye como Anexo 1. "Reporte sobre la caracterización del entorno de las estaciones de monitoreo

actualmente en operación en el Área Metropolitana de Monterrey”, de este documento.

Tabla 5.1.A. Resumen de los criterios de localización de toma de muestra o trayectoria de muestreo.

Contaminante	Escala de representatividad	Altura de toma de muestra sobre nivel del suelo (m)	Distancia horizontal y vertical a estructuras de soporte ¹ (m)	Distancia de la toma de muestra respecto a árboles (m)	Distancia de toma de muestra respecto a vialidades (m)
Dióxido de azufre (SO ₂) ^{2,3,4}	Media Vecinal Urbana Regional	2 - 15	>1	>10	NA
Monóxido de carbono (CO) ^{2,4}	Micro Media Vecinal	2.5 – 3.5 2 – 7 2 - 15	>1	>10	≤ 50 Ver Tabla 5.1.B para escalas media y vecinal
Ozono (O ₃) ^{2,4}	Micro Media Vecinal	2 - 15	>1	>10	Ver Tabla 5.1.C para todas las escalas
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) ^{2,4}	Micro Media Vecinal Urbana Regional	2 – 7 2- 15 2- 15 2- 15	>1	>10	≤ 50 Ver Tabla 5.1.C para las escalas Media, Vecinal, Urbana y Regional
Partículas (PM) ^{2,3,4} y Plomo (Pb) ^{2,3,4}	Micro Media Vecinal Urbana Regional	2 – 7 2 – 7 2- 15 2- 15 2- 15	>2 (sólo distancia horizontal)	>10	2- 10 Ver Figura 5.1 para las escalas Media, Vecinal, Urbana y Regional

¹ Cuando la estación se encuentra en la azotea, esta distancia de separación se refiere a las paredes o parapetos ubicados en el techo.

² Se debe garantizar un flujo de aire sin restricciones de 270 grados alrededor de la toma muestra.

³ La toma de muestra deben estar lejos de fuentes menores, como hornos de incineración o chimeneas. La distancia de separación depende de la altura del punto de emisión de la fuente menor (como una combustión), el tipo de combustible o residuos quemados, y la calidad del combustible (azufre, cenizas o contenido de plomo). Este criterio está diseñado para evitar influencias indebidas de fuentes menores.

⁴ La distancia de la toma de muestra respecto a un posible obstáculo debe ser de al menos el doble de la altura que sobresale el obstáculo.

Tabla 5.1.B. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal para la medición de monóxido de carbono.

Tráfico diario promedio (vehículos por día)	Distancia mínima* (metros)
≤ 10,000	10
15,000	25
20,000	45
30,000	80
40,000	115
50,000	135
≥ 60,000	150

* Distancia desde el borde del carril de tráfico más cercano. La distancia para recuentos intermedios de tráfico se debe interpolar a partir de los valores de la tabla en función del recuento real de tráfico.

Fuente: 40 CFR, Part 58, Appendix E, Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring

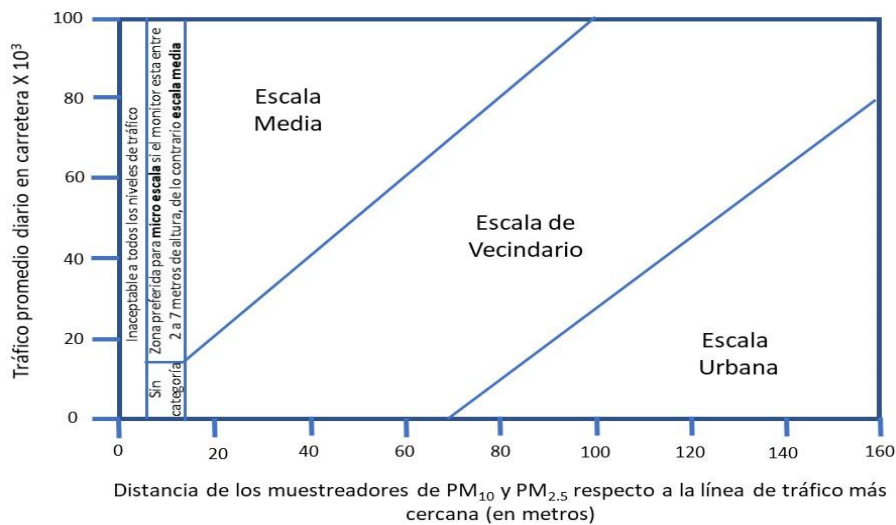
Tabla 5.1.C. Distancia de separación mínima entre vialidades y estaciones de monitoreo de escala vecinal y urbana para la medición de ozono (O₃) y óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x y NO_y).

Tráfico diario promedio (vehículos por día)	Distancia mínima* (metros)
≤ 1,000	10
10,000	10
15,000	20
20,000	30
40,000	50
70,000	100
≥ 110,000	250

* Distancia desde el borde del carril de tráfico más cercano. La distancia para recuentos intermedios de tráfico se debe interpolar a partir de los valores de la tabla en función del recuento real de tráfico.

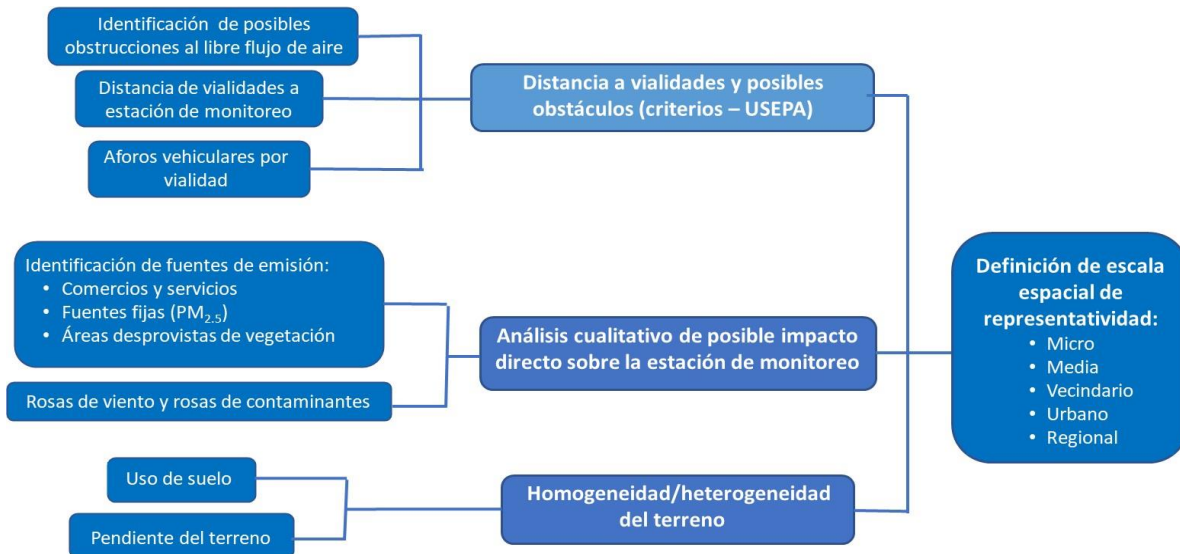
Fuente: 40 CFR, Part 58, Appendix E, Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring

Figura 5.1. Distancia recomendada, en metros, de muestreadores de partículas respecto a vialidades según intensidad de tráfico



Fuente: Elaboración propia, basada en 40 CFR, Part 58, Appendix E, Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring. http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title40/40tab_02.tpl

Figura 5.2. Elementos de información y criterios empleados para caracterizar el entorno inmediato de una estación de monitoreo y definir su escala espacial de representatividad



Fuente: Elaboración propia INECC, 2020

5.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo

De acuerdo con el documento “Guía de evaluación de redes de monitoreo de aire ambiente” de la EPA, existen diferentes aproximaciones metodológicas para llevar a cabo la evaluación técnica de una red de monitoreo. Estas pueden ir desde sencillos análisis sitio por sitio, que son útiles para evaluar qué monitores podrían ser candidatos a modificarse o removerse, hasta complejas técnicas de modelación fotoquímica. En este abanico de posibilidades metodológicas, se encuentra la técnica denominada “Suitability modeling” (Modelación de Aptitud), que es más elaborada que la evaluación sitio por sitio y menos robusta que la modelación fotoquímica. Dicha técnica es útil para evaluaciones que tienen como objetivo, entre otros, determinar si los datos generados por una red de monitoreo son útiles para caracterizar la exposición de la población (USEPA, 2007).

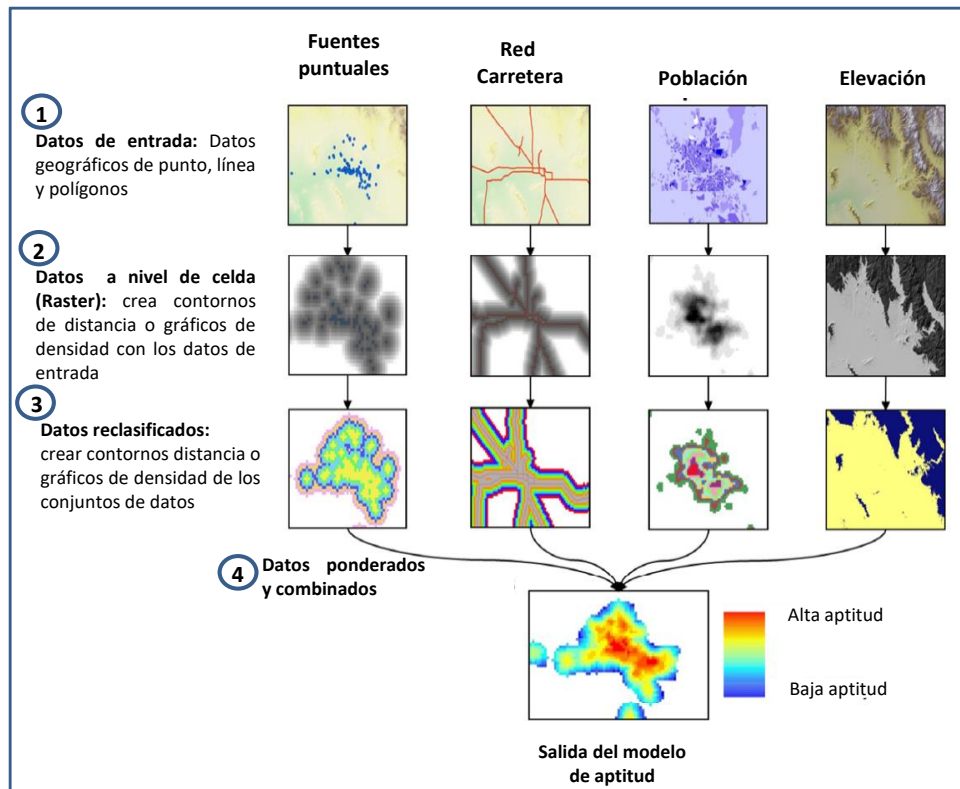
La modelación de Aptitud es una aplicación común y valiosa de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) que ha sido aplicada para identificar los sitios más apropiados para un uso o actividad particular de acuerdo con requerimientos o preferencias específicas. Ha sido aplicada, por ejemplo, en una amplia variedad de campos que incluye la ecología, la agricultura y el comercio, pero cuyo uso más extendido se ha dado en el campo de la gestión y planeación urbana y regional (Malczewski, 2004). En el área ambiental esta aplicación ha demostrado su utilidad en el diseño y evaluación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire (USEPA, 2007; Pope and Wu, 2014; M. C. McCarthy, et al, 2014; STI, 2014; CDPHE, 2015; y, Penfold, B. M., et al, 2003).

En el presente trabajo, el concepto de “Aptitud” se asume como la capacidad de un sitio o área determinada para soportar un uso específico, en este caso el monitoreo de la calidad del aire. En este contexto, la modelación de Aptitud aplicada en este trabajo tiene por objeto identificar las zonas más aptas en el Área Metropolitana de Monterrey para albergar estaciones de monitoreo de la calidad del aire. Para realizar dicho análisis, que es cualitativo, se hizo uso de un sistema de información geográfica (SIG), como herramienta de apoyo para facilitar la recolección, manejo y representación cartográfica de la información requerida para determinar la Aptitud del territorio; además, permite llevar a cabo, de manera coherente y sistemática, el análisis espacial de la información.

La Figura 5.3 resume las etapas incluidas en la metodología empleada. Primero se eligen las variables a incluir en el análisis y se obtiene la información correspondiente. Como se observa, la información es de diferente naturaleza en cuanto a los aspectos que se requieren valorar; por lo tanto, los insumos cartográficos varían según la geometría del objeto espacial representado, lo que implica que los insumos cartográficos sean de tipo vectorial, en sus tres variantes (puntos, líneas y polígonos). La siguiente etapa consiste en la transformación de la cartografía vectorial a formato raster para facilitar la superposición de variables. En seguida se hace una reclasificación de datos para poner todas las variables en una

misma escala y se pondera cada una de las capas de información en función de su importancia relativa en el análisis, para finalmente realizar la superposición de capas y obtener como resultado la valoración de la Aptitud del terreno.

Figura 5.3. Aproximación conceptual usada para desarrollar una evaluación de Aptitud.



Fuente: Elaboración propia, adaptada de Sonoma Technology Inc, 2014.

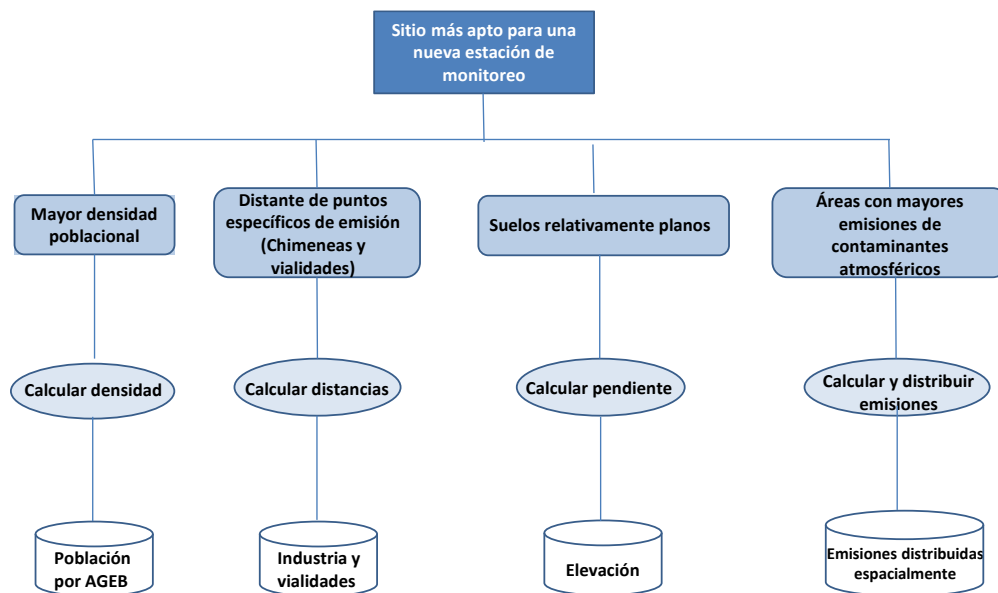
5.2.1 Identificación y recopilación de la información a usar en la evaluación de Aptitud y generación de mapas individuales por variable

La complejidad del modelado de Aptitud puede ser tan grande como lo sean los elementos que tienen injerencia en el tema que se desea evaluar, por ello es conveniente identificar las variables de mayor impacto que conviene usar en el análisis y dejar fuera aquellas de menor relevancia, o bien de las que no se dispone información suficiente. En este caso, las concentraciones ambientales de los

contaminantes que se desean monitorear, dependen, entre otros, de factores tales como tamaño de población, tipo de actividad económica, tamaño y características de la flota vehicular, tipo y cantidad de actividad industrial y comercial en la región, características de los combustibles, infraestructura carretera, tipo de uso de suelo, condiciones meteorológicas y topográficas de la región, etc. Para el caso particular de este análisis, se simplificó la cantidad de variables a partir de la disponibilidad de información. Así pues, se ha establecido que el lugar más apto para instalar una estación de monitoreo es aquellas que cumple con las siguientes características (Figura 5.4):

1. Que tenga alta densidad poblacional, pues se pretende priorizar el objetivo de caracterizar el grado de exposición que tienen la mayor parte posible de los habitantes de una localidad a los contaminantes atmosféricos;
2. Que esté distante de puntos específicos de emisión para evitar que la medición de la calidad del aire en la estación se vea afectada por ellos (p. ej. chimeneas, incineradores o emisiones vehiculares, entre otros);
3. Que se encuentre en áreas con poca pendiente de terreno para buscar una mayor representatividad espacial de las mediciones;
4. Que registre altas emisiones de contaminantes atmosféricos. Este criterio se emplea como indicador de calidad del aire, asumiendo que los sitios con mayores emisiones podrían tener peor calidad del aire que aquellos con menos emisiones. Se consideraron únicamente las emisiones de partículas suspendidas $PM_{2.5}$.

Figura 5.4. Criterios usados para definir la mayor Aptitud de un sitio para instalar una nueva estación de monitoreo de calidad del aire.



Bajo estas consideraciones se utilizó la siguiente información para generar los insumos a emplear en el software ArcGis Spatial Analyst para realizar el modelado de Aptitud:

- a. Población a nivel de AGEB1 del Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010);
- b. Red carretera (INEGI, 2011);
- c. Ubicación geográfica de fuentes puntuales de emisión tanto de jurisdicción estatal como federal (SEMARNAT, 2019)
- d. Datos de Relieve. Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), Resolución de 30 metros, Cobertura geográfica Nuevo León (INEGI, 2017)
- e. Emisiones de Partículas PM_{2.5} de fuentes puntuales, de área y móviles a nivel de celda con una resolución espacial de 1x1 km (SEMARNAT, 2019)

¹ El AGEB constituye la unidad básica del marco geo estadístico empleado por el INEGI, cuyo perímetro está representado generalmente por calles, avenidas, brechas y, en ocasiones, por rasgos físicos naturales y/o culturales, normalmente reconocibles y perdurables en el terreno” (INEGI, 2008).

Toda la información señalada en el párrafo anterior es trabajada en Sistemas de Información Geográfica como datos vectoriales, esto es, como objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) mediante la codificación explícita de sus coordenadas. Los puntos (por ejemplo, fuentes puntuales de emisión de contaminantes) se codificaron en formato vectorial por un par de coordenadas en el espacio, las líneas (por ejemplo, red carretera) como una sucesión de puntos conectados y los polígonos (por ejemplo, población y emisiones) como líneas cerradas o como un conjunto de líneas que constituyen las diferentes fronteras del polígono (formato Arco/nodo). Este formato resulta especialmente adecuado para la representación de entidades reales ubicadas en el espacio. De esta manera se construyeron mapas individuales por variable.

5.2.2 Transformación de datos vectoriales a datos a nivel de celda (RASTER)

Dada la naturaleza de cada una de las variables incorporadas al análisis (puntos, líneas y polígonos), su escala numérica es diferente (por ejemplo, número de habitantes, longitud del segmento carretero (metros), distancias a las fuentes de emisión (metros), emisiones de contaminante (gramos por día), pendiente del terreno (%), etc.), por lo que la superposición de las capas de información generadas para cada variable a fin de construir un mapa único que dé cuenta de la Aptitud de cada sitio en el área analizada para los fines buscados podría conducir a resultados difíciles de interpretar.

Para evitar este problema, es necesario transformar el formato de dichos datos y llevarlos a uno que permita homologar las escalas numéricas y facilite su unión en un mapa único, así como la interpretación de los resultados generados. La opción disponible en el modelado de Aptitud es el formato RASTER, el cual se fundamenta en la división del área de estudio en una matriz de celdas, generalmente cuadradas, donde cada una de estas celdas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la misma. Este formato, por

tanto, cubre la totalidad del espacio, lo que supone una ventaja fundamental ya que pueden obtenerse valores de forma inmediata para cualquier punto del mismo, lo que no sucede con los datos vectoriales.

Para generar esta transformación se crean contornos de distancia o gráficos de densidad. En este caso los contornos de distancia se generaron para la ubicación de fuentes fijas de emisión de contaminantes y red carretera, en tanto que el gráfico de densidad se generó para las variables como población y emisiones.

5.2.3 Reclasificación de datos

Una vez que se cuenta con los datos en formato RASTER para todas las variables incluidas en el análisis, es posible establecer una escala numérica común. En este caso la escala usada va de 1 a 10, donde 1 corresponde a sitios con menor Aptitud y 10 a los sitios mayor Aptitud. A esto se denomina habitualmente escala de Aptitud. El hecho de tener todas las variables analizadas en la misma escala numérica proporciona la misma importancia a todas ellas a la hora de determinar las ubicaciones más aptas. La reclasificación hecha para cada una de las variables incluidas en el análisis quedó de la siguiente forma:

Densidad de población: como se pretende priorizar el objetivo de caracterizar el grado de exposición que tienen la mayor parte de los habitantes, se asignó un valor de 1 (áreas menos Aptas) a aquellas ubicaciones con AGEBS con el menor número de habitantes y de 10 (áreas más Aptas) a las ubicaciones con AGEBS con mayor número de habitantes. Esta variable sólo considera la cantidad de habitantes por AGEBS, independientemente de su distribución por edad y género (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Figura 5.5. Reclasificación de datos de población



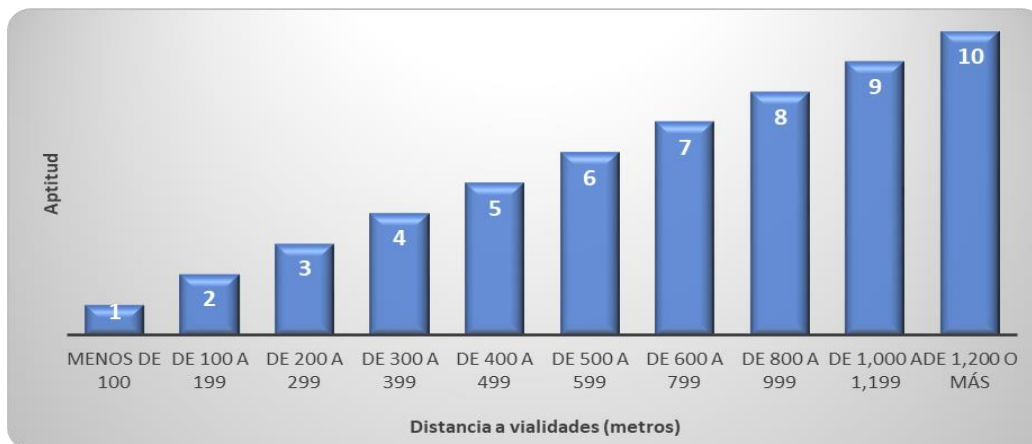
Fuentes puntuales: con el objetivo de ubicar las estaciones de monitoreo en sitios donde sus mediciones sean menos impactadas de manera negativa por la proximidad de fuentes de emisión industrial tal como hornos, calderas, incineradores, etc., se decidió asignar un valor de 1 (áreas menos Aptas) a aquellas ubicaciones que se encontraran más cerca de fuentes puntuales de emisión y de 10 (áreas más Aptas) a las ubicaciones más lejanas a las de fuentes puntuales de emisión (Figura 5.6).

Figura 5.6. Reclasificación de datos de distancia respecto a la ubicación de las fuentes puntuales de emisión



Red vial: En el mismo sentido al explicado previamente para las fuentes puntuales, se asignó un valor de 1 (áreas menos Aptas) a aquellas ubicaciones que se encontraran más cerca de alguna vialidad y de 10 (áreas más Aptas) a las ubicaciones más lejanas a dichas vialidades (Figura 5.7).

Figura 5.7. Reclasificación de datos de distancia respecto a la ubicación de vialidades.



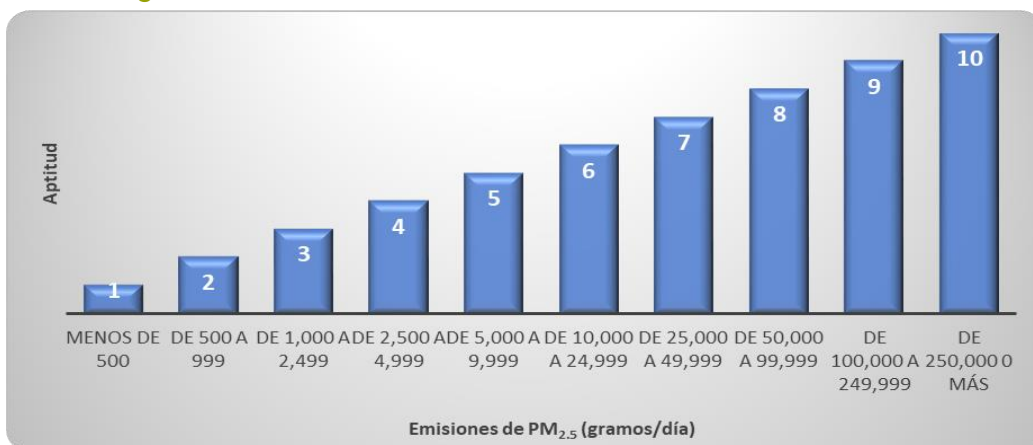
Pendiente del terreno: como es recomendable ubicar las estaciones de monitoreo en pendientes relativamente llanas, se asignó un valor de 1 a las ubicaciones con pendientes empinadas y de 10 a las ubicaciones con pendientes menos pronunciadas tal como se muestra en la Figura 5.8.

Figura 5.8. Reclasificación de datos de pendiente del terreno



Emisiones de contaminantes: al utilizar las emisiones de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ como un indicador de la calidad del aire en un lugar se asignó un valor de 1 a las ubicaciones con menores emisiones y de 10 a las ubicaciones con mayores emisiones, dado que se pretende privilegiar la ubicación de estaciones de monitoreo en sitios con mayor riesgo potencial de impactos a la salud (Figura 5.9).

Figura 5.9. Reclasificación de datos de emisiones de $PM_{2.5}$



5.2.4 Ponderación de capas de información y combinación de capas

El último paso que se debe realizar en el modelado de Aptitud es combinar los resultados reclasificados. Esto es, los mapas de Aptitud individual de cada variable analizada, por ejemplo: mapa de densidad de población, de distancia hasta las vialidades, de distancia hasta las fuentes puntuales de emisión, de pendiente del terreno y de emisiones de PM_{2.5}.

Cuando existe una fuerte evidencia de que algunos factores o variables son más importantes que otros para alcanzar el objetivo buscado (en este caso el monitoreo de la calidad del aire), entonces éstos factores deben ser ponderados en función de su nivel de importancia o contribución. En este trabajo se usó la herramienta Spatial Analysis Map Calculator de ArcGIS para ponderar y combinar los mapas individuales y producir el mapa de Aptitud. El siguiente es un ejemplo de una expresión usada para realizar la ponderación de capas o mapas en el modelado de Aptitud:

$$([\text{Layer}_1]*0.20 + ([\text{Layer}_2]*0.30 + ([\text{Layer}_3]*0.50))$$

En este modelo, Layer_1, Layer_2 y Layer_3, representan capas individuales de información y las cifras decimales son los factores de peso aplicados a cada capa. Layer_3 es ponderada de manera más importante porque se asume que tiene más influencia en el modelo. La salida de la herramienta Spatial Analysis Map Calculator es el modelo de Aptitud.

En este proyecto fueron definidos cuatro diferentes escenarios de ponderación para evaluar la Aptitud del territorio para la ubicación potencial de sitios de monitoreo de calidad del aire. Dichos escenarios se resumen en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Escenarios de ponderación de variables en la modelación de Aptitud del terreno para la ubicación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en el AMM

Variable	Factor de ponderación (%)			
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Densidad de población	20	40	25	50
Distancia a vialidades	20	5	10	5
Distancia a fuentes fijas	20	5	10	5
Pendiente del terreno	20	10	5	10
Emisiones de PM _{2.5}	20	40	50	30

Escenario 1. Todas las variables se ponderan con el mismo peso. Este escenario tiene como finalidad la identificación de los sitios más aptos para instalar equipos de monitoreo de la calidad del aire bajo el supuesto de que todas las capas de información son igualmente importantes y los monitores deberían ser capaces de medir la calidad del aire en sitios con mayor densidad poblacional, más emisiones de PM_{2.5}, con la menor influencia directa, por distancia, de las emisiones generadas por las fuentes puntuales y móviles, así como de ubicarse en sitios con la menor pendiente posible y así ofrecer la posibilidad de que dichas mediciones tengan una mayor escala espacial de representatividad.

Escenario 2. Población y emisiones tienen el mismo peso. La población y las emisiones se ponderan con un peso de 40%, seguida de la pendiente del terreno (10%). Debido a que las emisiones se están empleando como un indicador de calidad del aire, se asume que donde hay más emisiones hay peor calidad del aire y mayor riesgo a la salud de la población, el objetivo de este escenario es la identificación de sitios donde se podría caracterizar la calidad del aire que signifique los mayores riesgos a la salud para la mayor cantidad de población en la entidad.

Escenario 3. Las emisiones se ponderan con mayor peso. En su conjunto las emisiones tienen el mayor peso (50%), le sigue en importancia la población con 25% y la ubicación tanto de fuentes puntuales como de la red carretera con 10% cada uno. La pendiente del terreno recibe un factor de ponderación del 5%. En este escenario el objetivo es identificar los sitios más relevantes en términos de

emisiones considerando que puede resultar de interés para las autoridades ambientales establecer monitoreo en áreas con altas emisiones de contaminantes.

Escenario 4. La población se pondera con mayor peso. La capa de información sobre población se pondera con mayor peso (50%) que las demás capas con la idea de enfatizar el interés por encontrar sitios donde se pueda caracterizar la calidad del aire con una mayor cantidad de población expuesta.

5.3 Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.

Existen diferentes métodos para determinar la ubicación de puntos de monitoreo. Algunos favorecen el establecimiento de puntos de monitoreo en áreas que de manera subjetiva son de interés por sus características de población y/o uso de terreno, otros en lugares de gran tráfico vehicular, zonas industriales o alrededor de industrias que emiten una gran cantidad de contaminantes atmosféricos (Lebrel y Col., 2000; Kukkonen y Col., 2001; Goswami y Col., 2002; citados por Kanaroglou y Col., 2005; Velázquez, 2003).

En este sentido se han propuesto métodos formales para el diseño de redes de monitoreo, cubriendo diferentes objetivos, tales como detectar violaciones a las normas de salud ambiental, vigilar los niveles de contaminación de una industria en particular y crear bases de datos con fines de investigación o para la gestión de la calidad del aire, entre otros (TrujilloVentura y Ellis, 1991; Finzi y Col., 1991; Kanaroglou y Col., 2005; Negri y Sozi, 1988; Noll y Col., 1977; Noll y Mitsutomi, 1983; Mazzeo y Venegas, 2000).

En muchas de las ciudades mexicanas que cuentan con redes de monitoreo atmosférico, la ubicación de las estaciones de monitoreo ha sido generalmente determinada de manera subjetiva, utilizando como criterio las zonas donde se sospecha existen altas emisiones contaminantes o concentraciones importantes de

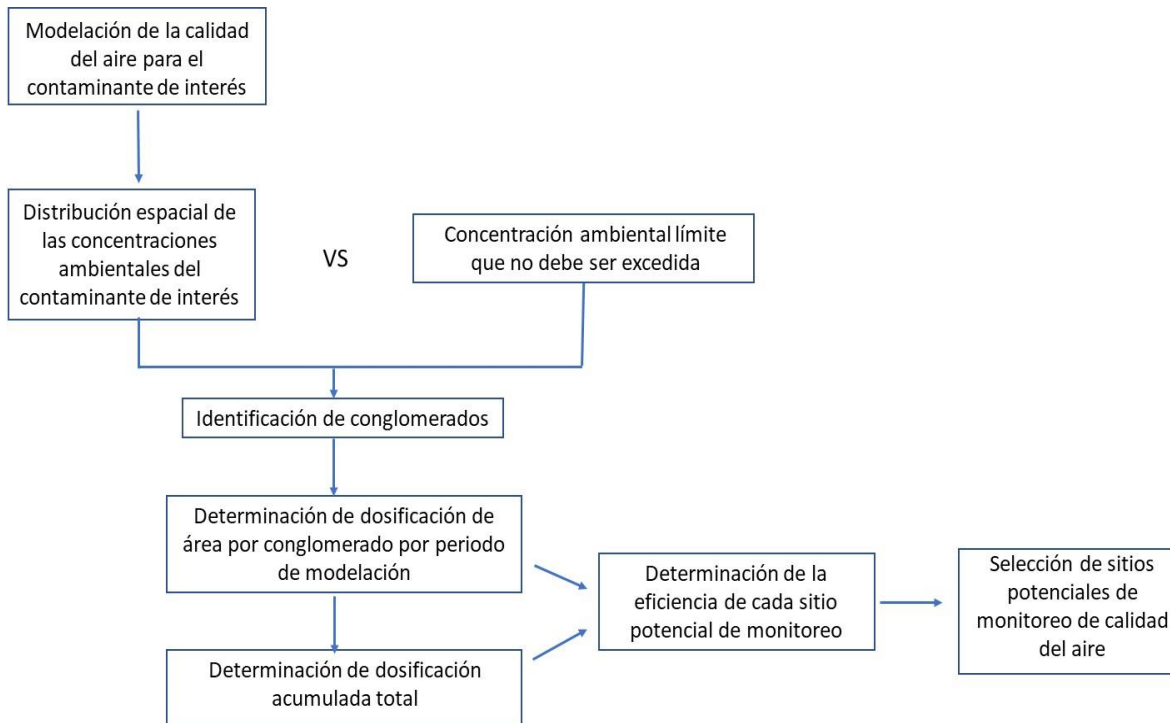
población. En ocasiones lo que se busca son lugares que cuenten con seguridad para el equipo y disponibilidad de energía eléctrica para su funcionamiento, sin considerar si el sitio elegido es el más representativo del estado de la calidad del aire en la localidad.

