



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROPUESTA METODOLOGICA PARA LA SELECCION DE  
SITIOS DE MONITOREO DE PARTICULAS FINAS (PM<sub>2.5</sub>)  
EN LA REGION CENTRO DE LA ZONA  
METROPOLITANA DE CIUDAD DE MÉXICO

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERIA**

AMBIENTAL

P R E S E N T A :

OLIVIA RIVERA HERNANDEZ

TUTOR:

DR. HUMBERTO BRAVO ALVAREZ



2005

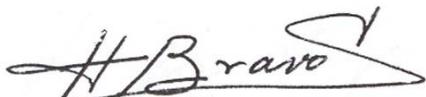
**JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE:** DR. ARMANDO AGUILAR MARQUEZ  
**VOCAL:** DR. HUMERTO BRAVO ALVAREZ  
**SECRETARIO:** M EN C. VICENTE FUENTES GEA  
**SUPLENTE:** DR. RODOLFO SOSA ECHEVARRIA  
**SUPLENTE:** DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGOMEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

Subdirección de Monitoreo de la Secretaria del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal.

**TUTOR DE TESIS**  
DR. HUMERTO BRAVO ALVAREZ



---

**PRESENTA**  
ING. OLIVIA RIVERA HERNÁNDEZ



---

## Agradecimientos

*A mis asesores, el Dr. Armando Aguilar, al Dr. Humberto Bravo, a la Dra. Georgina Fernández, al M en C. Vicente Fuentes y al Dr. Rodolfo Sosa. Por su guía para la culminación de este trabajo, conjugando en el sus excelentes criterios, característicos y propios de cada uno.*

*A los que participaron en el Proyecto "Diseño, adquisición e instalación de una Red de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> en la ZMCM". Por su tiempo, empeño y disposición: Angélica Cruz Arana, Angélica Vázquez Montero, Antonieta Pérez Nova, Cristina Ortuño Mojica, Francisca Aldape Ugalde, Francisco Mandujano, José F. Ángeles García, Javier Flores, Margarita Castillejos Salazar, Norma Vargas Montes, Rafael Ramos Villegas, Raúl V. Díaz Godoy, Rosa Ma. Bernabé Cabanillas, Salvador Blanco Jiménez, Vicente Pérez.*

*A mis amigos y compañeros de la Subdirección de Monitoreo del GDF. Los cuales fueron parte fundamental en la puesta en marcha de la Red de Monitoreo de PM<sub>2.5</sub>.*

*A mi Jefe, Armando Retama, por la confianza depositada para dirigir este proyecto y sus valiosas aportaciones al mismo.*

*Agradezco especialmente a mi familia que con su presencia, palabras de ánimo y compañía son en todo momento parte fundamental de mi desarrollo personal y profesional: Magos, Héctor, Alberto, Alan, Paco, Alepú, Dany, Alicia, Jenny, Alma, A la Sra. Ofelia, Sr Javier...*

*En especial mi madre; su tiempo, consejos y desvelos dedicados, me han impulsado a siempre seguir adelante y conseguir una más de mis metas. Gracias por todo.*

*A mi amado esposo Javier, gracias por tu amor, apoyo y compañía en la realización de este proyecto.*

## Índice

AGRADECIMIENTOS. . . . .	I
ÍNDICE. . . . .	II
INTRODUCCIÓN . . . . .	VI
META. . . . .	VII
OBJETIVOS GENERALES. . . . .	VIII
<b>1. ANTECEDENTES. . . . .</b>	<b>1</b>
1.1. LA ATMOSFERA Y LOS CONTAMINANTES . . . . .	1
1.2. REDES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO . . . . .	2
1.2.1. REPRESENTATIVIDAD DEL SITIO DE MONITOREO. . . . .	4
1.2.2. UNIFORMIDAD ESPACIAL. . . . .	5
1.2.3. DISEÑO DE REDES DE MONITOREO ATMOSFÉRICO. . . . .	5
1.2.4. DEFINICION DE OBJETIVOS. . . . .	6
1.2.5. NÚMERO Y SELECCIÓN DE SITIOS PARA MONITOREO. . . . .	7
1.2.6. ESTRATEGIAS DE MUESTREO. . . . .	7
1.2.7. SELECCION DE INSTRUMENTOS. . . . .	8
1.2.8. ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD. . . . .	9
1.3. PARTÍCULAS SUSPENDIDAS Y AEROSOLAS. . . . .	9
1.3.1 PROPIEDADES DE LAS PARTICULAS. . . . .	10
1.3.2. IMPORTANCIA DE LAS PARTICULAS SECUNDARIAS. . . . .	13
1.3.3. NORMATIVIDAD SOBRE PARTICULAS. . . . .	16
1.3.4. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE PARTICULAS. . . . .	16
<b>2. MÉTODOS. . . . .</b>	<b>21</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO. . . . .	21
2.2. SELECCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO. . . . .	25
2.3. PLAN DE MUESTREO. . . . .	33
2.3.1. CALENDARIO DE MUESTREO. . . . .	36
2.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS . . . . .	37
2.4.1. ESTADÍSTICA BÁSICA. . . . .	37
2.4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL. . . . .	38
2.4.3. MODELO DE COEFICIENTE DE REPRESENTATIVIDAD (RN). . . . .	39
2.4.4. MÉTODO DE PORCENTAJE DE REPRESENTATIVIDAD. . . . .	40
<b>2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. . . . .</b>	<b>41</b>
3.1 CONCENTRACIÓN DE $PM_{2.5}$ . . . . .	41
3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS $PM_{2.5}$ EN EL NORTE DE LA CIUDAD DE MÉXICO . . . . .	47
3.2.1. REGIÓN NORESTE. . . . .	48
3.2.2. REGIÓN NOROESTE. . . . .	52
3.3. VALIDACIÓN DE DATOS DE TRABAJO PARA SELECCIÓN DE SITIOS DE MONITOREO DE $PM_{2.5}$ . . . . .	55
3.4. SELECCIÓN DE SITIOS PARA EL MONITOREO DE $PM_{2.5}$ . . . . .	56
3.4.1. REGIÓN NORESTE. . . . .	56
3.4.2. REGIÓN NOROESTE. . . . .	65
3.5. LA RED DE MONITOREO DE $PM_{2.5}$ DE LA CIUDAD DE MÉXICO. . . . .	70

4. CONCLUSIONES . . . . .	71
REFERENCIAS . . . . .	72
ANEXO A BASES DE DATOS . . . . .	A1
ANEXO B MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL . . . . .	A2

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. COMPOSICIÓN TÍPICA DE UNA ATMÓSFERA A NIVEL DEL MAR BASE HÚMEDA . . . . .	1
TABLA 1.2. DESCRIPCIÓN DE LAS ESCALAS ESPACIALES EMPLEADAS PARA EL MONITOREO ATMOSFÉRICO. . . . .	4
TABLA 1.3. ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AIRE DE PM <sub>2.5</sub> PARA ALGUNOS PAÍSES O CIUDADES DE AMÉRICA Y EUROPA. . . . .	16
TABLA 1.4. RESUMEN DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS AUTOMÁTICAS UTILIZADAS PARA PARTÍCULAS. . . . .	19
TABLA 2.1. UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO. . . . .	29
TABLA 2.2. CALENDARIO DE MUESTREO PARA LAS REGIONES NORESTE Y NOROESTE. . . . .	37
TABLA 2.3. COMPARACIÓN DE VALORES INTERPOLADOS CON REALES EN TRES SITIOS DE LA REGIÓN NE. . . . .	39
TABLA 3.1. ESTADÍSTICA BÁSICA DE PM <sub>2.5</sub> POR SITIO DE MUESTRO, EN LA REGIÓN NE. . . . .	42
TABLA 3.2. ESTADÍSTICA BÁSICA DE PM <sub>2.5</sub> POR SITIO DE MUESTRO, EN LA REGIÓN NO. . . . .	42
TABLA 3.3. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PM <sub>2.5</sub> EN LA REGIÓN NORESTE . . . . .	44
TABLA 3.4. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PM <sub>2.5</sub> EN LA REGIÓN NOROESTE. . . . .	45
TABLA 3.5. PRUEBA DE COMPARACIÓN DE MEDIAS REGIÓN NE. . . . .	45
TABLA 3.6. PRUEBA DE COMPARACIÓN DE MEDIAS REGIÓN NO. . . . .	46
TABLA 3.7. VALIDACIÓN DE NORMALIDAD REGIÓN NORESTE . . . . .	46
TABLA 3.8. VALIDACIÓN DE NORMALIDAD REGIÓN NOROESTE. . . . .	47
TABLA 3.9. COMPARACIÓN ENTRE LA POBLACIONES ORIGINAL Y CON ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES. . . . .	56
TABLA 3.10. VALORES DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LOS SITIOS DE LA REGIÓN NE . . . . .	57
TABLA 3.11. VALORES DE COEFICIENTES DE REPRESENTATIVIDAD PARA CADA SITIO DE LA REGIÓN NE POR ETAPA DE MUESTREO. . . . .	58
TABLA 3.12. ÁREA DE REPRESENTATIVIDAD DE LOS SITIOS DE MONITOREO (CRITERIO DE $\pm 10\%$ ), PRESENTADO COMO PORCENTAJE DEL TOTAL DEL ÁREA PARA LA REGIÓN NE. . . . .	60
TABLA 3.13. COSTOS DE INSTALACIÓN Y EQUIPAMIENTO DE UNA CASETA DE MONITOREO ATMOSFÉRICO PARA PM <sub>2.5</sub> . . . . .	62
TABLA 3.14. VALORES DE COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PARA LOS SITIOS DE LA REGIÓN NO . . . . .	65
TABLA 3.15 VALORES DE COEFICIENTES DE REPRESENTATIVIDAD PARA CADA SITIO DE LA REGIÓN NO POR ETAPA DE MUESTREO. . . . .	66
TABLA 3.16 ÁREA DE COBERTURA DE LOS SITIOS DE MONITOREO (CRITERIO DE $\pm 10\%$ ), REPRESENTADO COMO PORCENTAJE DEL TOTAL DEL ÁREA PARA LA REGIÓN NO. . . . .	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. LOCALIZACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA ESTACIÓN DE MONITOREO CONSIDERANDO ÁRBOLES O BARRERAS FÍSICAS. . . . .	3
FIGURA 1.2. LA FUNCIÓN DEL MONITOREO EN EL MANEJO DE LA CALIDAD EL AIRE . . . . .	3
FIGURA 1.3. CRITERIOS DE APOYO PARA EL DESARROLLO DEL DISEÑO DE MUESTREO. . . . .	6
FIGURA 1.4. EJEMPLO DE UN MUESTRO A JUICIO Y UN HÍBRIDO DE ESTRATEGIAS DE MUESTREO. . . . .	8
FIGURA 1.5. MODELO DE ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD PARA EL MONITOREO DEL AIRE. . . . .	9
FIGURA 1.6. MODELO DE DISTRIBUCIÓN Y FORMACIÓN DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS. . . . .	12
FIGURA 1.7. SISTEMA RESPIRATORIO, ZONAS DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO. . . . .	14
FIGURA 1.8. RELACIÓN ENTRE TAMAÑO DE PARTÍCULA Y PORCENTAJE DE COLECCIÓN. . . . .	17
FIGURA 2.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. . . . .	21
FIGURA 2.2. CRECIMIENTO DEL ÁREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO. . . . .	22
FIGURA 2.3. IMAGEN SATELITAL DEL ÁREA INDUSTRIAL DE TLALNEPANTLA. . . . .	23
FIGURA 2.4. IMAGEN SATELITAL DEL ÁREA INDUSTRIAL DE XALOSTOC. . . . .	24
FIGURA 2.5. LOCALIZACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO PARA PARTÍCULAS FINAS. . . . .	28
FIGURA 2.6. MUESTREADOR MINIVOL (IZQUIERDA) Y HI (DERECHA). . . . .	34
FIGURA 2.7. ENSAMBLE E INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS MINIVOL (IZQUIERDA) Y HI (DERECHA). . . . .	36
FIGURA 3.1. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN LA REGIÓN NE. ÉPOCA SECA FRÍA (DÍA DE MUESTREO SÁBADO 26 DE ENERO DE 2002) . . . . .	49
FIGURA 3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN LA REGIÓN NE. ÉPOCA SECA CALIENTE (DÍA DE MUESTREO JUEVES 25 DE MARZO DE 2002) . . . . .	49
FIGURA 3.3. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN LA REGIÓN NE. ÉPOCA DE LLUVIA (DÍA DE MUESTREO MARTES 03 DE JUNIO DE 2002) . . . . .	50
FIGURA 3.4. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN LA REGIÓN NO. ÉPOCA SECA FRÍA (DÍA DE MUESTREO JUEVES 07 DE FEBRERO DE 2002) . . . . .	53
FIGURA 3.5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN LA REGIÓN NO. ÉPOCA SECA CALIENTE (DÍA DE MUESTREO MARTES 09 DE ABRIL DE 2002) . . . . .	53
FIGURA 3.6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CONCENTRACIONES DE $PM_{2.5}$ EN LA REGIÓN NO. ÉPOCA DE LLUVIA (DÍA DE MUESTREO JUEVES 27 DE JUNIO DE 2002) . . . . .	54
FIGURA 3.7. FOTOGRAFÍAS DEL JARDÍN DE NIÑOS "JEAN PIAGET" EN LA COL. PRADOS DE SANTA CLARA . . . . .	61
FIGURA 3.8. FOTOGRAFÍAS DE LA ESTACIÓN SAG DEL SIMAT, SAN AGUSTÍN 3RA SECCIÓN. . . . .	61
FIGURA 3.9. FOTOGRAFÍAS DE LA UNIDAD DE MEDICINA FAMILIAR NO. 23 DEL IMSS, COL. SAN PEDRO EL CHICO. . . . .	62
FIGURA 3.10. FOTOGRAFÍAS DE LA SECUNDARIA TÉCNICA NO. 41, COL. UNIDAD HABITACIONAL SAN JUAN DE ARAGÓN 1RA SECCIÓN. . . . .	63
FIGURA 3.11. SUPERFICIE DE REPRESENTATIVIDAD DE LOS SITIOS DE MONITOREO DE $PM_{2.5}$ SELECCIONADOS EN LA REGIÓN NE. . . . .	64
FIGURA 3.12. FOTOGRAFÍAS DE LA ESTACIÓN TLA DEL SIMAT, FRACCIONAMIENTO TLALNEMEX. . . . .	68
FIGURA 3.13. FOTOGRAFÍAS DE LA ESTACIÓN CAM DEL SIMAT, COL. HOGAR Y SEGURIDAD . . . . .	68
FIGURA 3.14. FOTOGRAFÍAS DEL DIF MUNICIPAL "SAN PABLO XALPA", COL. SAN PABLO XALPA . . . . .	68
FIGURA 3.15. SUPERFICIE DE REPRESENTATIVIDAD DE LOS SITIOS DE MONITOREO DE $PM_{2.5}$ SELECCIONADOS EN LA REGIÓN NO. . . . .	69

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 3.1. SERIE DE TIEMPO DE LAS CONCENTRACIONES REGISTRADAS EN LA REGIÓN NE. ....	43
GRÁFICA 3.2. SERIE DE TIEMPO DE LAS CONCENTRACIONES REGISTRADAS EN LA REGIÓN NO. ....	44
GRÁFICA 3.3. DIAGRAMA DE CAJA PARA LA REGIÓN NE. ....	45
GRÁFICA 3.4. DIAGRAMA DE CAJA PARA LA REGIÓN NO. ....	46
GRÁFICA 3.5. HISTOGRAMA REGIÓN NE. ....	46
GRÁFICA 3.6. HISTOGRAMA REGIÓN NO. ....	47

---

## Introducción.

La región urbana de la Ciudad de México se encuentra localizada en parte de los territorios del Distrito Federal y el Estado de México, en la Cuenca del Valle de México. La región, mejor conocida como Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), alberga alrededor de 18 millones de habitantes, 3 millones de automóviles, 260 mil establecimientos industriales y de servicio; área forestal y de cultivo. Las actividades que se desarrollan cotidianamente ocasionan que anualmente se emitan 3.5 millones de toneladas de contaminantes a la atmósfera (gases y partículas).

Los altos niveles de contaminación atmosférica presentes en la Ciudad de México por partículas suspendidas de entre 0.01 y  $\sim 10 \mu\text{m}$ , pueden provocar serios daños a la salud de la población, a los ecosistemas y a los materiales; esto obedece a la conjunción de diversos factores de desarrollo económico, condiciones fisiográficas, de altitud y meteorológicas propias de la cuenca, las cuales son desfavorables para la dispersión de contaminantes y favorables para la formación de aerosoles o partículas secundarias, dentro de estas últimas encontramos a las partículas finas (menores a 2.5 micrómetros:  $\text{PM}_{2.5}$ ). En la Ciudad de México como en otras partes del mundo la composición de las  $\text{PM}_{2.5}$  es un indicador de las diversas fuentes de emisión (naturales o antropogénicas).

Estudios realizados en la Ciudad de México, reportan asociaciones importantes con la presencia de concentraciones elevadas de partículas finas y el incremento en la mortalidad y morbilidad humana (Castillejos et al., 2000; Gold et al., 1999; Romieu et al., 1995). Una de las más importantes es la mortalidad prematura en niños, ya que por cada incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se reporta un 6% del total de muertes infantiles (Loomis et al., 1999), otro caso parecido se presenta en adultos mayores de 65 años previamente enfermos (Borja-Aburto et al., 1998). También se ha observado un incremento entre las afecciones respiratorias, cardiovasculares, admisión a salas de hospital y ausentismo escolar y laboral (Rosas et. al., 1998). Estos resultados son consistentes con los encontrados en otras ciudades del mundo. Estos estudios son pocos y realizados en periodos de tiempo cortos.

Debido a lo anterior, la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) financió con 10 millones de pesos el proyecto "Diseño, adquisición e instalación de una red de monitoreo para las partículas menores a 2.5 micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ) en la Zona Metropolitana del Valle de México". El proyecto tuvo una duración de casi dos

---

años, el diseño y la coordinación estuvieron a cargo de la Subdirección de Monitoreo de la Secretaría del Medio Ambiente del DF. Para el desarrollo se implementaron cuatro etapas: 1) Localización de sitios más representativos para el monitoreo de  $PM_{2.5}$  enfocados a salud de la población, 2) Selección de los equipos más adecuados para la medición de  $PM_{2.5}$ , 3) Adquisición de los equipos para el monitoreo y 4) Adquisición de la infraestructura y puesta en marcha de la red

En el desarrollo del proyecto trabajaron diversas instituciones reconocidas. Durante la primera etapa, el Instituto nacional de investigaciones nucleares (ININ) y el Centro nacional de investigación y capacitación ambiental (CENICA) fueron las responsables del muestro de partículas. En la etapa 2 la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco fue la responsable de la evaluación de los diferentes métodos de monitoreo disponibles en el mercado.

Este trabajo de tesis utiliza parte de los resultados de la campaña de muestreo para caracterizar las partículas y proponer dos métodos novedosos que permitan identificar sitios de muestreo para diferentes usos a través de: 1) un método estadístico que cuantifica la representatividad de un sitio de monitoreo y 2) un valor porcentual que determina el área de representatividad de un sitio de monitoreo. La región de estudio abarca la región centro de la ZMCM que es conocida por su complejidad ambiental.

## **Meta.**

Identificar sitios para el monitoreo de partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) en la de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM).

## **Objetivos generales.**

- Caracterizar el comportamiento de las  $PM_{2.5}$  en el área de estudio mediante el muestreo, el análisis de los datos y evaluación de sus niveles de concentración.
- Utilizar el modelo de coeficiente de representatividad propuesto por Chan-Hwang para la identificación de los sitios de monitoreo de partículas finas.
- Determinar la representatividad de los sitios de monitoreo a través del método de porcentaje de representatividad

# Capítulo 1

## *Antecedentes*

## 1. Antecedentes.

Este capítulo contempla los conceptos más comunes utilizados cuando se diseñan redes de monitoreo atmosférico a través de un sistema de gestión de calidad para el control y aseguramiento de las actividades. También un panorama general acerca las partículas suspendidas especialmente las de tamaño menor o igual a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ), también conocidas como partículas finas.

### 1.1. La atmósfera y los contaminantes.

La atmósfera es la delgada envoltura gaseosa compuesta principalmente por nitrógeno, oxígeno y otros gases (Tabla 1.1). Cerca de 95% de la masa de aire del planeta se encuentra en esta capa de la atmósfera conocida como troposfera que se extiende a 11 Km. sobre el nivel del mar, en ella se desarrollan las diferentes reacciones químicas y procesos físicos que condicionan la presencia de contaminantes causantes de los diferentes daños a la salud y el medio ambiente.

Tabla 1.1. Composición típica de una atmósfera a nivel del mar base húmeda ( Griffin, 1994.)

Componente gaseoso	Fórmula	Partes por millón (ppm) en volumen
<b>Gases permanentes</b>		
Nitrógeno	$\text{N}_2$	78084
Oxígeno	$\text{O}_2$	20946
Argón	Ar	934
Neón	NE	18.2
Helio	He	5.2
Kriptón	Kr	1.1
Hidrógeno	$\text{H}_2$	0.5
Oxido nitroso	$\text{N}_2\text{O}$	0.3
Xenón	Xe	0.09
<b>Gases variables</b>		
Vapor de agua	$\text{H}_2\text{O}$	10 - 7000
Dióxido de carbono	$\text{CO}_2$	35
Metano	$\text{CH}_4$	1.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Ozono	$\text{O}_3$	0.02
Amonio	$\text{NH}_3$	0.01
Dióxido de nitrógeno	$\text{NO}_2$	0.001
Dióxido de azufre	$\text{SO}_2$	0.0002
Ácido sulfúrico	$\text{H}_2\text{S}$	0.0002

Cualquier alteración a la composición química natural del aire se le conoce como contaminación. La Ley General del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente de los Estado Unidos Mexicanos define a la contaminación

como “La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico” y a contaminante como “toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural”.

Los contaminantes generalmente encontrados en la atmósfera alterados por la actividades antropogénicas son variados y de efectos diversos, sin embargo hay algunos que resultan de gran importancia medir por ocasionar severos daños a la salud pública y al medio ambiente; se dividen en gases y partículas, los gases como el ozono (O<sub>3</sub>), el bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), el bióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y el monóxido de carbono (CO). Las partículas en sus diferentes tamaños conocidas como gruesas (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>), finas (PM<sub>2.5</sub>) y ultra finas (< PM<sub>2.5</sub>).

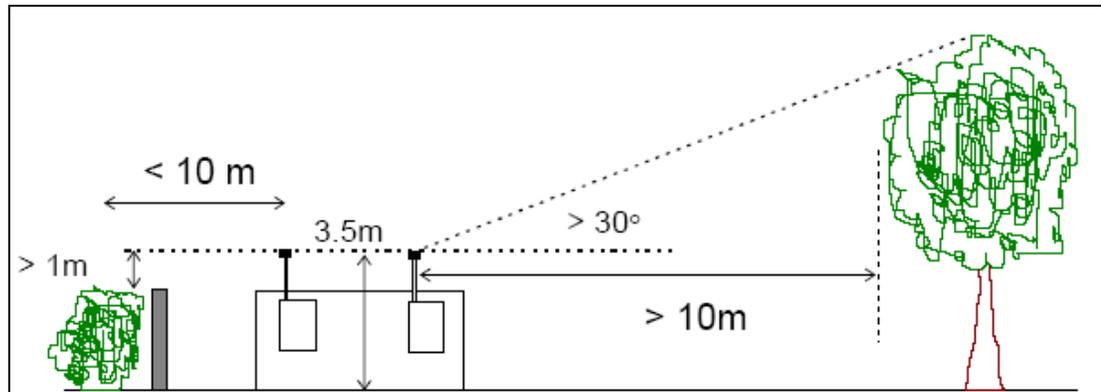
Los datos de contaminación usualmente se reportan en unidades de concentración y en ocasiones son referidas a un índice en relación con salud con para informar a la población. La concentración de los gases generalmente se expresa en partes por millón (ppm) este es el número de volúmenes de un contaminante encontradas en un millón (10<sup>6</sup>) de volúmenes de aire, o en por ciento en volumen (%Vol), el cual se define como el número de volúmenes de un gas contenido en 100 volúmenes de aire y la tercera unidad hace referencia a las partículas y es la masa por volumen de aire que usualmente se expresa en microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>) a condiciones estándar de presión y temperatura (760 mmHg y 25°C)

## **1.2. Red de monitoreo atmosférico y su importancia.**

A fin de conocer el estado de la calidad del aire, actualmente diversas ciudades del mundo tienen implementados sistemas de vigilancia de calidad del aire también conocidos como redes de monitoreo, en las cuales se determinan las concentraciones de algunos contaminantes atmosféricos de un lugar, de una zona o región. Están conformadas por estaciones de monitoreo que generalmente se distribuyen estratégicamente en base a una meta establecida en un área urbana o rural.

Una estación de monitoreo se refiere a la infraestructura y permite mantener y operar los equipos de medición (Figura 1.1). Su ubicación debe de considerar los siguientes aspectos: a) las condiciones físicas de la zona a evaluar, b) acceso restringido a la estación, c) seguridad, d) disponibilidad de energía eléctrica, e) facilidad para la instalación y mantenimiento de los equipos de medición, f) estar a distancia de obstáculos que permitan el libre flujo del viento (árboles, edificios, etc.) y g) las concentraciones medidas deben ser representativa de las condiciones de la zona; esto es, aún cuando las características del monitoreo dependerán de los objetivos es importante que la muestra obtenida en

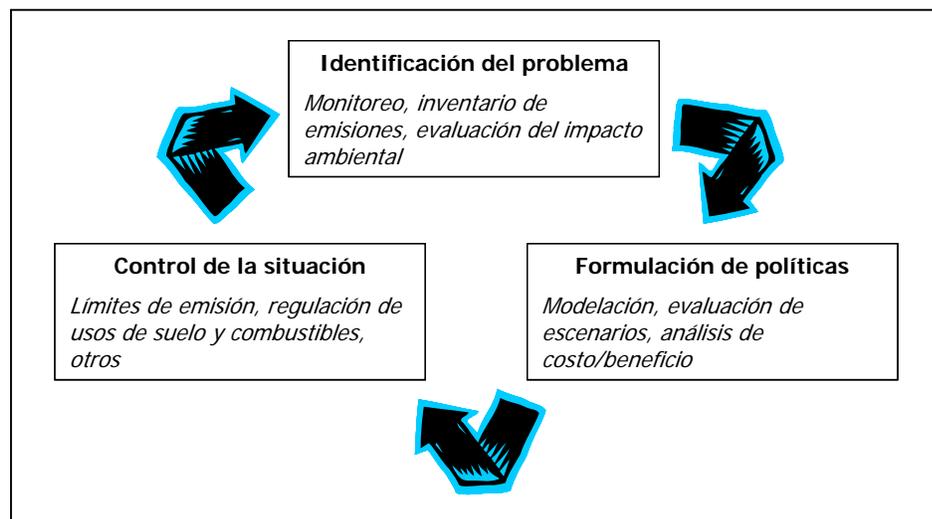
la estación sea representativa del área y características a evaluar (US. EPA 1999; Martínez, 1997; US. EPA, 1997a; US. EPA, 1997b).



Fuente: U.S. EPA 1999, IMPROVE Site Selection.

**Figura 1.1.** Localización esquemática de una estación de monitoreo considerando árboles o barreras físicas.

El monitoreo atmosférico desempeña el papel central en el proceso de vigilancia de la calidad del aire, provee bases científicas sobre el estado de algunos contaminantes para que los tomadores de decisiones planteen las estrategias de control para el mejoramiento del ambiente y mejoramiento de la calidad del aire, elaborar y verificar el cumplimiento de las normas de calidad del aire establecidas, realizar investigación sobre sus efectos en la salud humana y medio ambiente (Figura 1.2)



Fuente: WHO, 2000

**Figura 1.2.** La función del monitoreo en el manejo de la calidad el aire (WHO, 2000)

En algunos países o ciudades del mundo, las redes de monitoreo pueden ser operadas por diversas organizaciones y se pueden incluir a las diferentes instancias de gobierno e instituciones de investigación. En estas

circunstancias puede existir armonización entre los programas específicos, además de compartir los datos y aumentar al máximo el costo beneficio.

### 1.2.1. Representatividad del sitio de monitoreo.

La representatividad es un indicador a través del cual se refleja alguna característica de una población, las variaciones de un parámetro en un punto de muestreo, las condiciones de un proceso o las condiciones ambientales (Keith, 1996). En el aire ambiente, las concentraciones de un contaminante resulta de la contribución de las emisiones de fuentes cercanas y distantes, por lo que la representatividad de las muestras obtenidas en el sitio de monitoreo dependerá de las contribuciones de las fuentes ubicadas a diferentes distancias o escalas espaciales. La dimensión de la escala representa el diámetro de un círculo o los lados de un cuadrado donde al centro se ha ubicado un instrumento de monitoreo (US. EPA, 1997a). La U. S. EPA define las siguientes escalas espaciales:

Tabla 1.2. Descripción de las escalas espaciales empleadas para el monitoreo atmosférico (U.S. EPA, 1997a)

Escala	Distancia	Característica
Micro	~10 a 100 m	Áreas tales como, calles centrales que forman cañones estrechos o corredores con tráfico intenso. Los monitores se encuentran cerca de fuentes de emisión de bajo nivel. Estos sitios no son tomados en consideración generalmente para la evaluación del cumplimiento de normas y estándares. Las mediciones se pueden emplear para el estudio de emisiones y sus zonas de influencia. Los sitios se encuentran en edificios habitados o lugares donde el público puede estar expuesto a las concentraciones medidas.
Media	100 a 500 m	Las mediciones de este tipo son apropiadas para la evaluación de efectos de corto plazo en la salud pública. Las diferencias entre las mediciones a esta escala se deben a la presencia de áreas industriales grandes con procesos diversos o a la cercanía de grandes zonas de construcción. Los muestreos generalmente están orientados a fuentes y se emplean para determinar la contribución de las fuentes de emisión en la comunidad.
Vecindario	500 m a 4 Km	Las mediciones de esta categoría representan las condiciones en una subregión urbana razonablemente homogénea con dimensiones de varios Kilómetros. Los datos se pueden emplear para evaluar los modelos empleados en la evaluación de fuentes de emisión.
Urbana	4 a 100 Km	Estas mediciones se emplean para caracterizar las concentraciones de PM <sub>10</sub> en un área completamente metropolitana o rural. El monitoreo refleja la mezcla de contaminantes de diferentes fuentes dentro de un complejo urbano. Estas mediciones no están dominadas por algún vecindario o fuente en particular. Los monitores generalmente se ubican en puntos elevados lejos de industrias y avenidas transitadas.
Regional	100 a 1,000 Km	Las mediciones caracterizan las condiciones de un área con dimensiones de varios cientos de kilómetros. Su empleo requiere una gran homogeneidad en el área.