Si se cuenta con pocos recursos económicos y humanos para el monitoreo de la calidad del aire, es de mayor importancia la elección adecuada de la ubicación de puntos de monitoreo, de manera que sean lo más representativos posible del estado de la calidad del aire, sobre todo para cumplir el objetivo de la protección de la salud humana.

Noll y Mitsutomi (1983) desarrollaron una metodología que jerarquiza los sitios potenciales para monitoreo atmosférico de acuerdo a su habilidad para representar el patrón de “dosificación ambiental” en una red de monitoreo. La dosificación ambiental se asume como un indicador de riesgo a la salud de la población, que toma en consideración tanto la concentración ambiental del contaminante como la concentración de población en un punto, así como la frecuencia con que se registran, en dicho punto, excedencias a algún valor de referencia orientado a la protección de la salud.

En esta metodología, para obtener la concentración del contaminante se modela la dispersión de los contaminantes en el aire. Se selecciona una concentración límite que no debe ser excedida. Un grupo de receptores contiguos que excedan el límite establecido son identificados en un conglomerado. A cada conglomerado se le asigna una dosificación ambiental representativa. Los receptores que se encuentren en un alto número de conglomerados son identificados como áreas de alta dosificación y se convierten en sitios potenciales de monitoreo. Tales sitios potenciales de monitoreo se jerarquizan de acuerdo a un valor de eficiencia. Dicha eficiencia es un indicador de la cantidad de contaminante que se recibe en el sitio seleccionado y en las áreas contiguas (representadas por los conglomerados que pertenecen a este punto) con respecto a la cantidad total de contaminante que se tiene en la zona de estudio durante todo el periodo modelado. Los puntos de monitoreo se eligen con base a dicha eficiencia (Figura 5.10).

Figura 5.10 Identificación de sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire de acuerdo con su habilidad para representar el patrón de dosificación ambiental.



Fuente: Elaboración propia a partir de Noll y Mitsutomi, 1983

El procedimiento usado en este trabajo para la selección de puntos de monitoreo se basa en la metodología descrita anteriormente, pero además de establecer una concentración límite de contaminante para la formación de conglomerados, se emplea un valor relativo al riesgo a la salud, que incluye el concepto de dosificación ambiental para redefinir los conglomerados a partir de los cuales se seleccionan los sitios potenciales de monitoreo. A continuación se detalla esta metodología.

5.4 Determinación de sitios de monitoreo de calidad del aire con base en dosificación ambiental

Esta metodología jerarquiza los sitios potenciales para monitoreo atmosférico de acuerdo a su habilidad para representar el patrón de “dosificación ambiental”,

entendida ésta como el producto de la concentración de un contaminante por el tiempo de exposición, en una red de monitoreo.

1. Estimación de concentraciones ambientales de PM_{2.5}. El punto de partida de esta metodología es conocer la distribución espacial de las concentraciones del contaminante de interés en el área de estudio. En este caso, el contaminante de interés son las partículas suspendidas con un diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras (PM_{2.5}) y sus concentraciones ambientales en el Área Metropolitana de Monterrey fueron estimadas con el modelo fotoquímico WRF CHEM2, bajo las siguientes consideraciones:

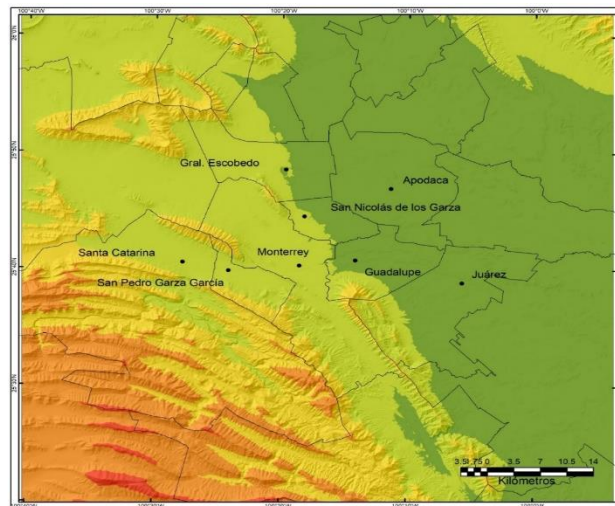
Región modelada:

Para delimitar el dominio de modelación fotoquímica se utilizaron como referencias la región denominada Área Metropolitana de Monterrey (SEDATU et al. 2018), la región geográfica propuesta como cuenca atmosférica de Monterrey (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) por el Instituto Nacional de Ecología (INE, 2007), y el transporte de contaminantes inter - cuencas de Monterrey con Saltillo, propuesto por Bautista en 2019 (Bautista, 2019), y el estudio antes mencionado del INE.

A partir de la información anterior el dominio de modelación se centró en las coordenadas latitud 25.68063 y longitud -100.2852, y se delimitó una extensión en 78 nodos en dirección Este – Oeste y 78 nodos en dirección Norte – Sur, para generar una malla cuadrada con (celdas de) resolución de 1000 m. La Figura 5.11 muestra la cobertura geográfica del dominio de modelación.

² <https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem>

Figura 5.21 Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de $PM_{2.5}$ en el AMM.



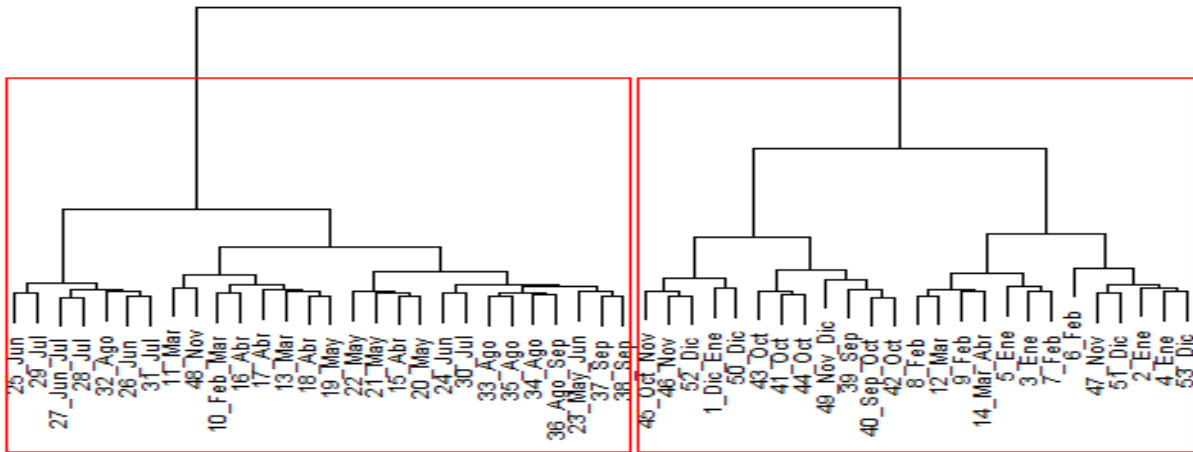
Fuente: Elaboración propia INECC.

Periodos modelados:

Para determinar los periodos a modelar se usó la técnica estadística multivariada, conocida como “Análisis de conglomerados o clúster”. El análisis de conglomerados es una forma explícita para identificar grupos en conjuntos de datos, máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos. En este análisis se generan dendogramas o representaciones gráficas que muestra los grupos que se forman al crear conglomerados de observaciones y sus niveles de similitud, de tal forma que facilita la visualización de conglomerados con características similares. El análisis se realizó a partir de los datos meteorológicos horarios registrados por el Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire de Nuevo León en 2016, seleccionado por la disposición para este año del último inventario de emisiones para modelación del AMM. Las variables consideradas fueron: presión atmosférica (PA), temperatura (TEMP), velocidad del viento (VV) y humedad relativa (HR) a partir de los promedios semanales (lunes a domingo) de cada una de ellas. En la Figura 5.12 se aprecian claramente dos grupos o conglomerados: octubre a febrero y marzo a septiembre, que corresponden a periodos de tiempo en los que las variables analizadas muestran mayor similitud al interior de cada grupo y al

mismo tiempo mayor diferencia entre grupos. De esta forma, se asume que cualquier semana que forma parte de cada uno de los grupos podría representar adecuadamente las características meteorológicas que se presentan en la región en cada uno de los periodos identificados.

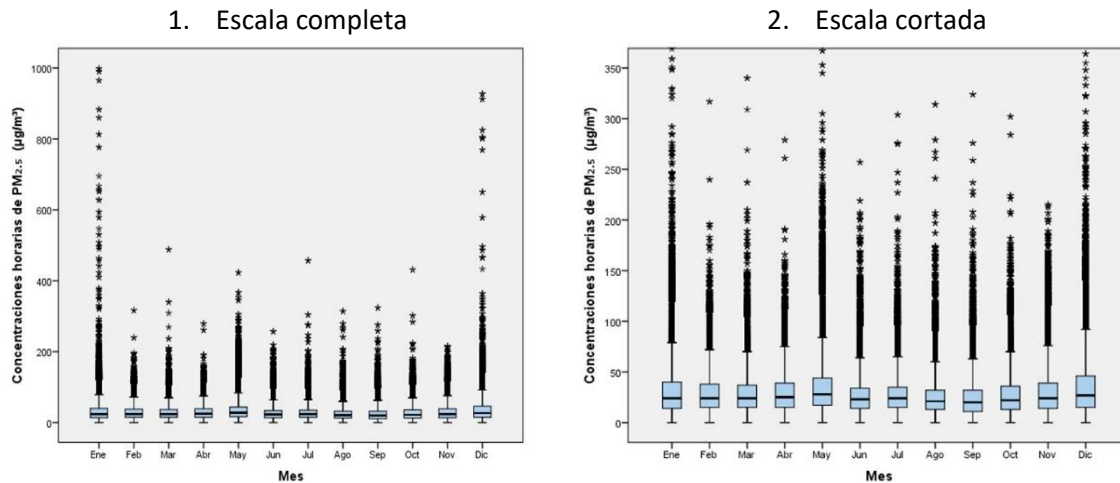
Figura 5.12. Cobertura geográfica del dominio de modelación fotoquímica para estimar concentraciones de PM_{2.5} en el AMM.



Fuente: Elaboración propia INECC

Para definir específicamente las semanas de modelación, se consideró también el comportamiento histórico (2003-2018) de las concentraciones horarias de las PM_{2.5} registradas por el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de Área Metropolitana de Monterrey. La Figura 5.13 muestra las tendencias de las concentraciones horarias de PM_{2.5} (inciso (a) con la escala completa e inciso (b) con un recorte en la escala, a fin de apreciar mejor las tendencias). En ellas se aprecia, a partir de la mediana y el percentil 75, que las concentraciones más altas se registran en los meses de enero, mayo y diciembre; mientras que las concentraciones más bajas se observan en los meses de junio, agosto y septiembre.

Figura 5.1. Tendencia mensual de las concentraciones horarias de PM_{2.5} en el AMM, 2003-2018.



Fuente: Elaboración propia INECC

Tomando en consideración tanto el comportamiento de la meteorología como de las concentraciones de PM_{2.5} a lo largo del año se decidió modelar un par de semanas con concentraciones altas y una semana de concentraciones bajas. Los periodos del 11 al 17 de enero y del 23 al 29 de mayo se eligieron como representativos de los periodos de altas concentraciones y el periodo del 20 al 26 de junio, como representativa de las concentraciones bajas. La modelación de dos periodos de concentraciones altas se decidió sobre la base de que cada uno de ellos pertenece a periodos con condiciones meteorológicas distintas, de acuerdo con los resultados del análisis de clúster.

Configuración general del modelo:

Resolución geográfica (celdas) 1000 m; amplitud Este-Oeste 78 nodos y Norte-Sur 78 nodos; 37 niveles Eta, que generan 36 niveles medios para la estimación de las concentraciones de PM_{2.5}; techo del dominio a 50 mb y 2 capas de suelo; mientras que la parametrización física incluyó microfísica con esquema de Lin para alta resolución, radiación de onda larga esquema Rapid Radiative Transfer Model, radiación de onda corta con Goddard, capa superficial con esquema NCEP GFS,

física de la superficie de la tierra con Pleim-Xiu scheme Model, capa límite con Mellor-Yamada-Janjic y la parametrización de cúmulos con ensamble Grell-Freitas.

Inventario de emisiones

Se utilizó el inventario nacional de emisiones 2016 para modelación, desarrollado en el marco del estudio “Adecuar el Inventario Nacional de emisiones 2016 para Modelación” (INECC, 2016), el cual fue desarrollado para las coberturas de Guanajuato, Ciudad Juárez, Colima, Región CAME, Guadalajara, Mexicali, Tijuana y Monterrey, con resolución 1x1 km. Para conocer el detalle sobre la preparación del inventario de emisiones para modelación del Área Metropolitana de Monterrey se sugiere consultar el reporte del estudio antes referido.

Los resultados de la etapa de modelación de la calidad del aire son las concentraciones horarias de $PM_{2.5}$, para cada día modelado, para cada una de las celdas en que se divide el área de estudio.

2. Selección de valor límite. Una vez obtenidas las concentraciones de $PM_{2.5}$ para cada celda, es necesario seleccionar el valor límite de protección a la salud de la población que se empleará como referencia.

En este caso se optó por utilizar como valor límite (VL) el valor guía para $PM_{2.5}$ recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para protección de la salud de la población, que es de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas (OMS, 2005). Con este criterio, en las siguientes etapas de la metodología sólo se consideran las celdas con concentraciones promedio de 24 horas mayores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3. Estimación de la masa inhalada por celda. Para cada una de las celdas en las que la concentración de $PM_{2.5}$ es mayor al valor guía de la OMS, se calcula la masa inhalada (MI), que para efectos de este trabajo se definió como la masa de un contaminante que es inhalada por una población receptora, durante determinado

tiempo de exposición. La MI se asume como una forma simple de describir la relación entre la calidad del aire y la exposición de la población y se estima para cada celda de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$MI = CC * PC * TR * 10^{-06}$$

Donde MI es la masa inhalada de PM_{2.5} (g) para cada día modelado, CC es la concentración del contaminante (µg/m³) en la celda, PC es la población en la celda y TR es la tasa de respiración promedio. Para hacer la conversión de microgramos a gramos de PM_{2.5} inhaladas por la población receptora en cada celda, se utilizó el factor de 10⁻⁰⁶.

En este caso se empleó una tasa de respiración de 13.25 m³/24 horas, recomendada por Velázquez (2008). Dicha tasa es el promedio de las tasas de respiración de hombres (15.2 m³/día) y mujeres (11.3 m³/día), sugeridas por la EPA (USEPA, 1997).

Para obtener el número de habitantes por celda se tomó la población por Área Geoestadística Básica (AGEB) del Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática en el año 2010 (INEGI, 2010).

Para ello, fue necesario transformar los datos de población que se encuentran en polígonos irregulares (AGEBS) a una malla regular. Para pasar los datos de población de los AGEBS³ a cada celda de la zona de estudio se superpuso la cobertura de la malla de modelación con la cobertura de AGEB y se tomó en cuenta el área de las secciones de AGEB que caen dentro de cada una de las celdas multiplicado por su población. Al final la suma de las contribuciones parciales de

³ AGEB - Área Geoestadística Básica: se definen como la extensión territorial ocupada por un conjunto de manzanas que generalmente son de 1 a 50, perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo sea principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etc. (https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_social_AGEB_2010.aspx)

cada AGEB en cada una de las celdas, dieron como resultado la población total en dicha celda.

4. Selección de valor de referencia para riesgos a la salud. Se calcula el valor de referencia contra el cual se comparará la Masa Inhalada (MI) de cada celda a fin de identificar posteriormente los conglomerados. El valor de referencia (VR) se estima de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$VR = \text{Masa inhalada por población receptora} = VL * PP * TR * 10^{-06}$$

Donde VR es valor de referencia para definir el riesgo a la salud, VL es la concentración límite propuesta por la OMS para protección de la salud de la población con respecto a PM_{2.5} (25 µg/m³), PP es la población promedio de cada celda en la zona de estudio (448.8 personas/celda), TR es la tasa de respiración promedio (13.25 m³/24 horas). En este cálculo se emplea el factor de 10⁻⁶ para transformar el resultado a gramos.

Al aplicar la ecuación anterior se obtuvo un valor de referencia de 0.14923948 g de PM_{2.5}, con el cual se seleccionaron las celdas en las que se rebasó dicho valor, para posteriormente formar los conglomerados.

Con el objeto de no dar demasiado peso sólo al factor de población, en la determinación de la masa inhalada de PM_{2.5}, en cada celda de la malla que cubre el área de estudio se asigna el valor de cero si la concentración de este contaminante es menor a 25 µg/m³. En estos casos, el riesgo a la salud es más pequeño que el que se presentaría en zonas donde la población es escasa y las concentraciones de PM_{2.5} sean elevadas. De esta manera se evita calcular valores altos de masa inhalada cuando en zonas de densidad poblacional alta se tienen concentraciones de PM_{2.5} bajas (y por lo tanto un riesgo a la salud también bajo).

5. Formación de conglomerados. Se compararon los valores de Masa Inhalada de cada celda (MI) contra el valor de referencia (VR) y se formaron los conglomerados con las celdas contiguas (Norte-Sur y Este-Oeste) donde el valor de la Masa Inhalada fue superior al Valor de Referencia. Los conglomerados fueron determinados para cada día de cada periodo de modelación. En principio cada punto o celda de cada conglomerado puede ser considerado un sitio potencial de monitoreo.

6. Dosificaciones de área por conglomerado. Para cada conglomerado se estimó la Dosificación de Área, la cual se define como la suma de la masa inhalada de todas las celdas que pertenecen a un conglomerado particular, multiplicado por la probabilidad de ocurrencia de cada escenario o día modelado, es decir;

$$A_{qt} = \sum_{m \in Q_{qt}} (MI_{mt})(P_t)$$

Donde A_{qt} es la dosificación de área para el conglomerado q del escenario meteorológico t , MI_{mt} es la masa inhalada estimada en la celda m para el escenario meteorológico t , y P_t es la probabilidad de ocurrencia del escenario meteorológico t .

Esta dosificación de área es asignada a cada celda m incluida en el conglomerado, de tal manera que $A_{mt} = A_{qt}$ para cada $m \in Q_{qt}$. Como cada punto de la malla puede aparecer solamente en un conglomerado en la situación t , $A_{mt} = 0$ si el punto m no pertenece a ningún conglomerado.

Se utilizaron promedios diarios de concentraciones modeladas de $PM_{2.5}$, por lo que un escenario meteorológico corresponde a las condiciones meteorológicas de un periodo de 24 horas. La probabilidad de ocurrencia de cada escenario meteorológico es igual a $1/365$, que corresponde a cada uno de los días modelados.

7. Dosificación de Estación. Cada sitio potencial de monitoreo puede estar involucrado en más de un conglomerado, por lo que una estación es más efectiva cuando pertenezca a una mayor cantidad de conglomerados. La dosificación de la estación (S_m), se define como la suma de las dosificaciones de área de todos los conglomerados que contengan la estación para cada uno de los días modelados.

$$S_m = \sum_t A_{mt}$$

Donde S_m es la dosificación de la estación para todos los días modelados y A_{mt} es la dosificación de área en cada punto de la malla para cada uno de los días modelados.

8. Dosificación Total. Se refiere a la dosificación acumulada total del área de estudio, considerando todos los días modelados; es decir, consiste en una suma de todas las dosificaciones de área estimadas por día y por conglomerado. Se representa por:

$$A = \sum_t \sum_q A_{qt}$$

Donde A es la dosificación total y A_{qt} son las dosificaciones de área con sus pesos proporcionales a la frecuencia de ocurrencia de los escenarios modelados.

9. Eficiencia de la Estación. Se define en términos de las dosificaciones recibidas por el sitio (celda) de monitoreo potencial. Esta eficiencia se calcula como la razón de la dosificación de la estación entre la dosificación total y se expresa en porcentaje. La eficiencia de la estación se define como:

$$E_m = S_m/A * 100$$

Donde E_m es la eficiencia de la estación, S_m es la dosificación de la estación y A la dosificación total en el área de estudio.

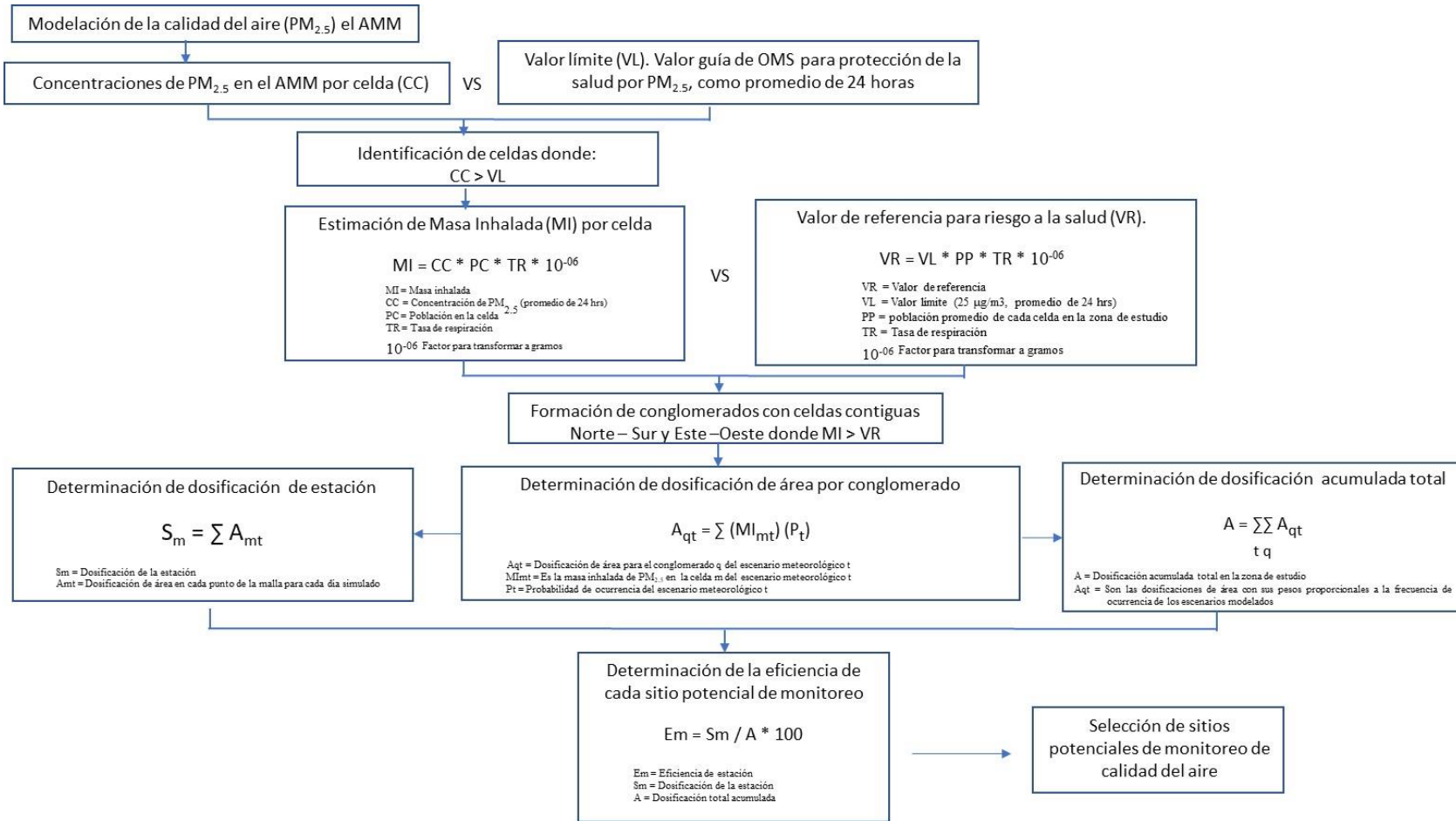
10. Selección de sitios de monitoreo. El primer sitio de monitoreo que se selecciona es el que tiene la más alta eficiencia de estación. La cobertura de estación se define como el conjunto de todos los puntos que pertenecen a cualquier conglomerado que contenga la estación. La eficiencia de la red de monitoreo es la suma de las eficiencias de todas las estaciones seleccionadas.

Después de seleccionado el primer sitio de monitoreo, todos los conglomerados asociados a este sitio son eliminados y se calculan nuevas dosificaciones y eficiencias de estación para los puntos que restan. Luego se selecciona el segundo sitio más eficiente. Este proceso continúa hasta que las restricciones de eficiencia o número total de estaciones de la red de monitoreo se cumplen.

La Figura 5.14 resume la metodología empleada en este trabajo para identificar los sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey con base en el criterio de dosificación ambiental.

La metodología completa y detallada de esta actividad pueden ser consultados en el Anexo 2 “Modelación de $PM_{2.5}$ y determinación de sitios para su monitoreo con base en dosificación ambiental”, de este documento.

Figura 5.2. Identificación de sitios potenciales de monitoreo de la calidad del aire en el AMM con base en la dosificación ambiental.



Fuente: Elaboración propia INECC.

6. Resultados

En las siguientes secciones se presentan los principales resultados para cada una de las actividades desarrolladas como parte de este trabajo: a) Caracterización de entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2020; b) Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo, y; c) Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire con base en el riesgo a la salud humana.

6.1 Caracterización de entorno de las estaciones de monitoreo en operación en el año 2020

Se hizo la caracterización del entorno de las 13 estaciones de monitoreo que se encontraban en operación en el mes de marzo del año 2020 en el territorio del Área Metropolitana de Monterrey a través de la metodología descrita en la sección V.1 de este reporte. La única estación no considerada en este trabajo fue Pesquería, la cual entró en operación en el último trimestre del año 2020. Los resultados de la evaluación hecha con la información disponible, y teniendo en consideración que el objetivo prioritario de la red de monitoreo es la caracterización de la calidad del aire a la que está expuesta la población, indican que cinco estaciones de monitoreo cumplen con los criterios para asumir una escala espacial de representatividad de tipo vecindario (de 0.5 a 4 km), apropiada para el objetivo antes planteado, especialmente para el monitoreo de partículas suspendidas PM_{2.5}. Estas estaciones de monitoreo son: **Obispado, Cadereyta, Juárez, La Pastora y Santa Catarina.**

Cuatro estaciones de monitoreo requerirían de reubicación para, si es del interés de la autoridad ambiental del Estado de Nuevo León, ampliar la escala espacial de representatividad a una de tipo vecindario, al menos para la medición de partículas suspendidas. Estas estaciones son: **Pueblo Serena, Escobedo, García y Universidad.** La causa principal de no alcanzar la escala espacial de tipo vecindario, en la mayoría de los casos, es la proximidad a alguna vialidad con

intenso aforo vehicular o a amplias zonas desprovistas de vegetación, situaciones que potencialmente pueden tener, de acuerdo con los criterios de la USEPA, un impacto directo en las mediciones de calidad del aire realizadas en el sitio.

Cuatro estaciones de monitoreo requieren de una valoración adicional para confirmar la escala espacial de representatividad de sus mediciones asignada en este trabajo. Estas estaciones son: **Apodaca, San Pedro, San Bernabé y San Nicolás**. Las estaciones Apodaca y San Pedro, tienen en su proximidad la presencia de fuentes fijas, cuyas emisiones de PM_{2.5} bajo ciertas condiciones de viento, podría tener un impacto directo en las mediciones de este contaminante, por lo que se sugiere descartar tal impacto mediante la realización de ejercicio de modelación.

En el caso de la estación San Bernabé se identificó una posible inconsistencia en el dato del aforo vehicular de una vialidad cercana. Si se confirma en dato de aforo con el que se cuenta al momento, la estación requeriría de reubicación, pero si se corrige a la baja en el rango que se asume razonable por las características del sitio y del aforo de la vialidad a la que le da continuidad, es probable que alcance la escala de tipo vecindario para la medición de gases, en tanto que para la medición de partículas permanecería en una escala micro a media.

Con respecto a la estación San Nicolás, el entorno le favorece para tener una escala espacial de tipo vecindario, sin embargo, esto no se puede establecer como una realidad en tanto no se logre realizar la poda de un árbol que se ubica en su proximidad inmediata y cuyo follaje está muy cercano a los equipos de medición e incluso ocasionalmente haciendo contacto con ellos. Si se concreta la poda de dicho árbol, la escala espacial de las mediciones sería de tipo vecinal y se recomendaría mantener este sitio de monitoreo. Por el contrario, si esto no es posible, resulta inevitable su reubicación.

La Tabla 6.1 resume la condición particular de representatividad espacial, por contaminante, de cada una de las estaciones de monitoreo actualmente en operación en el Área Metropolitana de Monterrey, así como algunas recomendaciones específicas en cada caso.

Los resultados detallados de esta actividad pueden ser consultados en el primer informe de este proyecto, el cual se incorpora como Anexo 1. “Reporte sobre la caracterización del entorno de las estaciones de monitoreo actualmente en operación en el Área Metropolitana de Monterrey”, al presente reporte.

Tabla 6.1 Escala espacial de representatividad por contaminantes en cada una de las estaciones de monitoreo que conforman el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey.