### 1.2.2. Uniformidad espacial

La uniformidad espacial se define como la variación de la concentración de las partículas suspendidas en un área específica. Esta puede ser expresada como un coeficiente de variación espacial, calculado como la desviación de las mediciones de un sitio de muestreo con respecto al promedio espacial de todos los sitios en un área determinada. De acuerdo con los autores se considera adecuado un coeficiente de variación anual menor al 10% (US. EPA, 1997b).

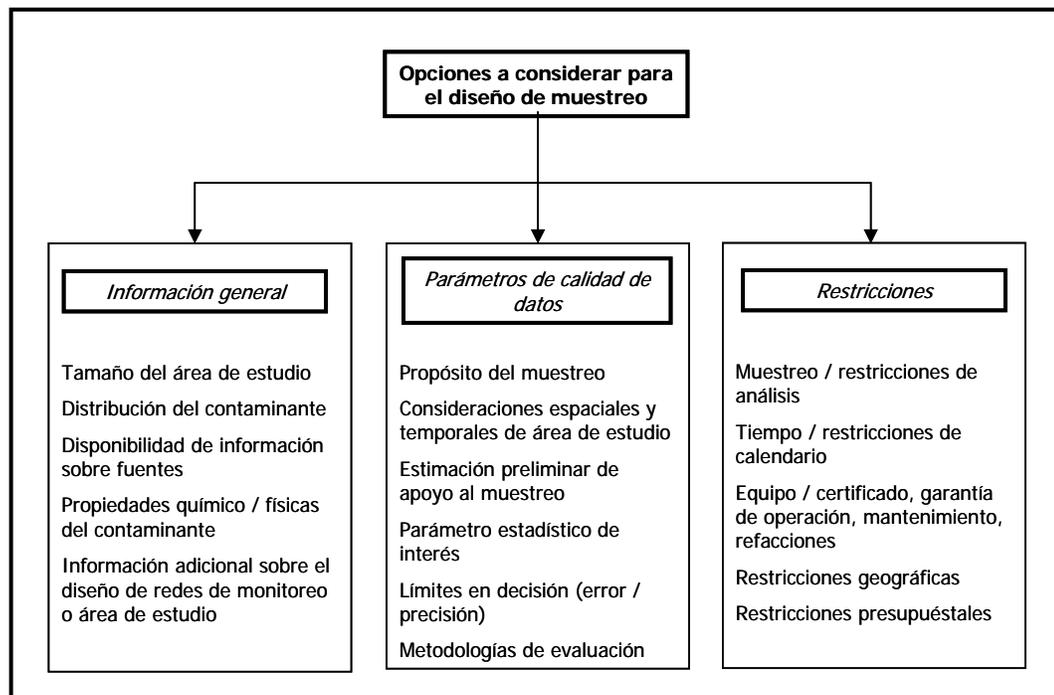
### 1.2.3. Diseño de redes de monitoreo atmosférico

No existen reglas universales para el diseño de redes destinadas al monitoreo atmosférico, cualquier decisión será determinada en última instancia por los objetivos de monitoreo y los recursos disponibles. Los sistemas de monitoreo pueden cumplir con un solo objetivo, sin embargo es más común que tengan un mayor número de funciones programadas. La meta global es asegurar que el máximo de información se derive del mínimo esfuerzo y recursos.

Los recursos humanos y materiales son factor fundamental en el uso eficaz de tiempo. El recurso humano debe involucrar a un grupo multidisciplinario que determine el proceso más adecuado para el cumplimiento de los objetivos. Este conjunto de personas debe incluir entre otros a los especialistas en el tema de partículas, los tomadores de decisiones y a los usuarios finales de los datos. Los recursos materiales están en consideración de los costos directos (equipo, refacciones, consumibles, estudios, muestreos, transporte, etc.) y los costos indirectos (sueldos, papelería, gastos de oficina, etc.).

Durante el diseño, se debe tener especial énfasis en el control y aseguramiento de la calidad de las actividades de muestreo, validación y análisis de datos por su importancia en la toma de decisiones a la hora de seleccionar los sitios de monitoreo. Estas actividades se realizan por personal especializado en la colección de muestras y manejo de equipo, así como por expertos en problemas ambientales capacitados en el uso de técnicas estadísticas respectivamente.

También es importante considerar aquellos factores que puedan interferir con el diseño e incluir toda la información disponible relacionada con el tema y el área de interés, así como cualquier información adicional que permita el logro de los objetivos (Figura 1.3).



Fuente: U.S. 2000 EPA QA/G-5S

**Figura 1.3.** Criterios de apoyo para el desarrollo del diseño de muestreo.

#### 1.2.4. Definición de Objetivos

Las redes de monitoreo pueden ser diseñadas para cumplir con diferentes objetivos específicos debido a la heterogeneidad que presenta la atmósfera. El número de objetivos que se quieran cumplir repercutirá en el número de sitios a implementar, en el costo de mantenimiento y en la operación de la red. Algunos de estos se listan a continuación:

- Evaluar el cumplimiento de las normas de calidad del aire
- Evaluar los riesgos a los que se encuentran expuestos los habitantes de áreas contaminadas y densamente pobladas.
- Evaluar los riesgos para el ambiente.
- Determinar el impacto de las fuentes de emisión en una región determinada.
- Evaluar los planes de control de contaminantes.
- Observar variaciones de los contaminantes a largo plazo
- Determinar las concentraciones de algunos contaminantes transportados hacia otras áreas urbanas o rurales.
- Determinar las concentraciones máximas del contaminantes en el área de influencia de la red.
- Determinar el impacto en el medio ambiente en la zona metropolitana y sus alrededores.

### 1.2.5. Selección de sitios para monitoreo

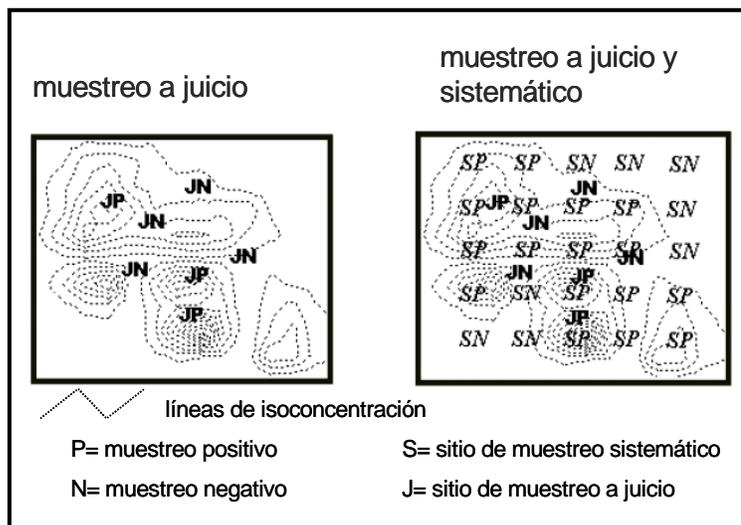
Una vez definidos los objetivos y el área a cubrir se procede a la distribución espacial de los puntos de monitoreo que sean representativos de la calidad del aire de un lugar para poder compararla con las normas correspondientes. Por consiguiente será necesario definir la localización y determinar el número de estaciones de monitoreo o sitios de muestreo que se requieran para cumplir con los objetivos. Un punto importante es conocer las características del área a cubrir con la red de monitoreo: la distribución de la población, las fuentes de emisión, cartografía topográfica, datos meteorológicos y en caso de existir información de las concentraciones del contaminante. La mayor información confiable y disponible sobre el área de estudio ayudará a una mejor ubicación de las estaciones de muestreo (U.S. EPA, 1997; Martínez y Romieu, 1997) .

Actualmente existen diferentes procedimientos de localización de los sitios de monitoreo entre ellos se encuentran: el estadístico y los modelos matemáticos adecuados. El método estadístico asume la existencia de datos y la posibilidad de extraer información significativa de estos generalmente a través de muestreos en campo (Chow et al. 2002; Goswami, et al. 2002; Chang & Hwang 1996). Tienen mayor ventaja que otros; porque es posible conocer las variaciones en el tiempo y la distribución en el espacio del contaminante (Elsom, 1978; Handscombe and Elsom, 1982). Los modelos matemáticos necesitan información previa de las fuentes y la tasa de emisión, procesos meteorológicos y transformaciones químicas y físicas, etc (Zannetti P, 2003).

### 1.2.6. Estrategias de muestreo

Un muestreo bien desarrollado asegura datos suficientes y de calidad basados en decisiones científicas (US. EPA, 2000; Cochran, 1995). El diseño de muestreo depende del tipo de escenario presente y de los recursos humanos y materiales disponibles.

Existen diversas estrategias para la colección de datos, las más comunes son: 1) muestreo a juicio que requiere conocimiento previo del área de estudio, las conclusiones obtenidas son limitadas y dependen únicamente de la validez y exactitud del juicio profesional; 2) muestreo aleatorio simple que supone la misma probabilidad por sitio de muestreo; 3) muestreo estratificado que requiere del conocimiento previo del área de estudio y su división en estratos, cada estrato con características diferentes pero el coeficiente de variación es el mismo y 4) muestreo sistemático que requiere dividir el área de estudio en celdas de tamaño igual y seleccionar una muestra dentro de cada celda con la misma probabilidad a la de cualquier otra muestra de otra celda. También es posible la combinación de dos o más estrategias para la colección de datos que dependen de la heterogeneidad del área de estudio (Figura 1.4).



Fuente: Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>  
**Figura 1.4.** Ejemplo de un muestreo a juicio y un híbrido de estrategias de muestreo

### 1.2.7. Selección de instrumentos

Otras acciones son necesarias para complementar el diseño de la red, como es la selección apropiada de los instrumentos con los que operará la red en caso de que todavía no exista un método de monitoreo oficial o de referencia. Algunos documentos reportan la importancia de realizar estudios de selección de instrumentos equivalentes y mencionan la metodología para llevarlos a cabo (US. EPA, 2002; Chung, et al., 2001; US. EPA, 1998; US. EPA, 1997a; Cook, et al., 1995). Básicamente en los estudios de selección de instrumentos se comparan diversas tecnologías y el control se lleva con un método de referencia bajo diferentes condiciones atmosféricas y por periodos prolongados de tiempo. Lo anterior sirve para conocer la precisión y la exactitud de las mediciones de las distintas metodologías o instrumentos. Estas metodologías están clasificadas en los listados anuales publicados por la US. EPA (<http://www.epa.gov/ttn/amtic/criteria.html>)

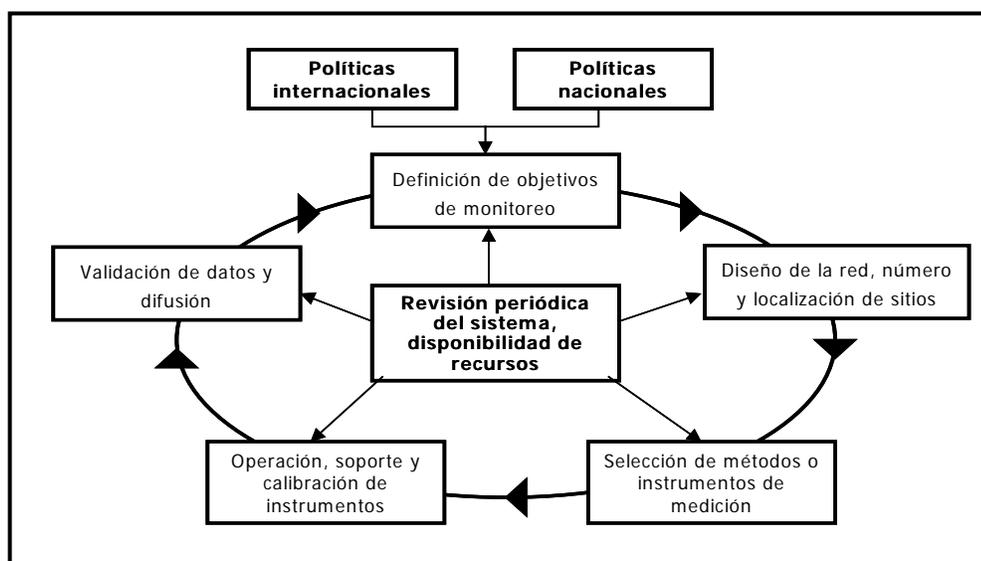
### 1. 2.8. Sistema de gestión de calidad.

El aseguramiento de calidad (AC) y control de calidad (CC) de los sistemas de monitoreo son los dos principios del sistema de gestión de calidad (SGC). El SGC asegura un trabajo ordenado, efectivo y eficiente, da reconocimiento y propicia la mejora continua del proceso de vigilancia de la calidad del aire. El SGC es una estructura documentada que describe la políticas, los objetivos, los principios, la estructura, las líneas de comunicación, las línea de

responsabilidades, el manejo de los recursos y ejecuta el plan de la organización para asegurar la calidad en el trabajo de las redes de monitoreo.

Las actividades del SGC deben cubrir todas las fases del monitoreo desde su diseño hasta la operación continua de la red de monitoreo atmosférico (Figura 1.5). La aplicación exitosa de cada componente del sistema ayuda al cumplimiento de los objetivos del programa:

- Asegurar mediciones exactas, precisas y creíbles.
- Representatividad de los datos obtenidos.
- Resultados comparables y trazables.
- Mediciones consistentes a través del tiempo.
- Optimizar los recursos humanos y financieros.



Fuente: WHO, 2000

Figura 1.5. Modelo de aseguramiento y control de calidad para el monitoreo del aire (OMS, 2000)

### 1.3. Partículas suspendidas y aerosoles

El término partículas suspendidas se emplea de manera genérica para referirse a cualquier material sólido o líquido suspendido en el aire, cada modalidad o tamaño de partícula presenta un tiempo de residencia determinado. No existe una definición clara en cuanto al intervalo del tamaño, mientras en el límite inferior tampoco existe un acuerdo para establecer cuando un agregado de moléculas se considera una partícula (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986).

Las partículas suspendidas pueden ser emitidas directamente a la atmósfera (partículas primarias) o formarse como producto de diversos procesos físicos y/o químicos (partículas secundarias) ocurridos en ésta (Kiely G., 1999).

Para propósitos prácticos se considera a las partículas como esféricas a pesar de que la mayoría de estas presentan formas irregulares. Debido a que muchas propiedades importantes dependen del tamaño, este generalmente se expresa en términos de diámetro equivalente o efectivo definido a partir de sus propiedades físicas. Existen diferentes tipos de diámetros equivalentes de los cuales el más empleado es el diámetro aerodinámico, definido como el diámetro de una esfera de densidad unitaria que tiene la misma velocidad de asentamiento terminal que la partícula en consideración. Esta definición resulta útil ya que se asocia con los tiempos de residencia de las partículas en el aire y los patrones de depósito en el sistema respiratorio. El diámetro aerodinámico ( $D_a$ ) está dado por:

$$D_a = D_g k \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}}$$

Donde  $D_g$  es el diámetro geométrico,  $\rho_p$  es la densidad de la partícula,  $\rho_0$  es la densidad de referencia ( $1 \text{ gcm}^{-3}$ ) y  $k$  es un factor relacionado con la forma. En el resto del documento cualquier referencia al diámetro será al **diámetro aerodinámico**.

### ***1.3.1 Propiedades de las partículas***

#### ***Distribución, formación y composición.***

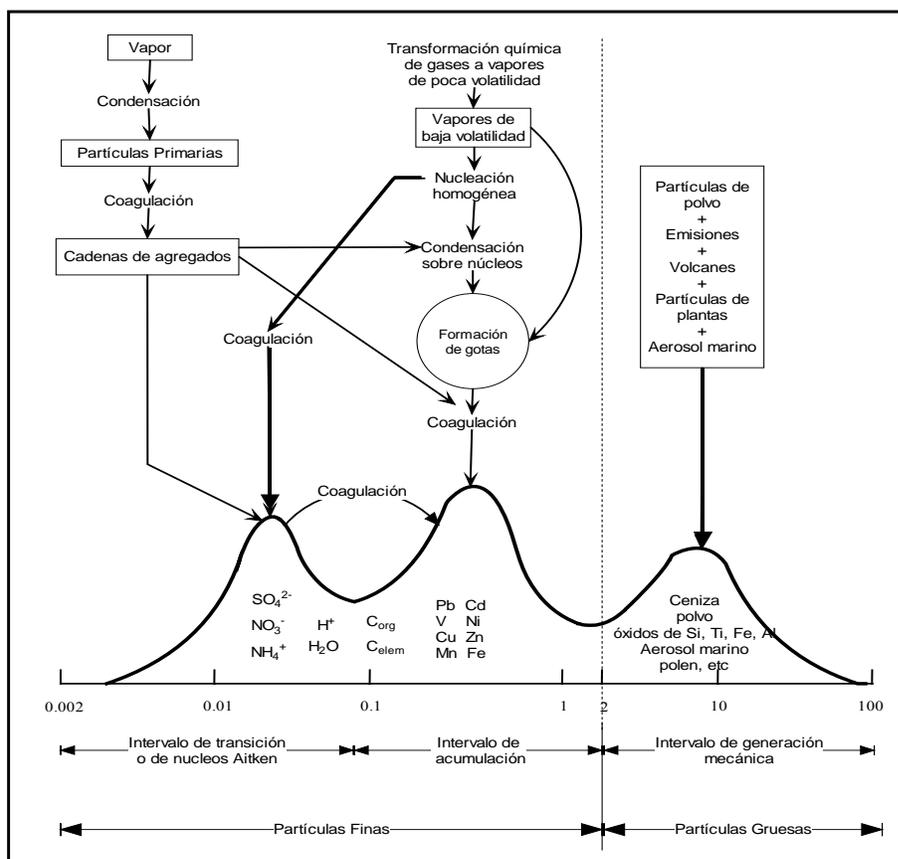
La distribución del tamaño puede definirse en términos de número, masa, superficie y volumen. Debido a que presentan diferentes ordenes de magnitud, la distribución se presenta en términos del logaritmo del diámetro de la partícula.

En los modelos de distribución de masa y volumen las curvas muestran picos bien definidos en los intervalos de 0.1 a 1.0  $\mu\text{m}$  y de 1.0 a 10  $\mu\text{m}$  (Figura 1.6). En cada uno de estos intervalos las partículas presentes tienen características y composición particulares. Sin embargo, no existe un punto definido en el cual se diferencian unas de otras.

Las partículas formadas en el intervalo de “**nucleación o intervalo de transición**” también llamadas partículas ultrafinas, tienen un diámetro menor a  $\sim 0.08 \mu\text{m}$  y son emitidas directamente de fuentes de combustión o son gases condensados en la atmósfera. El tiempo de vida de estas partículas es normalmente menor a una hora, ya que ellas coagulan rápidamente con partículas más grandes o sirven como núcleos para formar gotas de niebla.

El intervalo de “**acumulación**” consiste en partículas con diámetros entre  $0.08$  y  $\sim 2 \mu\text{m}$ . Estas partículas son el resultado de la coagulación de las partículas más pequeñas emitidas de fuentes de combustión, de la condensación de especies volátiles y de finas partículas de polvo de tierra. Los intervalos de nucleación y acumulación constituyen la fracción conocida como “**partículas finas**” y la mayor parte están compuestas de ácido sulfúrico, bisulfato de amonio, sulfato y nitrato de amonio, carbono orgánico y elemental se entran en esta intervalo de tamaño.

Las partículas más grandes que  $2 \mu\text{m}$  se llaman “partículas gruesas”, en ellas predomina material de origen geológico, al igual que el polen y las esporas. También existen otras actividades de origen natural que contribuyen con la presencia de estas partículas. Algunas aproximaciones estadísticas muestran que las partículas gruesas y finas se basan en la distribución log-normal (Larsen, 1969; Goswami et al, 2002).



Fuente: Modificado de Finlayson-Pitts and Pitts p. 355

**Figura 1.6.** Modelo de distribución y formación de partículas suspendidas

La formación de las partículas secundarias puede ocurrir a través de diferentes mecanismos. Estos incluyen: las reacciones de gases para formar productos con presión de vapor baja (oxidación de  $\text{SO}_2$  a  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), seguida por la formación de núcleos que generan nuevas partículas o la condensación en partículas preexistentes junto con la coagulación entre ellas; la reacción de gases en la superficie de las partículas para formar productos de condensación (reacción de  $\text{HNO}_3$  gaseoso con partículas de sal para formar  $\text{NaNO}_3$ ); y la reacción en fase acuosa en niebla, nubes o aerosoles (oxidación de  $\text{SO}_2$  a sulfatos).

Las transformaciones de gas a partícula pueden resultar de un proceso de condensación homogénea de la fase gaseosa o controlada por procesos en la fase partícula. Cuando los productos de condensación se han formado en el seno de la fase gaseosa el sistema tiende al equilibrio a través de la generación de nuevas partículas (homogénea) o por la condensación en partículas ya existentes (heterogénea). La formación de núcleos homogénea y heterogénea pueden ocurrir en la misma parcela de aire de manera secuencial o simultáneamente.

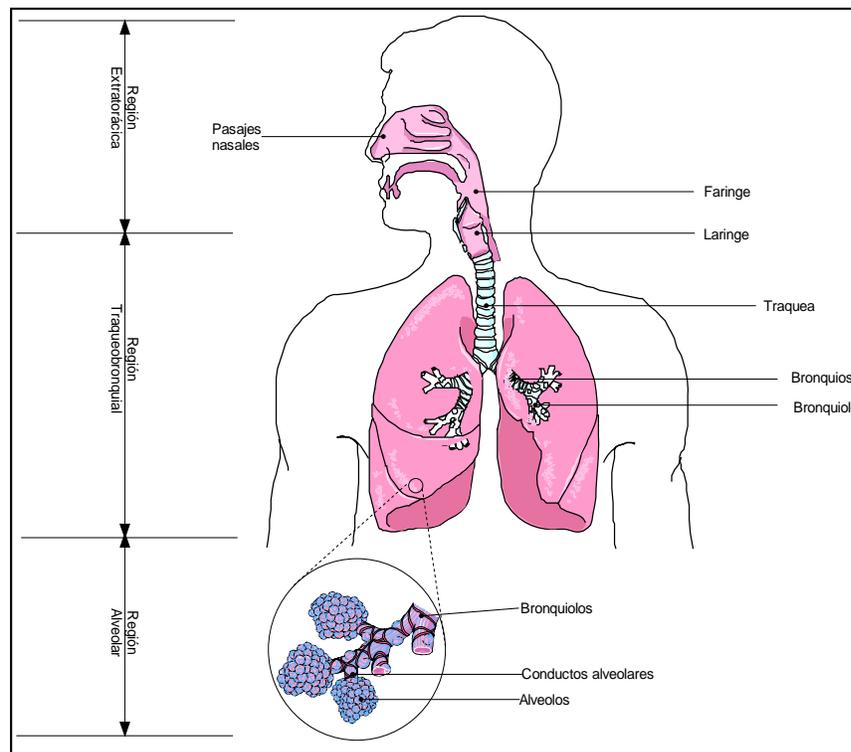
Por otra parte, las reacciones en fase acuosa suceden en las gotas de agua presentes en las nubes y neblina. El mecanismo de formación involucra la oxidación algunas especies químicas (como el  $\text{SO}_2$ ) en medio acuoso seguida de la evaporación del agua hasta dejar únicamente una partícula en suspensión compuesta por los productos de la reacción.

### ***1.3.2. Importancia de las partículas secundarias***

#### ***Salud Humana***

El adulto promedio inspira 15 veces por minuto, en cada inspiración tiene un volumen de aproximadamente 500 cc. En un día se ingresan al sistema respiratorio alrededor de 10,000 litros. El aire es un vehículo excelente para trasportar y descargar de manera eficiente contaminantes dentro del sistema respiratorio (Figura 1.7) . Cada respiración contiene alrededor de 1 millón de partículas pequeñas sólidas y líquidas, que pueden depositarse en las diferentes regiones del aparato respiratorio: extratoraxica, traqueobronquial o alveolar. Algunas de las partículas que penetran son potencialmente infecciosas y otras son capaces de dañar químicamente al sistema respiratorio. Esta amenaza es balanceada por células especializadas de los pulmones que engullen, remueven y destruyen algunas entidades infecciosas y agentes químicos. Otras células se dividen y reemplazan tejidos dañados. Cuando al ataque al sistema respiratorio excede sus capacidades de defensa, se produce la enfermedad. (Phalen, 2003)

Los diferentes efectos a la salud humana causados por las partículas en el aire ambiente depende de varios factores: el tamaño de las partículas, de las condiciones de salud de la población expuesta, el tiempo de exposición, la concentración del contaminantes y en general las condiciones climáticas y ambientales en las que se da la exposición.



**Figura 1.7.** Sistema respiratorio, zonas de deposición de material particulado.

En los últimos años se ha incrementado el interés por las  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  debido a que en diferentes partes del mundo incluyendo la Ciudad de México estudios epidemiológicos han atribuido el incremento de efectos adversos en la salud humana con la presencia de estos contaminantes en el aire. Algunos de los efectos asociados son: el incremento de la mortalidad diaria, la admisión a hospitales y salas de emergencia, la exacerbación de síntomas respiratorios y el asma. La población más susceptible son los niños pequeños, los adultos mayores, los que presentan problemas respiratorios o cardiovasculares, los que tienen bronquitis o infecciones como neumonía entre otros. Los resultados de los estudios epidemiológicos no muestran evidencia de que exista un valor umbral en que el daño a la salud se haga evidente (Gold et al. 1999, Romieu et al. 1999, Borja Aburto et al. 1997, Rosas et al. 1998)

### ***Medio Ambiente***

La reducción del rango visual o visibilidad atmosférica es uno de los efectos que se asocian comúnmente a la contaminación del aire. La visibilidad depende tanto de la capacidad del ojo para distinguir un objeto que este en contraste con el medio, como de la transmisión de la luz a través de la atmósfera. La disminución de la visibilidad se debe a la presencia de gases y partículas que dispersan o absorben la luz. El fenómeno de **dispersión** ocurre cuando la

energía recibida es irradiada en la misma longitud de onda con diferentes intensidades en diferentes direcciones. La **absorción** se da cuando la energía se transforma en otras forma de energía, tales como calor o energía para reacciones químicas.

La relación de Beer-Lambert puede emplearse para expresar la intensidad de la radiación que alcanza la superficie:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-b_{\text{ext}}L}$$

Donde,  $I_0$  e  $I$  son las intensidades de la luz incidente y transmitida, respectivamente,  $L$  es la longitud de la trayectoria de la luz y  $b_{\text{ext}}$  es el coeficiente de extinción. El valor de  $b_{\text{ext}}$  representa la reducción total en la intensidad de la luz provocada por la dispersión y absorción de los gases y partículas presentes. (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986)

En el caso de las partículas la dispersión predomina sobre la absorción. La dispersión de la luz se presenta en tres regiones dependiendo del tamaño de la partícula: las partículas con diámetro  $D < \lambda$  (longitud de onda) se conoce como dispersión de Rayleigh, cuando  $D = \lambda$  se conoce como dispersión de Mie, y cuando  $D > \lambda$  la luz se refracta siguiendo las leyes clásicas de la óptica.

El carbono grafito, los nitratos y sulfatos presentes en las partículas finas son responsables de la mayor cantidad de luz absorbida y ocasionan la disminución de la visibilidad, entre 10 y 50%. Estas especies se presentan principalmente en atmósferas urbanas.

Otro impacto importante en los ecosistemas ocurre indirectamente a través de la lluvia o depósito atmosférico, donde los nitratos y sulfatos asociados con el ión  $H^+$ , los cuales alteran la composición química y la dinámica biológica de los suelos, como consecuencia disminuyen los nutrientes y pueden generar suelos estériles o eficiencia bajo rendimiento de cultivos. (Priz, 1986). Este fenómeno también daña las estatuas y los monumentos de arenisca y de mármol.

### 1.3.3. Normatividad sobre partículas

Uno de los aspectos que resaltan en el caso de las normas de calidad del aire de partículas suspendidas es que los Estados Unidos, la Organización Mundial de la Salud y la Unión Europea han dejado de usar a las PST como indicador de los efectos sobre la salud y las han reemplazado por  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . En el caso de México así como otros países se mantienen a las PST como indicador de la norma de calidad del aire. Recientemente, en septiembre de 2005 se publicó en el Diario Oficial de La Federación la modificación a la Norma Oficial Mexicana 025 en materia de salud para Partículas Suspendidas en la cual se incluyó el indicador de  $PM_{2.5}$ . Los cambios más sobresalientes son: La forma como evalúan los indicadores para el promedio de 24 horas de las fracciones PST,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . La restricción a los estándares de 24 horas de PST y  $PM_{10}$  quedando en 210 y 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente. Los nuevos estándares de  $PM_{2.5}$  de 24 horas y anual (65 y 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente) los cuales son similares en otras Ciudades (Tabla 1.3). La exclusión del indicador anual de PST y finalmente reportar a condiciones actuales los estándares de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  (NOM-025, 2005).

Tabla 1.3. Estándares de calidad del aire de  $PM_{2.5}$  para algunos países y ciudades de América y Europa.

País o Ciudad	Estándar anual (media aritmética)	Estándar de 24 horas
Ciudad de Buenos Aires	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**)
Chile <sup>1)</sup>	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**)
Canadá <sup>(*)</sup>	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**)
E.E.U.U.	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como percentil 99
Los Ángeles	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como percentil 99
México	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como percentil 98
Reino Unido	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**)

\* Todas las provincias excepto Québec.

\*\* No se pudo comprobar si el valor corresponde a un percentil.

### 1.3.4. Instrumentos para la medición de partículas

En la actualidad existe una amplia variedad de instrumentos para la medición de partículas. Diversas publicaciones reportan sobre el desempeño, las mediciones, la operabilidad y los problemas asociados de varias tecnologías para la medición de partículas principalmente  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Los problemas asociados a la medición de partículas suspendidas están relacionados con aspectos tales como: las características y la composición de las mismas, el tipo de filtro empleado en la colección, las condiciones climáticas (velocidad del viento, la temperatura o la humedad relativa), el diseño de la entrada (cabezal) relacionado con el punto de corte del instrumento (Figura 1.8), así como del principio de operación: manual o automático.