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
Obispado (CE)	Vecindario: PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂ , NO ₂ y CO.	Ubicada en las instalaciones de Agua y Drenaje de Monterrey, en una zona con uso de suelo habitacional, homogéneo a más de 500 metros a la redonda; altura de toma de muestra que cumple con criterios EPA; libre de obstáculos al libre flujo de aire; sin una fuente de emisión cerna (fija, móvil o de área) que impacte de forma directa sobre la estación de monitoreo; se ubica viento a favor de numerosas fuentes de emisión de sectores económicos diversos lo que la hace susceptible de caracterizar niveles de exposición de la población asociados de una mezcla de emisiones provenientes de una diversidad de fuentes sin estar dominados por una fuente en particular.	Vigilar crecimiento de arbolado cercano y poda oportuna.	Cercanía con áreas arboladas, que en este momento cumplen con el criterio de distancia y altura apropiada para no ser un obstáculo, pero es tal la cercanía que si no se vigila el crecimiento y se hace la poda oportuna se podrían convertir rápidamente en un obstáculo al libre flujo de aire. Además, los árboles pueden proveer una superficie para la absorción y/o reacción de SO ₂ , O ₃ y NO ₂ , así como una superficie para la deposición de partículas (Appendix E Part 58 - Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring).
San Bernabé (NO)	Micro: PM ₁₀ y CO Media: PM _{2.5} , O ₃ y NO ₂ Vecindario: SO ₂	Estación ubicada en los patios de Metrorrey. Existen vialidades cercanas con aforos vehiculares que impactan las mediciones de calidad del aire en el sitio. En el entorno inmediato hay grandes áreas de terracería que probablemente impacta la medición de material particulado por efecto de la resuspensión de polvo.	Reubicación si se desea mayor escala espacial de representatividad. Validar aforo vehicular en las vialidades Tucumán y Tritón para confirmar o ajustar escala espacial de	La reubicación se recomienda tanto por la presencia de amplias áreas desprovistas de vegetación que pueden impactar la medición de partículas como por la cercanía a una vialidad con alto flujo vehicular. LA EPA sugiere no instalar equipos de medición en áreas no pavimentadas a menos que haya cubierta vegetal durante todo el año para minimizar el impacto de la

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
			representatividad para la medición de gases.	<p>resuspensión de polvo. Esta condición no se cumple en el sitio.</p> <p>La vialidad denominada Tucumán es la que le confiere una escala de representatividad media, tanto para partículas como para gases por su cercanía y aforo. Para dicha vialidad se reporta un aforo vehicular de 18,720 vehículos por día, mientras que para la vialidad a la que le da continuidad, denominada Tritón, sólo se reporta un aforo de 8,858 vehículos. Situación que resulta extraña, pues es una vialidad continua que sólo cambia de nombre. En este sentido, si el aforo estimado para la calle Tucumán fuera del mismo orden de magnitud que para la calle Tritón, entonces la escala espacial de representatividad para esa estación, con respecto a esa vialidad, cambia de Media a Vecindario para partículas y a Vecindario/Urbano para gases. En este contexto, se sugiere hacer un ejercicio de campo para validar el aforo vehicular correcto para ambas vialidades y ajustar la escala espacial de representatividad de acuerdo con los resultados obtenidos. Si el resultado arroja que la escala espacial es de tipo Vecindario, la estación podría permanecer donde está, pero se recomendaría no medir partículas suspendidas pues el impacto</p>

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
				de los campos desprovistos de vegetación sigue presente.
<p>Pueblo Serena (S)</p>	<p>Media: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂ y CO</p> <p>Vecindario: SO₂</p>	<p>Ubicada en la azotea del centro comercial Pueblo Serena. Por encima de 5 niveles de estacionamiento del propio centro comercial. Tomas de muestra por arriba de 15 metros sobre el nivel de piso de la calle más próxima, por lo que no cumple con criterios de EPA.</p> <p>La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, establece que una escala espacial de representatividad media, para PM₁₀, PM_{2.5} y CO, es característica de mediciones hechas en estacionamientos y calles alimentadoras asociadas con centros comerciales, estadios y edificios de oficinas (Appendix D to Part 58).</p>	<p>Reubicación si se desea mayor escala espacial de representatividad.</p>	<p>Emisiones vehiculares impactan las mediciones de O₃, NO₂ y CO. Titulación de O₃ con NOx emitido por vehículos.</p>
<p>Apodaca (NE2)</p>	<p>Vecindario: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, NO₂, SO₂ y CO.</p>	<p>Estación ubicada en la azotea del edificio de la Secretaría de Desarrollo Urbano, Obras Públicas y Ecología de Apodaca. La altura de toma de muestra cumple con criterios EPA; libre de obstáculos al libre flujo de aire; sin una fuente de emisión cerna (fija, móvil o de área) que impacte de forma directa sobre la estación de monitoreo; se ubica viento a favor de numerosas fuentes de emisión</p>	<p>Aplicar modelos de dispersión para descartar impacto, sobre la estación de monitoreo, de la pluma de emisión de las fuentes de emisión cercanas pertenecientes a los sectores de Pinturas y tintas y Minerales no</p>	<p>Dado el patrón de vientos dominantes y la ubicación, a menos de 800 metros de distancia, de una empresa del sector Pinturas y tintas, cabe la posibilidad de que las emisiones de partículas generadas en esta empresa impacten sobre el punto de ubicación de la estación de monitoreo.</p> <p>Personal del Centro Mario Molina reportó presencia de partículas tipo</p>

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
		<p>pertencientes a diversos sectores de actividad; el uso de suelo y la topografía son homogéneas en un radio de 500 metros y parcialmente homogénea en un radio de 2 km. Estas características, lo hacen un sitio adecuado para caracterizar niveles de contaminación asociados a una mezcla de emisiones de diversas fuentes sin estar dominados por una de ellas.</p>	<p>metálicos, ubicada a menos de 1 km de distancia, en dirección Sureste, de la estación.</p>	<p>“grafito” durante una visita de campo, las cuales pueden estar asociadas a las emisiones de alguna de estas empresas en el entorno inmediato. Durante la visita de campo de personal del INECC no se detectó ninguna anomalía de este tipo.</p>
<p>Escobedo (N)</p>	<p>Micro: PM₁₀ Media: PM_{2.5}, NO₂ y CO Vecindario: O₃ y SO₂</p>	<p>Estación ubicada a nivel de piso en un espacio urbano con juegos infantiles donde predomina la superficie de suelo desprovista de vegetación.</p> <p>A escasos 7.5 metros de distancia se ubica la vialidad denominada París cuyo flujo vehicular no es muy intenso, pero por su cercanía puede impactar las lecturas de calidad del aire en el sitio</p>	<p>Reubicación si se desea mayor escala espacial de representatividad para todos los contaminantes.</p> <p>En caso de mantenerla en el sitio actual se sugiere vigilar el crecimiento de los árboles en su proximidad y realizar poda cuando se sospeche que puedan obstruir el libre flujo del viento.</p>	<p>De acuerdo con los criterios de la EPA, la proximidad de la vialidad le confiere a esta estación de monitoreo una escala espacial de representatividad del tipo Micro a Media, tanto para gases como para partículas. En el caso de las partículas, esta escala espacial de representatividad se ve reforzada por la presencia de amplias áreas de terreno desprovistas de vegetación en el entorno inmediato. Como se ha referido con anterioridad, la EPA recomienda que no se instalen equipos de medición de partículas en zonas no pavimentadas a menos que exista cubierta vegetal a lo largo de todo el año para minimizar el impacto de la resuspensión de polvo en las lecturas de dichos equipos.</p>
<p>García (NO2)</p>	<p>Media: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ y CO</p>	<p>Estación ubicada en la azotea del edificio de la presidencia municipal de García desde el segundo semestre de 2018. En su proximidad</p>	<p>Reubicación si se desea mayor escala espacial de representatividad</p>	<p>Proximidad de amplias áreas desprovistas de vegetación que se ubican en la proximidad de la estación (menos de 100m) que bajo ciertas</p>

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
		<p>se identificaron extensas áreas desprovistas de vegetación, así como una vialidad (Heberto Castillo González) que por su ubicación y aforo (88 mil vehículos por día), se estima tienen impacto directo en las mediciones de calidad del aire que se realizan en el sitio.</p>		<p>condiciones de viento puede provocar arrastre de partículas hacia la ubicación de la estación de monitoreo.</p> <p>Las rosas de contaminantes pudieran soportar la hipótesis de que las emisiones generadas en la vialidad Heberto Castillo estén impactando las mediciones en la estación por el hecho de que las concentraciones más altas de PM₁₀, NO₂, CO y parcialmente de PM_{2.5} suelen ser más altas cuando el viento proviene del Oeste, exactamente la ubicación de dicha vialidad con respecto a la estación de monitoreo</p>
<p>Cadereyta (SE3)</p>	<p>Vecindario: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ y CO</p> <p>Micro: CO</p>	<p>Estación ubicada en el Centro de Rehabilitación Integral del municipio de Cadereyta. La altura de toma de muestra que cumple con criterios EPA; libre de obstáculos al libre flujo de aire; sin una fuente de emisión cercana (fija, móvil o de área) que impacte de forma directa sobre la estación de monitoreo; se ubica viento a favor de numerosas fuentes de emisión pertenecientes a diversos sectores de actividad, destacando las que pertenecen a los sectores Química y Petróleo y Petroquímica. En el entorno inmediato el uso de suelo es homogéneo, dominado por el uso habitacional, siendo más comunes las casas de dos niveles y calles con ligeras pendientes, la</p>	<p>Ninguna.</p>	

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
		<p>mayoría de ellas pavimentadas. Topografía homogénea en un radio de 500 metros lo mismo que ha radios de 2 y 4 km. Es un sitio apropiado para caracterizar los niveles de exposición de la población a niveles de contaminación asociados a una mezcla de emisiones provenientes de una diversidad de fuentes de área, fuentes fijas y fuentes móviles, sin estar dominados por una fuente de emisión cercana.</p>		
<p>Juárez (SE2)</p>	<p>Vecindario: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂ y NO₂ Micro: CO</p>	<p>Estación localizada en el Centro de Desarrollo Integral de la Familia del municipio de Juárez. La altura de toma de muestra cumple con criterios EPA; libre de obstáculos al libre flujo de aire. El uso de suelo en el entorno es homogéneo y está dominado por casa habitación y presenta abundante actividad comercial y de servicios. Topografía homogénea tanto en un radio de 500 metros como de 2 y 4 km. Se ubica viento a favor, más allá de 2 km de distancia, de varias fuentes de emisión pertenecientes a sectores diversos, aunque dominados por los pertenecientes a los sectores Extracción y beneficios de minerales no metálicos, Metálico y Pinturas y tintas. Ninguna de estas fuentes de emisión tiene un impacto directo</p>	<p>Se sugiere llevar a cabo los estudios pertinentes a fin de validar, o en su caso ratificar, la conclusión a la que se llegó en este trabajo en el sentido de que la estación de servicio ubica a aproximadamente 100 m al Oeste de la estación de monitoreo no tiene un impacto en las mediciones que se hacen en el sitio con respecto a ozono y material particulado, especialmente en su fracción PM_{2.5}</p>	

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
		sobre la estación de monitoreo. Solo una vialidad (Lic. Arturo B de la Garza), le confiere, por su cercanía y aforo, una escala de representatividad de tipo Micro para la medición de monóxido de carbono.		
La Pastora (SE)	Vecindario: PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , SO ₂ , NO ₂ y CO	Estación ubicada al interior del Parque Zoológico La Pastora. La altura de toma de muestra que cumple con criterios EPA. El entorno inmediato hay algunos árboles, pero estos se encuentran a una distancia tal que no se les considera como un obstáculo al libre flujo de viento. Más allá de los límites del parque, es de uso de suelo es residencial y presenta poca actividad comercial en un radio de 500 metros. Se ubica a favor del viento de un corredor industrial en una zona muy poblada. No parece estar influenciada por una fuente de emisión particular y como tal se asume que proporciona información que puede ser un indicador valioso de los niveles de contaminación y de exposición de la población en la zona sureste del área metropolitana.	<p>Vigilar crecimiento de arbolado cercano y poda oportuna.</p> <p>Mantener actividades de riego y mantenimiento para reducir al mínimo la resuspensión de polvo.</p> <p>Vigilar y documentar el eventual impacto de las emisiones de CO, PM₁₀ y PM_{2.5} generadas en el estadio de futbol sobre las mediciones de calidad del aire registradas en la estación de monitoreo. En este trabajo no se encontró evidencia del mismo, pero dada la cercanía del estadio a la estación de monitoreo esto podría ocurrir cada vez que se</p>	<p>La cercanía con áreas arboladas, que en este momento cumplen con el criterio de distancia y altura apropiada para no ser un obstáculo, puede, si no se vigila su crecimiento y se hace la poda oportuna, convertirse en un obstáculo al libre flujo de aire.</p> <p>Además, pueden proveer una superficie para la absorción y/o reacción de SO₂, O₃ y NO₂, así como una superficie para la deposición de partículas.</p>

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
			Lleven a cabo eventos deportivos-sociales.	
<p>San Nicolás (NE)</p>	<p>Potencialmente vecindario: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ y CO</p> <p>En la condición actual es muy complicado poder definir una escala espacial de representatividad.</p>	<p>La estación se ubica al interior del Centro Deportivo Unidad Laboral. La altura de las tomas de muestra se ubica en el rango recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. En el entorno inmediato hay varias áreas arboladas, pero sólo los árboles que se ubican al Norte de la estación representan una obstrucción por encontrarse a una muy corta distancia. De hecho, en campo se pudo observar que algunas ramas se ubican muy próximas a las tomas de muestra, llegando ocasionalmente a contactar a las mismas.</p>	<p>Poda de árbol ubicado al norte de la estación. Si esto no es posible entonces se recomienda la reubicación de la estación.</p> <p>Evaluar la posibilidad de negociar que la aplicación de pintura automotriz se haga en una cámara que impida la dispersión de contaminantes. Esto se plantea como medida precautoria, pues, aunque se estima un bajo impacto de las emisiones de estos talleres, no se tiene certeza de ello, por no conocer su nivel de actividad a lo largo del año. En caso de que no sea posible la instalación de cámaras de aplicación de pintura se sugiere vigilar la actividad de estos talleres y su</p>	<p>Esta estación de monitoreo se encuentra en una zona densamente poblada, con un uso de suelo y topografía homogéneas, con una actividad comercial e industrial abundante y diversa, por lo que podría calificar como un sitio adecuado para caracterizar niveles de contaminación a nivel urbano. Sin embargo, el impacto en la medición de la calidad del aire provocada por la presencia de los árboles cercanos y fuentes específicas de emisión de contaminantes como los talleres de hojalatería que aplican pintura al aire libre a poca distancia de la estación, hacen inviable estos alcances de caracterización, pero parecen problemas posibles de resolver.</p>

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
			<p>impacto potencial en las lecturas de la estación de monitoreo.</p>	
<p>Universidad (N2)</p>	<p>Media: PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y CO Vecindario: O₃ y SO₂</p>	<p>Esta estación está instalada en el área de estacionamiento del edificio de Graduados en Contaduría Pública y Administración de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Existen pocas vialidades en su entorno, sin embargo, hay dos (Fidel Velázquez y Gustavo Adolfo Bécquer), que por su cercanía y aforo pueden estar impactando las mediciones de calidad del aire. La Av. Fidel Velázquez está 72 metros al norte de la estación y tiene un aforo de 92,142 autos por día. Gustavo Adolfo Bécquer está 55 metros al Este y tiene un aforo de 26,586 autos por día. De acuerdo con los criterios de EPA, para que estas vialidades le dieran una escala de representatividad de tipo vecindario a la estación de monitoreo, deberían estar ubicadas a una distancia de 183 metros y 68 metros, respectivamente.</p>	<p>Reubicación si se desea mayor escala espacial de representatividad. Igualmente se sugiere validar, mediante ejercicios de modelación, que las fuentes de emisión ubicadas a 455 metros al Este y a 1.2 km al Sureste de la estación no estén impactando de forma directa en las lecturas de PM_{2.5} que se hacen en el sitio.</p>	<p>Se sugiere reubicación para minimizar el impacto de las emisiones vehiculares sobre las mediciones de calidad del aire en este sitio. La cercanía de las vialidades referidas impacta de forma directa las mediciones de contaminantes como partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}), CO y NO_x, e indirectamente las lecturas de O₃ por la titulación de éste con los NO_x (O'Neill, P., 1995).</p>
<p>San Pedro (SO2)</p>	<p>Vecindario: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ y CO</p>	<p>Estación ubicada en la azotea del gimnasio "San Pedro". La toma de muestra se ubica a aproximadamente 17 metros sobre nivel del piso de la calle más cercana. Sin embargo, se asume que esto no</p>	<p>Aplicar modelos de dispersión para descartar impacto, sobre la estación de monitoreo, de la pluma de emisión de las</p>	<p>A menos de 1 km de distancia, en dirección del viento dominante, se identificaron dos fuentes fijas de emisión de PM_{2.5}. Estas fuentes reportan emisiones de PM_{2.5} de 71 ton/año y 7.6 ton/año, respectivamente.</p>

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
		<p>tiene un impacto significativo en las mediciones de calidad del aire pues es producto de la topografía del sitio. El entorno inmediato está libre de obstáculos al libre flujo de viento. El uso de suelo es muy homogéneo tanto en un radio de 500 m como de 2 km. Existen varias vialidades en el entorno, pero ninguna con el aforo o distancia que permita suponer algún impacto en las mediciones de calidad del aire. A menos de 1 km de distancia, con dirección Noreste, se identificaron dos fuentes fijas de emisión de PM_{2.5}, una perteneciente al sector Extracción/beneficio de minerales no metálicos y otra perteneciente al sector de generación de energía eléctrica. Ambas se ubican en una de las direcciones de viento dominante, por lo que bajo ciertas condiciones pueden tener un impacto en las mediciones de calidad del aire realizadas en el sitio. Al Norte, sobre todo más allá de 2 km de distancia de la estación, se encuentran diversas fuentes de emisión de sectores como minerales no metálicos, metalúrgica, generación de energía eléctrica, química, textil, plástico y hule, celulosa y papel, impresión y petróleo y petroquímica. Se considera un sitio apropiado para caracterizar los</p>	<p>fuentes pertenecientes a los sectores Minerales no metálicos y Generación de energía eléctrica identificadas en las inmediaciones de la estación.</p>	

Estación	Escala de representatividad	Razones	Recomendación	Motivo
		<p>niveles de exposición de la población a niveles de contaminación derivados de una mezcla de contaminantes provenientes de diferentes fuentes fijas, de para y móviles sin ser dominados por alguna de ellas.</p>		
<p>Santa Catarina (SO)</p>	<p>Vecindario: PM₁₀, PM_{2.5}, O₃, SO₂, NO₂ y CO</p>	<p>La estación se localiza en la azotea del edificio de Servicios Públicos de Santa Catarina, en una zona con uso de suelo habitacional, homogéneo a más de 500 metros a la redonda; altura de toma de muestra que cumple con criterios EPA; libre de obstáculos al libre flujo de aire; sin una fuente de emisión cercana (fija, móvil o de área) que impacte de forma directa sobre la estación de monitoreo; se ubica viento a favor de numerosas fuentes de emisión de sectores económicos diversos lo que la hace susceptible de caracterizar niveles de exposición de la población asociados de una mezcla de emisiones provenientes de una diversidad de fuentes sin estar dominados por una fuente en particular.</p>	<p>Ninguna</p>	

6.2 Modelación de Aptitud: identificación de sitios más aptos para la ubicación de estaciones de monitoreo

Insumos para la modelación de Aptitud

La modelación de Aptitud empleó como insumos básicos, datos de población por AGEB (INEGI, 2010), red carretera (INEGI, 2011), ubicación geográfica de fuentes puntuales de emisión tanto de jurisdicción local como federal (SEMARNAT, 2019), datos de relieve (INEGI, 2017) y datos de emisión de partículas PM_{2.5} provenientes de fuentes puntuales, de área y móviles del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio del año 2016 (SEMARNAT, 2019). De tal información se puede destacar lo siguiente:

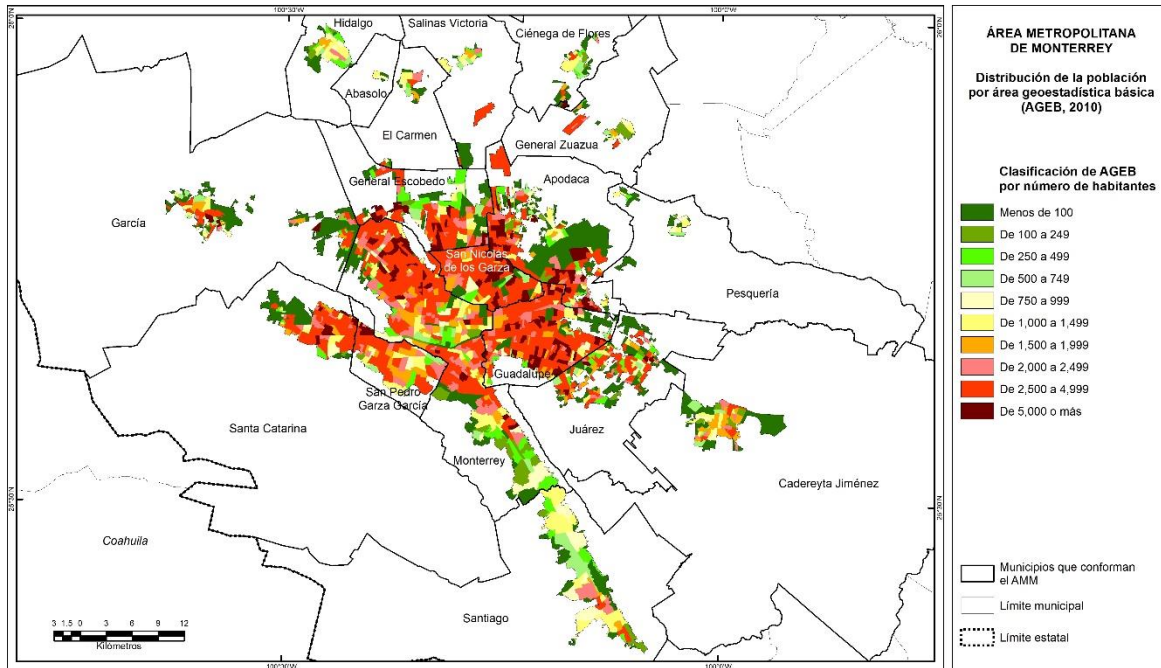
- Los municipios con mayor población, dentro del Área Metropolitana de Monterrey son: Monterrey (27%), Guadalupe (16%), Apodaca (12%) y San Nicolás (10%). En conjunto dichos municipios agrupan al 65% de la población total del Área Metropolitana. La Tabla 6.2 muestra la población por municipio, en tanto que la Figura 6.1 ilustra la distribución espacial de dicha población por AGEB.

Tabla 6.2 Población por municipio en el año 2010 en el Área Metropolitana de Monterrey. Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010).

Municipio	Población en el año 2010
Abasolo	2,835
Apodaca	531,245
Cadereyta Jiménez	87,744
Ciénega de Flores	16,343
El Carmen	24,908
García	145,867
General Escobedo	363,436
General Zuazua	55,958
Guadalupe	688,279
Hidalgo	16,841
Juárez	260,683
Monterrey	1,152,294
Pesquería	21,186
Salinas Victoria	33,171
San Nicolás de los Garza	449,953
San Pedro Garza García	124,450

Municipio	Población en el año 2010
Santa Catarina	273,152
Santiago	41,080
Total	4,289,425

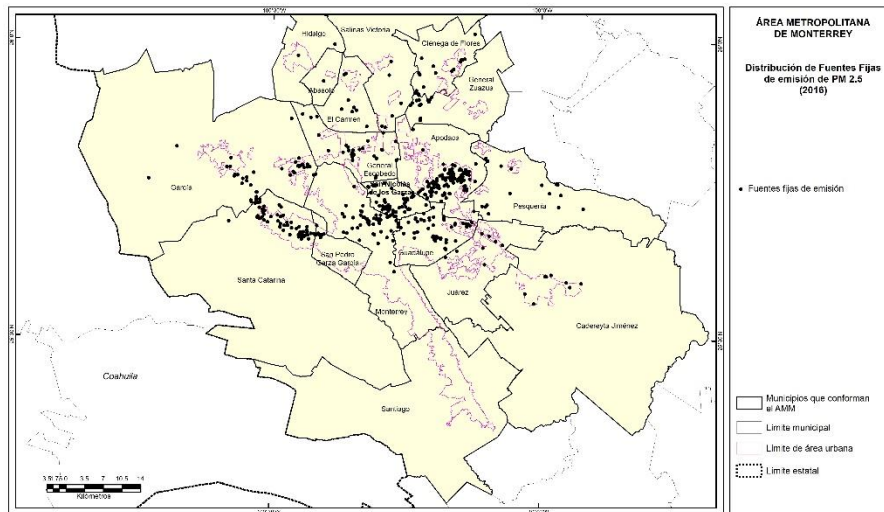
Figura 6.1. Distribución espacial por AGEB de la población en el Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: Elaboración propia INECC, 2020 con datos de INEGI, 2010.

Los municipios con mayor cantidad de fuentes puntuales de emisión de $PM_{2.5}$ en su territorio, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones del año 2016 realizado por la SEMARNAT (SEMARNAT, 2017) son: Apodaca (84), Santa Catarina (48), San Nicolás (42), Guadalupe (40), Monterrey (37) y García (33) (Figura 6.2). La Tabla 6.3 muestra la distribución del número de fuentes fijas de emisión de $PM_{2.5}$ por municipio y por categoría de fuente, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones del Año 2016 (SEMARNAT, 2017).

Figura 6.2. Distribución espacial de las fuentes puntuales de emisión de PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey en el año 2016.

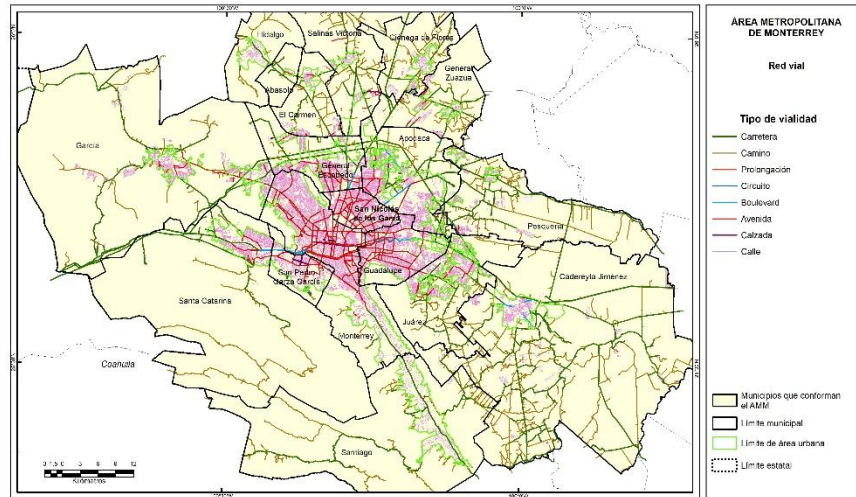


Fuente: Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio del año 2016. Disponible para descarga y consulta en <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>

- En general el Área Metropolitana de Monterrey tiene una densa cobertura vial que incluye diferentes tipos de camino⁴ tales como carretera, periférico, prolongación o enlace, circuitos, boulevard, etc. Los municipios con mayor densidad vial (km de vialidad por Km² de territorio) son: San Nicolás de los Garza, Guadalupe y Monterrey (Figura 6.3).

⁴ Se refiere a la clasificación que se le da a la vialidad, en función del tránsito vehicular y/o peatonal: Vialidad (superficie del terreno destinada para el tránsito vehicular y/o peatonal); carretera (vía de transporte terrestre pavimentada, diseñada para tránsito de vehículos automotores); y, camino (vía de transporte terrestre no pavimentada para tránsito de vehículos, personas y animales). INEGI. Manual para la aplicación y difusión de la norma técnica sobre domicilios geográficos (disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/normastecnicas/doc/manual_ntdg2012.pdf).

Figura 6.3. Distribución espacial de la red vial en el Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: Elaboración propia INECC, 2020 con datos de INEGI, 2011.

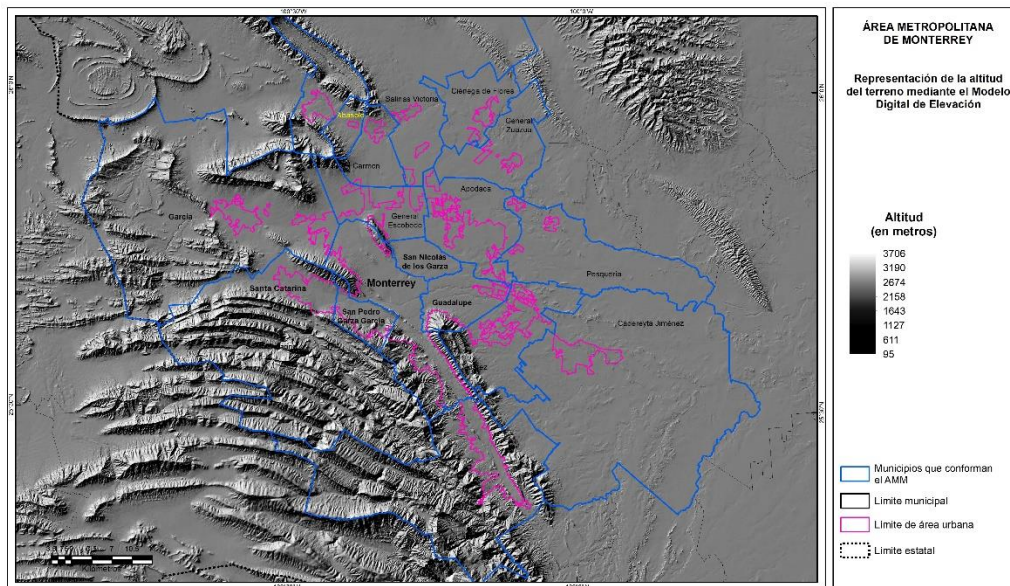
Tabla 6.3. Distribución de fuentes puntuales de emisión de PM2.5, por giro, en el Área Metropolitana de Monterrey en el año 2016.

Municipio	Número de fuentes por giro de emisión																			Total		
	Extracción/beneficio de minerales no metálicos	Generación de energía eléctrica	Cemento y cal	Petróleo y petroquímica	Accesorios, aparatos eléctricos y equipos de generación eléctrica	Alimentos y bebidas	Automotriz	Celulosa y papel	Derivados del petróleo y carbón	Impresión	Industria textil	Metálico	Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	Mezclas químicas	Minerales no metálicos	Papel y cartón	Pinturas y tintas	Plástico y hule	Química		Tratamiento de residuos	Vidrio
Abasolo																	1					1
Apodaca					26	5	6	3		2	1		28		2	1	3	7	3	1	1	89
Cadereyta Jiménez				2										1					4	3		10
Ciénega de Flores					3		7				1		9				1	1	1		2	25
El Carmen			2			1					1		1						1			6
García	1	1	2		1		4						7	1	1		1	1	8	2	3	33
General Escobedo	3				1	4	3		2				6		1			2	2	2		26
General Zuazua																						---
Guadalupe					13	9		1			1		13	1	2	2	2	3	1		1	49
Hidalgo			1																			1
Juárez													1		4		1					6
Monterrey		4	2		3	9		2			2		9		1	1	3		6	1	3	46
Pesquería		3											3		1		1		2	1		11
Salinas Victoria		1											1		1			1	1	1		6
San Nicolás de los Garza		1			4	4	1	6					19				1	2	7		1	46
San Pedro Garza García		1				1							1		1				1			5
Santa Catarina	3				8	6	3	2	1		1	1	13		2	1	2	2	7	2		54
Santiago																						---
Total	7	11	7	2	59	39	24	14	3	2	7	1	111	3	16	5	15	20	44	13	11	414

Fuente: Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio del año 2016. Disponible para descarga y consulta en <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>

- El relieve en la región que cubre el Área Metropolitana de Monterrey es muy accidentado. Monterrey, que es el municipio que le da el nombre al área metropolitana está situada al pie de la Sierra Madre Oriental y está atravesada de poniente a oriente por el cauce seco del Río Santa Catarina. La ciudad está rodeada de montañas y cordilleras que le confieren un carácter único en el mundo. La Sierra Madre Oriental cambia bruscamente de dirección hacia el oriente a la altura de Monterrey. Al noroeste de la ciudad se localiza la Sierra de las Mitras. El este es dominado por el Cerro de la Silla (altura máxima de 1820 msnm) en la parte norte de la Sierra de la Silla. En el municipio de San Nicolás de los Garza en el noreste se encuentra el Cerro del Topo Chico. Al sur del río Santa Catarina la “Loma Larga”, divide Monterrey de San Pedro Garza García. Al norte del Río Santa Catarina se encuentra la Loma de la Chepe Vera conocida popularmente como el Cerro del Obispado (Figura 6.4).

Figura 6.4. Relieve del Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: Elaboración propia INECC, 2020 con datos de INEGI, 2013.

- A nivel regional, de acuerdo con el inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio del año 2016, en toda el Área Metropolitana de Monterrey las emisiones de partículas suspendidas PM_{2.5} son generadas prioritariamente

por las fuentes fijas (74%) y en menor medida por las fuentes móviles (16%) y de área (10%). Los municipios con mayores emisiones de PM_{2.5} son: Pesquería (23%), García (17%), Santa Catarina (13%), Monterrey (12%) y San Nicolás de los Garza (11%) (Tabla 6.4).

A nivel de municipio, tanto en Pesquerías, como en García, Santa Catarina y San Nicolás la fuente de emisión predominante es la industria, con contribuciones porcentuales que oscilan entre 97% y 75%. Sólo en Monterrey la fuente de emisión predominante de PM_{2.5} son los vehículos, con una contribución porcentual de 46%, en tanto que la contribución de las fuentes fijas en este mismo municipio es de 37%.

Tabla 6.4. Inventario de emisiones de PM_{2.5} del Área Metropolitana de Monterrey para el año 2016 (Toneladas/año).