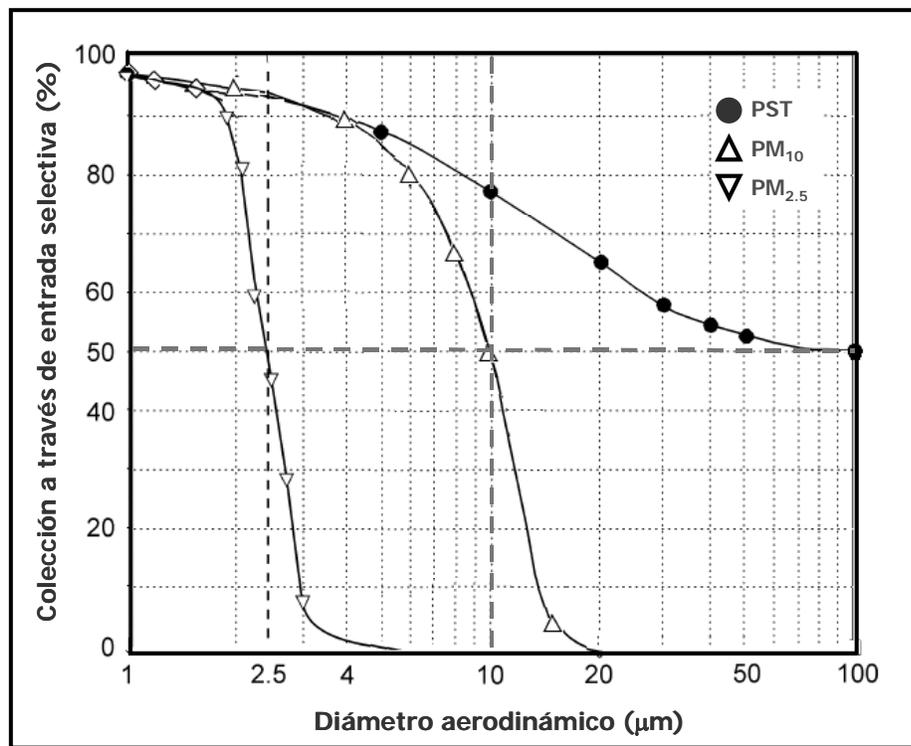


Figura 1.8. Relación entre tamaño de partícula y porcentaje de colección

**El método manual o gravimétrico:** Es el más sencillo para la medición de partículas suspendidas consiste en la cuantificación de la masa de una muestra de partículas recolectada sobre un filtro (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986). Tiene la ventaja de que la muestra puede ser usada para análisis posteriores, sin embargo presenta varias desventajas, como son: 1) el uso de filtros para colección de muestra y su acondicionamiento a temperatura y humedad controlada 2) la presencia de cargas estáticas pueden interferir en la medición principalmente cuando se trata de cantidades pequeñas de muestra (Engelbrecht et al., 1980); 3) el tiempo desde que el filtro es pesado por primera vez hasta que regresa de nuevo al laboratorio de análisis es de algunos días; por lo que, la incorporación de compuestos de la fase gaseosa o semivolátiles presentes en las partículas o el material del filtro se pierden y se puede subestimar la masa de las partículas (Kim et al., 1995,); 4) en ocasiones se presentan reacciones química entre algunos compuestos presentes en las partículas y el material del filtro o algunos compuestos de la fase gaseosa, que resultan en un incremento o decremento de la masa total (Appel et al., 1988) y 5) la información sobre el estado de la calidad del aire tarda más de 48 horas.

Con el fin de disminuir la magnitud de estas interferencias mencionadas anteriormente se pueden emplear filtros de materiales como el nylon o teflón, transportar y almacenar las muestras a temperaturas menores que el medio ambiente y disminuir la exposición del filtro después del muestreo (Chow, 1995).

El método de referencia que actualmente se emplea para la evaluación del cumplimiento de los estándares de partículas son instrumentos de operación manual o semiautomática. Estados Unidos es el único país que ha designado instrumentos de referencia para la medición de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, tienen como principio de operación el método gravimétrico, las características de éstos se describen detalladamente en el Código Americano de Regulaciones Federales Título 40 Parte 50 Apéndice el L "National Ambient Air Quality Standards for for Particulate Matter" (U.S. EPA, 1997c).

**Los métodos automáticos:** Miden algunas propiedades de las partículas suspendidas de manera continua, permiten observar *in-situ* de manera horaria o en tiempo real las concentraciones de la fracción de interés. Esta característica hace que los métodos continuos tengan una importante ventaja sobre los métodos manuales. Para cuestiones de riesgo a la salud de la población, muchas redes de monitoreo emplean métodos continuos para conocer de manera inmediata la calidad del aire y generar los índices de contaminación. Además, los métodos automáticos disminuyen las visitas a las estaciones de monitoreo, permiten conocer el patrón del contaminante a lo largo del día, detectar la presencia de fuentes. Las mediciones realizadas con métodos continuos se estandarizan con respecto a métodos de referencia.

Los métodos continuos se pueden clasificar de acuerdo a las propiedades de las partículas que miden, como son: I) masa y masa equivalente, II) interacción con la luz o III) composición química (Tabla 1.4)

Tabla 1.4.- Resumen de diferentes tecnologías automáticas utilizadas para partículas (U.S. EPA. 1998).

Instrumento	Descripción general	Cantidad de Medida
I. Masa y masa equivalente		
<p>Microbalanza oscilante (por sus siglas en ingles TEOM)</p> <p>Monitor de atenuación Beta (por sus siglas en ingles BAM)</p> <p>Sistema continuo de monitoreo de masa ambiente (por sus siglas en ingles CAMMS)</p>	<p>Las partículas se colectan sobre un filtro colocado en la punta de un tubo hueco de vidrio en forma ahusada el cual se mantiene en oscilación por medio de la aplicación de un diferencial eléctrico. El aire pasa a través del filtro y del tubo. La oscilación del elemento de vidrio se mantiene a través de una señal de retroalimentación proporcionada por un sensor óptico. La frecuencia de oscilación del elemento disminuye a medida que aumenta la masa sobre el filtro y es proporcional a la cantidad de masa depositada</p> <p>El monitor mide la concentración de partículas generada por una fuente de radiación que emite electrones de baja energía (radiación <math>\beta</math>), los electrones se propagan a través de una cinta de fibra de vidrio en donde se deposita la muestra de partículas, los electrones se determinan en el lado opuesto con un detector <math>\beta</math>. La cantidad de partículas depositadas sobre el filtro se relaciona con la transmitancia de la radiación <math>\beta</math> a través de la relación de Beer-Lambert.</p> <p>Se basa en la medición del incremento de la caída de presión a través de un filtro de Nucleopore® durante el muestreo de partículas. La caída de presión es proporcional a la masa de las partículas sobre el filtro.</p>	<p>Masa de partícula. Limite de detección <math>\sim 5 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> como promedio de 5 minutos</p> <p>Masa de partícula. Limite de detección <math>\sim 5 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> como promedio de 1 hora.</p> <p>Masa de partícula. Limite de detección <math>\sim 2 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> como promedio de 1 hora</p>
II. Interacción con la luz visible (dispersión y absorción)		
Nefelómetro	Es una manera indirecta para la medición de la concentración de las partículas finas mediante la medición de la dispersión de la luz. El coeficiente de dispersión de la luz, $b_{sp}$ , se relaciona linealmente con la masa de las partículas. El nefelómetro se puede usar para medir la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ cuando se conoce la constante de proporcionalidad entre el $b_{sp}$ y la masa de las partículas finas	Coeficiente de dispersión de la luz. Límite mínimo de detección $\sim 1 \text{ Mn}^{-1}$ para promedio de 10 min.
<p>Contador óptico de partículas</p> <p>Aethalometro</p>	<p>Se ilumina la partícula o un grupo de estas mediante un haz de luz, la luz se dispersa hacia varios ángulos y se mide la intensidad de luz dispersada. Esta señal se interpreta en términos de tamaño de partícula previa calibración del instrumento.</p> <p>Se hace pasar aire ambiente a través de un filtro de fibra de vidrio y se incide la muestra con un haz de luz, las partículas depositadas como el carbono negro absorbe parte de la luz incidente. Esta absorción se interpreta como la concertación de carbono negro presente en muestra de aire.</p>	<p>Número de partículas en el intervalo entre <math>0.1</math> y <math>50 \mu\text{m}</math></p> <p>La absorción se reporta como concertación de carbono negro. Limite de detección <math>\sim 0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3</math> como promedio de 1 min.</p>

Tabla 1.4.- Resumen de diferentes tecnologías automáticas utilizadas para partículas. (continúa)

Instrumento	Descripción general	Cantidad de Medida
III. Composición química		
Espectrómetro de masas	Se introduce una muestra de aire ambiente a baja presión para alcanzar velocidades grandes cuando el gas se expande. El tamaño de partícula se evalúa a través de la dispersión de luz emitida por un rayo láser que se incide sobre la muestra	La partícula clasifica según su tamaño y composición.
Detector fotométrico de flama, para detección de sulfuros.	La muestra se queman mediante una flama de hidrógeno y el fotomultiplicador detecta (S <sub>2</sub> *) mediante una emisión fluorescente cercana a 400 nm. La señal que se recibe es proporcional a la concentración de todas las especies de azufre.	Dióxido de sulfuro y sulfatos. Limite de detección ~ 1 µg/m <sup>3</sup> como promedio de una hora
Monitor automático para nitratos en Partículas	Se colecta la partícula mediante un impactor y se quema la muestra. La producción de gas se analiza mediante un analizador de NO <sub>x</sub> mediante quimiluminiscencia	Nitratos en partícula Limite de detección ~ 5 µg/m <sup>3</sup> como promedio de 12 min.
Monitor automático para sulfatos en Partículas	Convierte el SO <sub>4</sub> en SO <sub>2</sub> usando un reducción térmica. El SO <sub>2</sub> se analiza mediante una emisión fluorescente.	Sulfatos en partícula Limite de detección 0.5 µg/m <sup>3</sup> como promedio de 15 min.

# Capítulo 2

## *Metodología*

## 2. Metodología.

Esta sección describe el planteamiento utilizado para cumplir con la meta propuesta. Se inicia con la descripción de como se delimitó el área de estudio en el año 2002 hasta la selección del tipo muestreo más apropiado y de las técnicas de análisis de la información obtenida hasta la selección de los sitios de monitoreo.

### 2.1 Descripción del área de estudio

La región de estudio se encuentra en la porción centro de la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y tiene una extensión total de 297 Km<sup>2</sup>, involucra a las delegaciones de Gustavo A. Madero, Azcapotzalco y Miguel Hidalgo, en el Distrito Federal, y a los municipios Ecatepec de Morelos, Nezahualcoyotl y Tlalnepantla del estado de México. La región norte de la ZMCM presenta una geomorfología cuyo paisaje corresponde a un relieve de planicie acumulativa, el cual se caracteriza por tener pendiente ligeramente planas y planas (0-3%), delimitada al oeste por la Sierra de las Cruces y se encuentra dividida por la Sierra de Guadalupe al centro. Las planicies acumulativas están conformadas por depósitos superficiales clásticos, los cuales corresponden a sedimentos mixtos del Holoceno de origen fluvio-lacustres, donde se pueden encontrar lentes puros de microfósiles y de minerales arcillosos, o puede presentar manchones irregulares de ceniza volcánica o bien depósitos de materia orgánica (Figura 2.1).

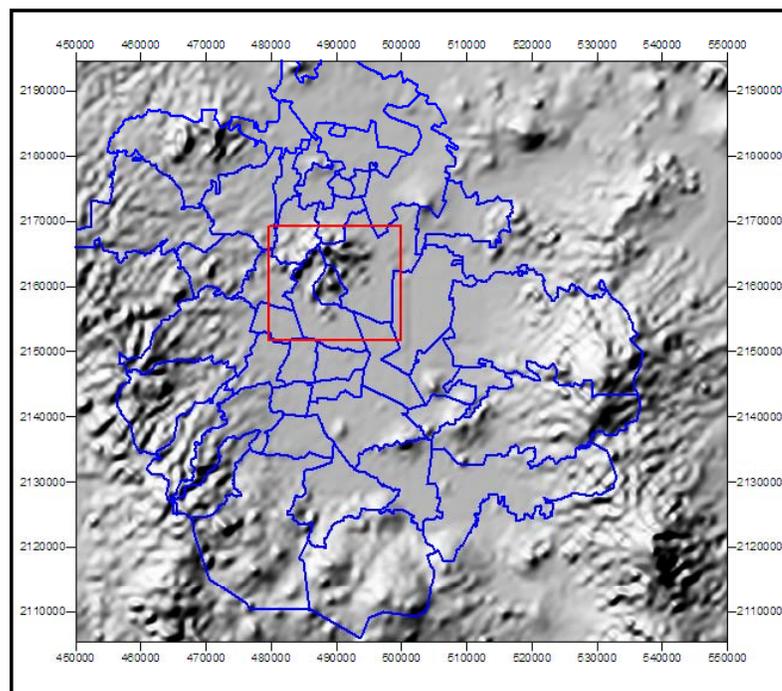


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio.

En alguna época la planicie estuvo ocupada por los cuerpos lacustres de Zumpango y Texcoco con vegetación hidrófila, llanos cubiertos de extensos pastizales, matorral xerófilo y vegetación halófila en las zonas emergidas y afectadas por el agua. Actualmente el desecamiento de las zonas lacustres ha favorecido la acumulación de sales de sodio en el suelo, pH alcalino, el área se encuentra con una severa degradación eólica y con escasa vegetación de tipos herbácea y halófila.

La región presenta un fenómeno particular de degradación por los procesos de erosión eólica, los cuales se dan en los suelos afectados por sales y que físicamente se encuentran sin estructura y de consistencia suelta. Estos suelos originalmente salinos son levantados por corrientes convectivas que se dan principalmente a finales de la época de invierno (durante los meses de febrero y marzo) y forman las clásicas tolveneras que levantan y transportan grandes cantidades de polvo.

El uso de suelo en la región ha sufrido transformaciones importantes a lo largo de las últimas décadas: el desplazamiento de la industria hacia la zona conurbada del DF, el crecimiento del sector terciario de la economía (comercio formal e informal) y con ello con ello el crecimiento poblacional y servicios (Figura 2.2). El suelo urbano se distribuye en los siguientes usos: comercio y servicios, habitacional, industrial, mixto, esparcimiento y, preservación y recreación. Cabe mencionar que hacia el oriente predominan los usos habitacionales de los grupos de menores ingresos y asentamientos irregulares.

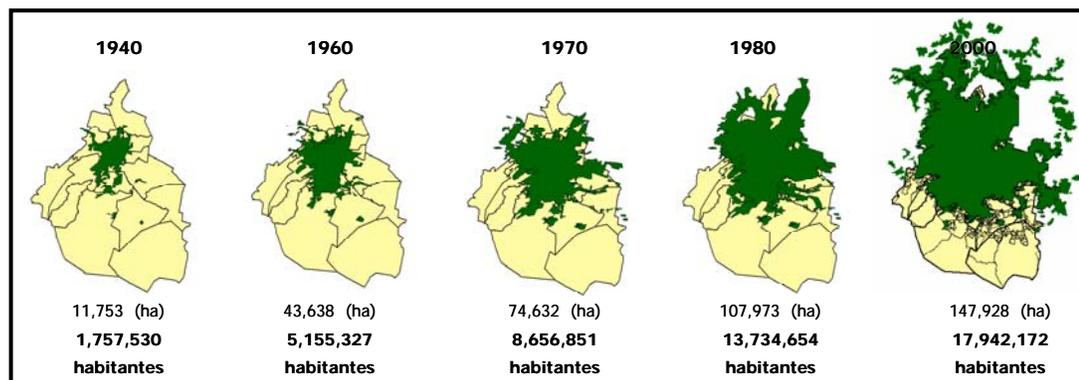


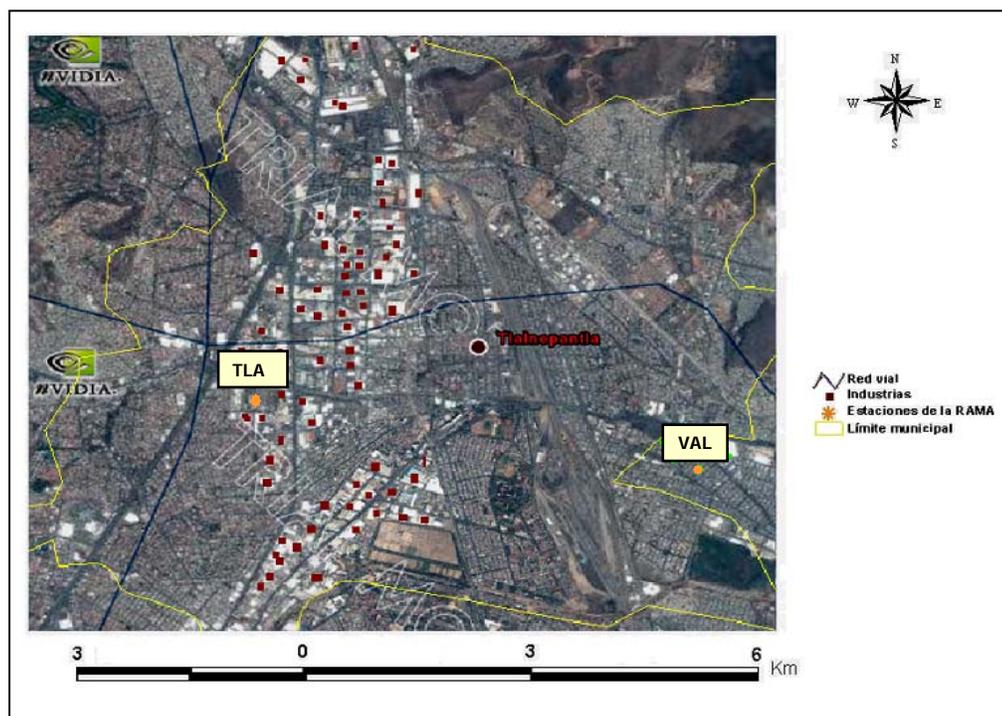
Figura 2.2. Crecimiento del área metropolitana de la Ciudad de México.

El sistema vial asociado a la ZMCM es tanto por sus características como por sus dimensiones el más complejo del país y esta influenciado por las carreteras federales y estatales que enlazan al país con ciudades como: Querétaro, Tlaxcala, Cuernavaca, Toluca y Pachuca. Destacan por su dinamismo la Carretera México-Querétaro donde el tránsito diario promedio anual es de aproximadamente 17 mil unidades y para la Carretera México-Pachuca de 7.5 mil unidades. El crecimiento de la ZMCM en los municipios conurbados ha tenido como consecuencia el crecimiento de vialidades

para conectarlos con las principales vías de comunicación y entre sí, como es el caso del tramo norte del periférico que unió a los municipios de Tlalnepantla, Ecatepec y a la delegación Azcapotzalco con el sur de la ciudad; además la construcción del distribuidor vial de Tizayuca, entre otros.

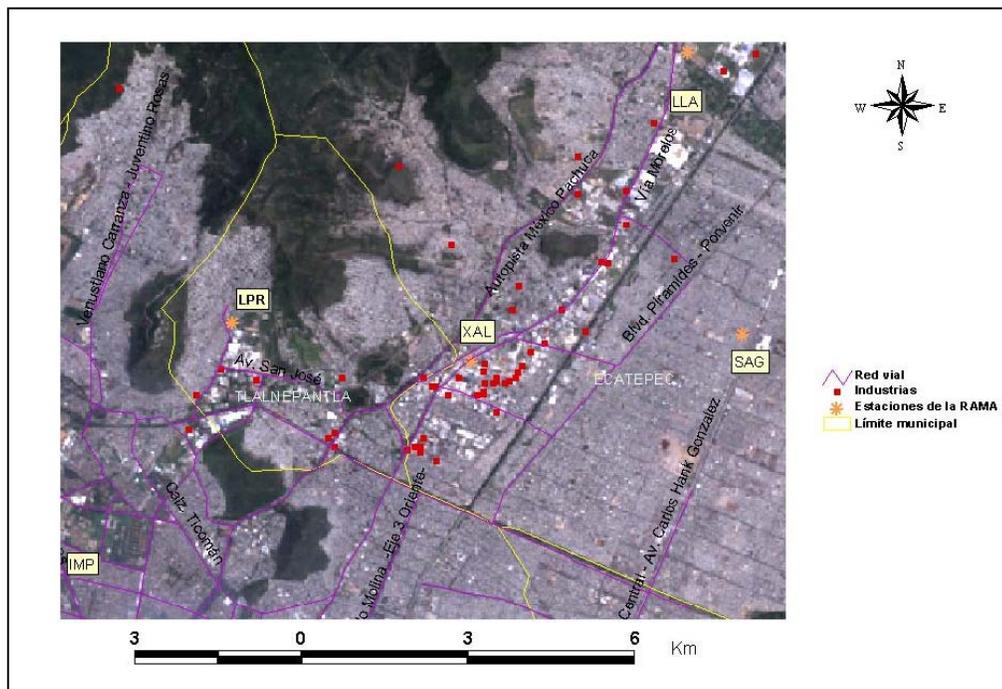
Actualmente el transporte está actualizado y hay 3.2 millones de vehículos que circulan en la ZMCM. La participación del transporte es importante para la funcionalidad de la Ciudad. La mayoría de los viajes se realiza en transporte motorizado de servicio público o privado. El transporte eléctrico desplaza un menor número de población

El desarrollo de zonas industriales hacia los municipios conurbados al norte del DF, tuvo lugar entre 1940 y 1980; tres de los más importantes y extensos se localizan dentro del área de estudio: Tlalnepantla (Figura 2.3), La Presa y Xalostoc (Figura 2.4), los dos primeros en el municipio de Tlalnepantla y el último en el municipio de Ecatepec de Morelos. Los giros que predominan son: alimenticio, químicos, mineral no metálico, metal mecánico, bebidas y tabaco; además de diversas comercializadoras de gas LP.



Fuente: [www.keyhol.com](http://www.keyhol.com) (marzo de 2005)

Figura 2.3. Imagen satelital del área industrial de Tlalnepantla



Fuente: Jefatura de sistemas de información geográfica, SMA.

Figura 2.4. Imagen satelital del área industrial de Xalostoc.

El clima en la región es de tipo seco estepario (BS en clasificación de Köppen), donde la lluvia anual varía de 400 a 500 mm, mientras que la temperatura anual oscila entre 15 y 17° C. Esta relativa aridez se explica por la subsidencia del aire en la planicie, originada por el desplazamiento del aire superficial en dirección cuesta arriba de las montañas (vientos de valle). Así durante la época de lluvia, las nubes originadas de las corrientes convectivas que producen la insolación se agregan al factor que produce el levantamiento orográfico, ocasionando que las nubes se eleven a mayor altura en las zonas montañosas y provoquen mayores aguaceros y tormentas eléctricas que en el centro del valle.

El sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) cuenta con algunas estaciones de monitoreo atmosférico dentro del área de estudio, las cuales evalúan la calidad del aire de la zona a través de diferentes parámetros (contaminantes atmosféricos) y variables meteorológicas. Algunas de ellas miden un mayor número de contaminantes dependiendo de la complejidad del uso del suelo donde se ubican. Tal es el caso de las estaciones de Tlalnepantla (TLA) y Xalostoc (XAL), las cuales determinan contaminantes primarios, ozono, deposición húmeda, seca, y variables meteorológicas. Las demás estaciones sólo miden algunos de estos parámetros: Vallejo (VAL), Azcapotzalco (AZC) y la Villa (LVI).

Los registros de las estaciones de monitoreo indican niveles altos de contaminantes primarios debido a la emisión de gases y partículas provenientes de la industria y la actividad vehicular. Los gases conocidos como: óxidos de nitrógenos y bióxido de azufre, y las partículas respirables tiene mayor presencia durante los meses fríos, ocasionado por la poca ventilación de la ciudad debido a la presencia de masas de aire frío y denso que provoca el estancamiento de los contaminantes en la planicie (SMA, 2003; J. Ostos,2000).

## 2.2. Selección de los sitios de muestreo

En la sección previa se describió la complejidad de la región norte de la ZMCM, las condiciones económicas, ambientales y sociales. La selección de los sitios de monitoreo de partículas finas implicó un reto particular. El propósito del estudio fue realizar una inferencia de calidad del aire en la región seleccionada con base en la colección de muestras en algunos sitios georeferenciados. Debido a que existía una diferentes posibilidades para la instalación de los sitios de muestreo y a las limitaciones de equipo y de presupuesto, fue necesario plantear un esquema tal que permitiera determinar la concentración de partículas finas en la región con un adecuado nivel de precisión tomando en cuenta las limitaciones existentes.

En un primer planteamiento se seleccionaron las estaciones del SIMAT localizadas en el área de estudio, sin embargo resultaron insuficientes para garantizar la cobertura mínima y la precisión necesaria. El problema inicial fue el de cómo agregar puntos adicionales a los existentes en la red de monitoreo. Una propuesta inicial para resolver el problema era el de monitorear  $PM_{2.5}$  en las estaciones y aplicar un método geoestadístico que permitiera conocer la distribución de los datos a través de mapas e interpolar hacia las zona donde no se tuviera información. El método más exacto es el Kriging, utiliza un indicador de autocorrelación para variables geográficas, permite identificar áreas en el mapa con “huecos” o redundancia en la cobertura de la RAMA (Haining R. 2003). Esta propuesta resultaba económica, sin embargo se dificultaba representar la influencia de las diferentes variables tales como: meteorología, emisiones y topografía que intervienen en la distribución de las concentración de las partículas finas, además había una gran distancias entre las estaciones de monitoreo.

Otra alternativa era la de aplicar modelos numéricos para simular la distribución espacial del contaminante sobre el Valle de México (Jacobson, M. Z, 1999), existen herramientas como: *The UAM-V Photochemical Modeling System* y *Regulatory Modeling System for Aerosols and Deposition* que permiten realizar este trabajo con notable precisión. La principal desventaja de este método es la falta de información sobre las diferentes variables físicas y químicas que se encuentran involucradas en el origen, formación y transporte de las partículas finas.

Una tercera opción fue la de generar información primaria acerca de la concentración del contaminante en el área de estudio a través de la colección de muestras en sitios seleccionados de manera estratégica que pudieran asegurar una cobertura adecuada de la región. Este método proporciona información sobre la distribución espacial real del contaminante, permite identificar sitios con concentraciones elevadas, evaluar su relación con otras variables asociadas a la contaminación atmosférica, así como también proporciona muestras físicas para análisis físico-químicos adicionales. La desventaja más importante de esta propuesta es el costo económico, técnico y humano para realizar este trabajo.

De la evaluación de las dos primeras estrategias mencionadas se concluyó que la información disponible no era suficiente para elegir entre la evaluación a través de un modelo interpolación exacto como es el caso de Kriging o la aplicación de modelos numéricos. Hasta el año 2000 era muy escasa la información sobre la concentración de  $PM_{2.5}$  en la ZMCM y los pocos estudios disponibles se realizaron durante periodos cortos o en sitios fuera del área de estudio, así como tampoco se encontró información suficiente sobre precursores, mecanismos y otras variables para la ejecución de los modelos numéricos de simulación. Por tal motivo se planteó la aplicación de un programa para la recolección de muestras de  $PM_{2.5}$  en la región de estudio, tomando en cuenta su extensión y las diferentes variables climatológicas.

Para el diseño del plan de muestreo se considero la aproximación de la teoría clásica del muestreo la cual considera los valores de una población de valores en la región como un conjunto de valores desconocidos los cuales son, fuera de cualquier error de medición, de un valor fijo. La aleatoriedad se introduce cuando se realiza la localización del sitio para el muestreo. En el caso de una población discreta, la meta a inferir puede ser una propiedad como:

$$\left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=1, \dots, N} z(k)$$

Donde N es el número de miembros en la población, la ecuación anterior es la media de la población. En el caso de una población continua en la región A de área |A| entonces la ecuación anterior se expresa como:

$$\frac{1}{|A|} \int_A z(x) dx$$

Los estimadores de este método ponderan las observaciones del muestreo por sus probabilidades de ser incluidas en la muestra. En la aproximación descrita se pueden emplear como meta de inferencia los valores individuales sin embargo esta estimación desprecia toda la información relacionada con la ubicación del valor.

Las principales estrategias de muestreo consideradas en el proyecto para evaluar las propiedades espaciales fueron: la aleatoria, la aleatoria estratificada y la sistemática. En el muestreo aleatorio se seleccionan “n” sitios de tal manera que cada miembro de la población tiene una probabilidad igual e independiente de selección. En el muestreo aleatorio estratificado la población a muestrear se divide en estratos y en cada uno de ellos se seleccionan los sitios de la manera descrita para el muestreo aleatorio. En el muestreo sistemático se estratifica el área y los puntos de muestro ocupan la misma posición en cada uno de los estratos, la aleatoriedad se introduce durante la selección del punto en el primer estrato, que es el que definirá la posición en el resto de los estratos.

Existen ventajas y desventajas de cada una de las técnicas descritas. El muestreo aleatorio no garantiza una cobertura uniforme de la región de estudio y puede contener grandes áreas sin muestreo, por lo que es un método poco preciso en zonas con propiedades diferentes. La estratificación reduce este problema y es más preciso aun cuando pueden darse casos con grandes áreas sin cobertura. El muestreo sistemático es sencillo de implementar y provee una cobertura uniforme con distancias homogéneas entre los puntos de muestreo y es tan preciso como el estratificado.

Una variante interesante al muestreo sistemático y del aleatorio estratificado es el muestreo a juicio, en donde se toma en cuenta los conocimientos previos del área a estudiar para la selección de los sitios, estos conocimientos se basan en la experiencia previa de los operadores y sus conocimientos de las áreas, como puede ser la presencia de un impedimento físico en el área que dificulte la obtención de la muestra, la presencia de fenómenos locales que contaminen o inhabiliten la muestra, riesgos sociales, etc. La aleatoriedad se puede introducir eligiendo en una primera etapa de manera aleatoria los sitios de muestreo y después someterlos a una evaluación por parte de los expertos.