Municipio	Fuentes Área	Fuentes Fijas	Fuentes Móviles	Total
Abasolo	1.21	0.25	1.17	2.63
Apodaca	85.53	184.83	200.64	471.00
Cadereyta Jiménez	80.82	513.32	56.39	650.53
Ciénega de Flores	4.58	56.03	21.42	82.02
El Carmen	5.56	13.59	0.94	20.09
García	36.58	1,524.21	26.18	1,586.97
General Escobedo	82.00	182.13	89.83	353.96
General Zuazua	8.14	---	7.92	16.06
Guadalupe	102.02	23.65	182.28	307.95
Hidalgo	3.90	0.39	3.88	8.17
Juárez	37.03	67.42	21.79	126.24
Monterrey	191.25	419.12	516.84	1,127.21
Pesquería	53.25	2,087.00	14.26	2,154.51
Salinas Victoria	15.20	9.42	12.92	37.53
San Nicolás de los Garza	83.00	764.20	176.50	1,023.70
San Pedro Garza García	39.77	98.33	69.12	207.22
Santa Catarina	55.66	1,077.16	97.80	1,230.63
Santiago	67.11	---	33.06	100.17
Total	952.61	7,021.03	1,532.93	9,506.57

Fuente: Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio del año 2016. Disponible para descarga y consulta en <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>

Nota: Los datos se reportan para los municipios que forman el Área Metropolitana de Monterrey, conforme al Sistema Urbano Nacional (SEGOB, SEDATU, CONAPO, 2018)

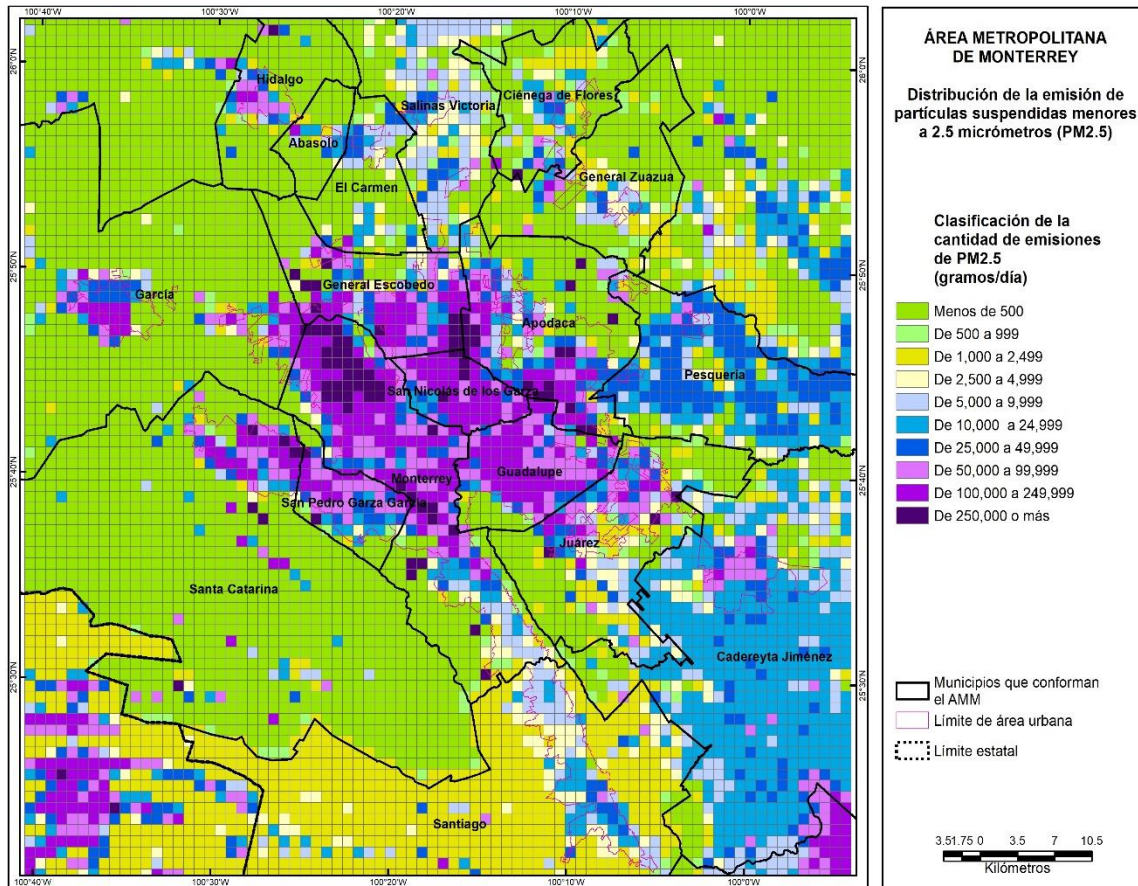
La Tabla 6.5 muestra la contribución de las fuentes puntuales a la emisión de partículas $PM_{2.5}$ por categoría de fuente y municipio, de acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones del Año 2016 (SEMARNAT, 2019). En tanto que la Figura 6.5 muestra la distribución espacial de las emisiones (gramos por día) de $PM_{2.5}$ (incluye emisiones de fuentes de área, fuentes fijas y fuentes móviles) del año 2016, a nivel de celda de 1 x 1 km, en el área de análisis incluido en este proyecto.

Tabla 6.5. Contribución de las fuentes puntuales a la emisión de partículas PM_{2.5} por categoría de fuente (ton/año) y municipio, en el Área Metropolitana de Monterrey en el año 2016.

Municipio	Emisiones (ton/año)																				Total	
	Extracción/beneficio de minerales no metálicos	Generación de energía eléctrica	Cemento y cal	Petróleo y petroquímica	Accesorios, aparatos eléctricos y equipos de	Alimentos y bebidas	Automotriz	Celulosa y papel	Derivados del petróleo y carbón	Impresión	Industria textil	Metálico	Metalúrgica (incluye la siderúrgica)	Mezclas químicas	Minerales no metálicos	Papel y cartón	Pinturas y tintas	Plástico y hule	Química	Tratamiento de residuos		Vidrio
Abasolo																		0.25				0.25
Apodaca					48	0.35	16.39	1.66		0.07	0.07		107		5.21	0.06	2.52	2.31	0.35	0	1	185
Cadereyta Jiménez				513										0					0.06	0.21		513
Ciénega de Flores					2.81		24.29				0.05		0.97				24.82	0	1.15		1.94	56
El Carmen			11.79			0.90					0.44		0.04						0.41			14
García	308.88	274.80	12.18		2.05		25.92						357	0.05	19.23		0.08	0	2.29	0	521	1523
General Escobedo	161.87				0.07	0.93	12		1.39				1.99		2.62			0.87	0.27	0.12		182
General Zuazua																						---
Guadalupe					7.51	7.97		0.27			0.01		5.21	0.03	0.67	0.22	0.57	1.01	0.02		0.14	24
Hidalgo			0.39																			0.39
Juárez													0.57		66.73		0.13					67
Monterrey		67.97	154.46		4.39	5.37		8.33			0.03		26.12		4.75	0.02	0.85		2.36	0.3	144	419
Pesquería		2074.44											9.43		0.23		2.81		0.09	0		2087
Salinas Victoria		7.55											0.62		1.18			0.06	0.01	0		9
San Nicolás de los Garza		23.66			5.27	1.54	0.45	54.85					113.17				0.87	1.79	563		0.04	764
San Pedro Garza García		7.66				0.27							18.50		70.89				1.02			98
Santa Catarina	967.17				52.90	1.61	8.21	0.36	0.23		0.44	0.10	35.04		1.31	0.15	4.27	4.69	0.67	0.01		1077
Santiago																						---
Total	1438	2456	179	513	123	19	87	65	2	0.07	1	0.10	676	0.08	173	0.45	37	11	572	0.65	669	7021

Fuente: Elaboración propia con datos del Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio del año 2016. Disponible para descarga y consulta en <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>

Figura 6.5. Distribución espacial de las emisiones de PM_{2.5} en el año 2016 en el Área Metropolitana de Monterrey



Fuente: Elaboración propia INECC

Áreas más Aptas para el monitoreo de calidad del aire según la modelación de Aptitud

En general, los resultados muestran que la mayor superficie con el nivel de Aptitud más alta (10), se encuentra en el escenario 3 (donde se pondera con más peso a las emisiones de PM_{2.5}), seguido de los escenarios 4 (se pondera con más peso a la población) y 2 (se pondera con el mismo peso a las emisiones y a la población). Por otra parte, la mayor superficie con nivel de Aptitud de 9 se observa en el escenario 4, seguido de los escenarios 3 y 2, respectivamente (Figura 6.6). En la

Tabla 6.6 se puede apreciar el área correspondiente a cada nivel de Aptitud para cada uno de los escenarios evaluados.

Tabla 6.6 Área en Km² por nivel de Aptitud estimada en el Área Metropolitana de Monterrey para cada escenario evaluado

Aptitud	Escenario 1 (Se ponderan todas las variables por igual)	Escenario 2 (se pondera con el mismo peso a las emisiones y a la población)	Escenario 3 (se pondera con más peso a las emisiones de PM _{2.5})	Escenario 4 (se pondera con más peso a la población)
1	4.15	30.21	15.28	31.23
2	15.92	29.00	26.87	39.41
3	48.13	51.41	33.20	88.79
4	109.99	94.30	58.93	99.80
5	231.08	126.83	100.56	77.96
6	197.76	88.84	123.48	87.49
7	243.72	104.96	136.11	95.66
8	60.61	173.52	174.51	157.03
9	4.60	189.87	194.88	210.23
10	0.73	27.75	52.87	29.09

Fuente: Elaboración propia INECC

Los resultados de los cuatro escenarios evaluados, identifican de manera consistente que las áreas más aptas para la instalación de estaciones de monitoreo en el Área Metropolitana de Monterrey se ubican predominantemente en los municipios de Apodaca, García, San Pedro, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás y Santa Catarina (Figura 6.6 y Tabla 6.7). Las mayores superficies con el máximo nivel de Aptitud se identificaron en Monterrey, Guadalupe, Apodaca y General Escobedo. Ello es resultado de la alta concentración de población y de emisión de PM_{2.5} a la atmósfera en dichas zonas, variables que recibieron la mayor ponderación en tres de los cuatro escenarios evaluados.

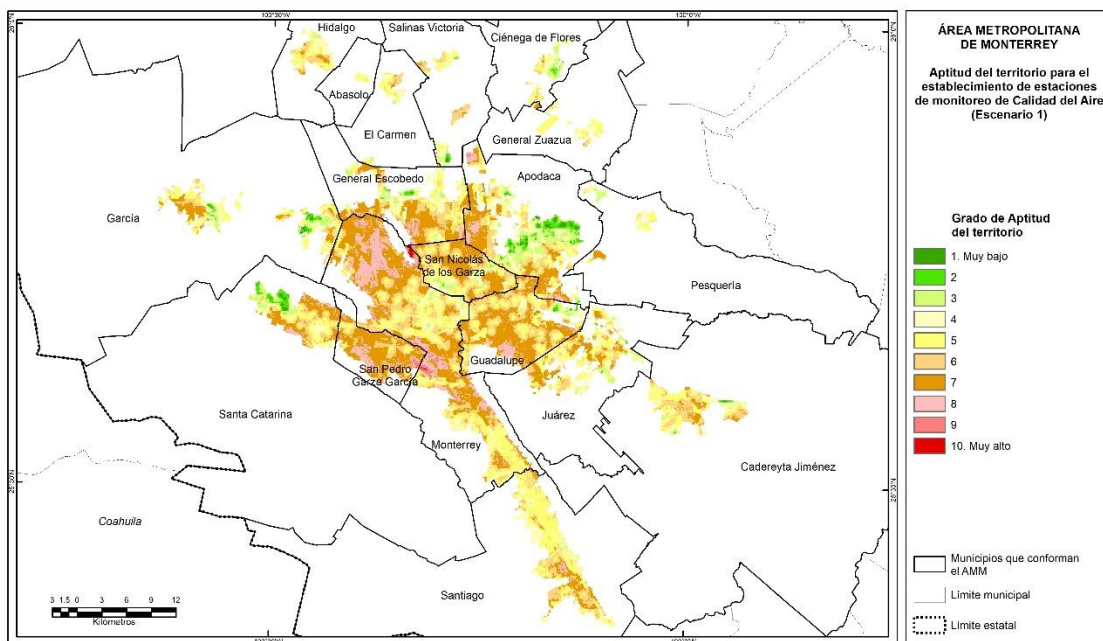
En Cadereyta, El Carmen, Ciénega de Flores, General Zuazua, Salinas Victoria y Santiago se identificaron pequeñas superficies con un menor nivel de Aptitud (9). En tanto que los municipios donde se identificaron áreas con un nivel de Aptitud máximo de 8 fueron Hidalgo y Pesquería, la primera en el escenario 3 y la segunda

en el escenario 4. Finalmente, en Abasolo la máxima Aptitud identificada fue de 6, en los cuatro escenarios evaluados.

Figura 6.6. Resultados de la modelación de Aptitud para la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey bajo cuatro distintos escenarios.

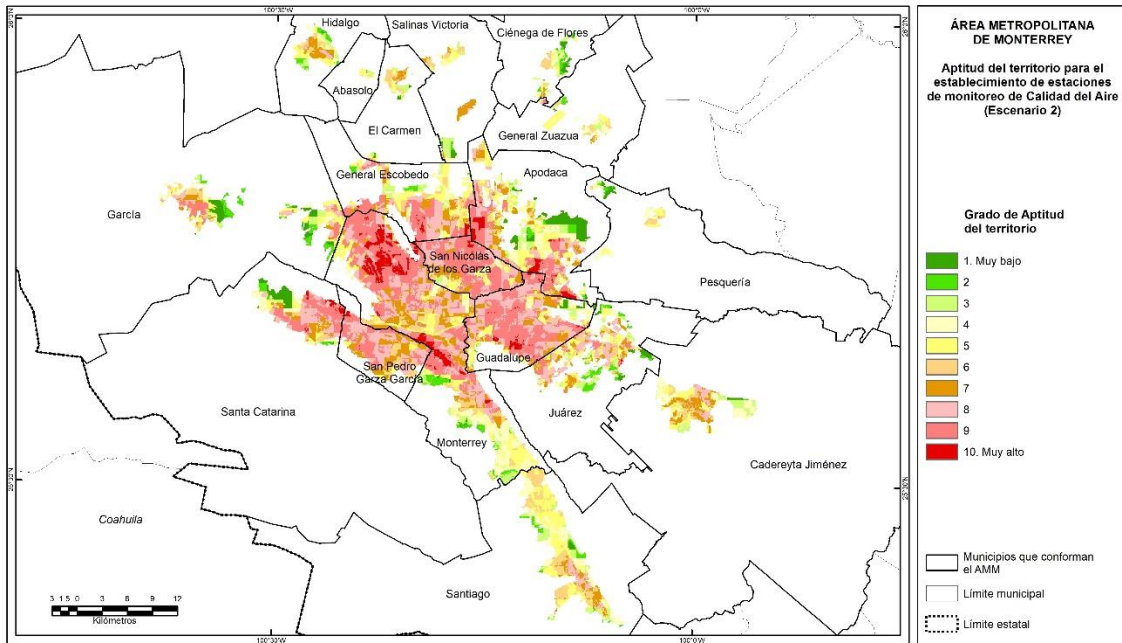
Escenario 1.

Se ponderan todas las variables por igual



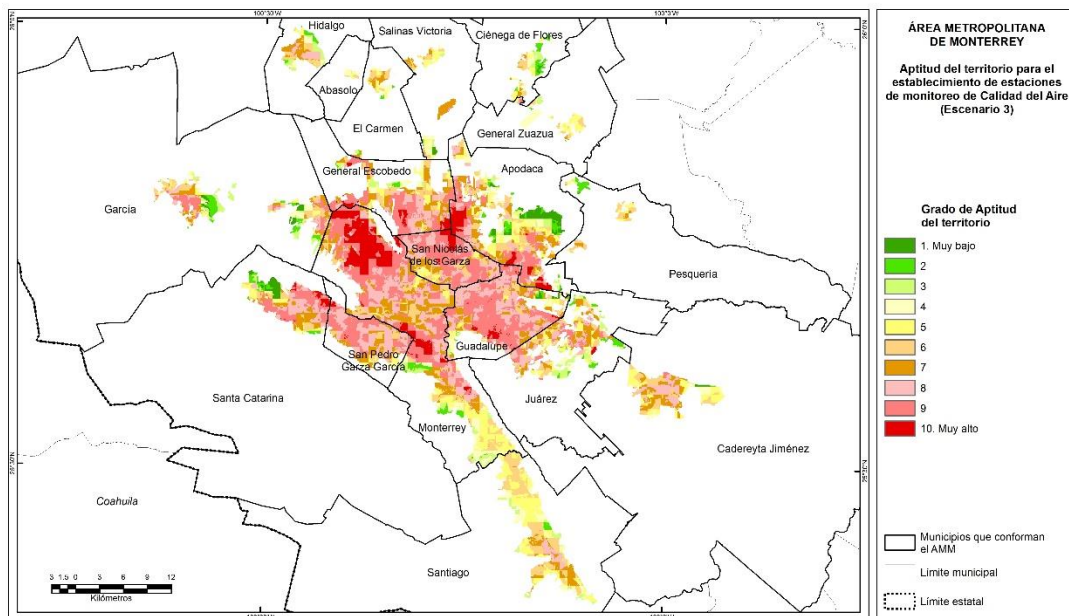
Escenario 2.

Se pondera con el mismo peso a las emisiones y a la población



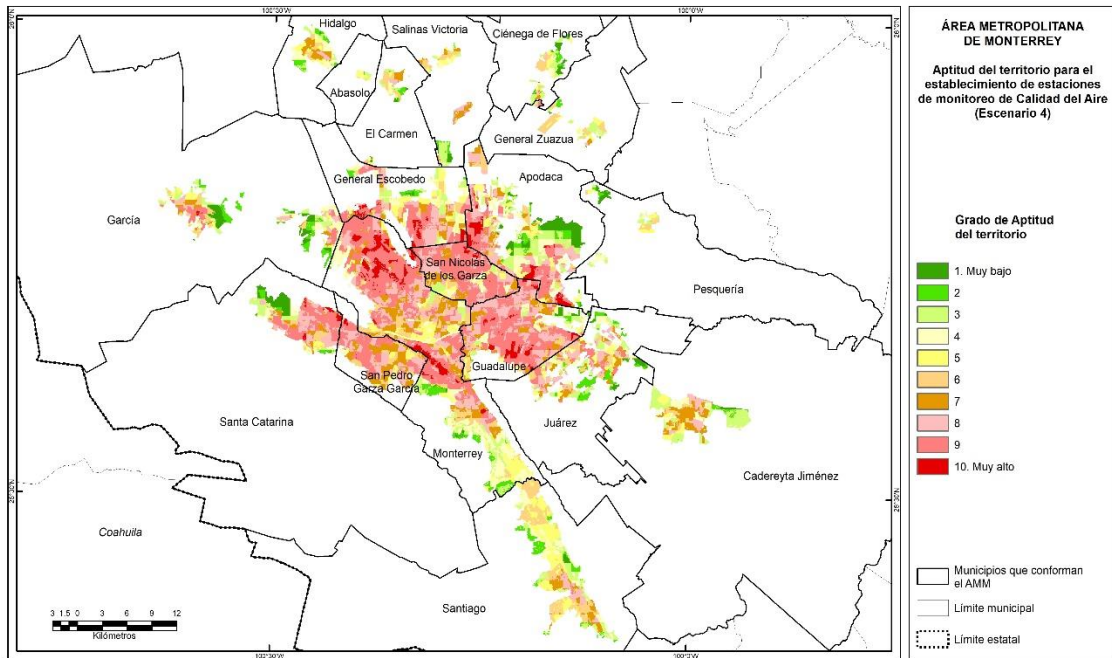
Escenario 3.

Se pondera con más peso a las emisiones



Escenario 4.

Se pondera con más peso a la población



Fuente: Elaboración propia INECC

Tabla 6.7 Superficie en Km² por nivel de Aptitud y por municipio para cada escenario evaluado en el Área Metropolitana de Monterrey

Municipio	Escenario	Superficie por grado de Aptitud del Territorio (Km ²)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abasolo	1			0.01	0.39	1.11	0.03				
	2		0.05	0.30	0.23	0.84	0.12				
	3			0.05	0.83	0.36	0.30				
	4		0.05	0.41	0.12	0.89	0.07				
Apodaca	1	2.03	7.42	15.43	15.21	19.30	17.74	22.48	5.34	0.19	
	2	10.28	2.41	7.02	13.62	15.62	8.07	9.72	15.84	17.59	4.99
	3	7.33	4.42	3.25	8.57	12.33	14.28	16.28	12.95	17.42	8.32
	4	10.31	4.31	15.03	12.14	7.02	7.06	6.00	18.71	18.92	5.66
Cadereyta Jiménez	1	0.11	0.33	1.28	5.50	12.62	12.24	3.89			
	2	0.45	0.05	4.55	9.22	5.76	4.63	7.56	3.68	0.07	
	3	0.42	0.07	0.11	2.89	8.82	8.13	8.17	6.95	0.41	
	4	0.49	1.08	11.15	4.71	3.55	2.73	8.30	3.88	0.08	
El Carmen	1			0.50	2.47	3.18	1.67	0.39			

Municipio	Escenario	Superficie por grado de Aptitud del Territorio (Km ²)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2	0.41	0.02	1.52	0.85	1.39	2.49	1.18	0.28	0.07	
	3		0.43	0.30	1.53	1.67	2.39	1.75	0.03	0.10	
	4	0.41	0.76	1.08	1.01	0.78	2.35	1.13	0.60	0.09	
Ciénega de Flores	1		0.53	3.33	3.11	3.10	1.46	0.19			
	2	1.62	1.58	2.25	2.62	1.24	1.81	0.38	0.20	0.02	
	3	0.35	2.65	1.36	2.13	2.39	1.90	0.74	0.19	0.02	
	4	1.62	1.25	3.41	1.13	1.45	2.23	0.33	0.28	0.02	
García	1	0.72	2.14	5.02	7.89	15.23	6.93	7.66			
	2	5.84	5.78	2.90	4.62	9.59	3.92	2.95	4.71	5.27	
	3	2.23	4.80	5.63	3.39	3.16	8.23	6.48	4.91	6.72	0.03
	4	6.07	6.61	5.33	8.02	3.15	3.99	2.77	4.00	5.49	0.15
San Pedro Garza García	1				0.06	3.45	9.14	26.38	7.71	0.86	0.01
	2			0.01	0.27	2.50	4.74	10.75	17.42	11.45	0.47
	3			0.01	0.38	1.81	3.68	7.81	18.67	14.70	0.55
	4			0.04	0.78	2.79	4.95	11.50	12.39	14.73	0.44
General Escobedo	1	0.05	0.76	4.42	10.08	13.85	14.17	22.00	4.16	0.07	0.00
	2	0.01	1.55	3.72	5.34	13.03	6.27	7.97	13.96	16.32	1.40
	3		0.56	2.42	3.17	4.94	8.81	13.00	13.98	18.95	3.74
	4	0.26	1.82	6.28	9.29	8.12	4.74	5.33	13.72	16.64	3.38
General Zuazua	1			0.20	2.81	6.46	0.76	0.50			
	2	0.10	0.49	1.35	2.44	4.01	1.67	0.24	0.20	0.23	
	3		0.10	0.54	4.42	3.32	1.76	0.16	0.20	0.22	
	4	0.10	0.56	2.62	0.67	1.75	4.18	0.29	0.27	0.29	
Guadalupe	1	0.16	0.62	1.73	4.51	20.09	27.19	36.15	4.98	0.02	
	2	1.19	0.16	1.56	3.49	6.19	4.22	9.53	30.95	35.89	2.27
	3	0.72	0.79	0.89	2.85	2.55	5.13	10.57	30.75	38.87	2.34
	4	1.19	0.56	2.94	5.08	2.23	4.92	9.09	26.89	38.08	4.47
Juárez	1		0.25	3.27	10.83	15.80	11.82	11.54	0.41		
	2	2.06	4.70	5.43	4.89	8.23	6.86	7.29	10.83	3.53	0.11
	3		3.02	4.97	4.77	6.27	8.68	10.90	9.30	5.59	0.42
	4	2.21	6.02	7.05	6.45	4.09	5.86	6.22	10.25	5.74	0.04
Monterrey	1			2.04	15.88	50.39	43.67	68.52	34.22	3.22	0.63
	2	0.53	5.31	7.03	21.42	23.32	16.43	24.90	45.31	57.93	16.41
	3		3.61	6.22	9.64	18.12	19.86	31.99	43.58	53.07	32.48
	4	0.53	6.29	11.99	27.27	15.73	16.48	24.61	37.35	65.68	12.63
Pesquería	1			1.20	2.02	3.32	0.65	1.13			
	2	1.28	0.50	0.35	2.36	2.42	1.35	0.05	0.00		
	3	0.05	1.61	0.18	0.48	1.53	3.50	0.97			
	4	1.28	0.50	1.66	1.58	1.84	1.42		0.04		

Municipio	Escenario	Superficie por grado de Aptitud del Territorio (Km ²)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Salinas Victoria	1	0.21	0.49	1.03	3.22	3.61	4.00	0.56	0.01		
	2	0.72	0.30	2.97	1.78	1.85	2.16	3.01	0.35		
	3	0.57	0.16	0.49	2.85	3.10	2.07	3.61	0.16	0.12	
	4	0.72	0.72	3.33	1.01	1.38	2.18	2.49	1.21	0.10	
San Nicolás de los Garza	1		0.11	2.92	6.09	12.77	16.41	21.17	0.36	0.17	0.09
	2			0.71	1.97	3.94	3.30	6.34	14.12	29.12	0.60
	3				0.41	2.29	5.27	6.43	16.12	26.57	3.01
	4			2.37	2.96	2.45	2.93	5.85	11.87	30.64	1.03
Hidalgo	1			0.56	4.34	6.09	4.14	1.39			
	2	0.09	1.95	2.07	1.79	3.89	2.08	3.55	1.10		
	3		1.25	2.59	1.77	1.02	3.17	3.76	2.96		
	4	0.09	2.13	1.70	4.58	2.21	1.68	3.33	0.80		
Santa Catarina	1	0.87	3.27	4.62	5.31	9.85	8.59	11.37	2.30	0.03	
	2	4.98	1.66	0.91	4.02	3.05	2.45	4.70	10.61	12.33	1.50
	3	3.61	2.61	0.79	1.24	3.64	3.81	6.58	9.89	12.08	1.97
	4	5.30	1.57	3.72	3.22	1.48	2.63	3.13	10.35	13.52	1.29
Santiago	1			0.55	10.26	30.86	17.13	8.40	1.11	0.04	
	2	0.65	2.49	6.76	13.36	19.97	16.29	4.84	3.97	0.03	
	3		0.79	3.40	7.62	23.24	22.49	6.91	3.87	0.04	
	4	0.65	5.18	8.69	9.77	17.05	17.09	5.30	4.42	0.20	

Fuente: Elaboración propia INECC

En el Escenario 1, o de referencia, en el que todas las variables se ponderaron con el mismo peso fue en el que se identificó la menor superficie con niveles de Aptitud alta (9 y 10) para el monitoreo de la calidad del aire. Ejemplo de ello es que en este escenario sólo se identificaron 65 km² con niveles de Aptitud 9 y 10. Esta superficie, sin embargo, incrementó a 217 km² cuando se pondera con más peso a las emisiones y a la población (Escenario 2) y a poco más de 240 Km² cuando se pondera con más peso ya sea a las emisiones (Escenario 3) o a la población (Escenario 4). Esto probablemente es resultado del hecho de que variables como las emisiones y la población tienen una distribución espacial relativamente concentrada en áreas que cubre primordialmente los municipios de Apodaca, García, San Pedro, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás

y Santa Catarina, contribuyendo con ello de una manera más importante en la determinación de la Aptitud global de estos sitios.

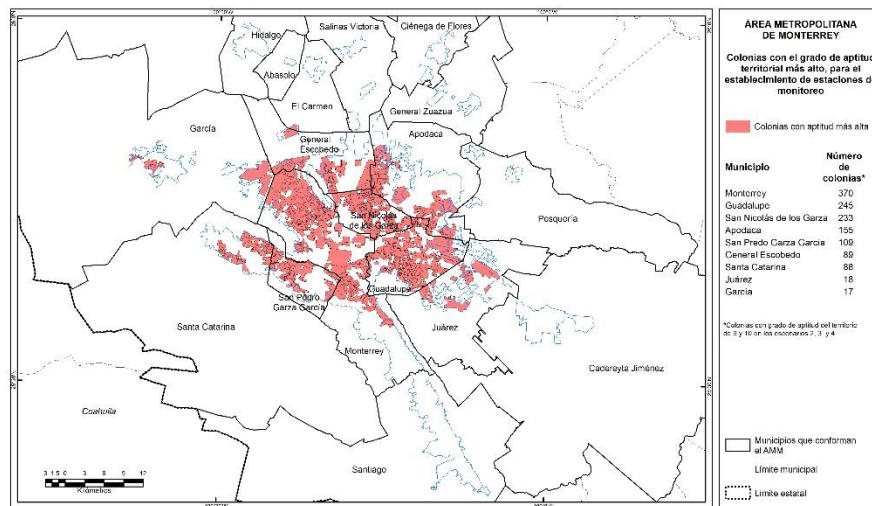
En el Escenario 2, donde se estaría identificando las áreas más aptas para el monitoreo bajo el supuesto de caracterizar la calidad del aire en los sitios donde existe la posibilidad de que se presenten los mayores niveles de contaminación (representada en este caso por las emisiones) que afectan a la mayor cantidad de habitantes (representada por la densidad poblacional), se identificó una superficie de 218 km² con niveles de Aptitud 9 y 10, principalmente distribuidos en los municipios de Monterrey, Apodaca, Guadalupe, Santa Catarina, General Escobedo, San Nicolás de los Garza, San Pedro y Juárez. Si se definiera como único objetivo del sistema de monitoreo de la calidad del aire la protección de la salud de la población, los sitios para instalar equipos de monitoreo debería ser elegidos de entre los sitios que se identificaron en este escenario.

Entre los escenarios con ponderación diferenciada de variables, el Escenario 3 (donde se pondera con más peso a las emisiones) fue el que identificó una mayor superficie de terreno con alta Aptitud (9 y 10) para la instalación de estaciones de monitoreo con un total de 248 km², siendo los municipios de Monterrey y Apodaca los que concentran la mayor parte de esta superficie. Aunque el inventario nacional de emisiones del año 2016 reporte emisiones de PM_{2.5} más significativas en otros municipios como Pesquería o García, en éstos no se identifican amplias áreas con alta Aptitud para el monitoreo debido que un número importante de las fuentes de emisión se ubican fueran de las áreas urbanas, por lo que la importancia relativa de la población, a pesar de haber recibido una ponderación menor en este escenario, cobró más relevancia en la evaluación de Aptitud.

En el Escenario 4 (donde se pondera con mayor peso a la población) los máximos niveles de aptitud (9 y 10) para la instalación de estaciones de monitoreo cubren una superficie de 239 km² distribuidos en los municipios de Monterrey, Apodaca, Guadalupe, Santa Catarina, General Escobedo, San Nicolás de los Garza, San Pedro y Juárez.

En general, el hecho de que los resultados obtenidos en los tres escenarios con ponderación diferenciada de variables fueran tan similares, abren la posibilidad de que el sistema de monitoreo de la calidad del aire del Área Metropolitana de Monterrey pueda atender de manera simultánea varios objetivos con una menor cantidad de estaciones de monitoreo, que en el caso de haber obtenido áreas aptas más dispersas y diferenciadas para cada escenario. Entre los objetivos que se pueden atender de manera simultánea destacan: evaluar la exposición de la población, evaluar el impacto de las estrategias de reducción de emisiones y ubicar los sitios donde se registran las máximas concentraciones de contaminantes, en adición a la determinación del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas de calidad del aire. Para la identificación de los sitios más aptos para el monitoreo de la calidad del aire bajo esta consideración, se hizo el cruce, por municipio, de las colonias con el nivel de Aptitud más alto obtenido en cada uno de los Escenarios 2, 3 y 4 y se seleccionó sólo a aquellas colonias que fueron comunes a los tres escenarios, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 6.7. Los resultados detallados por escenario y municipio, mostrando el listado de colonias con los dos niveles de Aptitud más alta registrados para cada municipio en cada uno de los escenarios evaluados se incluyen en el Anexo 3.

Figura 6.7. Ubicación geográfica de las colonias, pueblos, barrios y fraccionamientos con mayor Aptitud en los escenarios 2, 3 y 4 para la instalación de estaciones de monitoreo en AMM.



Fuente: Elaboración propia INECC

Además de la identificación de sitios Aptos para la instalación de nuevas estaciones de monitoreo de la calidad del aire, los resultados de esta actividad revelan la posibilidad de reubicar algunas de las estaciones de monitoreo que actualmente existen en la región a fin para mejorar su representatividad. En la Tabla 6.8 se muestra el nivel de Aptitud del área en la que se ubican actualmente las estaciones de monitoreo bajo las condiciones de los diferentes escenarios. Los resultados muestran que existen algunas estaciones en las que resultaría conveniente evaluar su posible reubicación a sitios con mayor Aptitud, tales como: Pueblo Serena, Apodaca, Juárez, La Pastora y Universidad ya que el máximo nivel de Aptitud del terreno de su ubicación actual es de 5 en los primeros dos casos y de 7 en los tres últimos. De manera particular, para estas estaciones, el nivel de Aptitud en el Escenario 2 (donde se pondera con igual peso a las emisiones y a la población), los niveles de Aptitud de la ubicación actual es de 4, 5 6. 5 y 7, respectivamente. La Figura 6.8 muestra los mismos resultados, pero de manera gráfica.

Tabla 6.8. Nivel de Aptitud de la ubicación actual de las estaciones de monitoreo existentes en el Área Metropolitana de Monterrey conforme a las condiciones de cada uno de los escenarios evaluados.

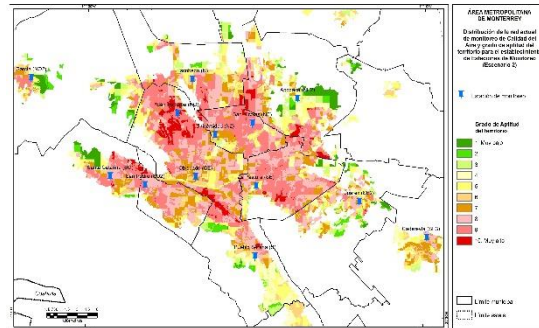
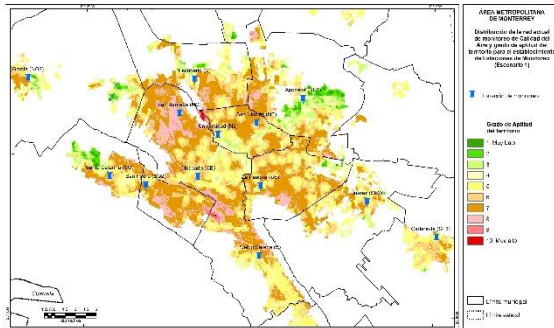
Municipio	Estación de monitoreo	Nivel de Aptitud en la Ubicación actual			
		Escenario 1 Se ponderan todas las variables con el mismo peso	Escenario 2 Se ponderan con el mismo peso población y emisiones	Escenario 3 Se pondera con mayor peso las emisiones	Escenario 4 Se pondera con mayor peso a la población
Monterrey	Obispado – CE	6	7	8	7
	San Bernabé - NO	7	9	10	9
	Pueblo Serena – S	5	4	5	3
Apodaca	Apodaca – NE2	4	5	5	5
General Escobedo	Escobedo -N	6	9	9	9
García	García – NO2	6	9	9	9
Cadereyta	Sureste 3 - SE3	7	8	8	8
Juárez	Juárez - SE2	5	6	7	6
Guadalupe	La Pastora - SE	5	5	7	4
San Nicolás	San Nicolás – NE	5	9	8	9
	Universidad – N2	5	7	7	7
San Pedro	San Pedro – SO2	7	8	9	8
Santa Catarina	Santa Catarina - SO	5	8	8	8

Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.1. Ubicación de estaciones actualmente en operación en el AMM y áreas de Aptitud correspondiente en cada escenario evaluado.

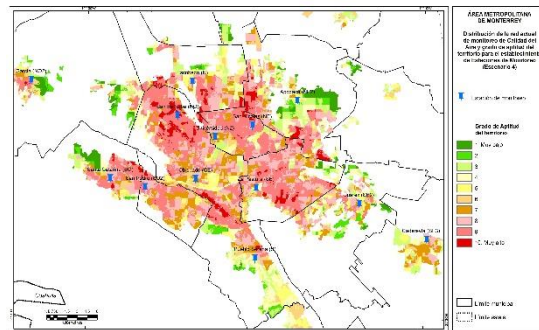
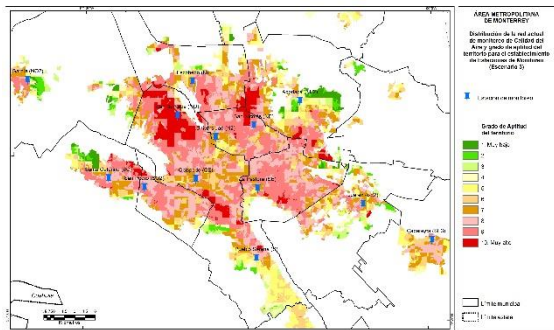
Escenario 1. Se ponderan todas las variables con el mismo peso

Escenario 2. Se ponderan con el mismo peso población y emisiones



Escenario 3. Se pondera con mayor peso las emisiones

Escenario 4. Se pondera con mayor peso a la población



Fuente: Elaboración propia INECC

6.3 Identificación de sitios para realizar monitoreo de calidad del aire como base en el riesgo a la salud humana.

El objetivo principal de este trabajo fue el de determinar la cantidad y ubicación de puntos de monitoreo de la calidad del aire en el territorio del Área Metropolitana de Monterrey, tomando como base los riesgos a la salud humana. A continuación se describen los resultados obtenidos.

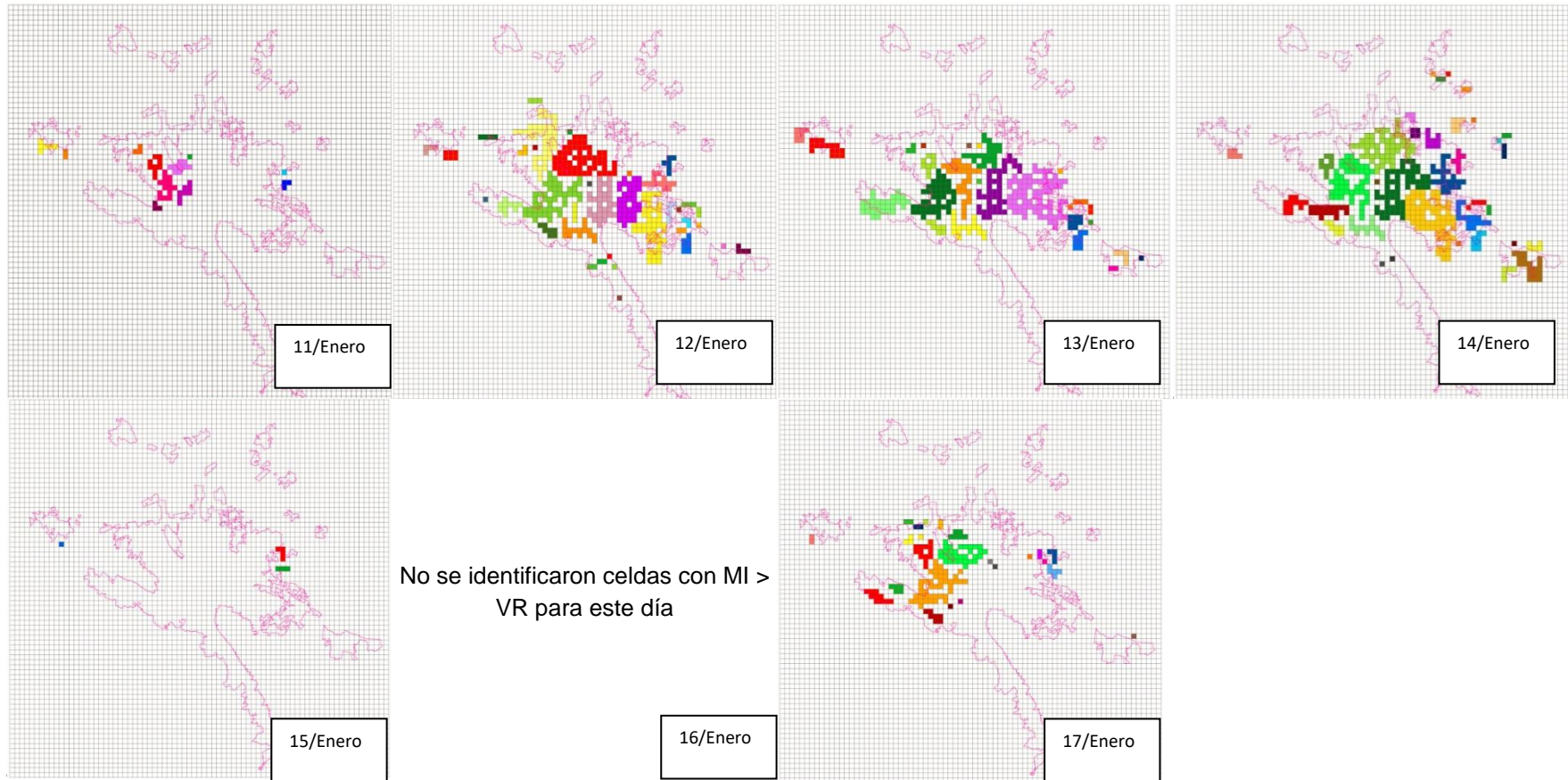
Definición de conglomerados

Conforme a la metodología descrita en la sección 4.3 de este reporte y en el Anexo 2, se definieron los conglomerados para cada uno de los días en los periodos del 11 al 17 de enero, del 23 al 29 de mayo y del 20 al 26 de junio. Para ello, se identificaron las celdas contiguas Norte-Sur y Este-Oeste, en donde se cumpliera la condición de que la Masa Inhalada fuera superior al Valor de Referencia, para ello se usó la siguiente información:

- En los tres periodos analizados se empleó como valor límite el valor guía de la OMS de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, promedio de 24 h para seleccionar las celdas con población expuesta a concentraciones que pueden ser de riesgo a la salud por su dosificación ambiental.
- Para cada celda se calculó la Masa Inhalada de $\text{PM}_{2.5}$ en 24 horas sólo en celdas con concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ mayores al valor límite ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$); utilizando una tasa de respiración de $13.25 \text{ m}^3/24 \text{ horas}$ (Velázquez, 2008) y la población de la celda procesada; empleando además un factor de 10^{-6} para transformar el resultado a gramos.
- El valor de referencia para riesgo a la salud por $\text{PM}_{2.5}$ fue de $0.14923948 \text{ g/habitantes promedio por celda en un periodo de 24 horas}$. Obtenido como producto del valor límite, la población promedio por celda en el área de estudio ($448.8 \text{ personas/celda}$), la tasa de respiración de $13.25 \text{ m}^3/24 \text{ horas}$ y el factor 10^{-6} (ver sección de metodología, numeral 4.4).

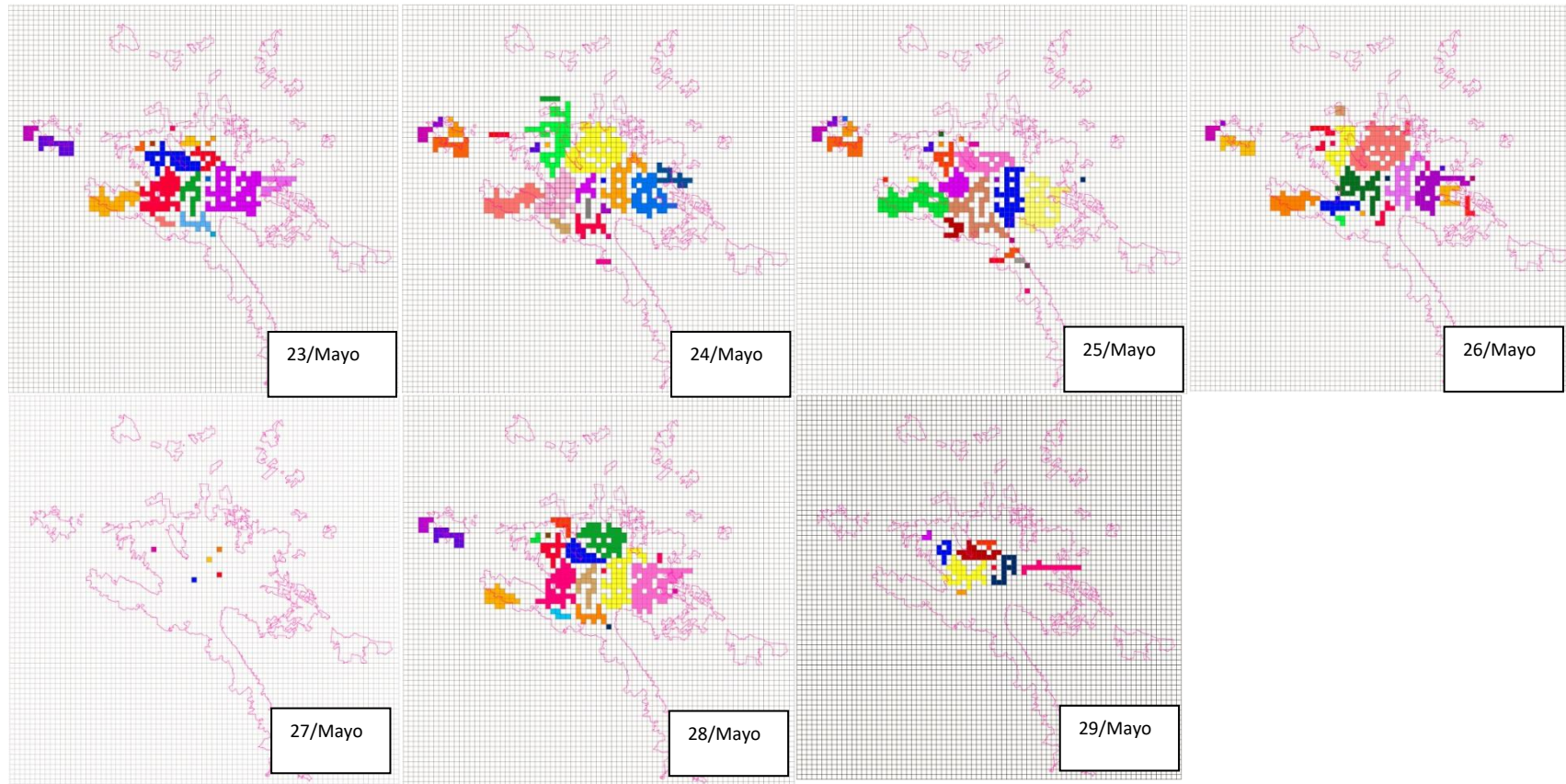
Los conglomerados obtenidos para cada uno de los días de los periodos modelados son ilustrados en las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11. En dichas Figuras, cada color define a un conglomerado distinto en cada día analizado.

Figura 6.2. Conglomerados por día formados a partir de celdas con $MI > VR$ para el periodo del 11 al 17 de Enero 2016.



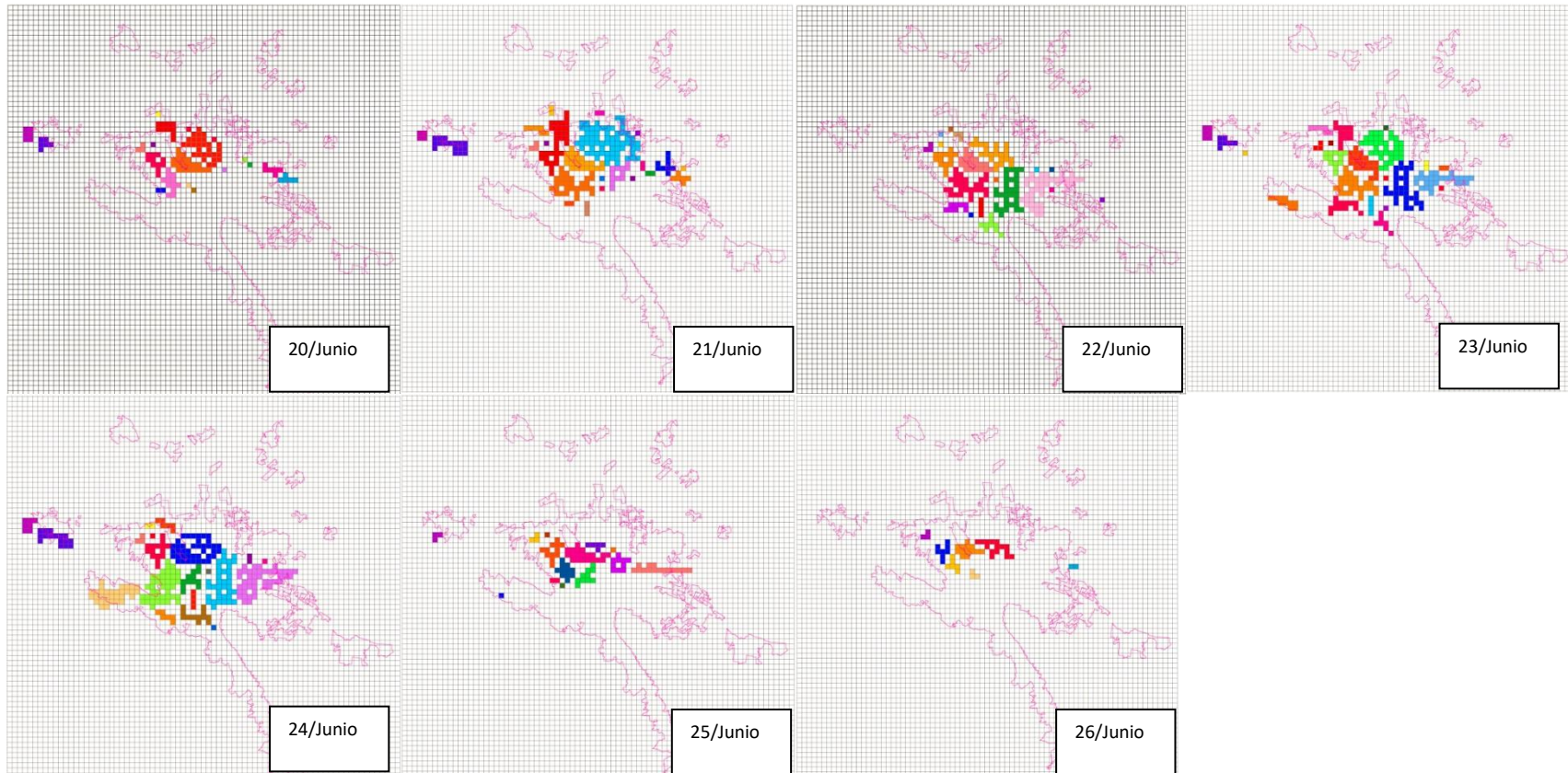
Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.3. Conglomerados por día formados a partir de celdas con $MI > VR$ para el periodo del 23 al 29 de Mayo 2016.



Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.4. Conglomerados por día formados a partir de celdas con $MI > VR$ para el periodo del 20 al 26 de Junio 2016.



Fuente: Elaboración propia INECC

En general, con los periodos analizados se logró caracterizar diversas condiciones de dispersión, que se reflejaron en el número de conglomerados (que variaron entre 3 para el día 15 de enero y 38 para el día 14 de enero) y en su distribución espacial. En el periodo del 11 al 17 de enero no sólo se identificaron la mayor cantidad de conglomerados, con un total de 140, sino que fue además en el que se observó una mayor variabilidad en el número de conglomerados identificados en diferentes días de la misma semana, producto de la variabilidad meteorológica. La diferencia entre el número de conglomerados entre los días con menor y mayor cantidad de ellos por día fue de 35. Por otra parte, el periodo con la menor cantidad de conglomerados identificados fue del 20 al 26 de junio con un total de 129 y una diferencia máxima de conglomerados entre días de 18, casi la mitad de lo observado en la semana de enero. En la semana de mayo se identificaron 130 conglomerados en total y una diferencia máxima de conglomerados entre días de 24.

En los resultados obtenidos para el periodo de análisis del 11 al 17 de enero se aprecia que las zonas con valores de masa inhalada que superan el valor de referencia tienen una cobertura muy amplia en sentido Este – Oeste (Figura 6.9), la de mayor extensión para los periodos modelados, particularmente en los días 12 al 14 de enero, cuando dicha zona cubre toda la AMM con población, y es el periodo en el cual se observó mayor cobertura hacia la parte Este, lo cual muestra cómo el problema de exposición se agudiza, en este periodo, cuando el transporte de partículas es desde el Noroeste hacia el Este y Sureste.

Durante el periodo del 23 al 29 de mayo la cobertura de los conglomerados es ligeramente menor que en enero hacia el extremo este del AMM, pero se alarga más hacia el Noroeste; lo cual es más apreciable en los días del 23 al 26 de mayo (Figura 6.10).

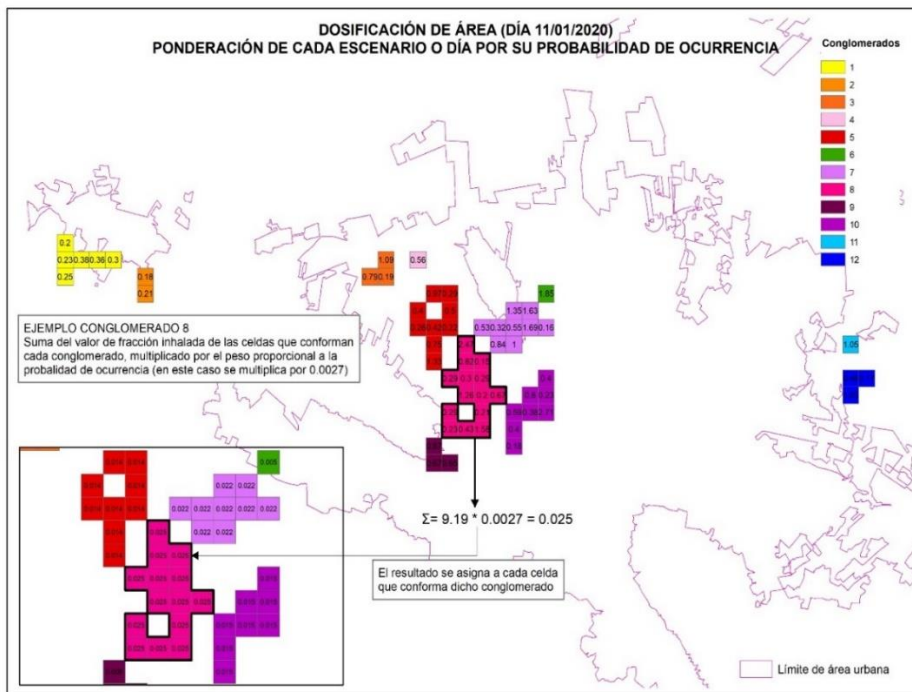
Finalmente, en junio se observó que las extensiones de los conglomerados tienen la menor cobertura (Figura 6.11), y se localizan sobre todo en la parte central del AMM, lo cual confirma a este periodo como el de menor contaminación por

partículas, así como a los meses de enero y mayo como periodos con mayor exposición a las mismas.

Dosificación de área

Terminada la etapa de formación de conglomerados, se procedió a realizar las operaciones para obtener la Dosificación de Área. Este parámetro se define como la suma de MI en cada celda de un conglomerado, multiplicado por la probabilidad de ocurrencia de cada escenario o día modelado; que en el caso presente es de $1/365 = 0.002739$. Un ejemplo de esta etapa se ilustra en la Figura 6.12, en la que se aprecia que para el conglomerado del 11 de Enero se suman los valores de MI por celda y dicha suma se multiplica por la probabilidad 0.0027, para obtener un valor de dosificación de área de 0.025, el cual se asigna a las celdas del conglomerado. Se procede de manera similar con todos los conglomerados de cada día incluido en el análisis.

Figura 6.5. Ejemplo del cálculo de la Dosificación de Área con conglomerados del día 11 de enero de 2020.



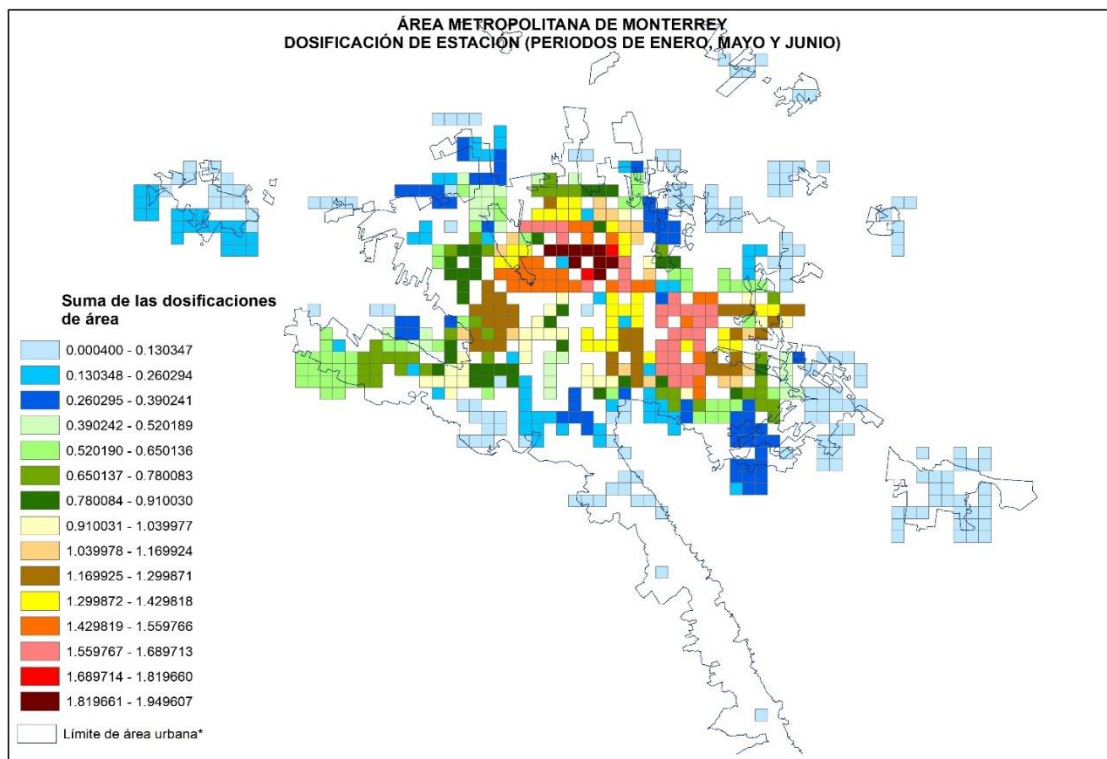
Fuente: Elaboración propia INECC

Dosificación de estación

La siguiente etapa del análisis es la estimación de la dosificación de la estación, etapa en la que se suman las dosificaciones de área de todos los conglomerados que contienen la estación o celda para cada uno de los días analizados. Esta operación se repitió para todas las celdas que compartieron conglomerados en los diferentes periodos de modelación.

Como resultado de esta etapa se genera una nueva matriz de nuevos conglomerados con extensiones que representan las coberturas agregadas de los conglomerados que compartieron la celda o estación en los periodos analizados. La Figura 6.13, muestra los resultados obtenidos.

Figura 6.6. Representación de Dosificación de Estación, en la cual los valores de dosificación de área han sido acumulados por celda.

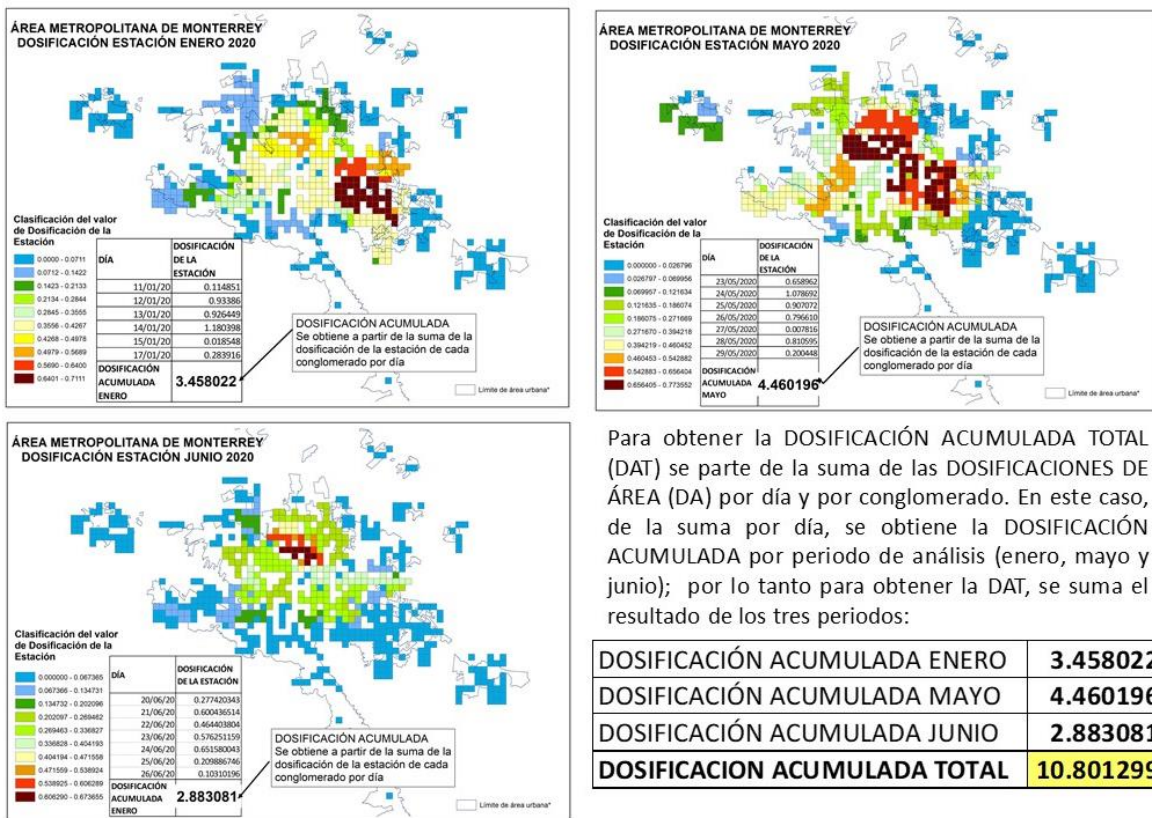


Fuente: Elaboración propia INECC

Dosificación total

La Dosificación Total representa la dosificación acumulada en la zona de estudio, considerando todos los días o escenarios evaluados, es decir consiste en una suma de las dosificaciones de área estimadas, ya ponderadas por la probabilidad de ocurrencia de cada escenario. La Figura 6.14, muestra los resultados obtenidos por periodo analizado y la dosificación total estimada considerando los resultados por periodo.

Figura 6.7. Dosificación total acumulada estimada en la zona de estudio.



Para obtener la DOSIFICACIÓN ACUMULADA TOTAL (DAT) se parte de la suma de las DOSIFICACIONES DE ÁREA (DA) por día y por conglomerado. En este caso, de la suma por día, se obtiene la DOSIFICACIÓN ACUMULADA por periodo de análisis (enero, mayo y junio); por lo tanto para obtener la DAT, se suma el resultado de los tres periodos:

DOSIFICACIÓN ACUMULADA ENERO	3.458022
DOSIFICACIÓN ACUMULADA MAYO	4.460196
DOSIFICACIÓN ACUMULADA JUNIO	2.883081
DOSIFICACIÓN ACUMULADA TOTAL	10.801299

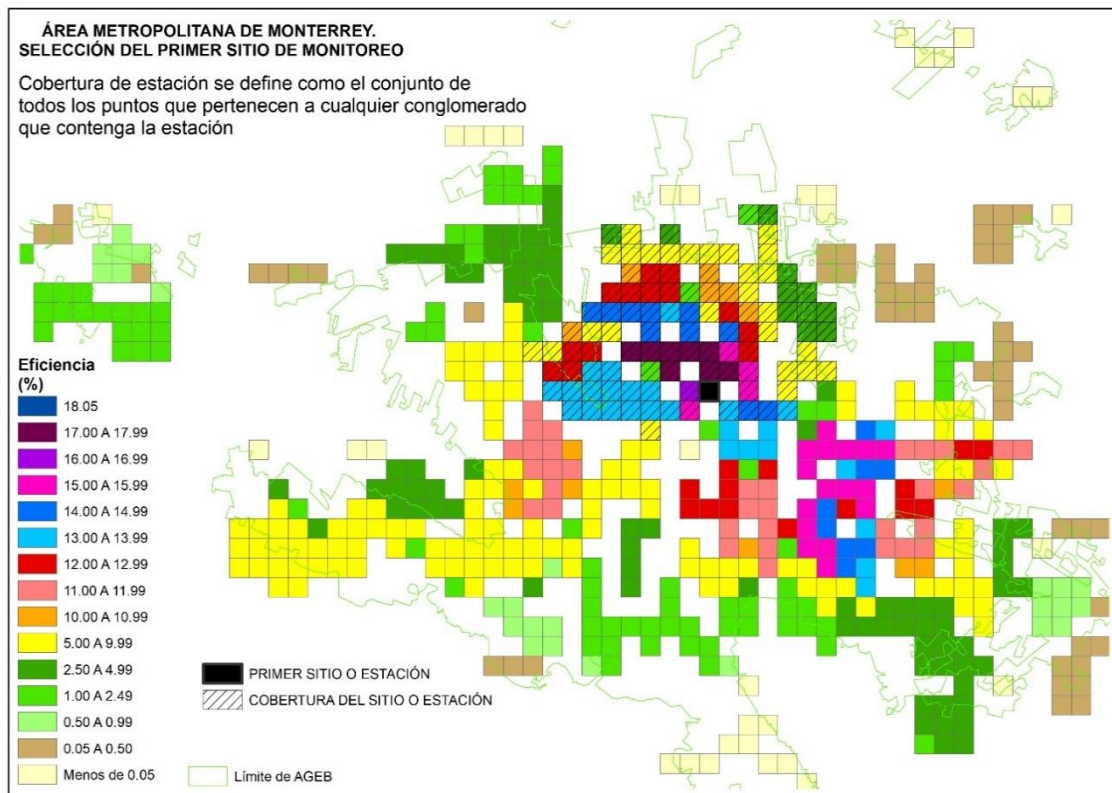
Fuente: Elaboración propia INECC

Eficiencia de la estación y selección de primer sitio de monitoreo

La eficiencia se calculó dividiendo la dosificación de la estación entre la dosificación total, y se multiplicó por 100 para expresarla como porcentaje. Como resultado se obtuvo una matriz con porcentajes en cada celda. Como se observa en la Figura

6.15, la celda marcada en color negro, tiene la mayor eficiencia estimada y corresponde al 18.05%. Las celdas contiguas con líneas diagonales en su interior representan su cobertura espacial, la cual está definida por todas las celdas que pertenecen a cualquier conglomerado en el que apareció la celda en cuestión.