Debido a la complejidad urbana de la región de estudio se eligió el método aleatorio estratificado con evaluación a juicio, para la selección de los sitios de muestreo. Se consideraron las zonas más poblada y de mayor complejidad ambiental por los diferentes usos de suelo presentes en la región. Se realizaron dos estratificaciones del área de estudio, la cual corresponde a la región centro de la ZMCM, en la primera se definieron dos áreas que se denominaron área Noreste (NE) y área Noroeste (NO); para la segunda estratificación se trazó una rejilla con celdas de 2 x 2 Km (Figura 2.5). El tamaño de la celda se definió tomando en cuenta las recomendaciones de la U. S. EPA para una representatividad de escala de vecindario (un radio de 0.5 a 4 Km). La región de estudio cuenta con áreas habitacionales irregulares en las laderas de la Sierra de Guadalupe, además de algunas barrancas y pendientes en

algunas laderas. A causa de esto y a las condiciones de inseguridad en estos sitios se decidió excluir del estudio aquellas celdas de la rejilla que se encontraban en las laderas de la sierra con una altitud superior a los 2300 metros.

Los criterios con los que se evaluaron los sitios resultantes de la estratificación aleatoria fueron:

- Ubicarse en áreas de población.
- No tener una influencia evidente de fuentes de emisiones de partículas cercanas.
- Estar alejados de vialidades con tránsito vehicular intenso o pesado.
- Evitar barreras cercanas que obstruyan el libre flujo del aire.
- Contar con seguridad para los técnicos y los equipos.
- Acceso restringido o controlado.
- Tener disponibilidad de energía eléctrica y de acceso a las instalaciones.

Como resultado se obtuvieron 42 sitios para la instalación de los muestreadores. Considerando en primera instancia los sitios de la RAMA quedando de la siguiente forma: 01\_XAL (Xalostoc), 09\_SAG (San Agustín), 14\_LVI (La Villa), 28\_TLA (Tlalnepantla), 31\_CAM (Camarones), 34\_AZC (Azcapotzalco). La posición y altitud de los sitios se muestra en la Figura 2.5 y Tabla 2.1 en la que se indica su distribución en la región de estudio.

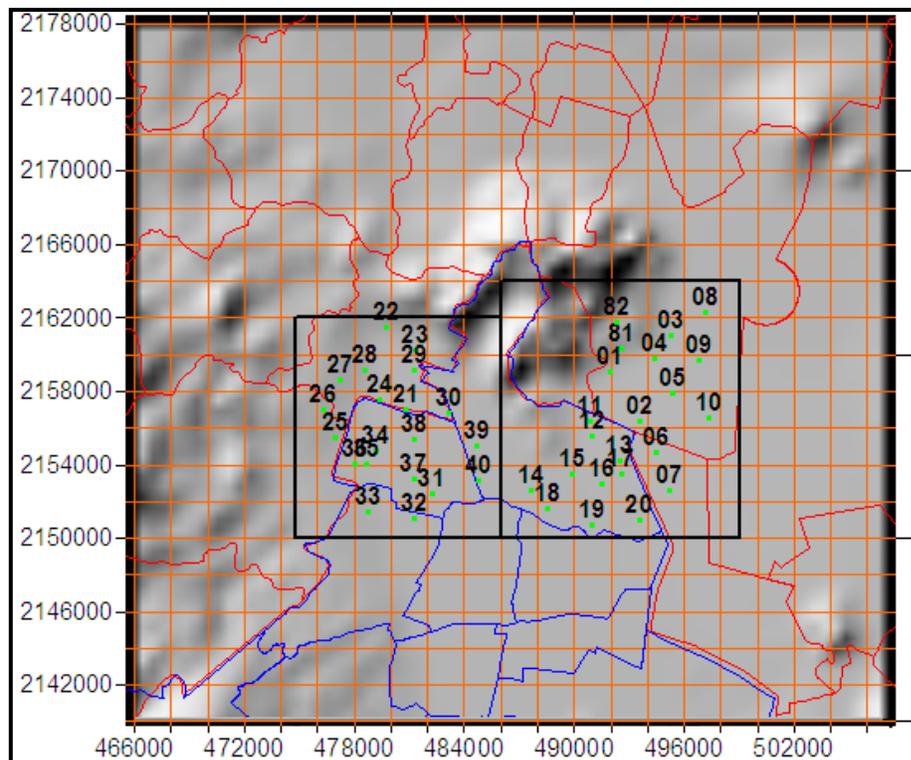


Figura 2.5. Localización de sitios de muestreo para partículas finas.

Tabla 2.1. Ubicación y descripción de los sitios de muestreo.

SITIO	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN DEL SITIO
1	Ecatepec	Latitud: 19° 31' 40"; Longitud: 99° 04' 35"; Altitud: 2201 msnm Distribuidora Volkswagen "Santa Clara" se encuentran en un área principalmente industrial y habitacional. Se ubica sobre la Antigua Carretera México-Pachuca, ahora llamada "Vía Morelos" esquina con la Calle Oro, la Vía Morelos presenta circulación en ambos sentidos con flujo vehicular alto de autos particulares, camiones de carga, autobuses a diesel, microbuses y taxis; la Calle Oro presenta circulación en un solo sentido con flujo vehicular moderado de camiones de carga, autos particulares y taxis. Hay diversas industrias y comercios cerca de la estación como: taller mecánico, industria jabonera, industrias químicas, del vestido, de consumo alimenticio y de productos metálicos y de madera. Los predios de alrededor presentan vegetación escasa.
2	Ecatepec	Latitud: 19° 30' 11"; Longitud: 99° 03' 41"; Altitud: 2213 msnm Escuela Primaria John F. Kennedy , se encuentra en un área industrial y habitacional. Se ubica en la Av. John F. Kennedy s/n equina Guadalajara, Col. Emiliano Zapata 2da sección Las casas aledañas son de dos pisos. Se encuentra una bodega empacadora de harina, industria de fabricación de tornos, algunos comercios: tintorería, taller mecánicos. Hacia el sur un pequeño mercado y terrenos baldíos. Las calles presentan flujo vehicular bajo.
3	Ecatepec	Latitud: 19° 32' 43"; Longitud: 99° 02' 43"; Altitud: 2212 msnm Jardín de niños "Jean Peaget", se localiza en calle Golfo de León S/N, Col. Prados de Santa Clara. Las casas son de uno y dos pisos. Hay pequeños comercios como: tintorería, taller mecánico, tiendas y papelerías. Al oeste un pequeño parque de juegos sin cubierta vegetal alguna. Las vialidades presentan carga vehicular local: autos particulares y algunos taxis.
4	Ecatepec	Latitud: 19° 32' 02"; Longitud: 99° 03' 14"; Altitud: 2210 msnm Escuela primaria "Vicente Guerrero". Se ubica en Mariano Escobedo Esq. Emiliano Zapata, Col. Miguel Hidalgo. Las casas aledañas son de uno y dos pisos. Algunas calles cercanas se encuentran sin pavimentar. Hacia el oeste se localiza la empresa Recicle, S.A. de C.V. donde almacenan, estiba y desestiba cartón a cielo abierto. También cerca de la escuela cruza el tren y en el momento de la visita este se encontraba haciendo maniobras. El flujo vehicular es bajo: autos particulares y algunos taxis.
5	Ecatepec	Latitud: 19° 30' 59"; Longitud: 99° 02' 38"; Altitud: 2211 msnm Edificio del Centro de Atención Psicopedagógica en la Educación Preescolar (CAPEP). Se ubica en la calle Leona Vicario Esq. Marte, Col. Valle de Anáhuac, Sección "A". Los edificios son de un piso. Las instalaciones cuentan con áreas verdes y al sur hay un deportivo con canchas de soccer cubiertas de tierra. Colina al este con el mercado Valle de Anáhuac y más adelante se encuentra Hospital General "Dr. José María Rodríguez" y la Av. Carlos Hank González. El tránsito vehicular de la zona es moderado, transitan vehículos particulares, taxis , microbuses y combis.
6	Nezahualcóyotl	Latitud: 19° 29' 16"; Longitud: 99° 03' 11"; Altitud: 2184 msnm Escuela primaria "Ignacio Manuel Altamirano". Se ubica en Valle Yukón Esq. Valle Maíz, Col. Valle de Aragón, 1ra sección, e una zona urbana comercial. El oeste se localiza el Centro de Estudios Tecnológicos del Estado de México (CEYTEM) y al norte el Centro Social del CEYTEM. La zona es comercial, hay panadería tintorería, taller mecánico y una Bodega Aurrera. Las calles aledañas presentan flujo vehicular moderado, transitan vehículos particulares, taxis , microbuses y combis. A 500 m hacia el norte se localiza la Avenida Río de los Remedios "Periférico" y hacia el este la Avenida Carlos Hank González.
7	Nezahualcóyotl	Latitud: 19° 28' 09"; Longitud: 99° 29' 16"; Altitud: 2187 msnm Escuela primaria "Poeta Josué Mirlo". Se ubica en cerrada Prados de Ahuehuate S/N, Col Prados de Aragón. Es una zona urbana habitacional con algunos comercios. Las casas son en su mayoría de dos pisos. Al norte colinda con el mercado Prados de Aragón, el cual tienen techo de lamina. Al sur con un parque de juegos infantiles con piso de arcilla y tezontle. La vegetación es escasa. El flujo vehicular es escaso, solo transitan autos particulares en su mayoría.
8	Ecatepec	Latitud: 19° 33' 24"; Longitud: 99° 01' 36"; Altitud: 2212 msnm Oficina de los Servicios Educativos del Estado de México, en la Avenida México Esq. Bahamas, Col Jardines de Cerro Gordo. La zona es urbana habitacional es mayoría. Las edificaciones son de dos y tres pisos. Hacia el norte colinda con una escuela primaria. La Avenida México presenta flujo vehicular moderado en dos sentidos, circulan algunos auto particulares, taxis, transporte público (combis). Hacia el noreste a 200 m se encuentra una empresa sin razón social visible que hace estructuras de acero y concreto.
9	Ecatepec	Latitud: 19° 31' 59"; Longitud: 99° 01' 49"; Altura: 2214 msnm El Centro de Salud Comunitario "San Agustín" (estación SAG), se encuentra en un área urbana habitacional. Se ubica en la esquina de las calles "Sur 88" y "Sur 90", ambas presentan circulación en ambos sentidos y flujo vehicular bajo de autos particulares. Algunos parques circundantes cuentan con vegetación de temporal. A más de 200 m al este de la EM se localiza la Avenida Hank González que presenta circulación en ambos sentidos (con 7 carriles cada uno) y flujo vehicular alto de autos particulares, taxis, microbuses, autobuses locales y foráneos, camiones de carga, pick-up, y motocicletas.

SITIO	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN DEL SITIO
10	Ecatepec	<p>Latitud: 19° 30' 18"; Longitud: 99° 01' 32"; Altitud: 2186 msnm            Escuela secundaria "Juan Álvarez". Se ubica en Avenida Ávila Camacho Esq. Plan de Ayala, Col. México Revolucionario en un área urbana habitacional. El flujo vehicular de la avenida es bajo solo autos particulares, sin embargo sobre la avenida, éste se vuelve moderado transitan autos particulares, taxis, combis y algunos microbuses. La avenida tiene flujo en dos sentidos con tres carriles de cada lado, se divide por un camellón de 2 m de ancho y no tiene cubierta vegetal alguna. La escuela tiene un pequeño estacionamiento para profesores como a 20 m en línea recta de donde se ubicó el equipo. Las casas aledañas son de dos pisos en su mayoría..</p>
11	Gustavo A. M.	<p>Latitud: 19° 30' 12"; Longitud: 99° 05' 13"; Altitud: 2233 msnm            Escuela secundaria No. 271 "Álvaro Obregón". Dirección: Avenida Eduardo Molina S/N entre calles 314 y 316, Col. Nueva Atzacualco. El uso de suelo en los alrededores de la estación es habitacional principalmente. Se ubica en el camellón de la Avenida Eduardo Molina a espalda del Salón de usos múltiples "Nueva Atzacualco. La avenida es de cuatro carriles a cada lado del camellón, y transitan principalmente autos particulares y taxis. A 200 metros al sur este se encuentra una base de camiones de RTP y microbuses que se dirigen hacia el sur. Hacia el norte a 300 m, la avenida se termina y cruza la avenida periférico y el canal de aguas negras". Las casas de la zona son de dos y tres niveles. El camellón tiene árboles de gran altura.</p>
12	Gustavo A. M.	<p>Latitud: 19° 29' 44"; Longitud: 99° 05' 10"; Altitud: 2229 msnm            Centro de salud P-II "Nueva Atzacualco". Se ubica en Calle 310 Esq. Calle 317, Col. Nueva Atzacualco. Se encuentra en un área urbana habitacional con algunos comercios. La calle 310 presenta circulación en ambos sentidos cuenta con de dos carriles amplios, donde circula autos particulares, taxis, microbuses, combis y algunos camiones de carga de poca tonelada. También se encuentran tiendas, refaccionaría, peletería, papelería y algunos talleres. Las casas son de dos y tres niveles. Hacia el oeste a 500 m se encuentra la avenida Eduardo Molina con flujo vehicular bajo. Hacia el Este la Avenida Gran canal con flujo vehicular bajo.</p>
13	Gustavo A. M.	<p>Latitud: 19° 29' 01"; Longitud: 99° 04' 19"; Altitud: 2224 msnm            Oficinas de estancia Infantil de la zona territorial No. 3. Se localiza en un área urbana habitación con domicilio en calle Edo de Morelos Esq. Edo de Sinaloa, ambas con poco flujo vehicular. Al oeste se encuentra una escuela secundaria y un pequeño parque con juegos infantiles y suelo de tezontle. A 500 m al sur se encuentra el Deportivo "Los Galeana" que tiene diversas canchas de soccer sin cubierta vegetal alguna y hacia el norte a la misma distancia la Avenida Villa de Ayala con flujo vehicular medio, circulan autos particulares, taxis, combis, microbuses y camiones de carga con menos de 3 toneladas.</p>
14	Gustavo A. M.	<p>Latitud: 19° 28' 09"; Longitud: 99° 07' 3"; Altitud: 2256 msnm            La Estación de Bomberos "José Saavedra del Razzo" se encuentra en un área urbana, principalmente habitacional y comercial. Se ubica sobre la Avenida Henry Ford que presenta circulación en ambos sentidos y flujo vehicular moderado de autos particulares, taxis, microbuses, autobuses locales y foráneos, y camiones de carga. A 12 m al suroeste se encuentran 3 tanques de gas LP con una capacidad aproximada de 5000 litros; hacia el este a 15 m se encuentra la calle Otilia y al oeste a 20 m se localiza la calle Martha, ambas presentan circulación en un solo sentido y flujo vehicular bajo de autos particulares y taxis; a 25 m al norte se encuentra un centro comercial con estacionamiento con capacidad para más de 20 autos y a un Km al noreste se encuentra una industria de ceras</p>
15	Gustavo A. M.	<p>Latitud: 19° 28' 38"; Longitud: 99° 05' 46"; Altitud: 2241msnm            Unidad de Medicina Familiar No. 23 del IMSS, se localiza un área urbana habitacional en la Avenida San Juan de Aragón No. 311 Esq. Avenida Eduardo Molina, Col. San Pedro el Chico. La circulación de ambas avenidas es de doble sentido con cuatro carriles cada sentido. Presentan flujo vehicular alto debido a que circulan autos particulares, taxis, combis, microbuses, camiones de RTP y camiones de carga. Existe camellón en ambas avenidas, el de Eduardo Molina tiene cubierta vegetal y árboles de gran altura, en San Juan de Aragón, éste se ocupa de estacionamiento para más de 20 autos. Además afuera de la UNF hay un sitio de taxi. En la zona hay Unidades habitacionales con torres de seis y siete pisos, además casas de dos y tres pisos, Hacia el sureste se localiza un área industrial y algunas estaciones de servicios de Gas LP. En el mismo predio de la UMF se localiza un teatro y el Deportivo "Eduardo Molina"</p>
16	Gustavo A. M.	<p>Latitud: 19° 28' 21"; Longitud: 99° 04' 50"; Altitud: 2232 msnm            Unidad de Medicina Familiar No. 94 del IMSS. Se localiza en una zona urbana habitacional en Camino a San Juan de Aragón S/N, Col. Ampliación Casas Alemán. La avenida es de dos sentidos con dos carriles por sentido. A 25 m se localiza la José Loreto Fabela con dirección en ambos sentidos y tres carriles por sentido, además tiene un camellón que divide los sentidos con árboles de gran altura. El flujo vehicular por ambas vialidades es medio, circulan autos articulares, taxis, microbuses y combis. Las casas son de dos y tres pisos, a espalda de la UMF se localiza la Unidad Habitacional José Loreto Fabela con algunas torres de 5 pisos cada una. Al frente de la UMF se observa: un taller mecánico y eléctrico, una vulcanizadora, algunas tiendas y farmacias. Hacia el noreste a 200 m se localiza el Deportivo "Los Galeana" que tiene varias canchas de fútbol soccer sin cubierta alguna y árboles de gran altura. Al sur a 500 m la Avenida 412 con flujo vehicular alto.</p>

SITIO	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN DEL SITIO
17	Gustavo A. M.	Latitud: 19° 28' 37"; Longitud: 99° 04' 16"; Altitud: 2228 msnm Escuela primaria "Profre. Enrique Vázquez", se localiza en una zona urbana habitacional en calle Volcán Larín S/N Esq. Volcán Acatenango, Col. Ampliación La Providencia. Las calles presentan flujo vehicular bajo no hay avenidas importantes cerca del sitio. Las casas aledañas son de dos y tres pisos. Hacia el noroeste a 150 m se localiza el Deportivo "Los Galeana" que tiene varias canchas de fútbol soccer sin cubierta alguna y árboles de gran altura.
18	Gustavo A. M.	Latitud: 19° 27' 36"; Longitud: 99° 06' 33"; Altitud: 2256 msnm Unidad de Medicina Familiar No. 3 del IMSS, se localiza en un área urbana habitacional en calle Oriente 91 No. 3498 Esq. Norte 52, Col. La Joya. Ambas calles son de doble sentido con una vialidad en cada sentido. El flujo vehicular que presentan es bajo. Al oeste a 200 m se localiza la Avenida Congreso de la Unión de un solo sentido y 6 carriles. Esta dividida a la mitad por un camellón el cual soporta las columnas del metro elevado de la línea 4. También se localiza un mercado.
19	Gustavo A. M.	Latitud: 19° 27' 07"; Longitud: 99° 05' 99"; Altitud: 2208 msnm Secundaria Técnica no. 41, se encuentran en un área urbana habitación y comercial entre las avenidas 504, 549, 508 y 553 Col. Unidad Habitacional San Juan de Aragón 1ª sección. Hay presencia de comercios en construcciones no mayores a dos niveles y un mercado hacia el norte. A 250 m en dirección norte se encuentra el Eje Vial 3 Norte, el cual tiene carga vehicular alta de autos particulares, taxis, microbuses y camiones de carga. A 35 m en dirección oeste se encuentra la Avenida 535. A 65 m en dirección este se encuentra un parque pequeño con vegetación abundante. Hacia el sur se localiza un patio escolar con 80m² de área, totalmente pavimentado.
20	Gustavo A. M.	Latitud: 19° 27' 17"; Longitud: 99° 03' 42"; Altitud: 2207 msnm Centro de Estudios Técnicos "Walter Cross Buchanas" se localiza en un área principalmente habitación y se ubica en Avenida 661 Esq. Avenida 606, Unidad Habitacional San Juan de Aragón 4ª sección. Las venidas circulación en ambos sentidos, el flujo vehicular es medio, circulan autos particulares, taxis, microbuses, combis y algunos camiones de la RTP. A 250 m al oeste hay un área comercial que tiene mercado, tintorería, tiendas, panadería y un taller. Durante la primera y segunda etapa de muestreo se estuvieron realizando obras de remodelación y pavimentación en la avenida 606.
21	Tlalnepantla	Latitud: 19° 30' 31"; Longitud: 99° 10' 58"; Altitud: 2252 msnm DIF municipal "San Pablo Xalpa" ubicado en Avenida Cultura Romana S/N, Col. San Pablo Xalpa. Es una zona urbana, a las casas son de uno y dos pisos y al este hay una unidad habitacional con edificios de 4 pisos. La avenida presenta dos sentidos cada uno con 2 carriles al centro hay un camellón de 3 m en algunas partes cuenta con pasto y tiene árboles de gran altura. El flujo vehicular es moderado: autos particulares, taxis, microbuses y algunos camiones de 2 toneladas. Hacia el sur a 400 m aproximadamente se observan los silos de la Harinera San Pablo y la fábrica de Pan de Marinela.
22	Tlalnepantla	Latitud: 19° 32' 57"; Longitud: 99° 11' 34"; Altitud: 2230 msnm Escuela primaria "Alfredo del Mazo Vélez", Calle Atenco No. 15, Col. Romana. La zona es urbana habitacional e industrial. Las casas son de 2 pisos y hay algunos comercio como: bancos, tiendas y tintorería. A 200 m al oeste se localiza la Av. Hidalgo que une a las Avenidas Mario Colín y San Rafael, el flujo vehicular presente es moderado, transitan autos particulares, taxis, microbuses, combis y algunos camiones de carga. Atravesando la avenida empieza la zona industrial de Tlalnepantla y una centro de carga y descarga de trenes.
23	Tlalnepantla	Latitud: 19° 32' 16"; Longitud: 99° 10' 41"; Altitud: 2255 msnm Unidad de Medicina Familiar No. 79 del IMSS en Avenidas Cuernavaca Esq. Colima, Col. Valle Ceylan. La zona es urbana habitacional, al norte hay un parque con cubierta vegetal y árboles de gran altura. Al oeste a 200 m se localiza la Av. Ceylan, que presentó flujo vehicular alto donde transitan: taxis, autos particulares, combis, microbuses, camiones de carga de diversos tamaños. Hacia el sur la avenida Mario Colín con características similares a la anterior.
24	Tlalnepantla	Latitud: 19° 30' 50"; Longitud: 99° 11' 47"; Altitud: 2229 msnm Escuela primaria "Dr. Gustavo Baz" localizada en calle Cultura Tolteca Esq. Cultura Griega, Col. El Rosario. La zona es urbana habitacional, las casas son de 2 pisos y hay diversos edificios de cuatro y cinco pisos. Las avenidas tienen circulación en ambos sentidos, cada uno tiene dos carriles. El transito de la zona es bajo, circulan autos particulares y taxis y microbuses por ambas calles.
25	Naucalpan	Latitud: 19° 24' 24"; Longitud: 99° 01' 07"; Altitud: 2247msnm Instituto Juventud del Estado de México, A.C. ubicado en Calzada San Agustín No. 61, Col. Rincón de Echegaray. Las casas son de dos niveles. Al norte se localiza el vaso regulador "El Cristo", al sur un club deportivo. El flujo vehicular es medio, la calzada presenta dos sentidos con dos carriles cada uno, transitan autos particulares taxis y microbuses, esta calzada une las Avenidas Las Armas y Gustavo Baz.
26	Naucalpan	Latitud: 19° 30' 31"; Longitud: 99° 13' 34"; Altitud: 2261 msnm Escuela primaria "Oficio No. 095" en Francisco Clavijero No. 13, Col. Circuito Historiadores. Las zona es urbana habitacional. Las casas son de dos y tres pisos. A sur existe un pequeño parque con cubierta vegetal y árboles de gran altura. El flujo vehicular es bajo, sólo transitan autos particulares. A 150 m al norte se localiza la Avenida que une a las Avenidas Gustavo Baz y Periférico. El flujo vehicular es moderado, con transito de autos particulares, taxis y microbuses.

SITIO	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN DEL SITIO
27	Tlalnepantla	Latitud: 19° 31' 24"; Longitud: 99° 13' 00"; Altitud: 2303 msnm Deportivo Tlalnepantla, se localiza en un área urbano habitacional en Calle Viveros de la Hacienda Esq. Viveros de la Loma, Col. Viveros de la Loma. La calle viveros de la loma presenta flujo vehicular bajo en ambos sentidos, circulan autos particulares, taxis y combis. Las casa cercanas son de dos y tres pisos en su mayoría. La zona es arbolada. Dentro de las instalaciones del Deportivo hay un estacionamiento con capacidad para más de 20 automóviles. Hacia en noreste a 300 m se localiza la Avenida Gustavo Baz que presenta transito vehicular alto, donde circulan autos particulares, taxis, combis, microbuses y camiones de carga.
28	Tlalnepantla	Latitud: 19° 31' 42"; Longitud: 99° 12' 15"; Altitud: 2290 msnm Avenida Toluca s/n, Glorieta Atlacumulco, Colonia Tlalmex (estación TLA), se encuentra en un área urbana principalmente habitacional con algunos comercios y servicios. Se ubica sobre la Avenida Toluca que presenta flujo vehicular moderado de autos particulares, taxis, colectivos (combi), microbuses, camiones de carga y pick-up. Al noreste y este hay una zona industrial y bodegas
29	Tlalnepantla	Latitud: 19° 31' 42"; Longitud: 99° 10' 42"; Altitud: 2238 msnm Escuela primaria "Pliano Mata", se localiza en un área urbana principalmente habitacional, con dirección en Calle Ópalo Esq. Alejandrina, Col. San Juan Ixtacala. Ambas calles presenta flujo vehicular bajo en ambos sentidos, sólo circulan autos particulares y algunos taxis. A 100 m al oeste se localiza la avenida Ceylan con flujo vehicular alto, al noreste a 150 m se localiza la Avenida Vallejo con flujo vehicular alto en un solo sentido donde transitan autos particulares, taxis, camiones de pasajeros, microbuses y camiones de carga. Se ubican en el área algunas bodegas sin razón social a la vista.
30	Tlalnepantla	Latitud: 19° 30' 27"; Longitud: 99° 09' 38"; Altitud: 2236 msnm Escuela Secundaria Técnica No. 3 "José Antonio Alzate", se localiza en un área urbana habitacional con domicilio en Isla Clarión S/N Esq. Isla de Guadalupe, Col. Prado Vallejo. El flujo vehicular en ambas calles es bajo, sólo transito local. Frente a la escuela al sur se localiza un parque con algunos juegos infantiles, árboles de gran altura y algunas áreas sin pavimento. A 150 m al noreste se localiza la Avenida Vallejo con flujo vehicular alto en un solo sentido, donde transitan autos particulares, taxis, camiones de pasajeros, microbuses y camiones de carga.
31	Azcapotzalco	Latitud: 19° 28' 03" Longitud: 99° 10' 10" Altitud: 2208msnm La Escuela "20 de Noviembre", Colonia Hogar y Seguridad, se encuentra situada en un área urbana habitacional, con predominio de comercios pequeños. El tránsito vehicular es bajo y circulan autos particulares principalmente. La Avenida Cuitláhuac se localiza a 200 m en dirección norte el flujo vehicular es alto con predominio de autos particulares, taxis, camiones y microbuses.
32	Miguel Hidalgo	Latitud: 19° 27' 20"; Longitud: 99° 10' 42"; Altitud: 2214 msnm Gfuardería infantil No. 18 del IMSS, se localiza en un área urbana habitacional con dirección en Calzada México tacuba 501; Col. Popotla. La calzada México Tacuba presenta flujo vehicular alto en ambos sentidos, circulan autos particulares, taxis, microbuses, camiones de la RTP y camiones carga. Las casas son de dos y tres niveles. Al sur cruzando la calzada hay un pequeño parque arbolado. Hacia el oeste a 250 m se encuentra la Avenida Cuitláhuac que también presenta flujo vehicular alto en ambos sentidos, circulan autos particulares, taxis, microbuses, camiones de la RTP y camiones carga. Durante la segunda etapa de muestreo se impermeabilizaron las azoteas de otras edificios cercanos a donde se colocó el equipo.
33	Miguel Hidalgo	Latitud: 19° 27' 30"; Longitud: 99° 12' 10"; Altitud: 2223 msnm Escuela secundario " León Felipe" ubicada en un área urbana habitacional y con algunos almacenes industriales. El domicilio es Río Uruguay Esq. San Bartolo Naucalpan, Col. Argentina. La calle de Río Uruguay presenta flujo vehicular bajo en ambos sentidos. La calle San Bartolo Naucalpan presenta flujo vehicular medio y es de un solo sentido, circulan autos particulares, microbuses, camiones de RTP y algunos camiones de carga. Las casas cercanas son de dos y tres pisos. Al norte cruzando la calle San Bartola Naucalpan se localiza el "Panteón Español"
34	Azcapotzalco	Latitud: 19° 28' 54"; Longitud: 99° 12' 13"; Altura del sitio: 2225 msnm El Centro de Salud Comunitario "Tezozomoc", estación AZC, se encuentra en un área urbana, principalmente habitacional. Se ubica sobre la Avenida Rafael Balbuena con circulación en un solo sentido y flujo moderado de autos particulares, taxis, microbuses, y camiones de carga. A más de 15 m área con vegetación. Las casas son dos pisos en su mayoría. Hacia el este y el sur a 150 m se encuentran las avenidas Tezozomoc y San Isidro respectivamente, ambas con flujo vehicular moderado de autos particulares, taxis, microbuses y algunos camiones de carga.
35	Azcapotzalco	Latitud: 19° 28' 54"; Longitud: 99° 12' 13"; Altitud: 2231 msnm Escuela secundaria No. 78 "Enrique Arteaga Luna", se localiza en un área urbana habitacional con domicilio en Campo Moluco Esq. Campo Verde, Col. San Bartolo Caluacaltongo. Las dos calles presentan flujo vehicular bajo en ambos sentidos, circulan autos particulares y algunos taxis. Las casas son de dos pisos. La escuela colinda al oeste con una unidad habitacional que tiene varios edificios de 5 pisos cada uno.