Figura 6.8. Resultado del cálculo de la Eficiencia de la Estación.

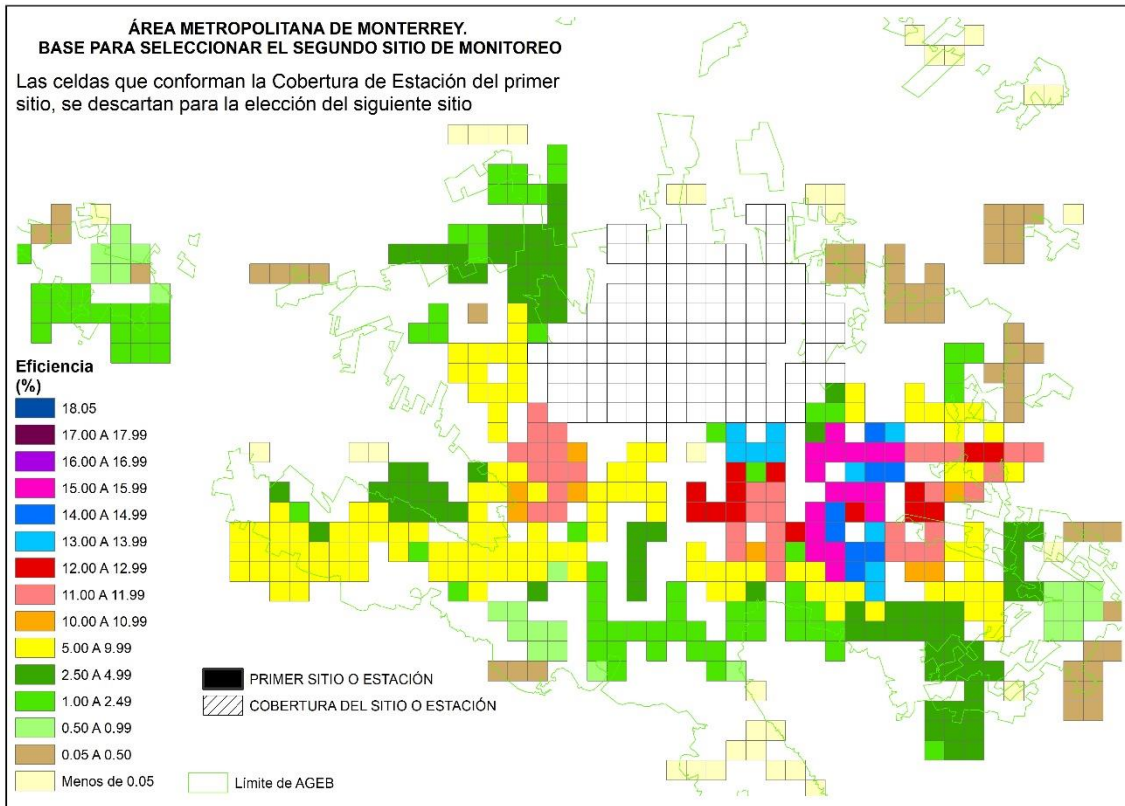


Fuente: Elaboración propia INECC

Selección de sitios potenciales monitoreo

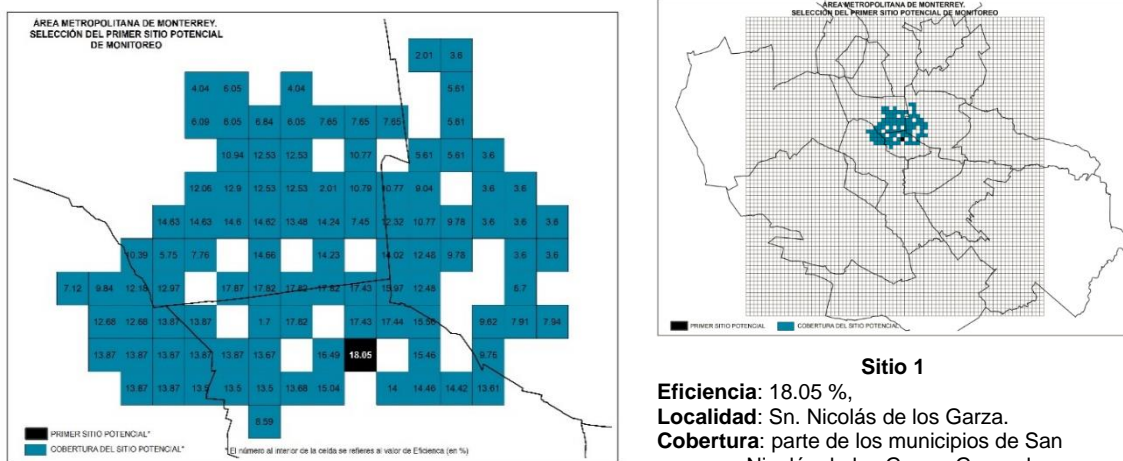
Una vez definido el primer sitio, las celdas que delimitan su cobertura fueron eliminadas para que no intervinieran en la identificación de los siguientes sitios potenciales de monitoreo (Figura 6.16). Una vez hecho esto, se determinó el segundo sitio de manera similar al primero. Se procedió de igual manera para los sitios sucesivos. Las Figuras 6.17 a 6.24 muestran los resultados de selección de cada sitio potencial de monitoreo, indicando su aporte a la eficiencia total de la red de monitoreo y su cobertura.

Figura 6.9. Celdas disponibles para la selección del segundo sitio potencial de monitoreo.



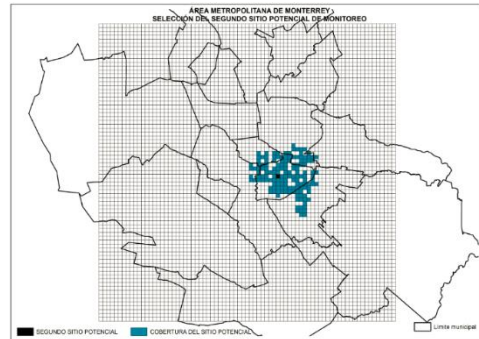
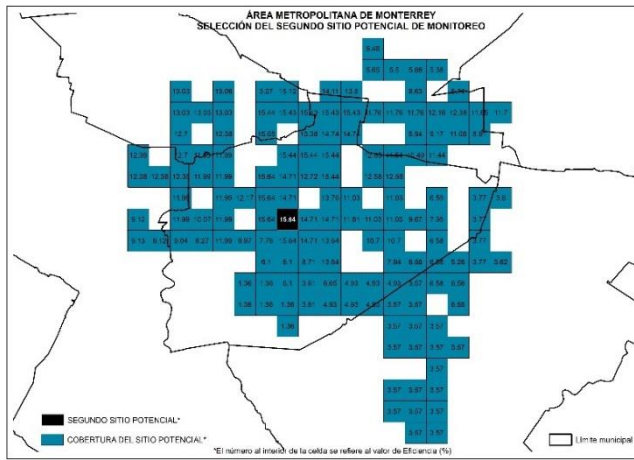
Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.10. Ubicación, eficiencia y cobertura del primer sitio potencial de monitoreo.



Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.11. Ubicación, eficiencia y cobertura del segundo sitio potencial de monitoreo.

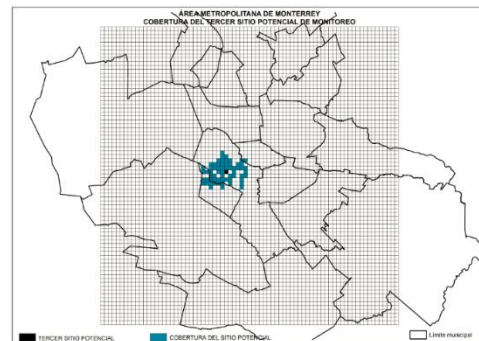
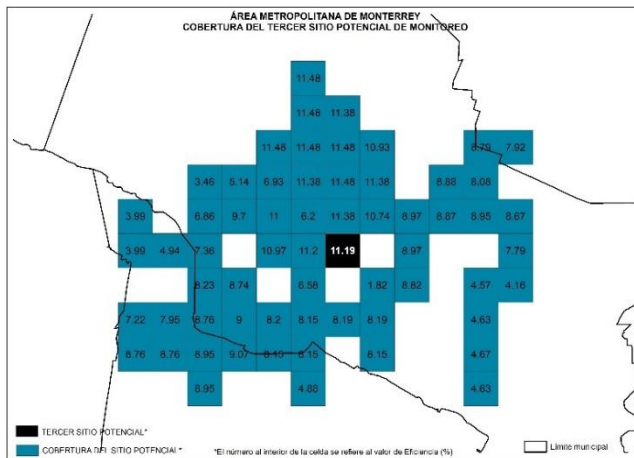


Sitio 2

Eficiencia: 15.64 %.
Localidad: Guadalupe.
Cobertura: parte de los municipios de Guadalupe, Juárez, Apodaca, San Nicolás de los Garza y Monterrey.

Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.12. Ubicación, eficiencia y cobertura del tercer sitio potencial de monitoreo.

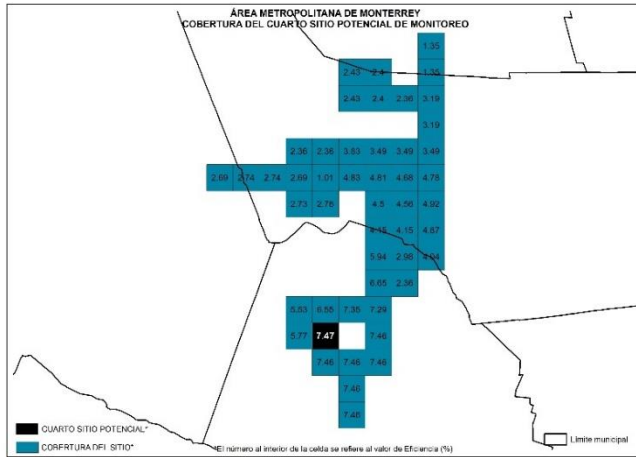


Sitio 3

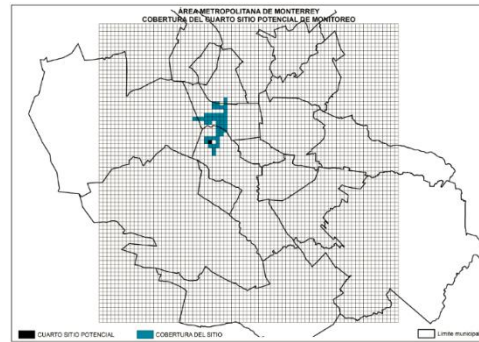
Eficiencia: 11.18 %
Localidad: Monterrey - centro
Cobertura: parte de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y San Nicolás de los Garza.

Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 6.13. Ubicación, eficiencia y cobertura del cuarto sitio potencial de monitoreo.



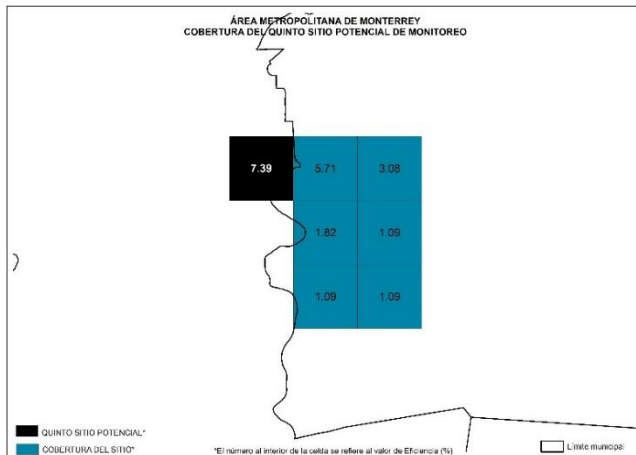
Fuente: Elaboración propia INECC



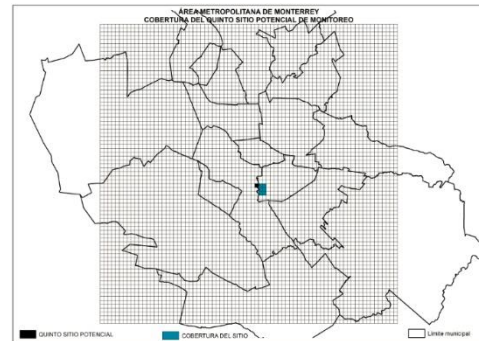
Sitio 4

Eficiencia: 7.47 %
Localidad: Monterrey-norte
Cobertura: parte de los municipios de Monterrey, General Escobedo, El Carmen y García

Figura 6.14. Ubicación, eficiencia y cobertura del quinto sitio potencial de monitoreo.



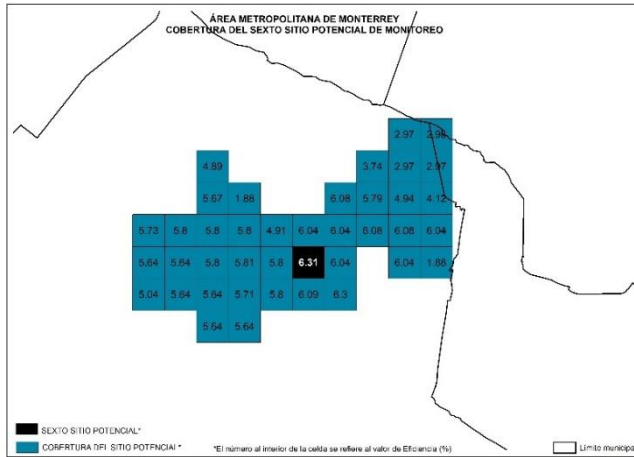
Fuente: Elaboración propia INECC



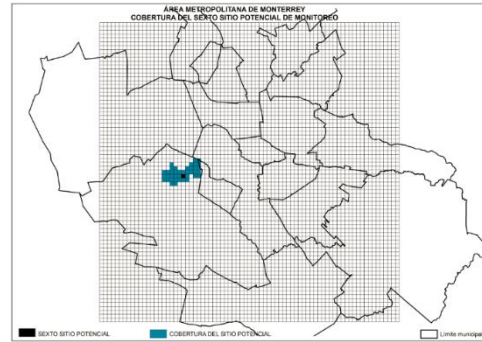
Sitio 5

Eficiencia: 7.38 %
Localidad: Monterrey – centro-este
Cobertura: parte de los municipios de Monterrey y Guadalupe

Figura 6.15. Ubicación, eficiencia y cobertura del sexto sitio potencial de monitoreo.



Fuente: Elaboración propia INECC



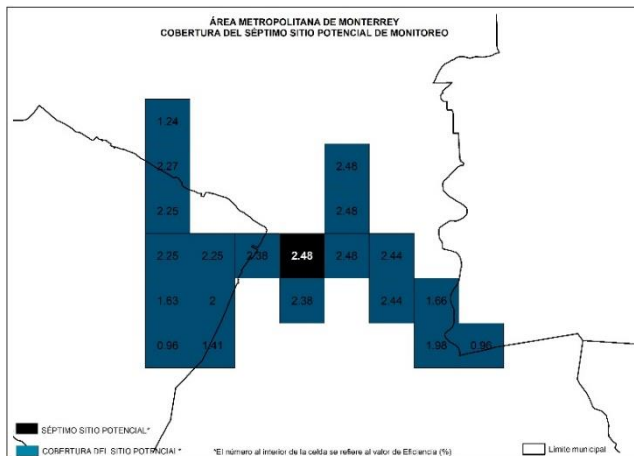
Sitio 6

Eficiencia: 6.31 %

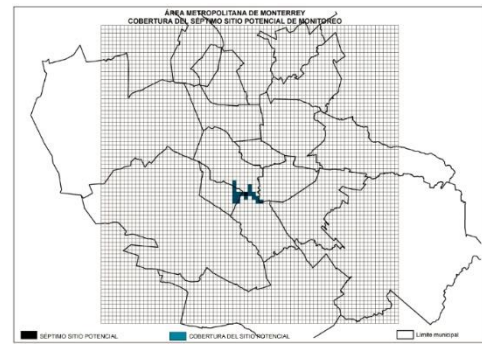
Localidad: Santa Catarina

Cobertura: parte de los municipios de Santa Catarina y San Pedro Garza García

Figura 6.16. Ubicación, eficiencia y cobertura del séptimo sitio potencial de monitoreo.



Fuente: Elaboración propia INECC



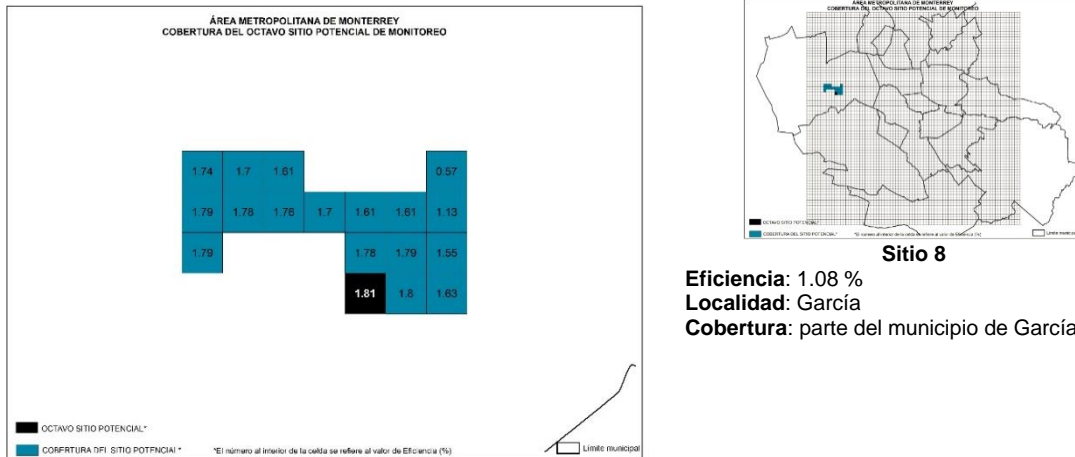
Sitio 7

Eficiencia: 2.48 %

Localidad: Monterrey – centro-sur

Cobertura: parte de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y Guadalupe

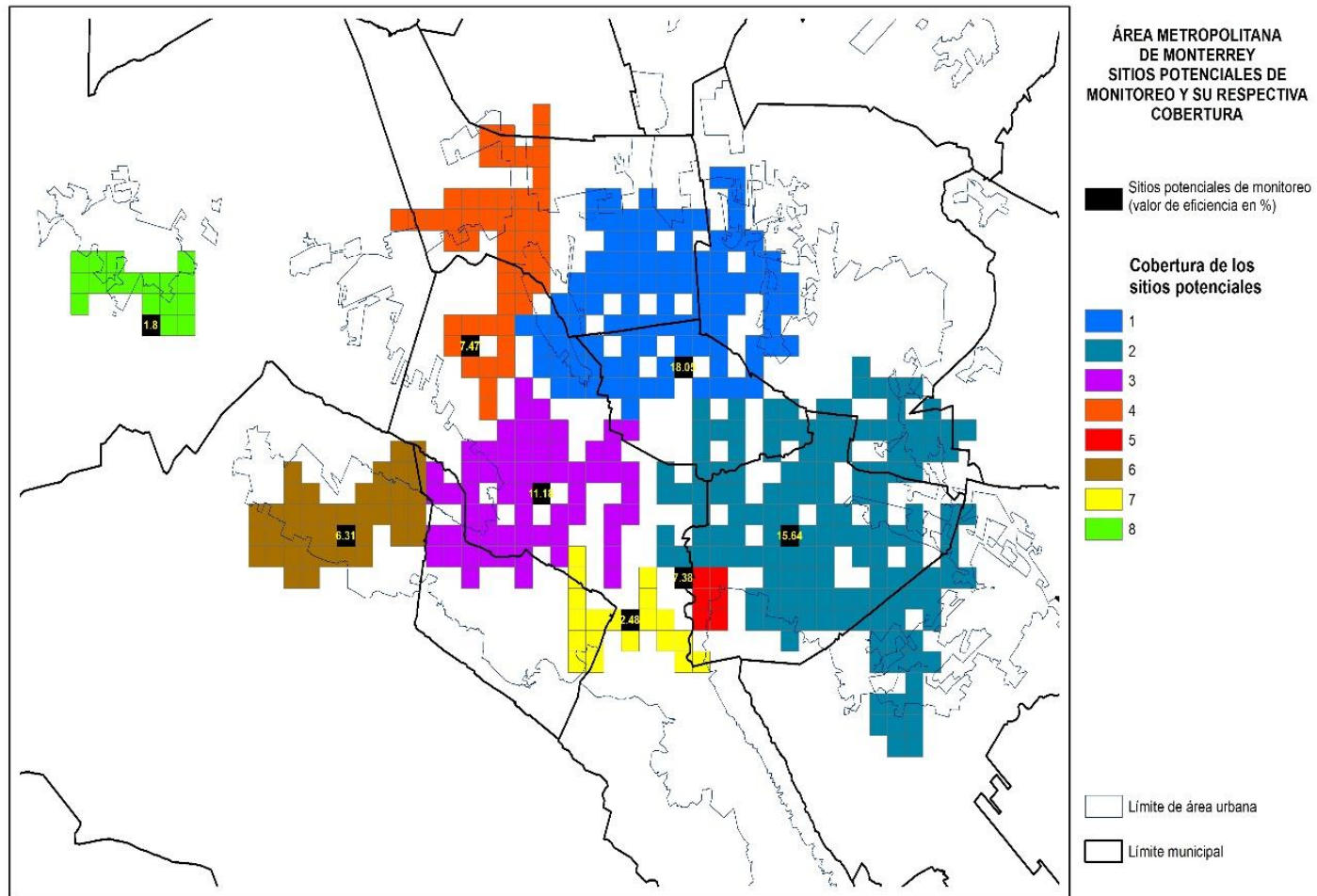
Figura 6.17. Ubicación, eficiencia y cobertura del octavo sitio potencial de monitoreo.



Fuente: Elaboración propia INECC

En el presente estudio se determinaron ocho sitios de monitoreo para partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en el AMM, cuyas eficiencias individuales varían desde 18.05% hasta 1.08%, y la suma o acumulación de eficiencias alcanza 70.31%. Este valor representa la eficiencia de la red que conforman juntos los ocho sitios de monitoreo potencial, determinados por el método de dosificación ambiental. Cabe mencionar que la incorporación de más sitios no produce incrementos en la eficiencia de la red por arriba del 1.08%, por lo que se optó en limitar el número de sitios potenciales a los ilustrados en las Figuras 6.17 a 6.24; cuyas coberturas geográficas individuales y de la red completa, se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En tanto que en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen las características de ubicación del área de influencia de cada sitio potencial de monitoreo.

Figura 6.18. Coberturas geográficas de cada sitio determinado y de la red que propuesta para el monitoreo de PM_{2.5}, en el Área Metropolitana de Monterrey.



Fuente: Elaboración propia INECC.

Tabla 6.1. Sitios potenciales de monitoreo de PM_{2.5} de acuerdo con la metodología de dosificación ambiental de Noll y Mitsutomi (1983).

Sitio potencial (celda)	Eficiencia	Ubicación			Área de influencia
		Municipio	Coordenadas de celda (punto central)		
			Latitud	Longitud	
1	18.05%	San Nicolás de los Garza	25.749844	-100.275954	Parte de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y San Nicolás de los Garza.
2	15.64%	Guadalupe	25.678131	-100.215407	Parte de los municipios de Guadalupe, Juárez, Apodaca, San Nicolás de los Garza y Monterrey
3	11.18%	Monterrey-centro	25.694958	-100.355089	Parte de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y San Nicolás de los Garza
4	7.47%	Monterrey-Norte	25.757774	-100.395681	Parte de los municipios de Monterrey, General Escobedo, El Carmen y García
5	7.38%	Monterrey-centro-este	25.659565	-100.274992	Parte de los municipios de Monterrey y Guadalupe
6	6.31%	Santa Catarina	25.675843	-100.464467	Parte de los municipios de Santa Catarina y San Pedro Garza García
7	2.48%	Monterrey-centro-sur	25.641245	-100.304679	Parte de los municipios de Monterrey, San Pedro Garza García y Guadalupe
8	1.80%	García	25.764970	-100.575232	Parte del municipio de García

Fuente: Elaboración propia INECC

7. Análisis de resultados

El monitoreo de la contaminación atmosférica es un factor elemental para la gestión de la calidad del aire, ya que permite a las autoridades correspondientes tomar las medidas necesarias para mantenerla en un estado que no represente un riesgo significativo a la salud de la población y a los ecosistemas.

Actualmente, en el territorio del Área Metropolitana de Monterrey existen un total de 14 estaciones de monitoreo de la calidad del aire distribuidas en los municipios de Monterrey (Obispado - CE, San Bernabé - NO y Pueblo Serena - S), San Nicolás de los Garza (San Nicolás - NE y Universidad - N2), Apodaca (Apodaca - NE2), General Escobedo (Escobedo - N), García (García - NO2), Cadereyta (Cadereyta - SE3), Juárez (Juárez SE2), Guadalupe (La Pastora - SE), San Pedro Garza García (San Pedro - SO2), Santa Catarina (Santa Catarina - SO) y Pesquería (Pesquería -NE3).

De acuerdo con información proporcionada por las autoridades ambientales de la entidad, sólo se tiene registro sobre un estudio realizado en 1992 por la empresa RADIANT Corporation en el cual se identifican 10 sitios potenciales para la ubicación de estaciones de monitoreo a partir de la aplicación de una metodología que hace uso de información sobre población, uso de suelo, meteorología y características del terreno (Radian, 1992). Como resultado de dicho trabajo, en una primera fase se instalaron sólo 5 estaciones de monitoreo: San Nicolás, La Pastora, Obispado, San Bernabé y Santa Catarina; tres de ellas permanecen actualmente en el mismo sitio en el que fueron instaladas en 1992. Estas estaciones son La Pastora, Obispado y San Bernabé. La estación San Nicolás, actualmente está ubicada en un sitio distinto al referido en el reporte de Radian, pero se ignora si siempre ha permanecido ahí o si en el transcurso del tiempo sufrió algún cambio. Esta información no está documentada. Finalmente, de acuerdo con información proporcionada por personal de la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León, la estación Santa Catarina fue reubicada al sitio actual desde abril de 2014,

pero no se tiene documentación que explique el motivo del cambio ni los criterios empleados para definir la nueva ubicación.

Respecto al resto de las estaciones, en el reporte de Radian se hace referencia a otras 5 estaciones a ubicarse en Apodaca, Guadalupe (2 estaciones), Monterrey y Escobedo, aunque en este caso no se refieren edificios públicos o instalaciones específicas para su instalación, por lo que se ignora si las estaciones de monitoreo que existen en Apodaca desde el año 2012, en Monterrey desde el año 2017 y en Escobedo desde el año 2009, fueron instaladas en su ubicación actual atendiendo a las recomendaciones derivadas del estudio de 1992 o si corresponden al resultado de algún otro trabajo de investigación.

Respecto a las estaciones de monitoreo incorporadas al Sistema de Monitoreo y que no son referidas en el estudio de Radian, tales como Pueblo Serena (en 2017), Cadereyta (en 2017) y García (en 2009), tampoco existe evidencia documental sobre la metodología empleada para definir su ubicación, como tampoco lo existe respecto a los cambios de ubicación experimentados por las estaciones Santa Catarina en 2014 y García desde 2018.

Dado que el estudio realizado por RADIANT Corporation se ejecutó hace casi 30 años y en este periodo el Área Metropolitana de Monterrey ha experimentado cambios en la calidad del aire, modificaciones en el tamaño y/o estructura de la población y en los patrones de emisión de contaminantes provenientes de las diferentes fuentes, es probable que las recomendaciones derivadas del mismo para instalar 5 de las 14 estaciones que actualmente conforman el sistema de monitoreo hayan perdido vigencia. Este hecho, junto con la falta de información sobre los criterios de ubicación y/o reubicación del resto de las estaciones de monitoreo, hacen que por ahora no se tenga certeza de que la ubicación actual de dichas estaciones cumpla con el objetivo de caracterizar los niveles de concentración de partículas $PM_{2.5}$ a los que está expuesta la población. En este contexto, el objetivo principal de este trabajo fue aplicar una metodología que permitiera determinar la ubicación de puntos de monitoreo orientados a caracterizar la calidad del aire por

partículas suspendidas $PM_{2.5}$ para la protección de la salud de la población expuesta.

Una primera etapa de este trabajo implicó la caracterización del entorno de las estaciones de monitoreo actualmente en operación, para determinar la escala espacial de representatividad de sus mediciones, así como la necesidad de una reubicación potencial para cumplir con el objetivo de caracterizar la exposición de la población.

Como regla general, cuando se diseña una red de monitoreo con este objetivo es deseable el monitoreo de la calidad del aire que está influenciada por un gran número de fuentes de emisión en una región determinada. De acuerdo con las recomendaciones de la EPA, estas estaciones de monitoreo deben ser representativas de una escala vecinal o urbana. Las estaciones de monitoreo con estas escalas de representación, por tanto, no debe estar influenciadas por una fuente de emisión en particular. En la mayoría de los casos, estos sitios se ubicarán a una distancia razonable de las fuentes de emisión y cerca de sitios comunales o vecindarios.

En este contexto general, de los 14 sitios de monitoreo que conforman el actual Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey, los resultados de esta etapa del proyecto indican que cinco de ellas cumplen con los criterios para asumir una escala espacial de representatividad de tipo vecindario, especialmente para el monitoreo de partículas suspendidas $PM_{2.5}$ que es el objetivo primordial de este trabajo. Estas estaciones de monitoreo son: **Obispado, Cadereyta, Juárez, La Pastora y Santa Catarina.**

Cuatro estaciones más requerirían de reubicación para, si es del interés de la autoridad ambiental del Estado de Nuevo León, ampliar la escala espacial de representatividad a una de tipo vecindario, al menos para la medición de partículas suspendidas $PM_{2.5}$. Estas estaciones son: **Pueblo Serena, Escobedo, García y Universidad.** La causa principal de no alcanzar la escala espacial de tipo vecindario, en la mayoría de los casos, es la proximidad a alguna vialidad con

intenso aforo vehicular o a amplias zonas desprovistas de vegetación, situaciones que potencialmente pueden tener, de acuerdo con los criterios de la USEPA, un impacto directo en las mediciones de calidad del aire realizadas en el sitio.