SITIO	DELEGACIÓN O MUNICIPIO	DESCRIPCIÓN DEL SITIO
36	Azcapotzalco	Latitud: 19° 28' 54"; Longitud: 99° 12' 34"; Altitud: 2239 msnm Guardería Infantil No. 12 del IMSS, se localiza en un área urbana habitacional con dirección en Manuel Bauche Esq. Campo Grijalva, Col. Santiago Ahuizotla. La calle Campo Grijalva presenta flujo vehicular medio en ambos sentidos, circulan autos particulares, taxis y microbuses. Las casas son de dos y tres pisos. En el costado sur se encuentra una bodega de "Grupo Poringas" y junto a esta un deportivo el cual tiene canchas de fútbol soccer empastadas.
37	Azcapotzalco	Latitud: 19° 28' 29"; Longitud: 99° 10' 44"; Altitud: 2212 msnm Escuela secundaria No. 55 "República del Salvador", se localiza en un área urbana habitacional, en Norte 87 Esq. Aspiras No. 438, Col. Sindicato Mexicano de Electricistas. Las calles presentan flujo vehicular bajo, solo se observa tránsito local. Las casas son en su mayoría de dos niveles.
38	Azcapotzalco	Latitud: 19° 28' 29"; Longitud: 99° 10' 44"; Altitud: 2218 msnm Unidad de Medicina Familiar del IMSS No. 40, ubicada en un área urbana habitacional, en Av. Hidalgo No. 24, Col. Santa Bárbara. La Avenida Hidalgo presenta flujo vehicular alto en ambos sentidos, cada sentido tiene un carril, circulan autos particulares, taxis, combis y microbuses. Las casas son de dos y tres niveles. Hay varios comercios de alimentos y tiendas cerca de la UMF.
39	Gustavo A. M.	Latitud: 19° 29' 27" Longitud: 99° 08' 46" Altitud: 2225msnm Escuela secundaria Técnica No. 31, ubicada en Av. 100 metros Esq. Poniente 134, Col. Industrial Vallejo. Se encuentra en un área urbana, principalmente habitacional. Las vialidades presentan circulación en ambos sentidos y flujo vehicular alto de autos particulares, taxis, combis, microbuses, autobuses foráneos, pick-up y camiones de carga.
40	Gustavo A. M.	Latitud: 19° 28' 25"; Longitud: 99° 08' 42"; Altitud: 2230 msnm Guardería Infantil No. 11, ubicada en un área principalmente habitacional en Norte 7ª Esq. Poniente 106, Col. Defensores de la República. Las calles presentan flujo vehicular bajo. Las casas son en su mayoría de dos pisos. Hacia el oeste a 100 m se localiza la Avenida Vallejo que presenta flujo vehicular alto, circulan autos particulares, taxis, combis, microbuses y camiones de la RTP y de carga. Hacia el sur a 50 m se encuentra la Avenida Cuicláhuac que también presenta flujo vehicular alto circulan autos particulares, taxis, combis, microbuses y camiones de la RTP y de carga.
81	Ecatepec	Latitud: 19° 32' 21"; Longitud: 99° 04' 14"; Altitud: 2218 msnm Escuela secundaria "Juan Fernández Albarán", se ubica en calle Moctezuma Esq. Aztecas, Col. Santa Clara Cuautitla. Es una zona urbana habitacional en su mayor parte. Al este se observa un establo. El flujo vehicular en estas calles es moderado, las calles son estrechas y circulan autos particulares, taxis, microbuses y combis. Hacia el este a 150 m se localiza la avenida Vía Morelos la cual presenta flujo vehicular alto y con tránsito pesado. Al oeste a 100 m la Autopista México-Pachuca con tránsito vehicular intenso en algunas horas del día.
82	Ecatepec	Latitud: 19° 33' 07" Longitud: 99° 04' 23" Altitud: 2237msnm Centro de salud comunitario "Hank González", se localiza en Emiliano Zapata Esq. Ignacio Allende, Col. Hank González. Es un área urbana rural en las laderas del cerro cabeza blanca. Las casas son de un piso y de diversos materiales. Existen algunos lotes con siembra de maíz o animales domésticos de especies grandes. Algunas calles se encuentran sin pavimentar y los servicios son escasos. Al este a 200 m. Se localiza la autopista México-Pachuca.

### 2.3. Plan de muestreo

El gran número de puntos de muestreo, los tiempos de recorrido y las condiciones de acceso y manipulación de las muestras requirió de la selección de muestreadores portátiles, económicos, ligeros, de fácil operación, disponibles, de desempeño comparable y de precisión y exactitud confiables. Con este propósito se seleccionaron dos tipos de instrumentos para la colección de partícula fina el impactor Marple-Harvard (Air Diagnostics Inc.) y el muestreador MiniVol (AirMetrics, Inc., Springfield, OR).

El impactor Marple-Harvard diseñado originalmente para los estudios de salud realizados por la Universidad de Harvard, ha sido empleado de manera confiable tanto en interiores como exteriores. En México este equipo ha sido empleado por investigadores de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco desde 1988, en estudios de

salud. Su desempeño ha sido evaluado en diversos estudios de campo los cuales demuestran su confiabilidad para la medición de las concentraciones de las partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en aire ambiente. Es un muestreador ligero, económico y de fácil operación. En su diseño básico cuenta con dos impactores con punto de corte de 2.5 micrómetros en dos etapas de separación idénticas, cada etapa de separación cuenta con un plato de impactación recubierto con aceite mineral para reducir el rebote de las partículas. EL muestreador opera a una tasa de flujo de 4 lpm y utiliza membranas de teflón de 41 mm de diámetro con poro de 2 micrómetros y con un soporte de polipropileno (Pall, Co.).

El muestreador MiniVol se ha empleado en una variedad de aplicaciones para  $PM_{10}$ , y recientemente para  $PM_{2.5}$  (Claiborne. et al, 1995; Lamoree, D.P. et al. && Chow, J. et al, 1998). El MiniVol es ligero, económico y relativamente de fácil operación (Figura 2.6). Para el muestreo de  $PM_{2.5}$  el equipo cuenta con un impactor inercial que opera a una tasa de flujo de 5 litros por minuto. El diseño empleado consiste en un arreglo en tandem con un impactor de  $PM_{10}$  previo al impactor de  $PM_{2.5}$ . El ensamble del MiniVol para  $PM_{2.5}$  se basa en los criterios genéricos para el diseño de impactores, sin embargo su desempeño no ha sido caracterizado con exactitud. El muestreador emplea filtros de 47 mm con poro de 2 micrómetros y con un soporte de polipropileno.

Ninguno de los dos muestreadores cumplen con las especificaciones de diseño requeridas para los monitores de  $PM_{2.5}$  empleado con propósitos de regulación o métodos de referencia; sin embargo, son potencialmente útiles para monitoreo de saturación y otros estudios que requieran el muestreo de partículas.



Figura 2.6. Muestreador MiniVol (izquierda) y HI (derecha).

La selección del medio filtrante se realizó tomando en consideración el tipo de análisis que posteriormente recibirían los filtros además del análisis gravimétrico. Se tenía la intención de analizar la composición elemental de las  $PM_{2.5}$  por lo que se sugirió el empleo de filtros de teflón, intercalando en algunos muestreos filtros de fibra de cuarzo para análisis de carbono orgánico o elemental. El análisis gravimétrico no fue afectado significativamente por el uso de ambos tipos de material filtrante.

El análisis gravimétrico se desarrolló en los laboratorios de pesado del Centro Nacional de Capacitación Ambiental (CENICA) y de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Antes y después del muestreo y previamente al pesado, los filtros se acondicionaron en un cuarto con condiciones controladas de humedad y temperatura ( $40\% \pm 5\%$ ,  $22^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$ ) durante un mínimo de 24 horas. Ambos laboratorios utilizaron una microbalanza Cahn modelo 34 y 33 respectivamente con una sensibilidad de 0.001 mg. Para todos los filtros se empleó el mismo protocolo de pesado desarrollado y validado por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Se consideró para todos los muestreos un 5% de blancos de campo, algunos de estos se emplearon como blancos de transporte, y un 5% de blancos de laboratorio. (CENICA, 2002; U.S. EPA, 1998; U.S. EPA, 1997; Allen G. et al, 1997; DRI, 1990).

Con el propósito de garantizar la calidad del trabajo de campo se definieron lineamientos adecuados para la validación de las muestras, se descartaron o etiquetaron como inválidas las muestras que presentaron alguna de las siguientes características:

- a. La superficie del área muestreada presentó un daño físico como raspaduras, perforaciones, o el filtro fue tocado con los dedos o la mano, antes o después del muestreo;
- b. El tiempo de muestreo total fue inferior a 22 horas o mayor a 26 horas;
- c. La diferencia entre el flujo inicial y final fue de más del 10%;
- d. Se desconocía el tiempo inicial o final del muestreo;
- e. Cuando no se contaba con alguno de los parámetros de muestreo (p.e., tiempo de muestreo, flujo, volumen, etc.);
- f. Cuando se presentaron fallas mecánicas o eléctricas en los sistemas de vacío;
- g. Presencia de insectos en la superficie del filtro;
- h. Cuando el peso final del filtro expuesto era mayor que el peso inicial del filtro blanco;
- i. Cuando el volumen total se encontraba fuera del intervalo de  $\pm 10\%$  con respecto al flujo nominal;
- j. Cuando el filtro no tenía número de identificación.

Los muestreadores se colocaron en los sitios previamente seleccionados que se describen en la tabla 3.1. La toma de muestra de cada muestreador se colocó a una altura mínima de 1.5 metros por encima del nivel de la azotea

para evitar la contaminación de la muestra con el polvo levantado por el viento (Figura 2.7). Los muestreadores se colocaron en superficies horizontales y sin vibraciones. Se evitaron obstáculos que obstruyeran la circulación del viento (árboles, construcciones, etc.) en un radio mayor a 50 metros de donde se localizará el equipo de medición. Se evitaron construcciones altas en los alrededores, cuando esto no fue posible se aplicó el criterio de que los muestreadores deberían encontrarse a una distancia del doble de la altura de la construcción.



Figura 2.7. Ensamble e instalación de los equipos MiniVol (izquierda) y HI (derecha).

### 2.3.1 Calendario de muestreo

Se realizaron cinco campañas de muestreo en cada región: NE y NO, por periodos de 15 días aproximadamente, donde se colectaron 4 muestras por equipo con frecuencia de 3 días (Tabla 2.2). El periodo de muestreo inició el muestreo a partir de las 00:00 horas hasta las 24:00 horas. La ventaja de esta propuesta es que considera los diferentes épocas climáticas presentes, para las de mayor duración como la época seca fría y lluvia se cubrieron en dos periodos cada una para tener una mejor caracterización de la partículas finas.

Tabla 2.2. Calendario de muestreo para las regiones noreste y noroeste

Etapa	Época climática	Región Este	Región Oeste
1	Seca fría	Enero 17, 20, 23 y 26	Febrero 1, 4, 7 y 10
2	Seca caliente	Marzo 19, 22, 25 y 28	Abril 6, 9, 12 y 15
3	Lluvia	Junio 2, 6, 9 y 12	Junio 18, 21, 24 y 27
4	Lluvia	Agosto 2, 5, 8 y 11	Agosto 17, 20, 23 y 26
5	Seca fría	Octubre 16, 19, 22 y 25	Octubre 31, Noviembre 3, 6 y 9

## 2.4. Análisis de los datos

### 2.4.1. Estadística básica.

En este paso el análisis conduce a una evaluación preliminar de los datos, donde se calculan algunos estadísticos básicos o medidas de localización y se examinan a través de representaciones gráficas o gráficas. A través de ello se puede conocer la estructura e identificar alguna asociación entre los datos. Las medidas de localización permiten resumir algunas características cuantitativas, las más comunes incluyen la media, mediana, cuartiles, el intervalo o desviación estándar, estas medidas pueden ser útiles para hacer inferencias.

Las representaciones gráficas por otros parte, son utilizadas para identificar algunos patrones y/o relaciones dentro de los datos y/o algunos problemas potenciales. Las representaciones incluyen el despliegue de puntos individuales, medidas de localización, datos espaciales o temporales de dos o más variables.

Las medidas de localización empleadas en este trabajo son: la concentración máxima, la concentración mínima, la media o percentil 50, los percentiles 25 y 75. La media es la suma de los datos entre el número de éstos. Los percentiles, señalan un valor de concentración debajo del cual se encuentra un determinado porcentaje de datos ordenados por su magnitud. La mediana, divide el conjunto de concentraciones ordenadas por su magnitud en dos grupos con igual número de datos. Estas se presenta de forma gráfica a través de gráfica de caja y bigotes (box plot). También se puede observar el intervalo Intercuartil que representa la diferencia entre el percentil 75 y el percentil 25, por lo que concentra el 50% de los datos alrededor de la mediana. Permite visualizar la variabilidad de la información, evitando la influencia de los casos extremos.

El caso extremo o caso atípico (outlier). Dada la variación de un fenómeno la mayoría de las observaciones se concentran alrededor de un punto (media o mediana), aquellos que se alejan considerablemente de éste, se consideran como datos atípicos, es decir datos que no ocurren frecuentemente y representa un caso particular.

Para garantizar la calidad en el procesamiento de la información que genera una sitio de muestro, es necesario considerar que todo sistema de información es susceptible a la pérdida de registros. Sin embargo, esta perdida puede ser estimada a través de alguna técnica estadística. La estimación es más adecuada si la distribución de los datos pueden asociarse a algún modelo de tipo normal (Gilbert, R.;1987)

Para analizar el comportamiento de los índices en cuanto a su potencial de discriminación aplicados a cada uno de los criterios de agrupamiento a priori de las escenas se utilizó en forma exploratoria el método multivariado de análisis discriminante. Los índices se sometieron a la verificación de las siguientes condiciones: a) distribución normal con el test de normalidad de Kolmogorov – Smirnov, b) homogeneidad de la varianza con el test de Bartlett, y c) homogeneidad de la matriz de varianzas y covarianzas con el test multivariado no paramétrico de Sen y Puri's. Para ser incluidos en el análisis los índices fueron seleccionados mediante el método de inclusión-exclusión iterativa y el criterio utilizado para comparar la bondad de ajuste o poder discriminante fue el valor del “Lambda de Wilks” (Legendre *et al.*, 1984; Jonson, 1998) (StatSoft Inc., 1999).

#### ***2.4.2. Distribución espacial.***

Los mapas de distribución espacial son una herramienta poderosa que permiten visualizar el patrón de distribución de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente de un espacio determinado, pueden facilitar el análisis y la toma de decisiones respecto a la ubicación de los sitios para el monitoreo. Los elaboración de los mapas se realizó mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG) con el programa Surfer® 8 que genera la interpolación de los datos obtenidos en el muestreo a través de un modelo matemático determinado. Considera la ubicación de los sitios de monitoreo para su representación en un plano de coordenadas X y Y.

La interpolación espacial se realizó con el modelo de distancias inversas debido a que: 1) el muestreo se realizó con una escala espacial pequeña entre dos y tres kilómetros, y 2) el método es más sencillo de aplicar que kriging con resultados semejantes. Para seleccionar el tamaño de la malla de interpolación se utilizaron los primeros tres el primer muestro válido de cada región y se realizaron interpolaciones a 1.0 km, 0.5 km, 0.2 km y 0.1 km. Con los resultados de 5 sitios

se compararon con los correspondientes sitios generados dentro de la malla y se calculó el porcentaje de diferencia. Finalmente el tamaño seleccionado fue de 0.2 km de distancia, el error asociado fue menor a 5%.

### 2.4.3. Método de coeficiente de representatividad ( $R_n$ )

Es un método estadístico sencillo que permite cuantificar la representatividad entre un sitio de monitoreo seleccionado y los sitios alrededor de la estación, designados a través de un plan de muestreo. Sea  $Y_{ij}$  las diferencias entre las mediciones en el tiempo donde el  $t_{th}$  corresponde al tiempo de ejecución y  $j_{th}$  el sitio de muestreo, de un sitio fijo seleccionado y los ubicados en su alrededor. Dentro de un período de evaluación específico para cada  $t = 1, 2, 3, \dots, T$  puede haber  $J_t$  sitios de muestreo de acuerdo al plan de muestreo.

Conforme el promedio de las mediciones ( $\bar{Y}$ ) se acerque a cero las mediciones de concentración del contaminante en la estación de monitoreo serán más representativas, asumiendo que  $Y_{ij}$  se distribuye normalmente con una media de cero. El estadístico está sujeto a las limitaciones dadas por las características de los datos.

Considerando que:

$$SS_y = SS_{\bar{y}} + n\bar{Y}^2$$

donde

$$SS_{\bar{y}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{J_t} (Y_{tj} - \bar{Y})^2$$

el coeficiente de representatividad se expresa como:

$$R_n = \frac{SS_{\bar{y}}}{SS_y}$$

El estadístico  $R_n$  se define como el término para medir la representatividad de un sitio fijo de monitoreo. La forma de  $R_n$  es similar al coeficiente de determinación en las ecuaciones de regresión, excepto que no se emplean modelos para obtener  $R_n$ . Aparentemente, los valores de  $R_n$  se encuentran entre 0 y 1. Sin embargo, la representatividad de las estaciones de monitoreo es mayor a medida que  $R_n$  se acerca a 1.

La incertidumbre del estadístico se puede describir con el intervalo de  $100(1-\alpha)$  % de la función de probabilidad de máxima densidad (PMD), el cual es similar al intervalo de confianza tradicional. Los límites superior y inferior del intervalo se obtiene de integrar la función de densidad de  $R_n$ ,  $f_{R_n}(v)$ . Los límites se obtienen la ecuación resolviendo la ecuación:  $\int_i^s \int_{R_n} (v) dv = 1 - \alpha$ , la cual es similar al tradicional intervalo de confianza donde:  $\int_{R_n} (v)$  es la función de distribución de  $R_n$ 's.

Para el cálculo del intervalo se utiliza el método bootstrap, que es básicamente un procedimiento de remuestreo, consiste en seleccionar datos al azar con remplazo de la matriz de datos original y formar otra matriz con las mismas características hasta B replicas independientes  $Y^{*1}, Y^{*2}, \dots, Y^{*B}$ . Entonces para cada nueva matriz se calcula la representatividad de cada sitio, a través de la siguiente ecuación:

$$R_n^*(b) = \frac{SS_{Y^{*b}}}{SS_{Y^{*b}}} \text{ para } b = 1, 2, \dots, B$$

Una vez generados los  $R_n(b)$  se ordenan ascendentemente forma de lista como  $(r_1, r_2, \dots, r_B)$ . Posteriormente se calcula el entero de  $B(1-\alpha)$ ,  $m$ . El intervalo de confianza se deriva de un incremento a partir del centro del intervalo, que puede ser la mediana o la moda, por ejemplo  $LS_B = LI_B = r_k$  donde  $r_k$  puede ser la mediana o la moda de  $(r_1, r_2, \dots, r_B)$ . Para este trabajo se utilizó la mediana. Considerando que  $r_s$  y  $r_l$  son valores próximos a LS y LI respectivamente pero no dentro del intervalo. La expansión se realiza aplicando la siguiente condición: Si  $(r_s - LI_B) \neq (LS_B - r_l)$  entonces  $LS_B$  reemplaza a  $r_s$ , si no  $LI_B$  reemplaza a  $r_l$ . El LS y LI pueden obtenerse por la repetición de la condición anterior hasta  $m$  veces.

#### 2.4.4. Método de porcentaje de representatividad.

Es un método de fácil aplicación que permite definir de forma operacional a la representatividad espacial, como el área alrededor de un sitio fijo en el cual las concentraciones de  $PM_{2.5}$  varían hasta 10%. La selección de  $\pm 10\%$  se basa en consideraciones esperadas de efectos en la salud pública y en las variaciones que pueden presentar las concentraciones entre los sitios de muestreo. La representatividad espacial de un sitio se expresa en porcentaje como el área que cumplen con la variación esperada respecto al total del área del dominio. El gradiente de representatividad ( $\Delta$ ) será suficientemente grande como las concentraciones cambien en todas direcciones.

Finalmente ( $\Delta$ ) se debe convertir de porcentaje a unidades de área para conocer la extensión física representada por el sitio.

Capítulo 3  
*Resultados y  
análisis de resultados*

### 3. Resultados y análisis de resultados.

Este capítulo presenta la evaluación de los datos obtenidos durante el muestreo realizado en el año 2002 en dos regiones de la ZMCM, se realiza un análisis preliminar de los datos a través de algunos indicadores estadísticos y representaciones gráficas, pruebas paramétricas y la aplicación de los métodos discutidos previamente para la selección de sitios de muestreo y la evaluación de su área de representatividad.

#### 3.1. Concentración de $PM_{2.5}$ .

En los sitios del dominio de la región Noreste se obtuvieron más del 75% de muestras válidas de un total de 20 esperadas, con excepción de los sitios no. 07, 09 y 82 (ver Tabla 3.1). La principal causa para la invalidación de muestras ocurrió al principio del estudio debido a que aun no se contaba con algunos de los sitios o a las autorizaciones correspondientes. pérdida de muestras Para el sitio no.19 se invalidaron 13 muestras por fallas en el suministro de energía eléctrica y problemas de logística. En el sitio no. 82 el muestreo inició tardíamente el 5 de agosto de 2002 proporcionando únicamente 7 muestras válidas. La instalación posterior del sitio no. 82 respondió a la necesidad de evaluar la distribución de las  $PM_{2.5}$  en el extremo norte de la zona industrial de Xalostoc. El sitio 81 se mantuvo fuera de operación durante el periodo 19 de marzo al 12 de junio de 2002, por problemas de logística. El sitio 07 se colocó a partir del 19 de marzo de 2002, proporcionando 12 de 14 muestras válidas esperadas, las muestras faltantes no se colocaron a causa del vandalismo en la zona. La concentración promedio en el dominio de la región, calculada para todos los sitios durante el estudio fue de  $27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las concentraciones máximas se registraron en los sitios 01 y 81 localizados dentro de la zona industrial de Xalostoc, con concentraciones promedio de  $40.4 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $41.0 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente. La concentración más baja se registró en el sitio no.16 con  $20.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los resultados muestran que con excepción de los sitios localizados en la zona industrial el promedio de la concentración en la región es homogénea. El día 26 de enero de 2002 se registró una concentración de  $88.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el sitio no. 02.

La Tabla 3.2. presenta un resumen de los resultados obtenidos en los sitios del dominio de la región Noroeste. Con excepción del sitio no. 40, el resto de los sitios registró más del 75% de datos válidos. La principal causa de invalidación de datos fueron las fallas en el suministro de la energía eléctrica. El promedio de la concentración registrada durante la campaña fue de  $24.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los valores más altos de la concentración de  $PM_{2.5}$  se registraron en los sitios ubicados en la zona industrial. En general las concentraciones en esta región son menores a las registradas en la región Noreste. El sitio no. 21 registró la concentración máxima de  $64.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabla 3.1. Estadística básica de PM<sub>2.5</sub> por sitio de muestro, en la región NE.

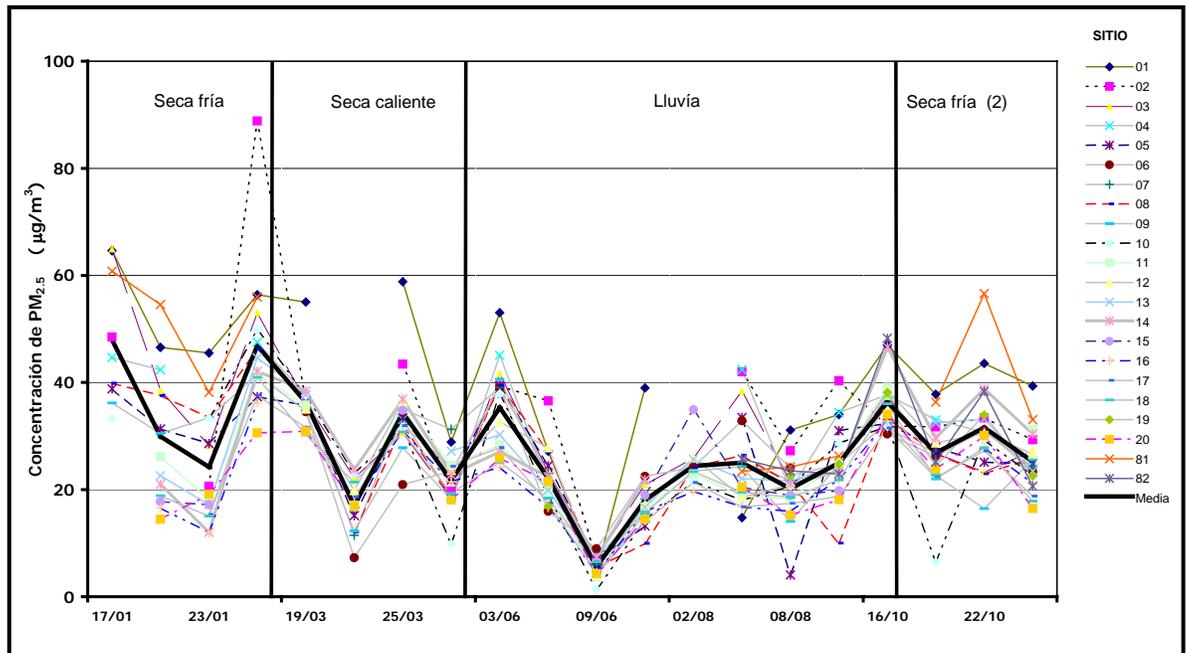
Sitio	N	%	Media	(Desv. Estándar)	Máximo	Mínimo
01_XAL	18	90	40.4	15.4	64.6	4.7
02	17	85	34.9	17.6	88.8	7.2
03	20	100	30.5	12.9	64.9	7.3
04	18	90	31.1	11.6	47.6	7.6
05	19	95	26.6	10.3	39.4	4.1
06	15	75	24.3	8.8	39.1	7.3
07	14	70	25.8	9.5	39.1	6.0
08	19	95	25.9	11.3	46.2	5.4
09_SAG	20	100	25.0	9.9	41.5	3.7
10	19	95	24.7	11.9	49.8	1.4
11	17	85	24.9	9.7	41.3	3.7
12	16	80	25.7	8.6	38.6	4.1
13	16	80	25.4	8.9	44.6	7.4
14_LVI	17	85	27.4	10.5	46.6	7.3
15	10	50	23.6	7.1	34.9	17.2
16	17	85	20.7	7.9	36.2	4.5
17	18	90	22.1	8.1	37.6	4.4
18	19	95	22.6	7.9	41.0	6.5
19	7	35	26.2	7.3	38.1	16.9
20	17	85	20.9	7.6	34.0	4.3
81	10	50	41.0	14.7	60.8	23.4
82	7	35	29.2	10.2	48.3	20.6

Tabla 3.2. Estadística básica de PM<sub>2.5</sub> por sitio de muestro, en la región NO.

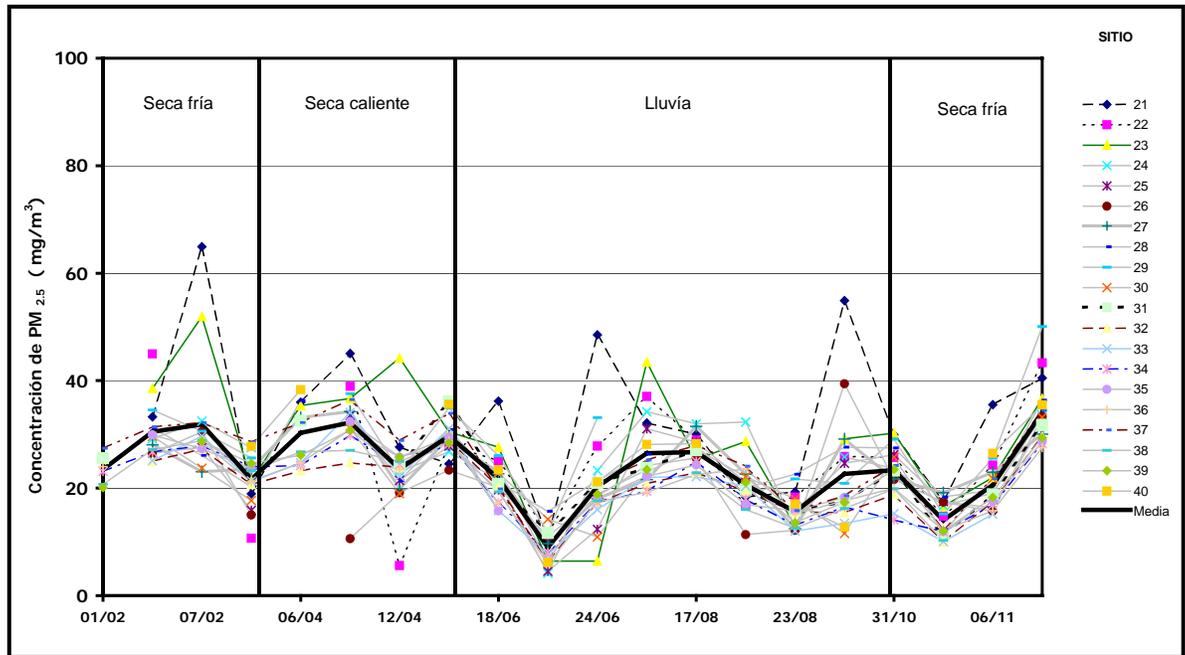
Sitio	N	%	Media	(Desv. Estándar)	Máximo	Mínimo
21	19	95	32.8	13.8	64.9	10.7
22	17	85	25.2	11.4	45.0	5.6
23	19	95	28.6	12.4	51.9	6.4
24	18	90	25.1	8.1	34.2	4.2
25	18	90	22.4	7.7	33.5	4.5
26	18	90	20.9	8.1	39.4	10.6
27	19	95	23.8	6.6	34.3	9.7
28_TLA	18	90	25.0	6.0	36.4	15.7
29	17	85	27.4	9.2	50.1	11.7
30	17	85	21.4	6.8	33.2	10.9
31CAM	16	80	22.5	7.1	36.1	11.1
32	19	95	20.4	6.0	29.6	6.6
33_TAC	18	90	19.9	7.3	34.1	7.6
34	20	100	20.7	6.3	29.9	8.0
35	16	80	22.4	6.2	32.4	12.0
36	18	90	21.7	5.2	30.9	12.1
37	20	100	25.1	7.8	36.5	6.6
38	17	85	20.4	6.7	28.8	5.9
39	17	85	22.7	5.4	30.8	12.1
40	12	60	25.1	9.6	38.3	6.2

Las Gráficas 3.1 y 3.2 presentan las series de tiempo de la concentración de  $PM_{2.5}$  en los sitios de muestreo en las regiones Noreste y Noroeste, respectivamente. El comportamiento en ambas regiones muestra poca variabilidad en la mayoría de los sitios de cada una de ellas, se observa un patrón similar con concentraciones máximas durante la temporada de secas y las más bajas se asocian a la temporada de lluvias. En los sitios del dominio de la región Noreste los sitios 1, 2, 3 se encuentran consistentemente muy por encima de los valores del resto de los sitios, estos se encuentran en la zona industrial de Xalostoc o cercanos a ella, por lo que tienen una evidente influencia de las emisiones de la zona.

Con el propósito de evaluar la variabilidad de los datos de concentración de  $PM_{2.5}$  que presentan los sitios de monitoreo, se aplicó para ambas regiones una prueba de homogeneidad a través del estadístico de Levene's. El resultado de la prueba fue de 0.591 para la región Noreste y de 0.456 para la región Noroeste, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) donde el supuesto es que los datos presentan varianzas iguales, el nivel de significancia empleado fue de  $\alpha=0.05$ .



Gráfica 3.1. Serie de tiempo de las concentraciones registradas en la Región NE.



Gráfica 3.2. Serie de tiempo de las concentraciones registradas en la Región NO.

Adicionalmente se aplicó una prueba de comparación de medias entre sitios a través de la prueba de Análisis de Varianza o ANOVA para verificar que al menos la media de un sitio fue diferente a los demás, aunque presenten el mismo patrón. La prueba también se conoce como de contraste de hipótesis, para un número de muestras mayor a dos (Tabla 3.5). El planteamiento es el siguiente utilizando un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$ :

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_n$$

$$H_a: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ó } \mu_1 \neq \mu_3 \text{ ó } \mu_2 \neq \mu_3 \text{ ó } \dots \text{ ó } \mu_{n-1} \neq \mu_n$$

Los resultados del análisis de varianza se muestran en las tablas 3.3 y 3.4. Con el resultado no se rechaza la hipótesis alterna ( $H_a$ ), por lo que al menos un par de sitios es diferente, si fuera el caso contrario en cualquier sitio podría establecerse una estación de monitoreo sin importar su representatividad. Por lo tanto, con este resultado es necesario aplicar otras técnicas más específicas para identificar cual de ellos puede ser el más representativo de la región.

**Tabla 3.3.** Análisis de Varianza para  $PM_{2.5}$  en la Región Noreste

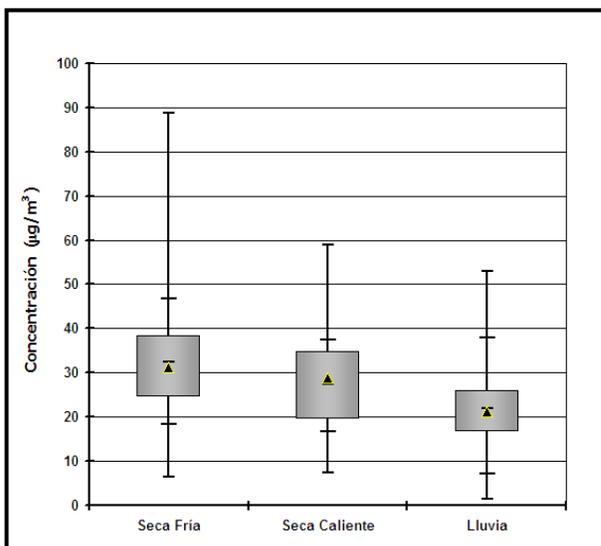
Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F	Resultado de la prueba.
Entre Grupos	6273.703	21	298.748	2.577	.000
Intra Grupos	33966.280	293	115.926		
Total	40239.983	314			

**Tabla 3.4.** Análisis de Varianza para PM<sub>2.5</sub> en la región Noroeste

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Media de Cuadrados	F	Resultado de la prueba.
Entre Grupos	3513.397	19	184.916	2.689	.000
Intra Grupos	21730.508	316	68.767		
Total	25243.905	335			

En ambas regiones se observa un comportamiento estacional de las PM<sub>2.5</sub> con un máximo en la temporada de secas y un mínimo durante la temporada de lluvias. La lluvia tiene un efecto de arrastre en las partículas (principalmente las del modo grueso, diámetro > 2 µm) o puede reducir la concentración de algunos precursores gaseosos de la fracción fina. La distribución de la concentración de PM<sub>2.5</sub> para cada época climática identificada durante el estudio se presenta en las Gráficas 3.3 y 3.4. El valor de la media se indica con un triángulo, la mediana se indica con una línea dentro de la caja, el ancho de la caja representa los percentiles 25 y 75, las líneas en los extremos representan el mínimo, los percentiles 10 y 90 y el valor máximo. En ambas regiones las concentraciones más altas se observaron durante la época fría, el valor máximo registrado en la región Noreste (88.8 µg/m<sup>3</sup>) sobrepasa el valor de la norma norteamericana para el promedio de 24 horas de PM<sub>2.5</sub> de 65 µg/m<sup>3</sup> (en México no existe una norma para este contaminante). Los valores más bajos se presentaron durante la temporada de lluvia.

Los resultados de la comparación de medias por épocas a través de la prueba de Tukey, indican que en ambas regiones existe una diferencia estadísticamente significativa para las diferentes condiciones de clima identificadas (Tablas 3.5 y 3.6), demostrando que existe una influencia importante en distribución de las PM<sub>2.5</sub> asociada a las condiciones climáticas del valle.

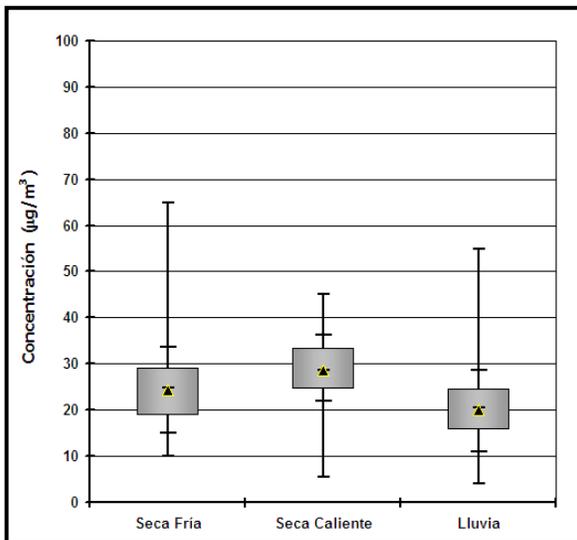


Gráfica 3.3. Diagrama de caja para la Región NE.

Tabla 3.5. Prueba de comparación de medias Región NE

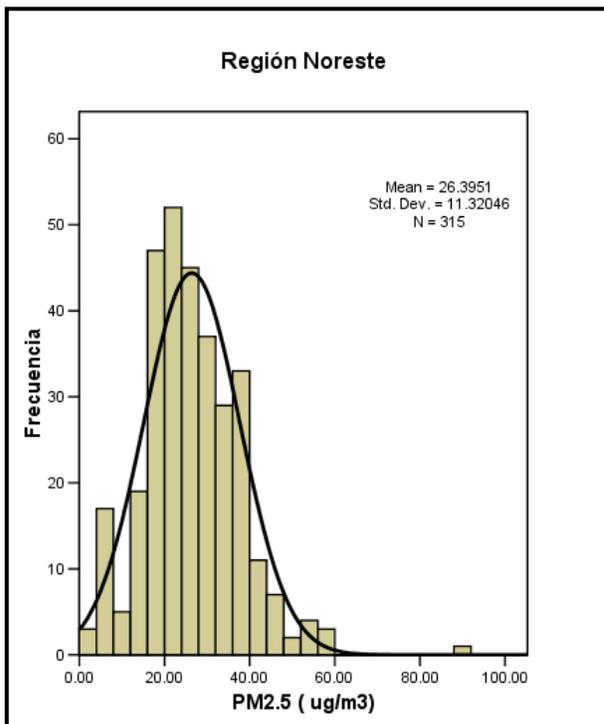
(I) EPOCA	(J) EPOCA	Diferencia de medias (I-J)
Seca fría	Seca caliente	4.18708(*)
	Lluvia	10.11661(*)
Seca caliente	Seca fría	-4.18708(*)
	Lluvia	5.92953(*)
Lluvia	Seca fría	-10.11661(*)
	Seca caliente	-5.92953(*)

\* La diferencia de medias es significativa con un nivel de 0.05.



Gráfica 3.4. Diagrama de caja para la Región NO.

Los datos de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  obtenidos en cada una de las regiones, presentan una distribución normal, como lo muestran los resultados de la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov. Para un nivel de significancia de 5% el resultado de la prueba es de 0.209 para la región Noreste y de 0.200, en ambos casos no se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) es decir la distribución asociada a las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la región NE es normal (Tabla 3.4).



Gráfica 3.5. Histograma región Noreste.

Tabla 3.6. Prueba de comparación de medias Región NO

(I) EPOCA	(J) EPOCA	Diferencia de medias (I-J)
Seca fría	Seca caliente	-3.42443(*)
	Lluvia	4.66720(*)
Seca caliente	Seca fría	3.42443(*)
	Lluvia	8.09162(*)
Lluvia	Seca fría	-4.66720(*)
	Seca caliente	-8.09162(*)

\* La diferencia de medias es significativa con un nivel de 0.05.

Hipótesis de prueba:

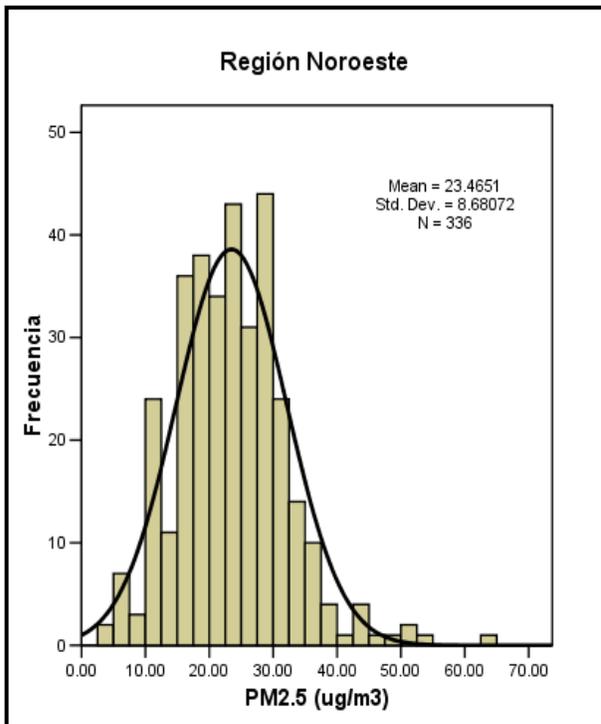
$H_0$ : Los datos se ajustan a una distribución normal

$H_a$ : Los datos no se ajustan a una distribución normal

Tabla 3.7. Validación de normalidad región Noreste

Región Noreste	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	N	Resultado de la prueba
$PM_{2.5}$	.060	315	.209

\* nivel de significancia  $\alpha = 0.05$



Gráfica 3.6. Histograma Región NO.

Hipótesis de prueba:

Ho: Los datos se ajustan a una distribución normal

Ha: Los datos no se ajustan a una distribución normal

Tabla 3.8. Validación de normalidad Región Noroeste

Región loroeste	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	N	Resultado de la prueba
PM <sub>2.5</sub>	.043	336	.200

\* nivel de significancia  $\alpha = 0.05$

En este punto, es conveniente hacer una aclaración. Si bien, se maneja que la época seca fría comprende los meses de noviembre a febrero esta hace referencia a dos años diferentes, el actual y el próximo anterior. Sin embargo como las condiciones climáticas presentes en el Valle de México en los años recientes no han variado significativamente. Se consideró en este documento para el análisis de la época seca fría a los cuatro primeros y últimos muestreos de cada región.

### 3.2. Distribución espacial de las PM<sub>2.5</sub> en el norte de la Ciudad de México.

Las condiciones climáticas presentes en el Valle de México son un factor importante en la distribución de los contaminantes atmosféricos y los niveles de concentración que se registran, primeramente se hace una breve descripción de su comportamiento durante el año 2002 y posteriormente se analizan los mapas de Distribución Espacial de ambas regiones, estos se presentan en el Anexo B de este documento.

De acuerdo con los registros de escala sinóptica, la meteorología en la región superior de la troposfera durante la época seca fría (en los meses de Noviembre a Febrero), se caracterizó por frecuentes sistemas anticiclónicos en los alrededores del altiplano central de la República Mexicana, los cuales trajeron consigo masas de aire polar al Valle, los cuales provocaron un movimiento horizontal débil en los vientos de superficie (menor a 1.5 m/s) con dirección

predominantemente del este, noreste o norte y, con menos frecuencia, del sur y oeste. En los días de muestreo se presentaron vientos del este con componente norte, noreste o sur, sureste. Destacó la presencia de una circulación ciclónica (los vientos giraron en sentido contrario de las manecillas del reloj) en la porción norte y noroeste de la ciudad, ligada a la presencia de aire tibio proveniente de la zona urbana. Los registros de las estaciones del SIMAT: Xalostoc (XAL) y Hangares (HAN) ubicadas en el oriente y centro, Tlalnepantla (TLA) y Tacuba (TAC) localizadas en el poniente corroboraron éste y los demás fenómenos presentes a lo largo del año.

Durante la época seca caliente de Marzo a Mayo, los registros de escala sinóptica mostraron para la región superior de la troposfera un comportamiento similar al de la época seca fría, con dos características que marcan una diferencia muy específica: la humedad disminuye sensiblemente y tiende a haber mucho más insolación sobre todo al final de época.

Al principio de la época de lluvias (junio a octubre), la circulación del viento a escala sinóptica se mantiene parecida a la de la época seca caliente y al final tiende a ser como la de la época seca fría, pero en este último caso, la causa no fue la misma debido a las ondas tropicales que continuamente afectaron al país. El viento en superficie provino con frecuencia del noreste y al entrar al Valle la circulación se convierte de norte a sur. Cuando tales ondas dejan de afectar al Valle, el flujo en el interior tiende a ser del este y de sureste.

Por la tarde fue frecuente el recorrido de los vientos de norte o noreste hacia el centro de la Ciudad de México, lo cual implicó para el transporte de contaminantes, que estos se acumularan en el rincón suroeste de la ciudad y aun más allá en la zona urbana que se extiende hacia las faldas del Cerro del Ajusco.

Durante los muestreos se presentaron algunos episodios de tormenta donde se depositó gran cantidad de agua lluvia al norte de la ZMCM de acuerdo con los registros de algunas de las estaciones de la Red de Depósito Atmosférico del SIMAT. Los días corresponden al 27 de Junio y 28 de Noviembre y se registró 22.3 y 28.3 mm de H<sub>2</sub>O de lluvia respectivamente, los demás días los registros fueron menores o no hubo.

### ***3.2.1 Región Noreste***

Las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3, representan la distribución espacial típica que presentaron las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> durante las épocas secas fría y caliente, y lluvia respectivamente en el dominio de la Región Noreste. El análisis visual muestra tres zonas con concentraciones y características diferentes al: oriente, suroeste y noroeste. El oriente, comprende una porción de los municipios de Ecatepec y Nezahualcóyotl. Al suroeste, parte del territorio de la delegación Gustavo A. Madero y por último, una zona con concentraciones elevadas al noroeste en el municipio de Ecatepec.

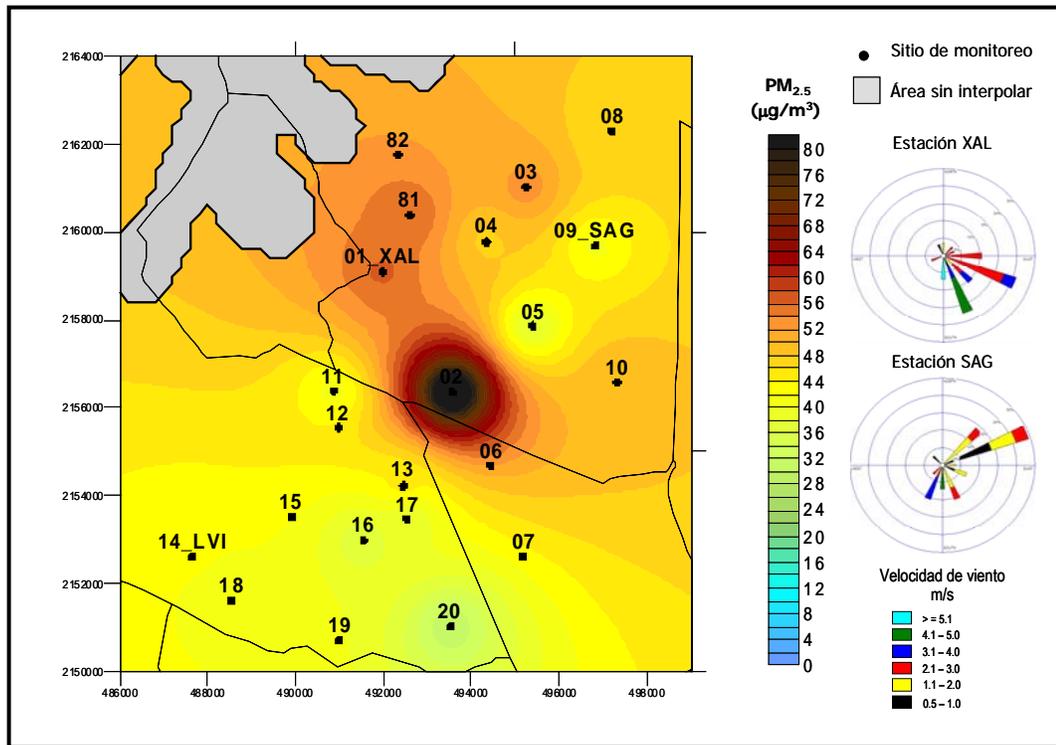


Figura 3.1. Distribución espacial típica de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en la Región NE. Época seca fría (día de muestreo 26 de enero de 2002)

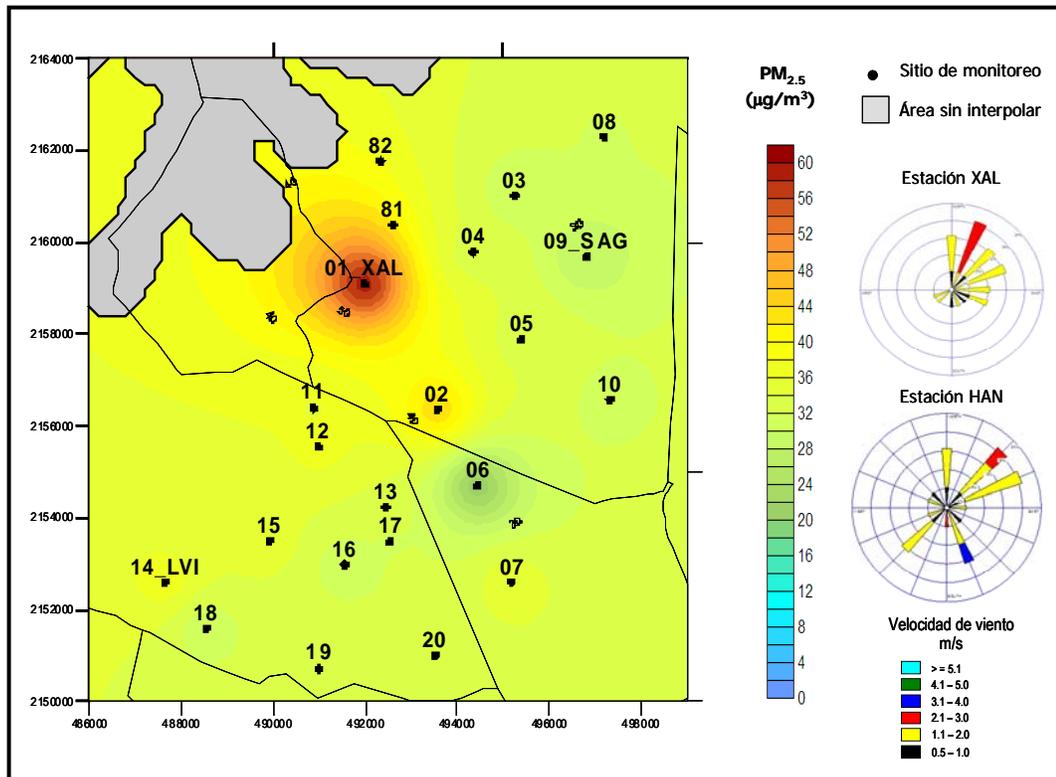


Figura 3.2. Distribución espacial típica de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en la Región NE. Época seca caliente (día de muestreo jueves 25 de marzo de 2002)

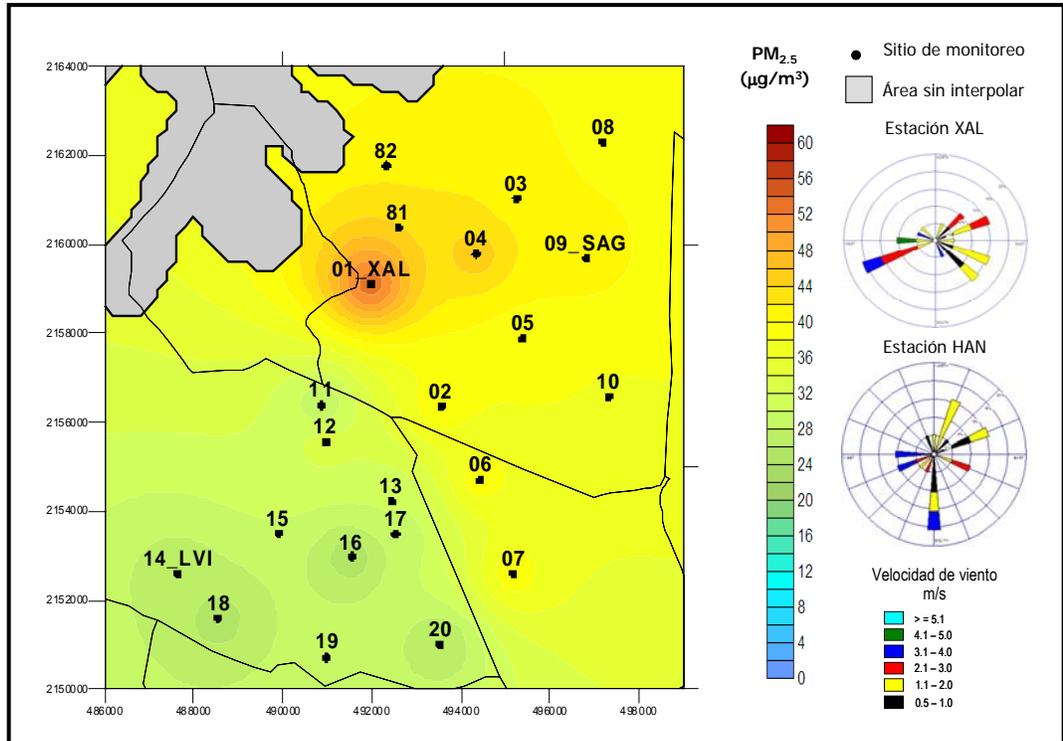


Figura 3.3. Distribución espacial típica de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la Región NE. Época de lluvia (día de muestreo martes 03 de junio de 2002)

El oriente de la región, se caracteriza por estar situado en terreno llano propio para la vegetación secundaria y matorral, el uso agrícola se encuentra limitado a cultivos muy resistentes a las sales, aunque éste es escaso. Las principales actividades económicas son el comercio y la industria ([www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/](http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/mexico/mpios/)). Habitan aproximadamente 2 millones de personas y es la porción más poblada de la ZMCM. Se localizan avenidas importantes como la Carlos Hank González y el Anillo Periférico. Por su ubicación geográfica dentro del Valle de México, los vientos llegan principalmente del este con componente norte o sur, en esa dirección se localiza el ExLago de Texcoco y del depósito de evaporación solar “El Caracol”, compuesto por las aguas del ExLago, actualmente en desuso y que son fuente importante de partículas de origen natural. Dé la intensidad y velocidad del viento, así como de las concentraciones registradas en todos los sitios de muestreo de la región dependió el tamaño de zona. Los sitios de monitoreo que presentaron concentraciones similares en la zona fueron los no.: 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09\_SAG y 10. En algunas ocasiones los sitios no.06 y 07 no se incluían por estar en la franja de transición con la otra zona localizada al suroeste. Los sitios se ubicaron en escuelas del sector público, en una oficina administrativa de la SEP regional y en un Centro de Salud. Los equipos instalados no presentaron influencia directa de alguna fuente de emisión u obstrucción al libre paso del viento.

Los registros promedio y desviación estándar de los sitios ubicados en los municipios antes mencionados para las diferentes épocas climáticas fueron:  $30.7 \pm 12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $25.5 \pm 9.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $22.6 \pm 11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Épocas seca fría, seca caliente y lluvia respectivamente. La información incluye los registros de los sitios 06 y 07, por presentarse el mayor número de muestreos en esta zona.

La segunda zona se localiza al suroeste, en la Delegación Gustavo A. Madero, comprende la zona donde se colocaron los sitios de monitoreo no. 11, 12, 13, 14\_LVI, 15, 16, 17, 18, 19 y 20. El tipo de suelo presente es: lacustre, de transición y de lomerío. El lacustre está constituido por formaciones arcillosas que anteriormente fueron ocupadas por el Lago de Texcoco, representa aproximadamente un 60% de la superficie de la delegación. El de transición, está presenta intercalaciones de arena y limo; con propiedades mecánicas muy variables, se encuentra ubicado en las faldas de los Cerros del Chiquihuite y Zacatenco, ocupa el 15% del resto de la superficie y los lomeríos corresponden a la parte de los cerros antes mencionados la cual es el suelo más resistente en cuanto a composición geológica ([www.gamadero.df.gob.mx/nr/gam/principal.asp](http://www.gamadero.df.gob.mx/nr/gam/principal.asp)). La actividad principal es el comercio y se localizan algunas industrias en la Colonia granjas Moderna principalmente. En la zona también existen áreas verdes importantes, como son: la Sierra de Guadalupe designada área natural protegida y el Bosque de San Juan de Aragón. Se estima que hay un millón de habitantes en la delegación, siendo el área más poblada la que se localiza en colindancia con el municipio de Nezahualcóyotl. Los sitios se instalaron en la parte lacustre y de transición evitando la influencia de las corrientes de viento ocasionadas por los cerros cercanos. Se localizaron en escuelas del sector público, Centros de Salud y Clínicas de IMSS. Los equipos instalados no presentaron influencia directa de alguna fuente de emisión u obstrucción al libre paso del viento.

De acuerdo con los registros de dirección y velocidad de viento de la estación Hangares del SIMAT (HAN) ubicada al sur del sitio no. 20. Los vientos de superficie soplan del noreste, este o sureste. Cuando provienen del sur, sureste y con velocidad alta, el tamaño de la zona aumenta y se extiende hacia el este hasta incluir en ella a los sitios no. 06 y 07, esto ocurrió en cinco muestreos durante las épocas seca fría y lluvia.

Los registros promedios y desviaciones estándar de la zona sur fueron de  $22.4 \pm 8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $28.6 \pm 7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $22.2 \pm 9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para las épocas seca fría, seca caliente y lluvia respectivamente. No se incluyó la información de los sitios no. 06 y 07. Los datos de desviación estándar son menores a los registros de la zona anterior.

La región noreste se caracterizó por reportar los registros de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  más elevados la mayor parte del tiempo. El tipo de suelo es de transición y lomerío. El uso que se le da al suelo es industrial principalmente y existen algunas zonas agrícolas, también hay abundante tráfico vehicular en las carreteras Federal y de Cuota México-Pachuca. Al norte se localizan los Cerros Petlecatl y Gordo. El sitio no. 01\_XAL se instaló dentro del área industrial en

la estación XAL del SIMAT, mientras que los sitios no. 81 y 82 se ubicaron al norte y el no. 02 al sur respecto al primero. Los sitios no. 02 y 81 por la cercanía con la industria ocasionalmente recibían influencia de sus emisiones según la dirección del viento presente en la región. Cabe mencionar que la estación de XAL continuamente rebasa la norma de salud por exposición a las PM<sub>10</sub>. El entorno que presentan los sitios no. 02, 81 y 82 es habitacional con población mayor a los 20 mil habitantes y algunos comercios dispersos. El sitio no. 82 se ubicó en una zona mixta (rural-urbana) y los demás en zona urbana. El día 26 de enero del 2002 se presentó un episodio de inversión térmica combinado con niveles elevados de partículas en la zona (Figura 3.1) donde el sitio no. 02 registró el valor más alto de PM<sub>2.5</sub>, este fue de 88.8 µg/m<sup>3</sup> y los sitios cercanos a él también mostraron valores elevados (SMA 2002b, SMA 2002c). El tamaño e la zona se incrementó considerablemente, sin embargo fue la única fecha en la que se presentó este fenómeno. Cuando los días de muestreo se efectuaron en Domingo, como fueron los casos de los días 9 de junio y 11 de Agosto, no se registraron emisiones industriales importantes y las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> registradas fueron muy parecidas a las reportadas en la zona contigua al noreste.

Los registros promedios y desviaciones estándar de las cuatro estaciones anteriores, fueron para las épocas seca fría, seca caliente y lluvia respectivamente de: 39.8±16.9 µg/m<sup>3</sup>, 36.8±9.3 µg/m<sup>3</sup> y 33.3±16.9 µg/m<sup>3</sup>. Ambos registros son mayores a los reportados por las otras dos zonas: noreste y suroeste.

### ***3.2.2 Región Noroeste***

Las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 corresponden a la distribución espacial típica que presentaron las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en el dominio de la Región Noreste durante las diferentes épocas climáticas. El análisis visual realizado a los mapas de esta región mostraron dos zonas con concentraciones y características diferentes entre ellas. La primera presentó concentraciones altas, se localizó en el municipio de Tlalnepantla. La otra ocupó el resto de la región en los territorios de las delegaciones y municipios: Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Naucalpan y Tlalnepantla.

La zona de Tlalnepantla se caracteriza por tener suelos de tipo: feozem háplico, feozem háplico más vertisol, pélico, feozem y háplico más litosol, de textura arcilloso y bueno para la mayoría de los cultivos. Hay gran variedad de cerros los cuales forman parte de la Sierra de Monte Alto, prolongación de la Sierra de las Cruces. Para el año de 1995 los censos de población registraban en zonas rurales algunos cientos de habitantes. Actualmente el decremento de la población rural ha sido el resultado del crecimiento e invasión de la mancha urbana. El uso de suelo predominante es mixto urbano-industrial. Sus principales actividades económicas son el comercio (30%) y la industria (70%), de esta última se tienen registradas más de 2,700 establecimientos, los cuales se encuentran dispersos en el territorio y unos cuantos instalados en parques industriales. Vialidades como la Vía Gustavo Baz, Av. Ceylan y el Periférico atraviesan la

regiones, además Ferrocarriles Nacionales presta importantes servicios a las industrias del municipio. Tiene una población superior a los 700 mil habitantes y es el tercero más poblado del Estado de México.