Otras cuatro estaciones de monitoreo requieren de una valoración adicional para confirmar la escala espacial de representatividad espacial asignada como resultado de esta actividad. Estas estaciones son: **Apodaca, San Pedro, San Bernabé y San Nicolás**. Las estaciones Apodaca y San Pedro, tienen en su proximidad la presencia de fuentes fijas, cuyas emisiones de $PM_{2.5}$ bajo ciertas condiciones de viento, se presume que podría tener un impacto directo en las mediciones de este contaminante. Sin embargo, esta situación sólo podría evaluarse mediante la realización de ejercicio de modelación de dispersión de contaminantes o análisis de trayectorias con modelos como Aermol (EPA, 2019), Calpuff (EPA, 1995) y/o Hysplit (NOAA, 2020). Esta actividad, sin embargo, rebasa los alcances del presente trabajo.

En el caso de la estación San Bernabé se identificó una posible inconsistencia en el dato del aforo vehicular de una vialidad cercana. Si se confirma el dato de aforo con el que se cuenta al momento, la estación requeriría de reubicación, pero si se corrige a la baja en el rango que se asume razonable por las características del sitio y del aforo de la vialidad a la que le da continuidad, es probable que alcance la escala de tipo vecindario para la medición de gases, en tanto que para la medición de partículas permanecería en una escala micro a media, por lo que para la medición de $PM_{2.5}$ sería necesaria su reubicación.

Con respecto a la estación San Nicolás, el entorno le favorece para tener una escala espacial de tipo vecindario, sin embargo, esto no se puede establecer como una realidad en tanto no se logre realizar la poda de un árbol en su proximidad, cuyo follaje se ubica muy próximo a los equipos de medición e incluso ocasionalmente haciendo contacto con ellos. Si no es posible eliminar la interferencia identificada mediante la poda, resulta inevitable su reubicación.

En una segunda etapa de este trabajo se aplicó la modelación de Aptitud, que es una aplicación común y valiosa de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) que ha sido usada para identificar los sitios más apropiados para un uso o actividad particular de acuerdo con requerimientos o preferencias específicas, y que en el área ambiental ha demostrado su utilidad en el diseño y evaluación de sistemas de

monitoreo de la calidad del aire (USEPA, 2007; Pope and Wu, 2014; M. C. McCarthy, et al, 2014; STI, 2014; CDPHE, 2015; y, Penfold, B. M., et al, 2003). En este proyecto, a partir del análisis de la información disponible sobre las características del terreno, distribución espacial de la población, distribución espacial y volumen de emisiones de $PM_{2.5}$, cobertura de la red vial y ubicación de las fuentes puntuales de emisión, se identificaron las áreas más aptas para el monitoreo de la calidad del aire bajo cuatro escenarios en los que se ponderó con diferente nivel de importancia relativa cada una de estas variables.

Los resultados de los cuatro escenarios evaluados, identificaron de manera consistente que las áreas más aptas para la instalación de estaciones de monitoreo en el Área Metropolitana de Monterrey se ubican predominantemente en los municipios de Apodaca, García, San Pedro, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás y Santa Catarina. Ello es resultado de la alta concentración de población y de emisión de $PM_{2.5}$ en dichas zonas.

Al cruzar los resultados de este análisis con la ubicación actual de las estaciones de monitoreo en operación se identificó la posibilidad de reubicar algunas de las estaciones a fin para mejorar su representatividad en función de la Aptitud de cada sitio. Las estaciones que se encuentran en esta condición son: **Pueblo Serena, Apodaca, Juárez, La Pastora y Universidad** ya que el máximo nivel de Aptitud del terreno de su ubicación actual es de 5 en los primeros dos casos y de 7 en los tres últimos.

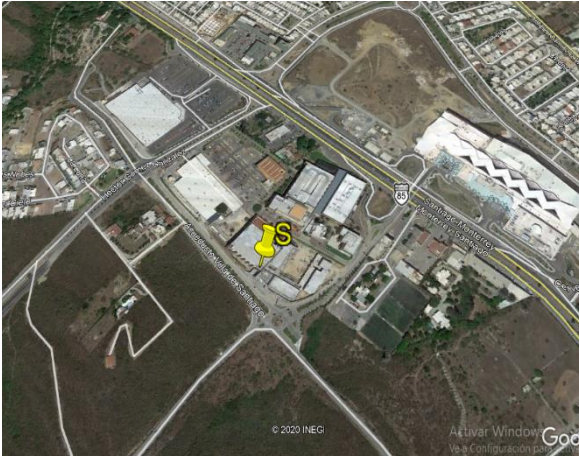
Como se puede observar, las estaciones Pueblo Serena y Universidad, vuelven a aparecer como candidatas a reubicación, tal como se sugirió después de caracterizar su entorno; sin embargo, aparecen estaciones como La Pastora, Juárez y Apodaca, que en la caracterización de entorno se plantearon como candidatas a permanecer en el sitio actual. Esto es consecuencia de que en el análisis espacial (celdas de 1 x 1 km), de la distribución de la población y de las emisiones, las áreas donde se ubican dichas estaciones, no corresponden con los niveles más altos de densidad de población, de volumen de emisiones o de ambas, situación que reduce su nivel de Aptitud de acuerdo con los criterios establecidos en dicho análisis. La

¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ilustra el entorno de todas las estaciones de monitoreo antes referidas.

Las dos etapas descritas hasta ahora constituyeron parte del análisis contextual de la red de monitoreo de $PM_{2.5}$ actualmente en operación y permitieron identificar, de manera semicuantitativa, algunas áreas de oportunidad para mejorar la ubicación de las estaciones actualmente en operación y con ello la representatividad espacial de sus mediciones. Adicionalmente, permitieron generar información que, como se verá más adelante, permitieron apoyar la toma de decisiones respecto a las recomendaciones finales derivadas de este trabajo con respecto a la configuración final que se propone para la red de monitoreo de $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey, la cual toma como base fundamental los resultados de la tercera etapa de este proyecto, que consistió en aplicar la metodología desarrollada por Noll y Mitsutomi (1983), la cual jerarquiza los sitios potenciales para monitoreo atmosférico de acuerdo con el riesgo a la salud de la población. Dicho método es compatible con el objetivo principal de vigilar la calidad el aire y le da soporte a la evaluación del Monitoreo de la Calidad del Aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ del Área Metropolitana de Monterrey, de acuerdo con lo solicitado por el Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente.

Figura 7.1. Entorno inmediato a las estaciones Pueblo Serena, Universidad, La Pastora, Juárez y Apodaca

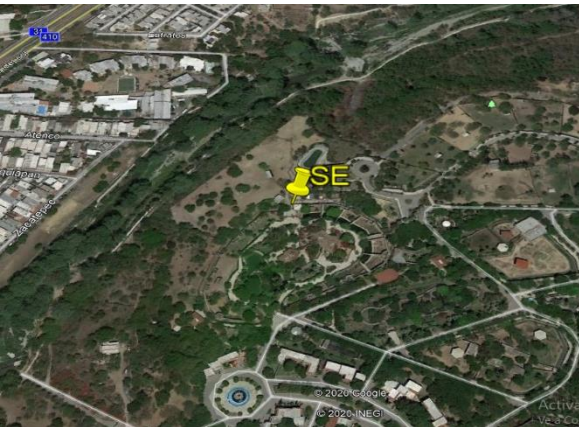
Pueblo Serena (S)



Universidad (N2)



La Pastora (SE)



Juárez (SE2)



Apodaca (NE2)

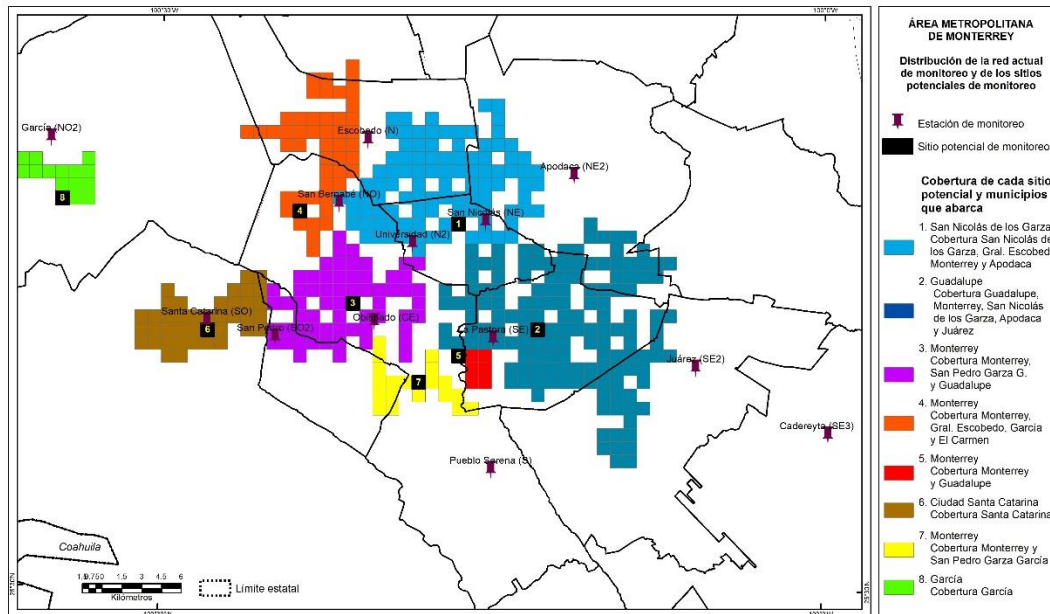


Para determinar la ubicación de sitios de monitoreo, de acuerdo con esta metodología, se utilizaron promedios diarios modelados de partículas suspendidas $PM_{2.5}$, para los periodos del 11 al 17 de enero, del 23 al 29 de mayo y del 20 al 26 de junio, de 2016. Ante las limitaciones computacionales y de información para modelar el año completo, se optó por identificar periodos que fueran representativos de las condiciones meteorológicas más frecuentes que se presentaron en 2016, año que corresponde al del inventario de emisiones más reciente disponible para la región. Dichos periodos se obtuvieron utilizando la técnica estadística multivariada denominada análisis “cluster” (Linares et al., 1986), que ha sido usado en estudios previos de clasificación de periodos meteorológicos. Como valor límite para la formación de conglomerados se usaron los valores guía de la Organización Mundial de la Salud para partículas suspendidas $PM_{2.5}$ como promedio de 24 horas.

De la aplicación de la metodología propuesta por Noll y Mitsutomi, resultó la identificación de un total de 8 sitios potenciales para el monitoreo de partículas suspendidas $PM_{2.5}$. Las áreas potenciales de monitoreo (a nivel de celda de modelación, con un área de 1 km por 1 km) se ubicaron en áreas que pertenecen a los municipios de San Nicolás de los Garza (1), Guadalupe (1), Monterrey (4), Santa Catarina (1) y García (1).

Considerando que en todos estos municipios ya existen estaciones de monitoreo en operación, se hizo la sobre posición de las coberturas que definieron las áreas potenciales de monitoreo, a nivel de celda de modelación, con la cobertura que muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo existentes en la actualidad a fin de evaluar la posibilidad de aprovechar al máximo la infraestructura de monitoreo existente y los datos históricos generados por dichos equipos. El resultado de este ejercicio se muestra en la Figura 7.2.

Figura 7.2. Ubicación de las estaciones de monitoreo actualmente en operación respecto a los sitios potenciales identificados con la metodología de Noll y Mitsutomi1.



Fuente: Elaboración propia INECC

El la figura anterior, se puede apreciar que:

- El punto (celda) potencial de monitoreo identificado como 1 por su mayor contribución a la eficiencia de la red de acuerdo con la metodología de Noll y Mitsutomi, no tiene dentro de su área de cobertura ninguna estación de monitoreo operando en la actualidad, pero en el área delimitada por el conglomerado al que pertenece se puede identificar la presencia de las estaciones de monitoreo San Nicolás (NE) y Universidad (N2).

Partiendo del hecho de que la propia metodología de Noll y Mitsutomi establece que cualquier celda que forma parte de un conglomerado es un sitio potencial para instalar una estación de monitoreo y se asume como representativa del mismo, cualquiera de las dos estaciones podría considerarse como candidatas a representar la calidad del aire de dicho conglomerado. Sin embargo, de ellas, la estación San Nicolás resultó mejor evaluada tanto en la caracterización de su entorno como en la modelación de Aptitud. En la caracterización del entorno, esta estación calificó con una

representatividad espacial potencialmente de tipo vecindario o vecinal para la medición de $PM_{2.5}$, y en la modelación de Aptitud resultó con niveles de Aptitud entre 8 y 9 para los escenarios 2, 3 y 4. Por ello, una alternativa a considerar sería la de mantener la estación en su sitio actual, pero para que ello sea posible, resulta indispensable la poda de los árboles que hay en su proximidad y que ocasionalmente incluso hacen contacto con los equipos de medición. Si tal acción correctiva no es posible, entonces lo más conveniente sería reubicar la estación actual en algún punto dentro de la celda identificada con la metodología de Noll y Mitsutom1.

La estación Universidad, al pertenecer al mismo conglomerado, podría considerarse como un sitio con posibilidades de permanecer operando en donde está y asumirse como representativa de las concentraciones de $PM_{2.5}$ de todo el conglomerado; sin embargo, es oportuno señalar que como resultado de la caracterización del entorno se identificó una representatividad espacial de sus mediciones de tipo Medio debido a la cercanía de un par de vialidades con intenso tráfico vehicular. Por otra parte, el sitio donde se ubica esta estación presenta una Aptitud baja (7) para el monitoreo de acuerdo con los resultados de la modelación de Aptitud. Por ello, no se recomienda la reubicación de esta estación dentro de este conglomerado.

- La celda potencial de monitoreo identificada como 2, en el municipio de Guadalupe, tampoco tiene una estación de monitoreo operando actualmente en su interior; sin embargo, en una celda del mismo conglomerado, casi 3 km al Suroeste de dicho sitio, se encuentra la estación de monitoreo La Pastora (SE).

La estación La Pastora en la caracterización del entorno calificó con una representatividad espacial de tipo vecinal para la medición de $PM_{2.5}$, sin embargo, en la modelación de Aptitud resultó con niveles muy bajos que oscilaron entre 4 y 7 para los escenarios 2, 3 y 4. Especialmente, para el escenario 2 (donde se ponderan por igual a la población y las emisiones) el nivel de Aptitud es de 5, es decir, muy lejana al máximo nivel de Aptitud que

es de 10. Ante esta circunstancia y en aras de caracterizar mejor la exposición de la población, se sugiere reubicar la estación en algún punto dentro de la celda de modelación identificada por la metodología de Noll y Mitsutom1.

- El sitio potencial de monitoreo identificado como 3, tiene en el interior del área delimitada por el conglomerado al que pertenece a la estación San Pedro (SO₂), la cual calificó con una representatividad espacial de tipo vecindario para la medición de PM_{2.5}, y en la modelación de Aptitud resultó con niveles de Aptitud entre 8 y 9 para los escenarios 2, 3 y 4. Por ello, se sugiere mantener la estación en su sitio actual y asumirla como representativa de la calidad del aire del conglomerado.
- En el conglomerado donde se ubica el sitio potencial de monitoreo identificado como 4, en la parte norte del municipio de Monterrey, no se identifica ninguna estación de monitoreo actualmente en operación, aunque si en su entorno inmediato. Aproximadamente 3 km al Este de la celda identifica como el sitio potencial de monitoreo se ubica la estación San Bernabé, la cual no pertenece a ningún otro conglomerado, lo que la haría susceptible de reubicación en algún punto dentro de la celda de modelación y de esta manera incrementar la representatividad de sus mediciones respecto a la caracterización del riesgo a la salud de la población.

La estación San Bernabé se ubica actualmente en una zona identificada con muy buen nivel de Aptitud para el monitoreo de la calidad del aire, ya que en el Escenario 2 (se pondera con el mismo peso a la población y a las emisiones), Escenario 3 (se pondera con mayor peso a las emisiones) y Escenario 4 (se pondera con mayor peso a la población), alcanzó niveles de Aptitud de 9 y 10, es decir de los más altos. Sin embargo, en la caracterización de su entorno cercano se identificó una representatividad espacial de sus mediciones de PM_{2.5} tipo Medio, debido a la presencia de grandes áreas de terracería que pueden impactar la medición de material particulado por efecto de la resuspensión de polvo, situación por la que se recomendó su reubicación. En este contexto, la reubicación de la estación

San Bernabé en algún punto dentro de la celda de modelación identificada como sitio potencial de monitoreo con la metodología de Noll y Mitsutomi permitiría atender esta recomendación sin tener que alejarse demasiado de su sitio actual y manteniendo el valor de la información histórica generada hasta ahora.

- En el conglomerado donde se ubica el sitio potencial de monitoreo identificado como 5, en la parte central del municipio de Monterrey, no se identifica ninguna estación de monitoreo actualmente en operación. Una alternativa para colocar un equipo de monitoreo en este punto podría ser la reubicación de alguna de las estaciones que no se identificaron como parte de alguno de los conglomerados definidos en este trabajo o bien instalar un equipo nuevo en caso de que las estaciones antes referidas se deseen mantener en operación en sus sitios actuales.

En el caso de optar por reubicar una estación de monitoreo existente, una alternativa podría ser la Estación Escobedo, considerando que la calidad del aire en su ubicación actual podría estar siendo caracterizada parcialmente por los sitios de monitoreo propuestos identificados como 1 y 4. Es posible, sin embargo, que se pueda pensar en mantener dicha estación en su ubicación actual considerando el hecho de que al no pertenecer a ninguno de los conglomerados definidos en este trabajo podría estar caracterizando la calidad del aire de un sitio que no es cubierto por ninguno de los puntos de monitoreo propuesto, aunque no se debe perder de vista que teóricamente este sitio representa un menor riesgo a la salud de la población que el identificado en el sitio potencial de monitoreo identificado como 5.

- En el conglomerado donde se ubica el sitio potencial de monitoreo identificado como 6, en el municipio de Santa Catarina, se encuentra en operación la estación de monitoreo Santa Catarina (SO). De hecho, la ubicación de esta estación está exactamente al interior de la celda (punto) potencial de monitoreo identificado a través de la metodología de Noll y Mitsutomi. Esta situación aunada al hecho de que la estación se encuentra

en un terreno con buena Aptitud (nivel 8, en los escenarios 2, 3 y 4) para el monitoreo de la calidad del aire y que su entorno le confiere una escala espacial de representatividad de tipo Vecinal para sus mediciones de PM_{2.5}, lo recomendable es mantenerla operando en el mismo sitio.

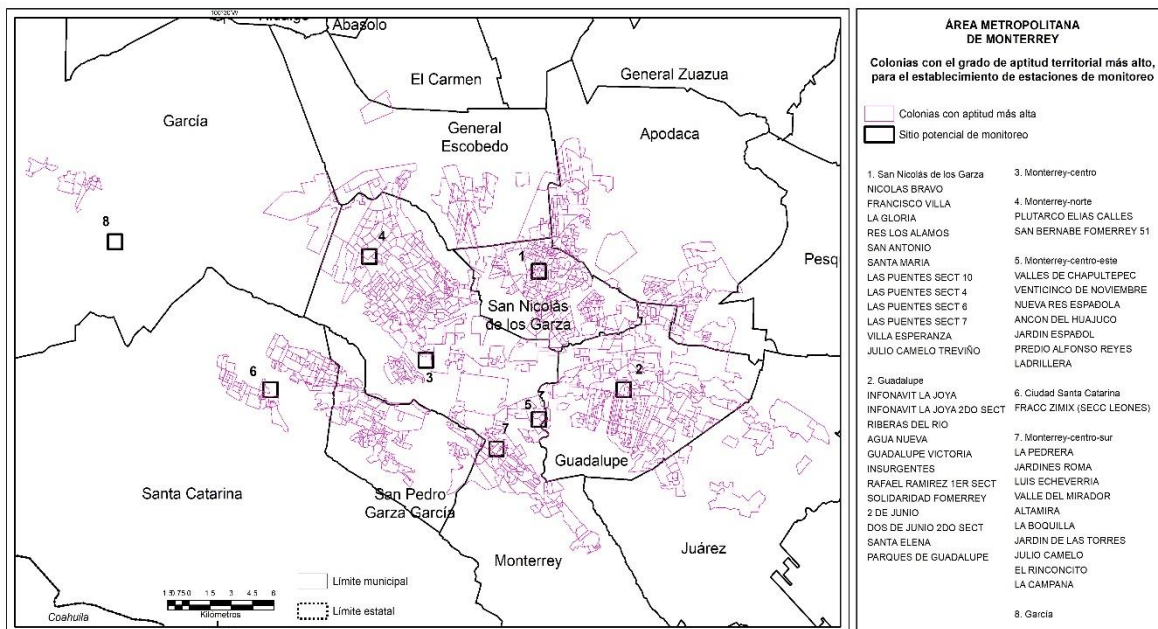
- En el conglomerado donde se ubica el sitio potencial de monitoreo identificado como 7, en la parte centro-oeste del municipio de Monterrey, no se identificó ninguna estación de monitoreo en operación; sin embargo, muy próxima al límite norte del mismo se encuentra la estación de monitoreo Obispado (CE), la cual no pertenece a ningún conglomerado, lo que la haría una candidata natural a reubicación al interior del conglomerado en cuestión dada su cercanía. La estación Obispado se ubica a aproximadamente 5 km al Noroeste del punto (celda) potencial de monitoreo identificado a través de la metodología de Noll y Mitsutom1. La estación de monitoreo Obispado en su ubicación actual tiene una escala espacial de representatividad de tipo Vecinal; sin embargo, sus niveles de Aptitud para el monitoreo de oscilan entre 6 y 8, dependiendo del escenario evaluado, por lo que su reubicación en el sitio potencial de monitoreo identificado puede incrementar tanto su Aptitud como su capacidad para caracterizar de manera más adecuada los niveles de exposición de la población a los niveles de contaminación atmosférica y los riesgos asociados.
- En el conglomerado donde se ubica el sitio potencial de monitoreo identificado como 8, en el municipio de García, no se identificó ninguna estación de monitoreo operando en la actualidad. Sin embargo, 4 km al norte del punto (celda) potencial de monitoreo se encuentra la estación de monitoreo García (NO₂).

La estación García se ubica en una zona con un nivel de Aptitud muy bueno (9 en los escenarios 2, 3 y 4); sin embargo, la representatividad espacial de sus mediciones es catalogada como Media debido a que en su entorno inmediato (en un radio de 500 metros) existen extensas áreas desprovistas de vegetación, así como una vialidad (Heberto Castillo González) que por su ubicación y aforo, se estima tienen impacto directo en las mediciones de

calidad del aire que se realizan en el sitio, especialmente en cuanto a partículas suspendidas. Con estas consideraciones y tomando en cuenta que la recomendación de la EPA es que una estación orientada a caracterizar la exposición de la población debe tener un nivel de representatividad espacial de tipo Vecinal, se sugiere la reubicación de la estación García a algún sitio dentro del punto (celda) potencial de modelación identificado a través de la metodología de Noll y Mitsutom1.

Ante la eventual ejecución de las acciones de reubicación de las estaciones antes señaladas para lograr una mejor representatividad de las mediciones de calidad del aire por partículas $PM_{2.5}$ en el Área Metropolitana de Monterrey, fue necesario identificar con mayor precisión la probable ubicación de dichas estaciones al interior de los puntos (celdas) potenciales de monitoreo identificadas en este trabajo. Para ello, se usaron los resultados de la modelación de Aptitud. Se sobrepuso la cobertura de las celdas o puntos potenciales de monitoreo con la cobertura de las áreas de mayor aptitud (9 y 10), que fueron comunes a los Escenarios 2, 3 y 4, para instalar las estaciones de monitoreo, identificándose de esta manera las colonias más aptas para acoger una estación de monitoreo de calidad del aire dentro de cada celda (Figura 7.3). En el Anexo 4 se puede consultar la información detallada sobre las colonias con Aptitud 9 y 10 que fueron comunes en los escenarios 2, 3 y 4 evaluados, así como el listado específico de colonias con los niveles de Aptitud más altos identificados para cada Escenario evaluado de forma independiente.

Figura 7.3. Colonias más aptas para el monitoreo de la calidad del aire dentro de cada celda o punto potencial de monitoreo.

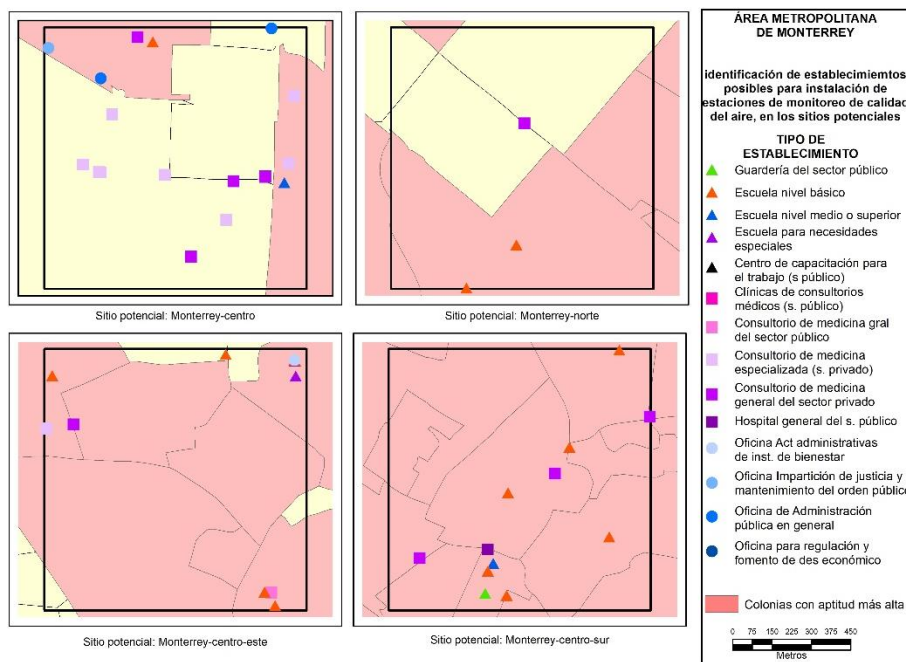


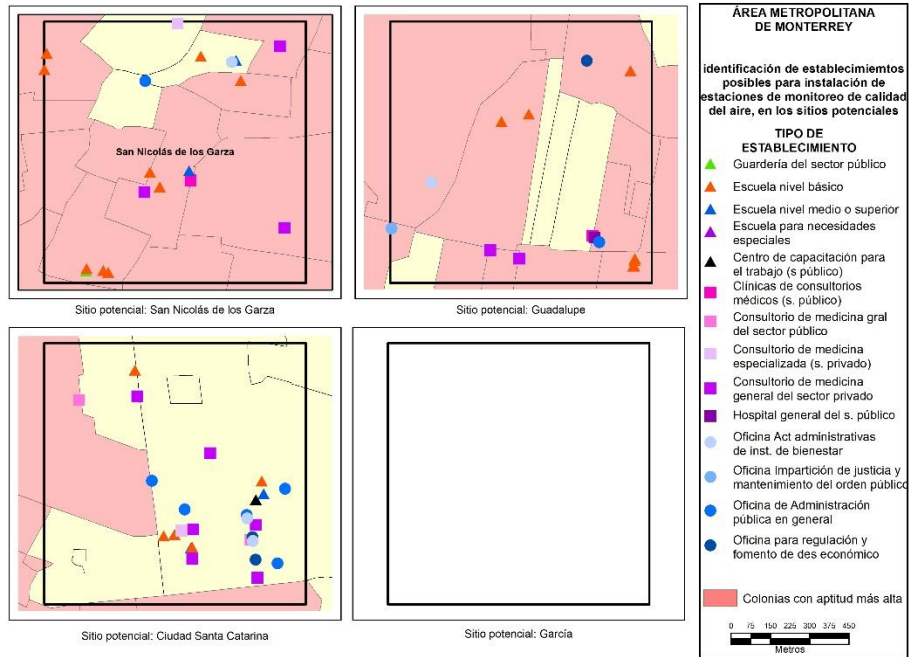
Fuente: Elaboración propia INECC

Enseguida se sobrepuso una cobertura más, que incluyó información relativa a instalaciones públicas para identificar, dentro de las áreas más aptas en cada celda potencial de monitoreo, aquellos edificios donde pudieran instalarse las estaciones. Las instalaciones públicas consideradas en el análisis fueron fundamentalmente Escuelas, Hospitales y Oficinas de Administración Pública, las cuales son recomendadas por la EPA debido a razones como la accesibilidad, la seguridad y la comunicación (EPA, 2017). De esta actividad se obtuvo un listado relativamente numeroso de instalaciones potenciales, las cuales se ilustran en la Figura 7.4. La información detallada de todos los establecimientos identificados por celda de monitoreo se pueden consultar en el Anexo 5. El entorno de estos establecimientos fue analizado con la ayuda de imágenes de satélite disponibles en Google Earth en septiembre de 2020, para finalmente elegir aquellas, que resultado de dicho análisis, parecen las mejores opciones a fin de priorizar la inspección visual en campo de cada alternativa. Los resultados de esta revisión, para cada celda potencial de

monitoreo, se muestran en la Tabla 7.1. En la cual se incluyen alternativas de ubicación para los 8 sitios potenciales de monitoreo de PM_{2.5}, incluso para aquellos sitios donde se propone mantener en operación alguna de las estaciones de monitoreo vigentes. En estos casos particulares se incluyen alternativas de reubicación a considerar sólo en el caso de que el re-acondicionamiento del entorno no sea posible.

Figura 7.4. Instalaciones públicas identificadas al interior de cada sitio (celda) potencial de monitoreo





Fuente: Elaboración propia INECC

Tabla 7.1. Edificios públicos propuestos para la instalación de las estaciones de monitoreo de PM_{2.5} al interior de cada celda potencial de modelación en el Área Metropolitana de Monterrey.

Sitio / celda potencial	Municipio	Sitios potenciales de instalación	Coordenadas Latitud / Longitud	
1	San Nicolás de los Garza	Se sugiere mantener la estación San Nicolás en su sitio actual de operación siempre y cuando sea posible atender las recomendaciones de mejora de su entorno. En caso contrario, se sugiere considerar las siguientes opciones <ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Federal Amado Nervo • Escuela Primaria Ford No 36 Belisario Domínguez 	25°44'43.86" 25°45'09.13"	100°16'43.23" 100°16'25.94"
2	Guadalupe ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de salud 20 de noviembre • Escuela Manuel L. Barragán 	25°40'30.77" 25°41'06.78"	100° 13'35.50" 100° 13'17.48"
3	Monterrey – centro	Se sugiere mantener la estación San Pedro en su sitio actual de operación	No Aplica	No Aplica
4	Monterrey – Norte ²	<ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Melchor Ocampo • Escuela primaria Sarita Gutiérrez Villagómez 	25° 45' 16.32" 25° 45' 06.60"	100° 23'45.89" 100° 23' 14.59"
5	Monterrey – Centro-Este	<ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Ford 88 Alfredi Bonfil • Escuela Sergio Armando López de Lara Méndez 	25°39'46.48" 25°39' 51.59"	100°16'47.62" 100°10'12.82"
6	Santa Catarina	Se sugiere mantener la estación Santa Carina en su sitio actual de operación	No Aplica	No Aplica
7	Monterrey – Centro-sur	<ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Turno Vespertino Jaima Nunco • Jardín de Niños Jesús Saavedra Sánchez • DIF Estancia Infantil Rosario Garza Sada 	25°38'45.31" 25°38'27.23" 25°38'14.52"	100°18'03.80" 100°18'19.27" 100°18'21.94"
8	García ³	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de Salud El Fraile • Escuela primaria Hildebrando Garza Sepúlveda 	25°48' 04.53" 25°47' 09.98"	100°35'36.02" 100° 35'05.25"

Fuente: Elaboración propia INECC

¹ En el caso de la celda potencial de monitoreo 2, en el municipio de Guadalupe, ninguna de las instalaciones identificadas a través del DENUÉ parecen idóneas para el monitoreo de la calidad del aire, debido a que la mayoría de ellas se encuentran en la proximidad de una vialidad de 8 carriles (4 por sentido), lo que hace suponer un alto flujo vehicular y un alto riesgo de que las emisiones vehiculares impacten de forma directa las mediciones de cualquier estación de monitoreo colocada en las instalaciones identificadas. Las opciones incluidas en esta Tabla corresponden a instalaciones que se ubican en la celda contigua, al oeste del punto potencial de monitoreo, y forma parte del mismo conglomerado.

² De las instalaciones identificadas al interior de esta celda de modelación sólo se identificó una con potencial para que se instale una estación de monitoreo en su interior, por ello, la segunda alternativa propuesta corresponde a una celda que se ubica al sureste de la celda potencial de modelación. Ambas celdas hacen contacto por uno de sus vértices.

³ En el caso de la celda potencial de monitoreo 8, en el municipio de García, no se identificó ningún establecimiento potencial para instalar un equipo de monitoreo. Las opciones incluidas en esta Tabla corresponden a instalaciones que se ubican en otras celdas que forman parte del mismo conglomerado.

De lo antes descrito se desprende que, de las estaciones que actualmente conforman el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey, Pueblo Serena (S), Apodaca (NE2), Escobedo (N), Cadereyta (SE3) y Juárez (SE2), no se ubicaron en las áreas cubiertas por los diferentes conglomerados identificados con la metodología empleada, ni se hizo sugerencia específica de reubicación. El hecho de no aparecer al interior de algunos de los conglomerados definidos por la metodología de Noll y Mitsutomi, no significa necesariamente que se deban eliminar o reubicar, simplemente debe entenderse que en su ubicación actual las mediciones que realizan de partículas $PM_{2.5}$ no son representativas de las áreas donde se presentan los mayores riesgos a la salud de la población; sin embargo, contribuyen a la caracterización de la calidad del aire de la región, incluyendo sitios con riesgos potenciales a la salud menos significativos a los caracterizados por los sitios identificados en este trabajo.

Finalmente, es importante destacar algunas consideraciones relevantes sobre la metodología empleada en este trabajo que se deben considerar en futuros trabajos de esta naturaleza, tales como:

Los datos de población empleados corresponden al año 2010 e idealmente debería utilizarse información más reciente que garantice una representación más real sobre la cantidad de población potencialmente expuesta a altos niveles de contaminación. El uso de esta información, sin embargo, obedeció a que es la única disponible que está desagregada a nivel de AGEB y ello permite una distribución espacial más certera que la que ofrece el dato de población más reciente pero desagregada a nivel de municipio.

Otra consideración importante con respecto a la población es el hecho de asumir que ésta permanece estática a través del día. Las personas no se encuentran las 24 horas del día en sus casas, que son los puntos que se toman en cuenta para determinar la distribución de la población por el INEGI, sino que se mueven entre diferentes celdas durante el día. Las personas pueden moverse de zonas habitacionales a laborales/escolares/comerciales durante el día y de regreso a las habitacionales durante la noche, con lo que se tendría una variación hora por hora

de la cantidad de habitantes que se encuentran en cada celda. El evaluar la variación de población hora por hora en cada una de las celdas en que se dividió el área de estudio rebasa los objetivos de este trabajo, pero puede resultar de interés analizar escenarios alternos variando la cantidad de población durante el día/noche en algunas celdas donde se tiene alta variabilidad en concentración de personas para estos periodos, tales como la zona universitaria, el centro histórico de la ciudad y las zonas con alta actividad industrial. En este sentido, la información detallada sobre la caracterización resulta fundamental.

El inventario de emisiones es un elemento fundamental tanto en la modelación de Aptitud como en la aplicación de la metodología desarrollada por Noll y Mitsutomi para identificar sitios de monitoreo con base en el riesgo a la salud, por lo que se recomienda trabajar en el desarrollo de un inventario de emisiones regional de alta resolución que reduzca la incertidumbre asociada con los volúmenes y patrones espaciales y temporales de emisiones contaminantes, lo cual incluye la validación de la ubicación geográfica de las fuentes fijas de emisión. Es muy común, en la actualidad, que los datos de ubicación de las fuentes puntuales se reporten de manera incorrecta, con los consecuentes efectos en la evaluación de la calidad del aire.

La importancia relativa que tienen las vialidades, en términos de su ubicación, en el análisis de Aptitud no contempla las diferencias que existen entre ellas, por ejemplo, vías primarias, secundarias y alimentadoras. Igualmente, la información disponible en INEGI está muy fragmentada y eso incorpora incertidumbre en la estimación de las distancias y de su importancia relativa en el análisis. Esta situación, sin embargo, trató de compensarse asignando una ponderación poco significativa en la modelación de Aptitud, pero resultaría más valioso para el análisis contar con información más robusta.

La modelación de la calidad del aire es un elemento de la mayor relevancia en la metodología empleada e idealmente debería considerar la estimación de la calidad del aire de todo el año, sin embargo, las limitaciones de cómputo y tiempo para la

realización del proyecto impusieron algunas restricciones que deberían ser consideradas en futuros trabajos.

A pesar de las limitaciones antes descritas, los resultados obtenidos en este trabajo aportan elementos valiosos para apoyar la toma de decisiones respecto a una posible reconfiguración del actual Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey a fin de mejorar su desempeño para caracterizar el riesgo a la salud de la población.

8. Conclusiones y recomendaciones

A partir del análisis de los resultados obtenidos en este trabajo se puede concluir que, en general, el Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey tiene una buena cobertura espacial y en cuanto al número de estaciones se refiere; sin embargo, presenta áreas de oportunidad para mejorar la caracterización de los riesgos a la salud de la población por exposición a altos niveles de concentración de partículas suspendidas $PM_{2.5}$. Estas áreas de oportunidad incluyen acciones tanto de posible reubicación de estaciones de monitoreo como de reacondicionamiento de su entorno.

La aplicación de la metodología de Noll y Mitsutomi para identificar sitios de monitoreo con base en el riesgo a la salud de la población, identificó la necesidad de contar con 8 estaciones de monitoreo para caracterizar la calidad del aire por partículas suspendidas $PM_{2.5}$ en los sitios del área metropolitana donde se presume se presentan los mayores riesgos a la salud, tanto por la densidad de población como por los niveles de concentración de este contaminante. Estas estaciones se ubican en los municipios de Monterrey (4 estaciones), San Nicolás de los Garza (1), Guadalupe (1), Santa Catarina (1) y García (1).

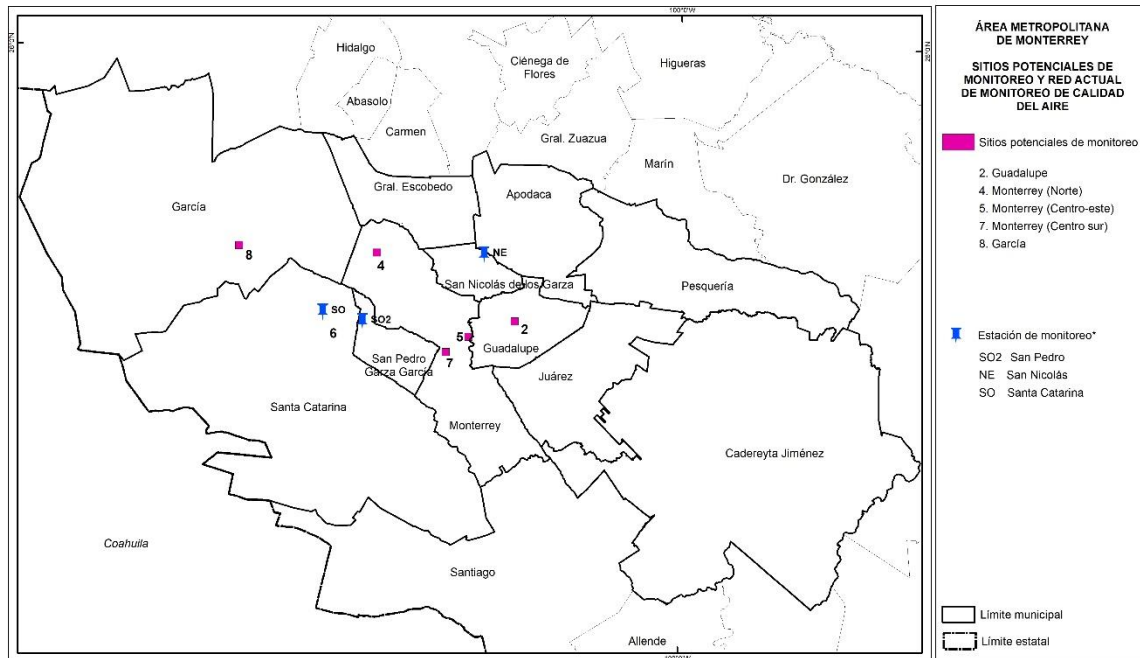
La ubicación específica de dichas estaciones indica que las necesidades de monitoreo determinadas en este trabajo podrían atenderse manteniendo en operación en su ubicación actual 3 estaciones, así como con la reubicación de otras 5 estaciones que operan en la actualidad. Para ello, se plantean propuestas concretas, que en caso de ser avaladas por las autoridades de la Secretaría de Desarrollo Sustentable de Nuevo León, abriría la posibilidad de que el SMCA del AMM quede reconfigurado como se plantea en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 8.1. Propuesta de ubicación/reubicación de estaciones de monitoreo de calidad del aire en el Área Metropolitana de Monterrey para mejorar la caracterización de los riesgos a la salud por exposición a partículas suspendidas PM_{2.5}.

Sitio / celda potencial	Municipio	Estación de monitoreo que se propone mantener y/o reubicar	Sitios potenciales de reubicación	Coordenadas Latitud / Longitud	
1	San Nicolás de los Garza	Se sugiere mantener la estación San Nicolás en su sitio actual de operación siempre y cuando sea posible atender las recomendaciones de mejora de su entorno	De no ser posible el reacondicionamiento del entorno se sugiere considerar las siguientes alternativas: <ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Federal Amado Nervo • Escuela Primaria Ford No 36 Belisario Domínguez 	25°44'43.86" 25°45'09.13"	100°16'43.23" 100°16'25.94"
2	Guadalupe	Se sugiere reubicar la estación La Pastora	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de salud 20 de noviembre • Escuela Manuel L. Barragán 	25°40'30.77" 25°41'06.78"	100°13'35.50" 100°13'17.48"
3	Monterrey	Se sugiere mantener la estación San Pedro en su sitio actual de operación	No Aplica	No Aplica	No Aplica
4	Monterrey	Se sugiere reubicar la estación San Bernabé	<ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Melchor Ocampo • Escuela primaria Sarita Gutiérrez Villagómez 	25°45' 16.32" 25°45' 06.60"	100° 23'45.89" 100° 23' 14.59"
5	Monterrey	Se sugiere reubicar la estación Escobedo	<ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Ford 88 Alfredi Bonfil • Escuela Sergio Armando López de Lara Méndez 	25°39'46.48" 25°39' 51.59"	100°16'47.62" 100°10'12.82"
6	Santa Catarina	Se sugiere mantener la estación Santa Carina en su sitio actual de operación	No Aplica	No Aplica	No Aplica
7	Monterrey	Se sugiere reubicar la estación Obispado	<ul style="list-style-type: none"> • Escuela Primaria Turno Vespertino Jaima Nunco • Jardín de Niños Jesús Saavedra Sánchez • DIF Estancia Infantil Rosario Garza Sada 	25°38'45.31" 25°38'27.23" 25°38'14.52"	100°18'03.80" 100°18'19.27" 100°18'21.94"
8	García	Se sugiere reubicar la estación García	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de Salud El Fraile • Escuela primaria Hildebrando Garza Sepúlveda 	25°48' 04.53" 25°47' 09.98"	100°35'36.02" 100° 35'05.25"

Fuente: Elaboración propia INECC

Figura 8.1. Propuesta de configuración de la red de monitoreo de partículas suspendidas PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Monterrey.



Fuente: Elaboración propia INECC.

En la Tabla 8.1 y en la Figura 8.1, no se incluye a las estaciones Pueblo Serena (S), Apodaca (NE2), Cadereyta (SE3), Juárez (SE2) y Universidad (N2), debido a que de acuerdo con la metodología aplicada no se encuentran en áreas donde se presentan los mayores riesgos a la salud de la población, ni fueron consideradas como una posibilidad de reubicación para cubrir el monitoreo de la calidad del aire en dichos sitios. Esto no significa que dichas estaciones deban eliminarse del actual sistema de monitoreo. Por el contrario, lo recomendable es que se mantengan en operación, atendiendo a las recomendaciones de reacondicionamiento o mejora de su entorno inmediato, y apoyen la caracterización de los riesgos a la salud en áreas donde, de acuerdo con la metodología empleada, actualmente dichos riesgos son menos significativos.

Las estaciones Apodaca, Juárez, Cadereyta y Pueblo Serena se ubican en la periferia de zonas identificadas con mayores riesgos a la salud, sin embargo, pueden aportar elementos de información valiosos para caracterizar las tendencias de las concentraciones ambientales de partículas, así como de los riesgos que pueden representar en el futuro, en la medida que se incremente la densidad poblacional en esas regiones. Es importante señalar que en estas estaciones, salvo en Pueblo Serena, se registran ocasionalmente concentraciones de $PM_{2.5}$ que superan los límites normados para protección de la salud. Si esta consideración es validada por las autoridades de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado, sería conveniente tener en mente las siguientes recomendaciones específicas para cada estación de monitoreo (Tabla 8.2).

Tabla 8.2. Recomendaciones a considerar para mantener en operación las estaciones Apodaca, Juárez, Pueblo Serena, Cadereyta y Universidad.

Estación	Recomendación
Apodaca	<p>Aplicar modelos de dispersión para descartar impacto, sobre la estación de monitoreo, de la pluma de emisión de las fuentes de emisión cercanas pertenecientes a los sectores de Pinturas y tintas y Minerales no metálicos, ubicada a menos de 1 km de distancia, en dirección Sureste, de la estación.</p> <p>Si se descarta el impacto de dicha fuente, la estación en su sitio actual tiene una escala espacial de representatividad vecinal y es apropiada para caracterizar la calidad del aire a la que está expuesta la población.</p>
Juárez	<p>Se sugiere llevar a cabo los estudios pertinentes a fin de validar, o en su caso ratificar, la conclusión a la que se llegó en este trabajo en el sentido de que la estación de servicio ubica a aproximadamente 100 m al Oeste de la estación de monitoreo no tiene un impacto en las mediciones que se hacen en el sitio con respecto a ozono y material particulado, especialmente en su fracción $PM_{2.5}$.</p>
Pueblo Serena	<p>La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, establece que una escala espacial de representatividad media, para PM_{10}, $PM_{2.5}$ y CO, es característica de mediciones hechas en estacionamientos y calles alimentadoras asociadas con centros comerciales, estadios y edificios de oficinas.</p> <p>Esta condición se cumple en el caso de esta estación, por lo que si es del interés de la autoridad ambiental que esta estación esté orientada a la población más que a una fuente, se sugiere su reubicación.</p> <p>Dado que las características orográficas del sitio y la escasez de fuentes de emisión relevantes en la zona ofrecen la posibilidad de que esta estación, reubicada en un sitio cercano al actual, pero sin ser afectada por una fuente de emisión particular, pueda ser empleada también para evaluar el transporte de contaminantes generados por las fuentes que se</p>

	ubican a favor del viento que corre por el canal formado por la Sierra Madre Oriental y el Cerro de la Silla.
Cadereyta	Ninguna
Universidad	<p>Actualmente esta estación tiene una escala espacial de representatividad tipo Media (100 m a 0.5 km) para la mayoría de los contaminantes. Esta escala se considera apropiada para realizar muestreos orientados a fuentes específicas y se emplean para determinar la contribución de dichas fuentes a la calidad del aire en su proximidad. Este tipo de mediciones se consideran apropiadas para la evaluación de efectos de corto plazo en la salud pública.</p> <p>La cercanía de grandes vialidades con aforos relevantes impacta de forma directa las mediciones de contaminantes como partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}), CO y NO_x, e indirectamente las lecturas de O₃ (titulación con NO_x).</p> <p>Otras fuentes que potencialmente pueden estar impactando las lecturas de calidad del aire en este sitio se ubican a 455 metros al Este y aproximadamente a 1.2 km al Sureste de la estación.</p> <p>Si es del interés de la autoridad ambiental que esta estación esté orientada a la población más que a una fuente, se sugiere su reubicación para minimizar el impacto de las emisiones vehiculares sobre las mediciones de calidad del aire en este sitio.</p>

Fuente: Elaboración propia INECC

Finalmente, resulta oportuno señalar que dado que el principio con el que se identificaron los sitios más aptos para ubicar y/o reubicar las estaciones de monitoreo para fortalecer el Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Monterrey, fue el riesgo a la salud, dichos sitios no sólo son de utilidad para caracterizar los niveles de exposición de la población sino también para otros usos, tales como:

- Proveer información de manera oportuna a la población sobre los niveles de contaminación en la entidad.
- Evaluar el cumplimiento de la normatividad mexicana en la materia.
- Activar procedimientos de control de emergencia para prevenir y/o controlar episodios de alta contaminación.
- Observar tendencias de contaminación en la región.

- Proveer datos para apoyar trabajos de investigación en materia de calidad del aire.

Para concluir, resulta conveniente destacar que parte fundamental del éxito operativo de un SMCA a lo largo del tiempo tiene relación directa con la observación de las condiciones mínimas establecidas en la Norma Oficial Mexicana “NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire”, y de las cuales a continuación se destacan algunas de las más importantes a fin que sean consideradas para mejorar la gestión operativa del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de Monterrey.

a) El área responsable del sistema de monitoreo de la calidad del aire deberá realizar cuando menos las siguientes actividades:

- Soporte técnico, mantenimiento y calibración de equipos;
- Control y aseguramiento de la calidad;
- Análisis estadístico, interpretación de datos de la calidad del aire y meteorología; y,
- Comunicación social, en coordinación con el área responsable de ello, según corresponda en los términos de las leyes de transparencia y de acceso a la información pública.

b) Se deberá contar con un procedimiento de evaluación de rutina de las estaciones de monitoreo y registrará en bitácora o formatos preestablecidos los resultados de dicha evaluación, la cual contendrá, al menos, la verificación de:

- El estado, exterior e interior, de la estación;
- El estado físico de la toma de muestra y de la torre;
- Que no haya obstáculos que impidan el libre paso de la corriente de aire;
- El estado general del interior de la estación, en particular del funcionamiento del equipo de aire acondicionado;
- La operación de los equipos, según las especificaciones del fabricante;
- El registro, almacenamiento y transmisión de datos; y

- La disponibilidad de consumibles que se encuentran en la estación (cilindros de gases de calibración, filtros, purificadores, limpiadores de aire, entre otros).
- c) Mantenimiento: Los instrumentos de medición y equipos de soporte del sistema de monitoreo de calidad del aire recibirán mantenimiento, de acuerdo a los procedimientos establecidos por el mismo sistema. Los responsables del muestreo y monitoreo de la calidad del aire desarrollarán un programa de mantenimiento preventivo para cumplir con el objetivo del sistema. Este programa contendrá por lo menos lo siguiente:
- Frecuencia de mantenimiento de estaciones;
 - Frecuencia de mantenimiento de instrumentos de medición;
 - Frecuencia de mantenimiento de equipos de soporte;
 - Programas de sustitución de instrumentos de medición y equipos de soporte; y
 - Lugares y responsables de mantenimiento de instrumentos de medición y equipos de soporte.

El programa de mantenimiento preventivo deberá contemplar las instalaciones centrales del sistema monitoreo de la calidad del aire y las estaciones de muestreo y monitoreo, con sus instrumentos de medición (analizadores, muestreadores, equipo meteorológico y equipo de calibración) y sus equipos de soporte (tomas de muestra, múltiples de muestra, extractores de aire, fuentes de energía, sistemas de iluminación, de control de temperatura, humedad relativa, entre otros).

Todas las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo que se lleven a cabo deberán ser registradas en una bitácora y se anexarán al expediente del instrumento de medición y/o equipo de soporte, según corresponda. El expediente del instrumento de medición y/o equipo contendrá al menos: nombre, marca, modelo, número de serie, especificaciones técnicas, lista de refacciones y consumibles, y registros de calibración, de cambio de ubicación, de modificaciones, entre otros.

d) Calibración. Los instrumentos de medición se calibrarán usando métodos de referencia, de acuerdo a la normatividad vigente (normas oficiales mexicanas ambientales) o a las especificaciones del fabricante. Para la calibración de los instrumentos de medición, se utilizarán gases de calibración y estándares de transferencia, con trazabilidad a materiales de referencia y patrones nacionales mantenidos en el Centro Nacional de Metrología, según aplique, acorde a principios metrológicos que garanticen la comparabilidad de las mediciones a través de la trazabilidad de las medidas.

En este contexto y basados en la experiencia del INECC apoyando el fortalecimiento de diversos sistemas de monitoreo de calidad del aire en el país, se recomienda, en términos de personal, que para atender los aspectos operativos se considere la necesidad de contar con un técnico en monitoreo por cada tres estaciones que se encuentren en un radio de hasta 30 km. Este número podrá variar en función de las distancias inter-estaciones y también respecto al centro de control. En la actualidad los elementos tecnológicos están apoyando de forma positiva el uso de los recursos, ya que a través del internet es posible conectarse de forma remota a las computadoras de las estaciones de monitoreo y revisar el estado operativo de los equipos de medición sin necesidad de trasladarse a éstas, no obstante, es claro que la revisión remota no sustituye o elimina la necesidad de la supervisión estrecha del funcionamiento de las estaciones, ya que como se mencionó, hay elementos internos y externos que no pueden ser “vistos” de forma remota, como rupturas, obstrucciones, etc.

Finalmente, algunos aspectos adicionales, no contemplados en la Norma Oficial Mexicana “NOM-156-SEMARNAT-2012”, pero que deben ser considerados para mantener el éxito operativo de un SMCA a lo largo del tiempo, tienen que ver con la evaluación periódica del diseño del sistema de monitoreo de la calidad del aire para garantizar que siga cumpliendo con los objetivos con los que fue originalmente implementada y con sus costos operativos.

En términos de la evaluación periódica del diseño de un sistema de monitoreo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos sugiere que ésta se lleve a cabo cada 5 años, periodo en el cual pueden presentarse una serie de factores que contribuyen a replantear los objetivos del monitoreo en un lugar determinado, por ejemplo: cambios en la calidad del aire, modificaciones en el tamaño, distribución y/o estructura de la población, modificaciones en los patrones de emisión de contaminantes provenientes de las diferentes fuentes, en la aparición o actualización de nuevas regulaciones ambientales, o el mejor entendimiento de la dinámica atmosférica.

Para llevar a cabo la evaluación antes referida se sugiere, realizar los estudios necesarios que incluyan el análisis elementos tales como:

- Inventario de emisiones a la atmósfera;
- Modelos de calidad del aire;
- Información meteorológica de la región;
- Características geográficas locales;
- Información fisiográfica urbana;
- Localización de asentamientos humanos, y
- Estudios preliminares de calidad del aire.

En todo este proceso, resultará de gran valor documentar cualquier modificación al diseño del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire del AMM, ya sea que se trate de la adición, reubicación o eliminación de una o un conjunto de estaciones de monitoreo. La documentación deberá incluir información relativa a los motivos del cambio, criterios empleados para determinar la modificación y objetivo que se pretende cumplir.

En términos de los costos operativos de un sistema de monitoreo de calidad del aire es oportuno destacar que, de acuerdo a la experiencia de algunos sistemas de monitoreo se señala que hasta el 10% de los gastos de adquisición de una estación de monitoreo corresponderán a los gastos anuales de su operación y mantenimiento, siempre y cuando ésta haya sido operada en condiciones normales,

en caso contrario, si los equipos se han deteriorado por la falta de reemplazo regular de refacciones y consumibles, el gasto a ser asignado será mayor en función del daño que presenten.

El costo actual de una estación de monitoreo que incluye, entre otras cosas: caseta con mobiliario, aire acondicionado y calefacción, analizadores de ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monitor de PM₁₀ y PM_{2.5}, sistema de adquisición de datos, calibrador, manifold de toma de muestra, cilindro de mezcla de gases y kits de mantenimiento para un año, es de aproximadamente 4.8 millones de pesos. Esto significaría entonces, que el costo anual asociado a su operación y mantenimiento superará los \$400,000.00 pesos. Estos factores (costo de la estación y costos operativos) deben ser considerados al momento de establecer la hoja de ruta a seguir para instalar y operar adecuadamente nuevas estaciones de monitoreo que se incorporan a un sistema de monitoreo de la calidad del aire.

9. Referencias

Appendix D to Part 58—Relationship Between Site Types and Scales of Representativeness. Disponible en https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?n=40y6.0.1.1.6#ap40.6.58_161.d.

Appendix E Part 58 - Probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring. Disponible en: <https://www.gpo.gov/fdsys/granule/CFR-2012-title40-vol6/CFR-2012-title40-vol6-part58-appE>

Bautista E. Análisis del transporte regional de ozono y su impacto en la calidad del aire de Saltillo, Coahuila. Tesis de Maestría. Centro de ciencias de la Atmósfera – UNAM, Marzo 2019.

CDPHE – Colorado Department of Public Health & Environment. 2015. Ambient Air Monitoring Network Assessment. Disponible para consulta en línea en: https://www.colorado.gov/airquality/tech_doc_repository.aspx?action=open&file=2015_CO_5yr_Network_Assessment.pdf

DENUE – Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI, 2018. Disponible en www.beta.ineg1.org.mx/app/mapa/denue/

Finzi, G., L. Zani and M. Zecchin. 1991. A decision support system for the design of air quality monitoring networks. Environmental Software, Vol. 6, No. 1, 55-60.

INEGI, 2010. Censo de Población y Vivienda 2010. <https://www.ineg1.org.mx/programas/ccpv/2010/>

INEGI (2011), Conjunto de datos vectoriales de Carreteras y Vialidades Urbanas. Edición 1.0, Nuevo León; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado el 26 de noviembre de 2019,

http://internet.contenidos.ineg1.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/carr_vial/Nuevo_Leon/702825292249_s.zip

INEG1. (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, Disponible en: <https://www.ineg1.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

INEG1. (2017). Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Serie VI, Continuo Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, Disponible en: <https://www.ineg1.org.mx/temas/usosuelo/default.html#Descargas>

INEG1. (2018). DENUE – Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en www.beta.ineg1.org.mx/app/mapa/denue/

INEG1. (2018). Comunicado de prensa núm. 640/19 del 4 de diciembre de 2019 <https://www.ineg1.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2019/StmaCnnaNal/CtasEcmcasEcologicas2018.pdf>

IHME - Institute for Health Metrics and Evaluation. 2020. Global Burden of Disease (GBD). Disponible en: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>

Instituto Nacional de Ecología - INE. Identificación de Cuencas Atmosféricas en México. INE/A1-011/2007, Septiembre 2007.

Instituto Nacional de Ecología - INE.2010. Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire. Disponible para consulta en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/3%20-%20Redes,%20Estaciones%20y%20Equipos%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC. Adecuar el Inventario Nacional de emisiones 2016 para Modelación, Reporte final. Proyecto INECC/A1-001/2019.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático - INECC, 2019. Informe Nacional de Calidad del Aire 2018, México. Disponible para consulta en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/informe2018.pdf>

Kanaroglou, P.S., M. Jerret, J. Morrison, B. Beckerman, M.A. Arain, N.L. Gilbert, and J.R. Brook. 2005. Establishing an air pollution monitoring network for intraurban population assesment: A location-allocation approach. *Atmospheric Environment*, 39, 2399-2409.

Linares, G.L. Acosta y V. Vega. 1986. Estadística multivariada. Universidad de la Habana. Facultad de Matemáticas Cibernética. Pp. 31.51.

Malczewski, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. *Prog. Plan.* 62, 3–65. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305900603000801>

Martínez, A.P., 1. Romieu. 1997. Introducción al monitoreo atmosférico. ECO/GTZ/Departamento del Distrito Federal. México. 238 pp.

Mazzeo, N.A., and L.E. Venegas. 2000. Practical use of the ISCST3 model to select monitoring site locations for air pollution control. *Int. j. Environment and Pollution*, Vol. 14, Nos. 1-6, 246-259.

Negri, A. and R. Sozz1. 1988. Optimization criteria in network configuration for air quality monitoring: analysis of available facilities and possible development lines. *Environmental Software*, Vol. 3, No. 4, 174-179.

Noll, K.E. and S. Mitsutom1. 1983. Design methodology for optimum dosage air monitoring site selection. Atmospheric Environment, Vol. 17, No. 12, 2583-2590.

Noll, K.E., T.L. Miller, J.E. Norco, and R.K. Raufer. 1977. An objective air monitoring site selection methodology for large point sources. Atmospheric Environment, Vol. 11, 1051-1059.

OMS - Organización Mundial de la Salud. Calidad del aire y salud. Datos y Cifras. Recuperado de: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#:~:text=Se%20estima%20que%20la%20contaminaci%C3%B3n,o%20menos%20de%20di%C3%A1metro%20\(PM2.5](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#:~:text=Se%20estima%20que%20la%20contaminaci%C3%B3n,o%20menos%20de%20di%C3%A1metro%20(PM2.5)

OMS - Organización Mundial de la Salud. Guías de calidad del aire – actualización mundial 2005. https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_agg/es/

O'NEILL, P. (1995). Environmental Chemistry. Chapman & Hall. London.

Penfold B.M., Funk T.H., and Hafner H.R. (2003) Exploring the use of suitability modeling to locate air toxics monitors in Massachusetts. Paper and presentation prepared for the ESRI International User Conference 2003, San Diego, CA, July 7-11 (STI-2388).

Pope R & Wu J. 2014. A multi-objective assessment of an air quality monitoring network using environmental, economic, and social indicators and GIS based models, Journal of the Air & Waste Management Association, 64:6, 721-737, DOI: 10.1080/10962247.2014.888378

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/10962247.2014.888378>

RADIAN Corporation. 1992. The SIMA Air Monitoring Network Siting Study. Preparado para el Gobierno del Estado de Nuevo León. Secretaría de Ecología. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental. Austin Texas. Noviembre de 1992

San Diego, 2015. "5-year Air Quality Monitoring Network Assessment, 2015". Monitoring and Technical Service Division. Air Pollution Control District. County of San Diego. Chapter 4 Ozone (O₃). pp 1-17

SEGOB, SEDATU, CONAPO. 2018. Sistema Urbano Nacional. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/sistema-urbano-nacional-2018>

SEDATU - Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2015. México 2018

Secretaría de Salud, 2014. Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014. Salud Ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. Diario Oficial de la Federación del 20 de agosto de 2014. Disponible para consulta en:

dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=53570428&fecha=20/08/2014

SEMARNAT 2012. Norma Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Diario Oficial de la Federación del 16 de julio de 2012. Disponible para consulta en:

dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=52594648&fecha=16/07/2012

SEMARNAT 2019. Inventario Nacional de Emisiones (INEM), 2016. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>

SIN TRÁFICO. Plataforma líder en Big Data de movilidad en México. <http://sintrafico.com/>

STI - Sonoma Technology Inc. 2014. Ambient Air Monitoring Network Assessment of the South Saskatchewan Region. Final Report. ISBN No. 978-1-4601-1521-0. Disponible para consulta en:

<https://open.alberta.ca/publications/9781460115220>

Trujillo-Ventura, A., J.H. Ellis. 1991. Multiobjective air pollution monitoring network design. Atmospheric Environment, 25A (2), 469-479.

USEPA. US EPA, Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems. Volume II: Part 1, Ambient Air Quality Monitoring Program. Quality System Development [en línea]. United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1998. EPA-454/B-17-001 Disponible en: <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/ga/Final%20Handbook%20Documentation%2017.pdf> [Consultado el 15 de abril del 2020].

USEPA – Environmental Protection Agency. 2007. Ambient Air Monitoring Network Assessment Guidance. Analytical Techniques for Technical Assessment of Ambient Air Monitoring Networks. Disponible para consulta en línea en: <https://www3.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/pm25/datamang/network-assessment-guidance.pdf>

USEPA – Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook. United States Environmental Protection Agency.
USEPA, 40 CFR 58.10. Annual monitoring network plan and periodic network assesment. Disponible en: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?n=40y6.0.1.1.6#se40.6.58_110

USEPA – Environmental Protection Agency 1997. Exposure factors handbook. United States Environmental Protection Agency

USEPA, 40 CFR 58.10. Code of Federal Regulations. Title 40. Protection of Environment. Part 58. Ambient Air Quality Surveillance. Subpart B. Monitoring Network. 58.10 Annual monitoring network plan and periodic network assessment. Disponible para consulta en línea en:

https://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?n=40y6.0.1.1.6#se40.6.58_110

USEPA, 40 CFR Appendix E Part 58, probe and monitoring path siting criteria for ambient air quality monitoring.

USEPA, 1997. Ambient Air Monitoring Network

Velázquez A. G. Diseño de una red de monitoreo atmosférico para la ciudad de San Luis Potosí: ubicación de nodos. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad de San Luis Potosí, Agosto de 2008.

Assessment Guidance. EPA-454/D-07-001. February 2007.



Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos Sobre Energía y Medio Ambiente A.C.

Ruben Dario # 36, Rincón del Bosque, Polanco,

V Sección Miguel Hidalgo,

CP. 11580, Ciudad de México

www.centromariomolina.org

Twitter: @CentroMMolina

Facebook.com/CentroMarioMolina