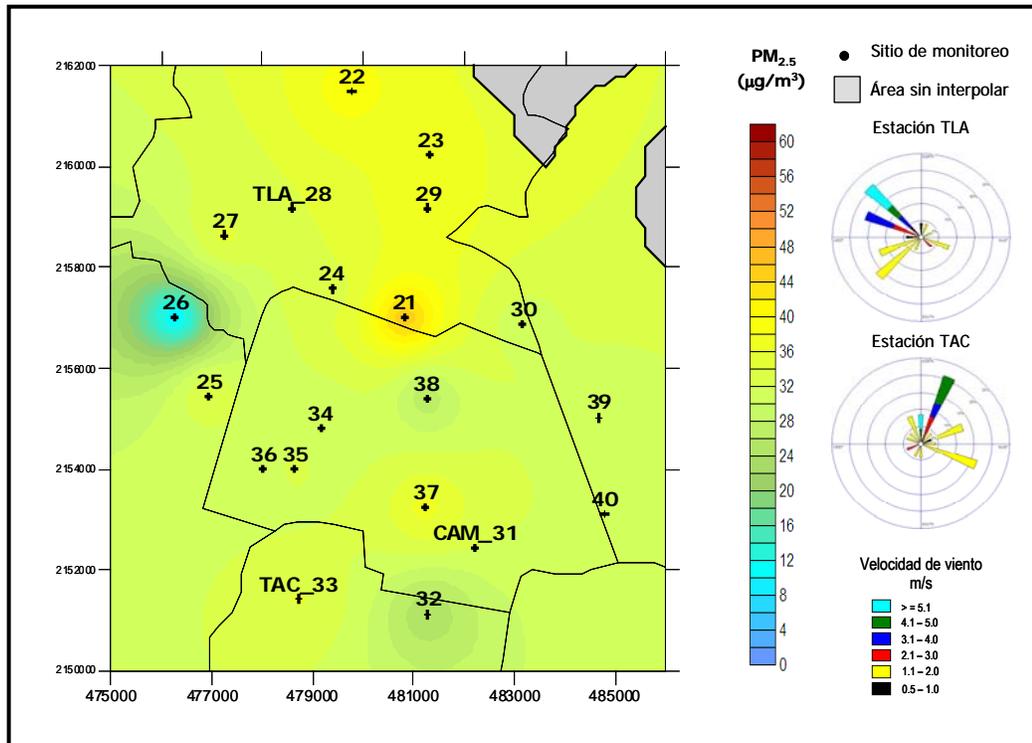


Figura 3.4. Distribución espacial de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la Región NO. Época seca fría (día de muestreo 07 de febrero de 2002)

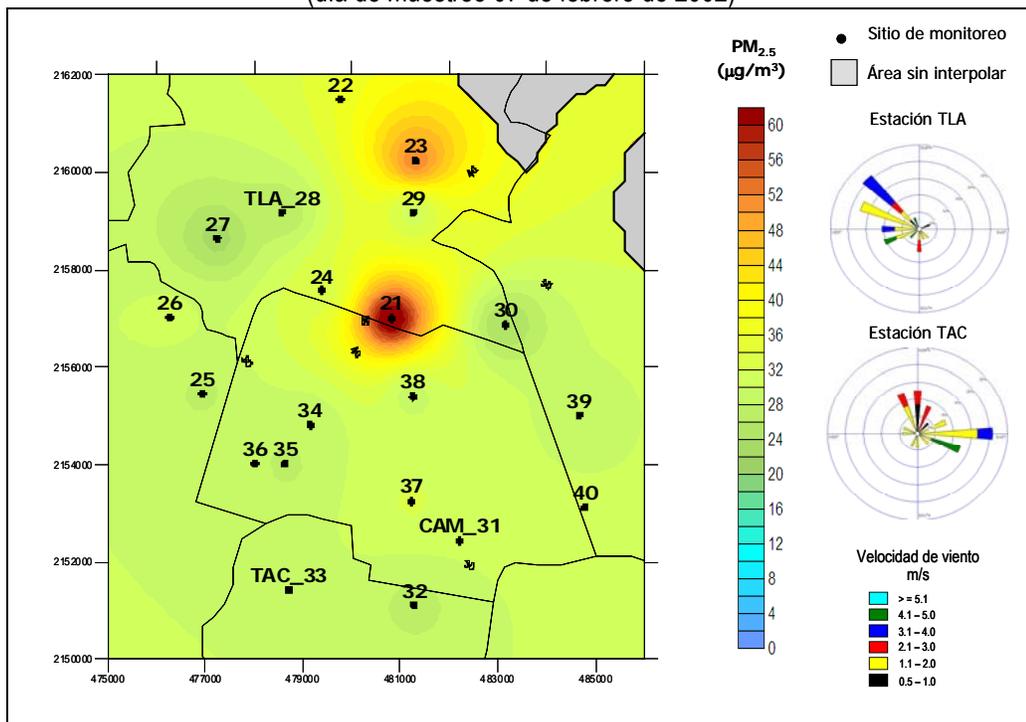


Figura 3.5. Distribución espacial de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la Región NO. Época seca caliente (día de muestreo lunes 09 de abril de 2002)

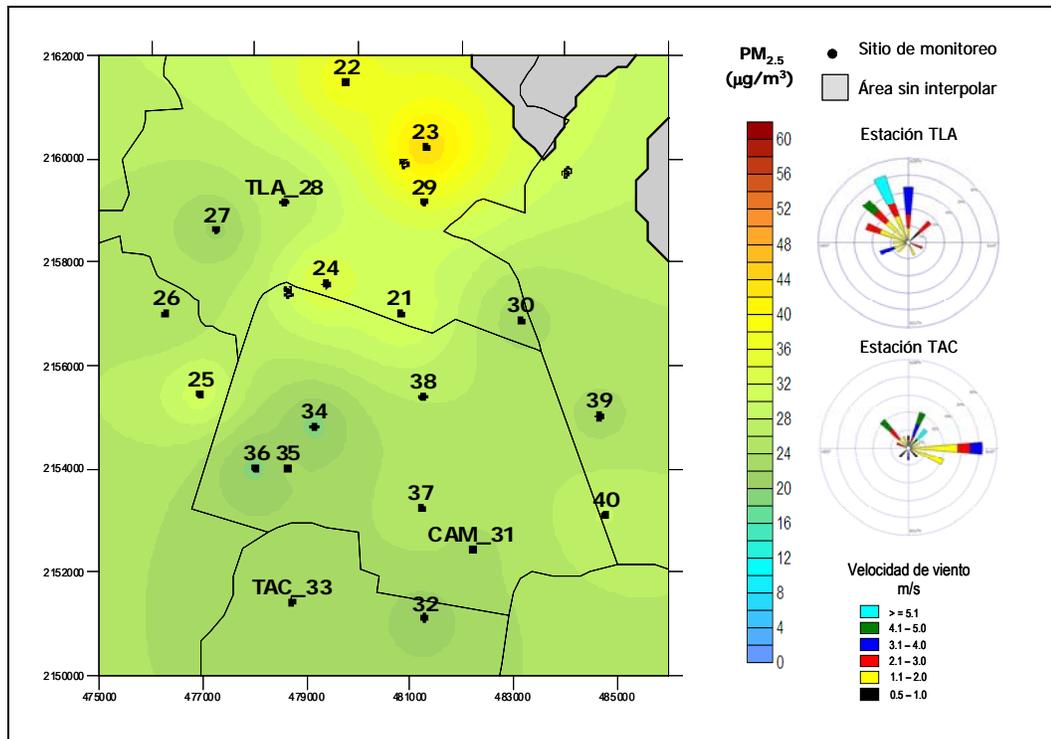


Figura 3.6. Distribución espacial de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  en la Región NO. Época de lluvia (día de muestreo martes 27 de junio de 2002)

Las concentraciones altas se presentaron en los sitios 21, 22, 23 y 29, la forma de la zona fue transversal alargada durante los días, donde los vientos llegaron al Valle con componente norte y en centro de la ciudad se formaron sistemas anticiclónicos, esto ocurrió durante las épocas seca fría y caliente. Para los demás muestreos se presentó una forma concéntrica alrededor de la estación que presentó concentraciones elevadas o esto no ocurrió. En la forma influyó el modelo de interpolación utilizado para la generación de los mapas. Los días 17 de Agosto y 31 de Octubre no se registraron concentraciones elevadas en la zona y coincide que los muestreos se efectuaron en día Sábado y Domingo respectivamente. La ubicación de los sitios consideró no tener influencia directa de alguna fuente de emisión y donde se presentara el libre paso del viento. Para ello se instalaron en escuelas del sector público y en una clínica del IMSS. Los registros promedio y desviación estándar los sitios para las épocas secas fría y caliente, y lluvia fueron:  $30.89 \pm 12.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $32.0 \pm 10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $25.23 \pm 11.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

El resto de la Región prestó concentraciones similares, sin embargo las características urbanas fueron diferentes. Fue por ello que se decidió dividir en dos subzonas: la primera, se localizó al noroeste de la región, comprende la parte que colinda con los municipios de Tlalnepantla y Naucalpan y la otra subzona se localizó al sur, ocupa el territorio de la delegación Azcapotzalco y una porción colindante con las delegaciones Gustavo A. Madero y Miguel Hidalgo.

La subzona noroeste presenta una extensión pequeña. El municipio de Tlalnepantla fue descrito anteriormente. El municipio de Naucalpan tiene características urbanas similares, sobre todo en el tipo de suelo. Se localiza en las laderas de la Sierra de las Cruces y por lo tanto el paisaje presenta árboles de coníferas y encinos, además parte de su territorio es suelo de conservación. Su extensión territorial y la población es mayor a la Tlalnepantla, cerca de los de 860 mil habitantes. El municipio cuenta con varias zonas habitacionales de tipo residencial. Su principal actividad económica es el comercio y hay algunas industrias importantes sobre todo en el territorio que colinda con Tlalnepantla. Los sitios localizados en esta zona fueron los no. 24, 26, 27 y 28\_TLA. Se ubicaron en escuelas del sector público y en la estación de TLA del SIMAT, sin influencia directa de alguna fuente de emisión. Los valores del promedio y desviación estándar para las diferentes épocas climáticas de estos sitios fueron:  $24.6 \pm 6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $26.3 \pm 7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $21.8 \pm 7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La subzona sur ocupa aproximadamente el 50% del dominio de la Región Noroeste. El tipo de suelo es de transición con estratos sedimentarios, estructura arcillosa y limos de aluvión, su uso es principalmente habitacional. Se estima que habitan alrededor de 600 mil habitantes, esta cantidad es menor a la que hay en cualquiera de los dos municipios arriba mencionados. La actividad económica que prevalece en la subzona el comercio y existen dos parques industriales en el área de Vallejo y San Lorenzo Tlaltenango. Los sitios que se localizaron en esta zona fueron los no. 25, 30, 31\_CAM, 32, 33\_TAC, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40. Se instalaron en escuelas del sector público, un CENDI y estaciones del SIMAT, sin influencia directa al de alguna fuente de emisión y donde corriera el libre paso del viento. Los datos promedios y desviaciones estándar para las épocas climáticas secas fría y caliente y lluvia fueron:  $21.9 \pm 5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $20.4 \pm 7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $22.8 \pm 7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 3.3 Validación de datos de trabajo para selección de sitios de monitoreo de $\text{PM}_{2.5}$ .

Los días 17 y 20 de Enero, así como el 2 de Agosto se invalidaron para el análisis de la información por no cumplir con el 75% de datos válidos, estos corresponden a los muestreos M01, M02 y M13 respectivamente. En el primer día se colectaron 9 muestra, los otros dos días colectaron 14 y 12 muestras respectivamente. La pérdida se debió en los dos primeros muestreos a que todavía no se tenían los permisos necesarios para la instalación de los equipos y el día 2 de Agosto el grupo técnico del CENICA sufrió el robo del vehículo mientras instalaban en el sitio no. 10 y se perdieron 5 muestreadores. A esto se suma la pérdida de muestras por problemas de logística o fallas eléctricas. Únicamente el día 8 de Agosto se tuvo el 100% de muestra. Los demás días se tuvieron pérdidas pero éstas no fueron significativas.

Se realizó interpolación con el método de Distancias Inversas para cada día de muestreo con el fin de estimar los datos faltantes y contar un número mayor de información para aplicar los métodos de selección de sitios. La estimación

de datos faltantes mostró diferencias pequeñas en todos los indicadores estadísticos con respecto población inicial (Tabla 3.9). La estimación fue más exacta debido a que los datos mostraron una distribución normal y el método de estimación fue el adecuado. Para la Región Noreste se estimó el 16% de los datos y el 11% para la Noroeste. La base con datos estimados se presenta en el anexo A.

Tabla 3.9. Comparación entre la poblaciones original y con estimación de datos faltantes.

PRINCIPALES ESTADISTICOS		REGIÓN ESTE				REGIÓN OESTE			
		Datos originales		Con datos estimados		Datos originales		Con datos estimados	
N	%	315	84 %	374	100%	336	89 %	360	100%
Máximo		88.5		88.5		64.9		64.9	
Mínimo		1.38		1.38		4.17		4.17	
Promedio		26.40		26.64		23.47		23.59	
Percentil 25		18.76		18.81		28.59		28.92	
Percentil 50		24.85		25.11		23.24		23.37	
Percentil 75		33.37		33.40		17.55		17.62	
Dev. estándar		11.32		11.32		8.68		8.68	

### 3.4 Selección de sitios para el monitoreo de PM<sub>2.5</sub>

En esta etapa de selección es importante tener presentes los objetivos del monitoreo. Para el proyecto se definieron los siguientes objetivos: 1) evaluar los riesgos a los que están expuestos los habitantes de zonas densamente pobladas, 2) evaluar el cumplimiento de la norma de calidad del aire, 3) evaluar los planes de control de este contaminante, 4) medir los niveles de áreas con concentraciones elevadas e 5) identificar el área de representatividad del sitio de monitoreo.

#### 3.4.1 Región Noreste

Los mapas de distribución espacial del contaminante en la Región Noreste, indican tres zonas las cuales presentaron características diferentes tanto en geomorfología, usos de suelo y densidad de población: al noreste, al sur y en el área industrial. Para verificar si existe una relación lineal entre los sitios que conformaban cada una de las zonas identificadas, se realizó un análisis de correlación entre todos los sitios de muestreo y se comparó contra la información del análisis visual.

La tabla 3.10 presenta los valores de correlación obtenidos entre los sitios de muestreo de la Región Noreste. Los valores son un indicador cuantitativo de la relación que existe entre un sitio de muestreo y otro. Se decidió utilizar los valores igual o mayores de 0.80 como indicadores de una buena correlación. El análisis de la información sugiere que los sitios no. 03 y 09\_SAG se correlacionan en buen grado entre ellos y con los sitios de su alrededor como son los no. 04, 05, 06, 07, 08 y 10. Cabe hacer notar que el sitio no. 07 mostró buena correlación con los demás excepto los no. 02, 05, 10 y 14 ubicados al sur y la correlación entre los sitios no. 09\_SAG y 82. Los sitios localizados al sur mostraron buena correlación entre ellos y con el sitio no. 07. Los sitios no. 01\_XAL, 11, 12, 81 y 82, donde se presentaron elevadas concentraciones también mostraron buena correlación entre ellos y con otros más alejados los no. 07, 15 y 17.

Tabla 3.10. Valores de coeficientes de correlación para los sitios de la región NE.

	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	81	82
01	1	0.55	0.65	0.66	0.65	0.64	0.81	0.74	0.78	0.76	0.83	0.83	0.77	0.70	0.81	0.78	0.80	0.73	0.79	0.79	0.88	0.84
02		1	0.83	0.77	0.67	0.81	0.77	0.71	0.70	0.70	0.69	0.74	0.77	0.60	0.74	0.69	0.71	0.77	0.72	0.62	0.65	0.71
03			1	0.93	0.81	0.85	0.80	0.86	0.90	0.80	0.73	0.76	0.76	0.63	0.79	0.71	0.76	0.79	0.76	0.73	0.71	0.85
04				1	0.89	0.87	0.80	0.78	0.88	0.73	0.72	0.72	0.75	0.60	0.74	0.70	0.71	0.73	0.76	0.75	0.75	0.82
05					1	0.69	0.78	0.76	0.88	0.67	0.73	0.73	0.71	0.57	0.71	0.70	0.71	0.67	0.68	0.76	0.70	0.74
06						1	0.86	0.73	0.77	0.68	0.70	0.69	0.80	0.60	0.73	0.70	0.71	0.71	0.77	0.63	0.76	0.80
07							1	0.82	0.80	0.70	0.88	0.89	0.93	0.76	0.90	0.87	0.92	0.83	0.88	0.84	0.84	0.86
08								1	0.89	0.74	0.74	0.79	0.75	0.59	0.78	0.67	0.76	0.71	0.71	0.77	0.79	0.86
09									1	0.82	0.73	0.76	0.70	0.54	0.73	0.66	0.72	0.68	0.69	0.71	0.74	0.84
10										1	0.69	0.74	0.66	0.60	0.71	0.67	0.74	0.77	0.75	0.70	0.78	0.85
11											1	0.96	0.94	0.94	0.96	0.97	0.94	0.91	0.95	0.89	0.86	0.84
12												1	0.93	0.91	0.97	0.95	0.96	0.93	0.94	0.93	0.84	0.87
13													1	0.88	0.94	0.97	0.96	0.92	0.94	0.88	0.87	0.84
14														1	0.94	0.95	0.90	0.92	0.94	0.88	0.79	0.78
15															1	0.96	0.97	0.96	0.96	0.94	0.86	0.90
16																1	0.96	0.95	0.96	0.91	0.83	0.82
17																	1	0.96	0.96	0.92	0.85	0.88
18																		1	0.96	0.91	0.81	0.89
19																			1	0.92	0.88	0.90
20																				1	0.87	0.90
81																					1	0.90
82																						1

En la Tabla 3.11, se muestra el resultado de la aplicación del Método de Coeficiente de Representatividad ( $R_n$ ). El valor es una cuantificación de la representatividad que mostró cada sitio de monitoreo de partículas finas durante las diferentes épocas climáticas y el total de los datos o "Acumulado". El indicador utilizado para la selección del sitio de mayor representatividad tuvo valores de  $R_n$  entre 0.90 y 1.00 en al menos dos de las épocas y el Acumulado (estos se resaltan en negrillas).

Los sitios no. 03, 05, 07, 08, 09\_SAG, 10, 11, 12, 13, 14\_LVI, 15 y 19 cumplieron con la premisa mencionada en el párrafo anterior. Los sitios no. 03, 05, 08, 09\_SAG y 10 se localizaron al noreste de la región, comparten características orográficas y usos de suelo similares, además de encontrarse cerca. La zona donde se localizan estos sitios tiene una alta representatividad de PM<sub>2.5</sub> y cualquiera de ellos es un posible candidato para la instalación de una estación de muestreo. Los demás sitios se localizan al sur de la región, el entorno que presentan tiene características diferentes y se observa una zona de alta representatividad de partículas donde se localizaron los sitios no. 11, 12, 13, 14\_LVI, 15.

El campo de vientos prevaeciente en la región tiene componentes del este y del norte principalmente, por la trayectoria que siguen los vientos se puede asumir que la representatividad de la zona localizada al norte se extiende hasta donde se localiza el sitio no. 07. El fenómeno también se presenta en la zona localizada al sur e incluye al sitio no. 19. Los sitios localizados en la zona industrial y sus alrededores presentaron valores bajos de representatividad en la mayoría de las épocas climáticas y en análisis Acumulado como son el 01\_XAL, 02 y 81.

Tabla 3.11. Valores de coeficientes de representatividad para cada sitio de la región NE por etapa de muestreo.

Sitio	Seca fría Rn (LS - LI)	Seca caliente Rn (LS - LI)	Lluvia Rn (LS - LI)	Acumulado Rn (LS - LI)
01_XAL	0.27(0.18-0.37)	0.41(0.13-0.50)	0.69(0.55-0.81)	0.48(0.39-0.55)
02	0.84(0.75-0.91)	0.97(0.89-1.00)	0.54(0.43-0.63)	0.80(0.73-0.85)
03	0.99(0.93-1.00)	0.99(0.92-1.00)	0.79(0.70-0.88)	0.96(0.90-0.99)
04	0.92(0.78-0.99)	0.96(0.87-1.00)	0.67(0.58-0.77)	0.88(0.81-0.93)
05	0.93(0.86-1.00)	0.96(0.89-1.00)	1.00(0.98-1.00)	0.98(0.95-1.00)
06	0.98(0.92-1.00)	0.62(0.51-0.74)	0.87(0.76-0.95)	0.99(0.97-1.00)
07	0.93(0.85-1.00)	0.98(0.89-1.00)	0.98(0.92-1.00)	1.00(0.99-1.00)
08	1.00(0.96-1.00)	0.79(0.66-0.91)	0.96(0.88-1.00)	0.97(0.93-0.99)
09_SAG	0.92(0.84-0.99)	0.90(0.79-0.99)	0.98(0.92-1.00)	0.91(0.85-0.96)
10	0.94(0.85-1.00)	0.94(0.83-1.00)	0.94(0.86-1.00)	0.94(0.90-0.99)
11	1.00(0.96-1.00)	0.98(0.87-1.00)	0.81(0.72-0.91)	0.98(0.95-1.00)
12	0.99(0.94-1.00)	0.96(0.81-1.00)	0.98(0.94-1.00)	1.00(0.98-1.00)
13	0.98(0.93-1.00)	0.96(0.78-1.00)	0.95(0.88-1.00)	0.99(0.96-1.00)
14_LVI	0.98(0.92-1.00)	0.79(0.58-0.94)	0.97(0.92-1.00)	0.99(0.97-1.00)
15	0.94(0.88-1.00)	0.98(0.91-1.00)	0.87(0.77-0.97)	0.93(0.88-0.96)
16	0.68(0.55-0.76)	0.92(0.82-1.00)	0.62(0.52-0.68)	0.72(0.65-0.77)
17	0.60(0.47-0.71)	0.97(0.92-1.00)	0.60(0.50-0.68)	0.70(0.64-0.77)
18	0.70(0.62-0.79)	0.90(0.77-1.00)	0.75(0.69-0.84)	0.77(0.71-0.82)
19	0.92(0.85-0.97)	0.97(0.87-1.00)	0.90(0.82-0.97)	0.92(0.87-0.96)
20	0.68(0.58-0.81)	0.79(0.63-0.92)	0.66(0.57-0.74)	0.71(0.64-0.75)
81	0.39(0.29-0.52)	0.63(0.48-0.75)	0.83(0.69-0.95)	0.63(0.55-0.69)
82	0.80(0.61-0.90)	0.93(0.74-1.00)	0.91(0.81-0.99)	0.88(0.81-0.92)

La Tabla 3.12 muestra los resultados del Método de Porcentaje de Representatividad ( $\Delta$ ), el valor corresponde  $\pm 10\%$  de la variación de la concentración de las partículas suspendidas en un punto con respecto a la promedio espacial de la superficie total de la región. Los resultados se presentan en porcentaje de cobertura (%) por muestreo y el promedio de estos, además el equivalente en Km<sup>2</sup> con respecto al tamaño de la Región Noreste descontando el área de los cerros no interpolada. La superficie de la región fue de 119.7 km<sup>2</sup>.

Los sitios que alcanzaron mayor porcentaje de cobertura promedio en la región fueron los no. 03 (46%), 04 (45%), 05 (40%), 06 (35%), 07 (55%), 08 (44%), 09\_SAG (35%), 11 (46%), 12 (49%), 13 (48%), 14\_LVI (39%), 15 (52%) y 19 (48%). Estos sitios son los mismos que tuvieron una buena representatividad de acuerdo con el análisis de R<sub>n</sub>, además se incluyó el sitio no. 04. Durante las diferentes épocas climáticas presentes a lo largo del año, los sitios que mantuvieron una adecuada cobertura de representatividad fueron los no. 03, 07, 15 y 19. Los demás, durante algún muestreo presentaron valores bajos.

Con los sitios anteriores se confirma que en la región existen dos zonas con características diferentes y de alta representatividad. Por lo tanto se debe instalar una estación de monitoreo en cada una de ellas. Para la selección del sitio se decidió que este debía estar en la zona de mayor representatividad, para la porción noreste, el sitio de mayor cobertura fue el no. 03 y para la porción sur el sitio no. 15. La superficie de representatividad respectivamente fue de 55 y 62 Km<sup>2</sup>.

Los sitios no. 01\_XAL (9%), 02 (29%) y 17 (22%) presentaron los registros promedio más bajos del período y sus valores fueron consistente durante la mayoría de los muestreos. Con esto, se corrobora que las emisiones del área industrial es un factor importante en el tamaño del área de representatividad que puede alcanzar una estación de monitoreo.

Los diferentes análisis de la información efectuados son consistentes en que hay dos zonas de alta representatividad en la Región Noreste de la ZMCM, con características diferentes. Además una zona de altas concentraciones de partículas finas y con una cantidad de población importante. Con estos resultados se decidió instalar una estación de monitoreo en cada una de las zonas, esto permitirá tener una buena representación de los niveles de partículas finas prevalecientes en la región y en áreas densamente pobladas. Los sitios seleccionados para instalar las estaciones de monitoreo fueron: para la zona noreste el no. 03, en la zona sur el no. 15 y en el área industrial la estación XAL del SIMAT (01\_XAL).

Tabla 3.12. Área de representatividad de los sitios de monitoreo (criterio de  $\pm 10\%$ ), presentado como porcentaje del total del área para la región NE

	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	% Prom Cobertura	Superficie Km <sup>2</sup>
<b>EPOCA</b>	<i>Seca Fria</i>		<i>Seca Caliente</i>				<i>Lluvia</i>						<i>Seca Fria</i>						
01_XAL	1	19	1	62	1	4	1	15	19	0	0	1	7	9	2	5	1	9	10.8
2	22	0	89	31	9	38	56	0	16	45	1	3	1	45	32	66	37	29	34.7
3	26	43	90	13	52	24	44	77	13	32	3	77	65	74	74	8	60	46	55.1
4	34	68	86	60	76	26	18	65	7	22	1	76	5	68	16	63	73	45	53.9
5	29	11	90	30	80	68	56	56	22	4	11	0	19	47	74	13	73	40	47.9
6	21	57	84	0	0	65	56	1	0	15	12	20	56	20	70	65	46	35	41.9
7	22	61	88	3	84	1	56	78	60	62	46	75	59	41	75	64	67	55	65.8
8	30	71	90	5	63	26	55	15	57	0	42	77	0	53	74	7	74	44	52.7
09_SAG	30	39	85	6	4	22	52	75	2	31	46	2	65	48	17	0	74	35	41.9
10	30	63	86	9	58	0	58	18	0	10	5	78	39	44	0	52	38	34	40.7
11	22	38	90	62	78	53	24	47	3	54	13	40	65	53	65	65	13	46	55.1
12	21	47	87	33	67	64	30	11	5	59	9	78	65	56	66	62	70	49	58.7
13	20	64	85	60	71	10	31	43	10	53	46	75	63	51	20	67	47	48	57.5
14_LVI	1	43	81	6	61	68	19	77	11	22	37	77	55	10	56	16	19	39	46.7
15	20	41	16	56	84	68	29	74	58	59	35	61	9	68	75	63	60	52	62.2
16	1	8	75	58	54	67	2	3	14	39	1	6	34	49	64	33	17	31	37.1
17	13	12	18	56	63	56	22	7	11	8	1	17	5	42	11	22	4	22	26.3
18	12	35	8	17	53	33	6	14	36	36	25	51	32	83	9	30	2	28	33.5
19	20	29	59	58	76	68	28	3	58	56	39	54	65	62	42	63	38	48	57.5
20	21	1	15	62	76	22	11	72	9	13	35	4	4	59	32	57	1	29	34.7
81	5	21	3	62	12	67	30	64	61	6	52	18	60	41	4	0	6	30	35.9
82	27	47	71	62	45	67	46	76	60	22	45	30	48	6	51	20	14	43	51.5

El equipo que se deberá instalar en cada una de las estaciones de monitoreo deberá ser operación automática y manual con designación de Método de Referencia. Con el primero se podrá observar el comportamiento del contaminante a lo largo del día y de forma continua, el cual brindará información sobre sus patrones diarios y estacionales. El equipo manual proporcionará una muestra para ser analizada a través de métodos químicos para conocer su composición, además se podrá evaluar la norma de calidad del aire para este contaminante. Cabe recordar que en México todavía no existe dicha norma, sin embargo esta modalidad es la que se sigue en otros países del mundo. También el funcionamiento de los instrumentos automáticos podrá ser evaluados con el Método de Referencia.

Cuando se realizó la visita para verificar las condiciones de los sitios y poder instalar una estación de monitoreo en cada uno de ellos, se encontró lo siguiente: el sitio 03, se instaló en un jardín de niños “Jean Piaget”, en la colonia Prados de Santa Clara, este contaba con seguridad y energía eléctrica pero no había espacio dentro de la escuela para colocar una estación de monitoreo sin que se vieran afectadas las áreas de juego de los niños y tampoco se podía colocar la caseta sobre alguna de las aulas ya que eran prefabricadas y tenían techo a dos aguas (Figura 3.7). Se busco otra alternativa dentro de la misma colonia, sin embargo no se obtuvo el permiso. Entonces se decidió instalar en la estación de monitoreo del SIMAT “San Agustín” (SAG) que se localiza a menos de 2 Km en línea recta de este sitio en

la Col. Valle de Santiago (Figura 3.8), esta dentro de la zona de alta representatividad y cuenta con la infraestructura necesaria para colocar el equipo de muestreo, esta acción repercutiría en a favor de la administración del proyecto, ya que una caseta nueva, instalada y puesta en marcha para la medición de partículas finas tiene un costo aproximado de 116 mil Dólares Americanos (Tabla 3.13) y en contra del área de representatividad (11% menos de cobertura). Sin embargo SAG reportó 42 Km<sup>2</sup> de superficie de representatividad con respecto a la región y este valor se considera adecuado. El valor de representatividad corresponde dentro de la clasificación de escalas espaciales empleadas para el monitoreo atmosférico por parte de la US. EPA a una escala Urbana (entre 4 a100 Km).



Figura 3.7. Fotografías del Jardín de Niños “Jean Piaget” en la Col. Prados de Santa Clara.



Figura 3.8. Fotografías de la Estación SAG del SIMAT, Col. San Agustín 3<sup>ra</sup> Sección.

Tabla 3.13. Costos de instalación y equipamiento de una caseta de monitoreo atmosférico para PM<sub>2.5</sub>.

Cantidad	Concepto	DI T*	Total
1	Caseta de monitoreo	40.000 USD	40.000 USD
1	Equipo de aire acondicionado	500 USD	500 USD
1	Regulador 5 KVA	600 USD	600 USD
1	Muestreador Método de Referencia (MR)	11.000 USD	11.000 USD
1	Consumibles para un año de operación MR	2.000 USD	2.000 USD
1	Kit de calibración MR	2.500 USD	2.500 USD
1	Muestreador automático	25.000 USD	25.000 USD
1	Consumibles para un año de operación equipo automático	2.000 USD	2.000 USD
1	Sistema de adquisición de datos	10.000 USD	10.000 USD
1	Preparación del sitio	7.000 USD	7.000 USD
		<b>SUBTOTAL</b>	<b>100,600 USD</b>
		<b>IVA</b>	<b>15,090 USD</b>
	<b>Costo por caseta de monitoreo instalada y en operación</b>	<b>TOTAL</b>	<b>115,690 USD</b>

\*Precios escalados a 2005 considerando una tasa de inflación de 5% anual.

Cuando se visitó el sitio 15 localizado en la Unidad de Medicina Familiar No. 23 del IMSS, Col. San Pedro el Chico (Figura 3.9), se observó que las Avenidas Ing. Eduardo Molina y San Juan de Aragón había importantes emisiones vehiculares debido al tránsito lento y pesado, además del sitio de taxis y el pequeño estacionamiento en el camellón del Av. San Juan de Aragón. El equipo habitualmente se situó a una altura de mayor a 15 m en la azotea de las oficinas administrativas de la Clínica, sin embargo estas no podían soportar la carga muerta de una caseta de monitoreo con el equipamiento necesario aproximadamente de 0.5 Toneladas. Se buscaron otras alternativas dentro de la misma clínica pero no eran adecuadas y colocar la caseta en alguno de los otros sitios del área representativa no era conveniente por la inseguridad de la zona, tanto para el personal de operación como para los equipos. Entonces se decidió localizarla en el sitio no. 19 ubicado en la Secundaria Técnica No. 41, Col. Unidad Habitacional San Juan de Aragón 1ra Sección, el cual era un lugar seguro (Figura 3.10), el área espacial que representará este sitio será de 58 km<sup>2</sup>, un valor considerado como adecuado y que pertenece a una escala espacial urbana.



Figura 3.9. Fotografías desde la Unidad de Medicina Familiar No. 23 del IMSS, Col. San Pedro el Chico.



Figura 3.10. Fotografías Secundaria Técnica No. 41, Col. Unidad Habitacional San Juan de Aragón 1ra Sección.

El porcentaje de cobertura promedio de los sitios seleccionados se representó gráficamente utilizando la información de la maya de interpolación de los mapas de distribución espacial de las  $PM_{2.5}$  en la Región Noreste. La Figura 3.10 muestra la superficie promedio que representan los sitios de muestro 01\_XAL, 09\_SAG y 19. El sitio 01\_XAL se localiza al centro de la porción norte de la región, el sitio 09\_SAG cubre la porción este y el sitio 19 la porción sur. Para distinguir la superficie representativa de cada sitio, se eligieron diferentes símbolos y colores : El sitio 01\_XAL en cuadrado color gris, el sitio 09\_SAG en triángulo color terracota y el 09 en triángulo color amarillo. En la esquina inferior derecha se observa que la superficie de representatividad de los sitios 09\_SAG y 19 se traslapa. Cabe mencionar que la forma y el tamaño de la superficie representativa de cada sitios puede variar dependiendo de la condiciones ambientales presentes y de las emisiones contaminantes en la región.

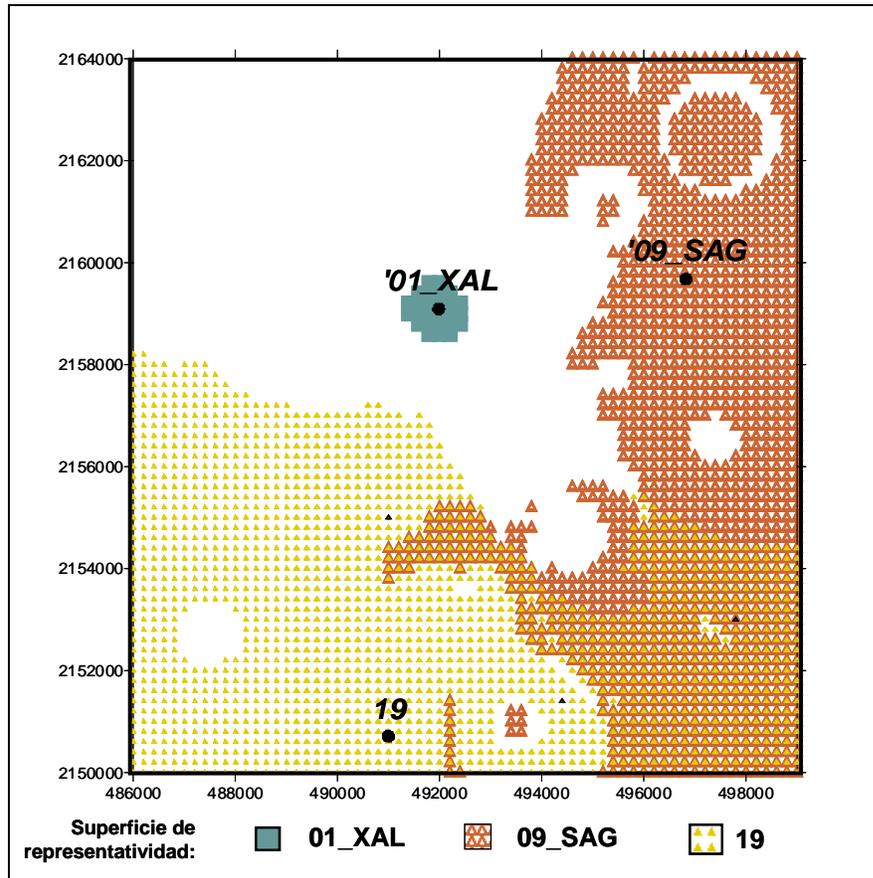


Figura 3.11. Superficie de representatividad de los sitios de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> seleccionados en la Región NE.

### 3.4.2 Región Noroeste

La Tabla 3.14, muestra los valores obtenidos del análisis de correlación entre los sitios de muestreo en la Región Noroeste. Se utilizan los valores igual o mayores a 0.80 como indicador de buena relación entre la interdependencia de las concentraciones registradas en los sitios de monitoreo. El análisis muestra que el sitio no. 25 se correlacionó con sitios cercanos localizados al norte de éste: 23, 24, 27, 28\_TLA. El sitio no. 28 se correlacionó con los sitios no. 22, 25 y 29. Los sitios mencionados anteriormente se agrupan al noreste de la región y son colindantes, la correlación más alta se presentó entre los sitios 25 y 28\_TLA fue de 0.87. Hacia el sur de la región los sitios no. 31\_CAM, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 mostraron entre ellos buena correlación, la mayoría de los valores obtenidos fueron por arriba del 0.90.

En la zona donde los sitios donde se registraron los niveles de concentraciones de partículas finas más altos no se presentó una correlación adecuada entre los sitio.

Los resultados anteriores coinciden parcialmente con los resultados presentados en el apartado de “Distribución espacial de PM<sub>2.5</sub> en el norte de la Ciudad de México” para la región Noroeste, la diferencia radica en los sitios localizados en la zona donde se registraron las concentraciones elevadas.

Tabla 3.14. Valores de correlación obtenidos para cada sitio de muestreo de la región NO.

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
21	1	0.61	0.47	0.49	0.45	0.62	0.45	0.46	0.48	0.13	0.41	0.43	0.40	0.43	0.43	0.42	0.41	0.48	0.43	0.34
22		1	0.48	0.62	0.71	0.52	0.61	0.81	0.81	0.66	0.63	0.59	0.61	0.55	0.61	0.60	0.57	0.65	0.61	0.60
23			1	0.72	0.80	0.49	0.53	0.57	0.49	0.59	0.66	0.74	0.71	0.69	0.72	0.74	0.73	0.76	0.76	0.63
24				1	0.84	0.44	0.79	0.67	0.68	0.60	0.75	0.79	0.80	0.78	0.77	0.82	0.84	0.79	0.83	0.76
25					1	0.52	0.81	0.87	0.71	0.76	0.76	0.77	0.78	0.73	0.79	0.79	0.79	0.78	0.80	0.72
26						1	0.48	0.55	0.42	0.17	0.36	0.41	0.27	0.34	0.35	0.31	0.30	0.46	0.36	0.26
27							1	0.78	0.62	0.66	0.73	0.70	0.73	0.77	0.76	0.76	0.77	0.71	0.78	0.69
28_TLA								1	0.84	0.77	0.80	0.75	0.77	0.72	0.82	0.78	0.76	0.76	0.75	0.69
29									1	0.73	0.82	0.81	0.78	0.73	0.78	0.71	0.79	0.87	0.77	0.84
30										1	0.82	0.80	0.79	0.72	0.75	0.77	0.78	0.77	0.81	0.81
31_CAM											1	0.95	0.95	0.93	0.94	0.93	0.95	0.91	0.94	0.92
32												1	0.93	0.93	0.92	0.93	0.96	0.95	0.95	0.94
33_TAC													1	0.96	0.94	0.95	0.96	0.90	0.92	0.90
34														1	0.96	0.94	0.96	0.91	0.93	0.90
35															1	0.95	0.97	0.91	0.94	0.89
36																1	0.96	0.86	0.94	0.85
37																	1	0.94	0.97	0.93
38																		1	0.92	0.95
39																			1	0.91
40																				1

La Tabla 3.15 presenta el resultado del Método de Coeficiente de Representatividad ( $R_n$ ). Se consideraron los mismos criterios utilizados en la Región Noreste. Los sitios que cumplieron con ellos fueron los no. 24, 25, 27, 28, 30, 31, 37, 38, 39 y 40. Los cuatro primeros se localizaron al noroeste de la región y en colindancia entre ellos, además comparten las mismas características urbanas, por sus valores se muestra una zona de alta representatividad. Los demás sitios se encuentran agrupados en el extremo sureste de la región tienen características orográfica y usos de suelo similares, por lo que se aprecia otra zona de alta representatividad de partículas finas en la región. Los sitios donde se registraron los valores Acumulados más altos de  $R_n$  para cada una de las zonas identificadas fueron los no. 27 (1.00) y 31\_CAM (1.00). Dadas las características diferentes entre ellas, se debe considerar una estación de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> para que representes las condiciones ambientales propias de cada una.

Por otra parte, los sitios no. 21 y 29 registraron los valores de  $R_n$  Acumulados más bajos: 0.64 y 0.74 respectivamente, estos presentan un tipo suelo similar donde existen diversas industrias, así como gran cantidad de población.

Tabla 3.15. Valores de coeficientes de representatividad para cada sitio de la región NO por etapa de muestreo.

Sitio	Seca fría (1) Rn (LS - LI)	Seca caliente Rn (LS - LI)	Lluvia (1) Rn (LS - LI)	Acumulado Rn (LS - LI)
21	0.61(0.51-0.68)	0.84(0.69-0.98)	0.59(0.51-0.65)	0.64(0.58-0.69)
22	0.87(0.74-0.96)	0.87(0.70-0.99)	0.79(0.67-0.92)	0.94(0.87-0.98)
23	0.65(0.56-0.74)	0.57(0.40-0.72)	0.96(0.86-1.00)	0.81(0.73-0.88)
24	0.97(0.87-1.00)	0.98(0.85-1.00)	0.88(0.75-0.98)	0.95(0.91-0.99)
25	0.91(0.84-0.98)	0.97(0.82-1.00)	0.99(0.93-1.00)	0.96(0.92-0.99)
26	0.88(0.80-0.95)	0.41(0.30-0.52)	1.00(0.97-1.00)	0.91(0.86-0.97)
27	0.98(0.93-1.00)	0.99(0.85-1.00)	0.99(0.93-1.00)	1.00(0.98-1.00)
28_TLA	0.99(0.95-1.00)	1.00(0.92-1.00)	0.90(0.79-0.99)	0.96(0.91-1.00)
29	0.68(0.53-0.81)	0.77(0.56-0.95)	0.77(0.60-0.89)	0.74(0.65-0.83)
30	0.93(0.86-0.99)	0.89(0.70-1.00)	0.96(0.90-1.00)	0.94(0.91-0.98)
31_CAM	0.97(0.91-1.00)	0.90(0.76-1.00)	0.99(0.94-1.00)	1.00(0.98-1.00)
32	0.67(0.57-0.77)	0.86(0.67-0.99)	0.79(0.70-0.86)	0.76(0.69-0.83)
33_TAC	0.67(0.58-0.76)	0.99(0.86-1.00)	0.68(0.60-0.76)	0.78(0.70-0.82)
34	0.73(0.64-0.82)	0.97(0.83-1.00)	0.74(0.65-0.80)	0.78(0.72-0.84)
35	0.85(0.79-0.92)	0.98(0.89-1.00)	0.80(0.71-0.87)	0.89(0.83-0.93)
36	0.77(0.67-0.85)	0.98(0.83-1.00)	0.84(0.76-0.91)	0.84(0.78-0.88)
37	0.95(0.84-1.00)	0.59(0.38-0.81)	0.99(0.96-1.00)	0.97(0.92-1.00)
38	0.95(0.88-0.99)	0.93(0.70-1.00)	0.76(0.64-0.85)	0.87(0.81-0.93)
39	0.95(0.89-1.00)	1.00(0.93-1.00)	0.96(0.91-1.00)	0.97(0.94-0.99)
40	0.97(0.89-1.00)	0.89(0.71-1.00)	0.99(0.96-1.00)	1.00(0.97-1.00)

La Tabla 3.1 reporta el Porcentaje de Representatividad ( $\Delta$ ) que obtuvo cada sitio de monitoreo por muestreo para la Región Noroeste. Se utilizaron los mismos criterios de selección que en la Región Noreste. Los sitios donde se reportó el mayor porcentaje de cobertura promedio fueron los no. 25 (46%), 27(45%), 28\_TLA (51%), 30 (46%), 31\_CAM (60%), 37 (50%), 39 (61%) y 40 (50%). Los primeros tres sitios se localizan al noroeste de la región y el resto al sureste. Estos sitios se localizan en las zonas identificadas por el método anterior como de alta representatividad. Los sitios que reportaron los valor de  $\Delta$  más alto y mantuvieron una adecuada variación a lo largo del año fueron los no. 28\_TLA, 31\_CAM y 39. La superficie de representatividad de cada uno de los sitios fue de 58 y 77 y 78 Km<sup>2</sup> respectivamente. La superficie total de la región excluyendo el área de los cerros no interpolada fue de 128 Km<sup>2</sup>. También se observan 13 sitios con cobertura igual o mayor al 40%, esto indica que las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> presentan homogeneidad espacial en la región. Los valores más bajos de cobertura los alcanzaron los sitios no. 21 (18%) y 22 (26%). El primero tuvo una mayor influencia de emisiones antropogénicas y se localiza donde hay asentamientos poblacionales importantes, por ello es conveniente sugerir la instalación de una estación de muestreo de PM<sub>2.5</sub> en el sitio.

Tabla 3.16. Área de cobertura de los sitios de monitoreo (criterio de  $\pm 10\%$ ), representado como porcentaje del total del área para la región NO

	M2	M3	M4	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	% Prom Cobertura	Superficie Km <sup>2</sup>
EPOCA	Seca Fría			Seca Caliente			Lluvia								Seca Fría					
21	43	0	26	1	28	6	0	37	0	19	60	40	12	0	10	27	0	23	18	23.0
22	2	18	0	17	0	81	41	15	5	8	74	6	25	34	55	38	35	10	26	33.3
22	9	2	72	37	0	92	12	6	0	1	87	2	16	28	8	37	59	57	29	37.1
24	80	74	11	85	84	50	68	0	19	13	9	0	12	35	68	36	51	80	43	55.0
25	48	55	4	84	44	79	45	0	1	22	79	87	80	31	47	29	22	74	46	58.9
26	46	78	2	0	12	2	52	30	65	64	90	0	5	2	55	30	11	80	35	44.8
27	73	1	69	83	20	89	63	38	53	23	16	74	8	28	56	6	53	53	45	57.6
28_TLA	75	15	60	84	43	91	65	1	53	62	92	87	1	31	33	16	55	60	51	65.3
29	28	78	30	28	83	18	26	14	2	10	84	55	2	25	15	41	15	1	31	39.7
30	82	2	11	76	9	89	61	2	0	50	91	82	33	0	55	46	60	80	46	58.9
31	78	78	53	78	80	12	61	15	57	59	92	86	80	37	67	27	47	72	60	76.8
32	17	50	64	4	80	87	53	8	38	15	22	79	80	12	17	4	35	43	39	49.9
33	18	76	72	83	69	91	4	44	12	31	12	88	3	3	2	5	4	69	38	48.6
34	54	64	63	63	75	82	15	46	39	2	76	18	17	27	0	46	30	17	41	52.5
35	82	50	68	80	68	89	3	46	53	34	48	7	81	39	25	46	34	27	49	62.7
36	79	71	71	73	83	85	15	43	41	2	16	31	79	38	27	48	13	8	46	58.9
37	73	77	5	39	8	33	47	9	59	67	85	17	80	40	68	49	60	79	50	64.0
38	63	73	72	10	73	83	41	3	43	62	20	4	9	22	26	8	57	80	42	53.8
39	82	72	41	73	68	83	59	38	72	56	93	88	37	36	67	47	40	38	61	78.1
40	82	78	9	77	74	15	58	5	55	47	82	88	58	1	41	49	9	71	50	64.0

La selección de los sitios para el monitoreo de  $PM_{2.5}$  en la Región Noroeste fue más sencilla que en la región anterior. Una vez identificadas las zonas de representatividad, se eligieron los sitios que tuvieran una buena representatividad y cobertura, a estos se añadió facilidad de acceso, seguridad para los técnicos y el equipamiento. Además de disponibilidad de energía eléctrica. Los sitios que cumplieron los requisitos anteriores fueron los no. 28\_TLA ubicada en Avenida Toluca s/n, Glorieta Atlacomulco, Colonia Tlalnemex, y el 31\_CAM en la Escuela Primaria "20 de Noviembre" Colonia Hogar y Seguridad. En estos sitios existen instaladas estaciones del SIMAT por lo que se aprovecha la infraestructura para colocar los equipos de monitoreo de partículas finas (Figuras 3.12 y 3.13). Además se incluye el sitio no. 21, localizado en el DIF municipal "San Pablo Xalpa" ubicado en Avenida Cultura Romana S/N, Col. San Pablo Xalpa, este representará las condiciones ambientales adversas causadas por la presencia de  $PM_{2.5}$  y que afectan a la población de la zona, en este sitio se deberá crear la infraestructura necesaria para la colocación del equipo y cuenta con las condiciones necesarias para hacerlo (Figura 3.14).



Figura 3.12. Fotografías de la estación de Tlalnepantla del SIMAT. Col Tlalnemex.



Figura 3.13. Fotografías de la estación de Camarones del SIMAT. Col Hogar y Seguridad.



Figura 3.14. Fotografías del DIF municipal "San Pablo Xalpa". Col. San Pablo Xalpa.

El porcentaje de cobertura promedio de los sitios seleccionados se representó gráficamente utilizando la información de la maya de interpolación de los mapas de distribución espacial de las  $PM_{2.5}$  en la Región Noreste. La Figura 3.15 muestra la superficie de representatividad promedio que representaron los sitios de muestro 21, 28\_TLA y 31\_CAM. El sitio 21 se localiza en la porción norte de la región al igual que el sitio 28\_TLA, el sitio 31\_CAM se encuentra al sur. Para distinguir la superficie representativa de cada uno, se eligieron diferentes símbolos y colores: el sitio 21 se resaltó con cuadros rojos, el 28\_TLA con una cruz en color gris y el sitio 31\_CAM con cuadros en amarillo. No se observa un área definida para cada sitio, hay traslape entre las superficies de representatividad de los sitios no. 21 y 28\_TLA y parece que la superficie del sitio 21 dividiera en dos a la otra. También existió traslape entre las superficies de los sitio 28\_TLA y 31\_CAM. La superficie del sitio 31\_CAM casi cubre la totalidad de la superficie del sitio 28\_TLA y parte del resto de la región. Como se mostró en los mapas de distribución espacial, la zona presentó homogeneidad en las concentraciones de  $PM_{2.5}$ .

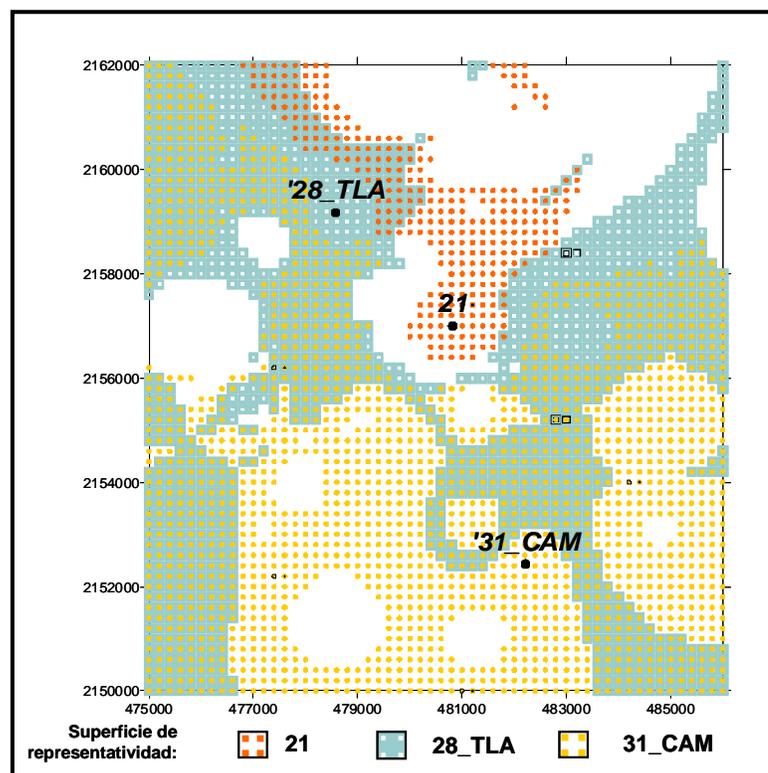


Figura 3.15 Superficie de representatividad de los sitios de monitoreo de  $PM_{2.5}$  seleccionados en la Región NO.

### 3.5 La red de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> de la Ciudad de México

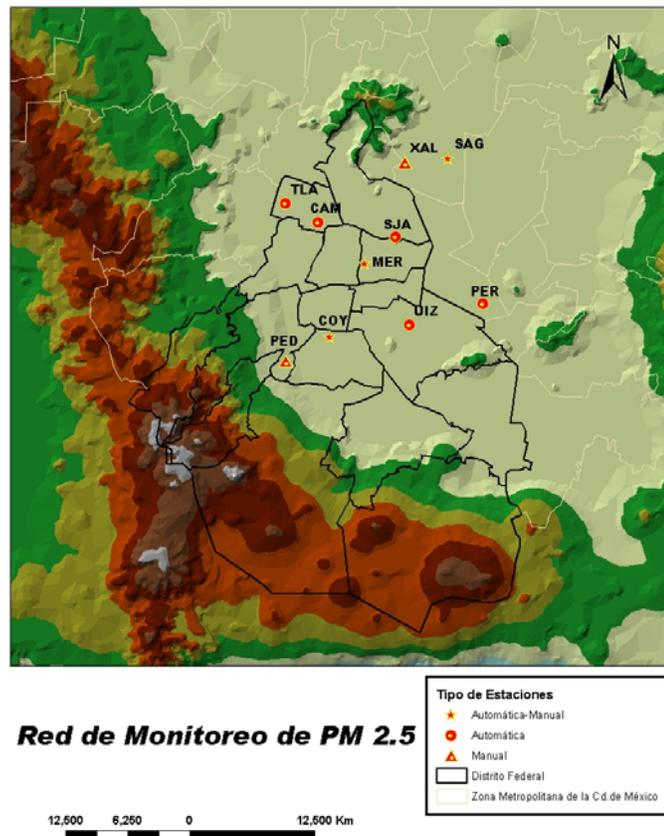
La red de monitoreo atmosférico de partículas finas de la Ciudad de México inició su operación en el mes de agosto de 2003 a cargo del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, esta integrada por 8 estaciones remotas automáticas y 7 manuales en zonas densamente pobladas de la Ciudad ó con alguna característica especial, estas son:

#### Estaciones Automáticas

- Coyoacán (COY)
- UAM-Iztapalapa (UIZ)
- Merced (MER)
- San Juan de Aragón (SJA)
- Nezahualcoyotl (PER)
- San Agustín (SAG)
- Camarones (CAM)
- Tlanepantla (TLA)

#### Estaciones Manuales

- Coyoacán (COY)
- Merced (MER)
- Pedregal (PED)
- San Agustín (SAG)
- Tlanepantla (TLA)
- Xalostoc (XAL)
- UAM Iztapalapa (UIZ)



El equipo automático con el que cuentan las estaciones es de dos tipos: TEOM y BETA, el manual es marca PARTISOL con designación de Método de Referencia. Los muestreos manuales se realizan con frecuencia de 7 días.

De los seis sitios seleccionados en este trabajo, en 5 de ellos se colocaron estaciones para el monitoreo de PM<sub>2.5</sub>, faltó el sitio 21. Sin embargo, es probable para una futura expansión de la red sea considerado, depende los objetivos que se quieran cubrir con los nuevos sitios.

**Conclusiones**

#### 4. Conclusiones.

La fracción fina de las partículas suspendidas presenta distribución relativamente homogénea en el norte de la zona metropolitana de la Ciudad de México, a excepción de las zonas industriales localizadas los municipios de Ecatepec de Morelos (Xalostoc) y Tlalnepantla. Lo anterior favorece que la instalación de sitios tenga una representatividad adecuada para la evaluación de la exposición de la población del norte de la ciudad. Las emisiones de las zonas industriales tienen un área de impacto pequeño comparado con el resto de la región de estudio, sin embargo es de esperar que la composición de las partículas resulte más tóxica que en el resto de la ciudad, por lo tanto se recomendó la instalación de muestreadores para la recolección y posterior análisis; adicionalmente se obtendrán resultados sobre los niveles de exposición del importante grupo de población que se localiza en los alrededores de estas zonas.

El modelo de Chan-Hwang fue una herramienta adecuada para los propósitos de este estudio. El estadístico es un indicador cuantitativo de la representatividad espacial de un sitio fijo a través de las mediciones del aire ambiente, el cual puede estimarse aun cuando se tengan datos faltante. Una limitante del modelo es que requiere que las diferencias entre el sitio fijo y los sitios de evaluación presenten una distribución normal. La evaluación del área de representatividad indica la superficie correspondiente a la representatividad de un sitio fijo para las  $PM_{2.5}$ . El valor del área puede asociarse a otros indicadores tales como población, emisiones, usos de suelo, etc. Los resultados fueron consistentes con los obtenidos con el método de porcentaje de representatividad.

Los sitios seleccionados para la evaluación de la exposición de la población por su representatividad espacial fueron Camarones, San Agustín, Tlalnepantla, Xalostoc y San Juan de Aragón, los cuatro primeros se instalaron en las estaciones de Monitoreo Atmosférico del SIMAT. Adicionalmente se recomienda la instalación de otro sitio en el área de influencia de la zona industrial de Tlalnepantla. Se sugiere que las estaciones cuenten con equipo de referencia, así como instrumentos automáticos.

## *Referencias bibliográficas*

---

## Referencias Bibliográficas.

- Appel, B.R. Tokiwa, Y., Kothny, E.L., Wu, R., Povard, V. 1988. *Evaluation of Procedures for Measuring Atmospheric Nitric an Ammonia*. Atmos. Environ. 22:1565-73
- Borja-Aburto, V.H., Loomis, S.I, Bangdiwala, C.M. Shy and R.A. Rascón-Pacheco. 1997. *Ozone, Suspended Particulates, and daily mortality in Mexico City*. Am. J. Epidem. 145(3): 258-268
- Bravo, H. A. y Báez J. 1960. Estudio de Depósito de Polvo por Gravedad en la Ciudad de México. *Revista de Ingeniería Química*. Junio.
- Castellan G. W. 1987. *Fisicoquímica*. Ed Addison Wesley, Iberoamericana. EU.
- Cesarman F. 1972. *La destrucción de Medio Ambiente*. Ed Joaquín Motriz.
- Chang-Chuan Chan, Jiang-Shiang Hwang. 1996. Site representativeness of urban air monitoring stations. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 46:755-760.
- Chow, J. Koutrakis, P. 1988 Publications; Air & Waste Management Association: Pittsburgh, PA, 1998 VIP-81pp 605-618, 215-225
- Chung, A. Chang, D. Kleeman, M. 2001. Comparison of real-time instruments used to monitoring airborne particulate matter. *J. Air & Waste Manag. Assoc.* 51:109-120.
- Claiborne, C. Mitra, A. Adams, G. Bamesberger, L. Allwine, G. Kantamaneni, R. Lamb, B. Westberg, H. 1995. *Atmos. Environ.* 29: 1075-1089.
- Cochran, W. 1995. *Técnicas de Muestreo*. Ed Continental, S.A. de C.V. México.
- Consulta realizada en junio 18, 2005 <http://www.goldensoftware.com/>
- Cook, JP. Oslund, W. Frank N. 1995. *Evaluation of Fine Particulate Sampler (PM<sub>2.5</sub>) in an Area of Volatile Constituents*. The AWMA International Specialty Conference Particulate Matter: Health and Regulatory Issues. Pittsburgh, Pennsylvania. April 4-6.
- Courtney, W. Shaw, R. Dzubay, G. 1982. Precision and Accuracy of a  $\beta$  Gauge for Aerosol Mass Determinations. *Envir. Sci. Tech.* 16:236-239.
- CSERVA (Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental). 1998. Comportamiento y distribución de las partículas respirables finas y gruesas en el norte y sureste de la Ciudad de México. Vol. 1, Aire-Agua.
- D. Loomis, Castillejos, D. R. Gold, W. McDonnell, V. H Borja-Aburto, Air pollution and infant mortality in Mexico City. *Epidemiology* 10: 118-123, 1999

- D. R. Gold, A.I. Damakosh, A. Pope III, D. W. Dockery, W. F. McDonnell, P. Serrano, A. Retama, M. Castillejos. Particulate and Ozone Pollutant Effects on the Respiratory function of Children in Southwest Mexico City", *Epidemiology*, Vol. 10 No. 1, 1999.
- Elsom, D. 1978. Spatial Correlation Analysis of Air Pollution Data in an Urban Area. *Atmos. Environ.* 12:1103—1107
- Finlayson-Pitts, B.J. and J.N. Pitts,. 1986. *Atmospheric Chemistry*. Wiley & Sons, U. S. A.
- Finlayson-Pitts, B.J. Pitts, JN Jr. 2000. *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press. San Diego, California.
- Friedlander, SK. 2000. *Smoke, Dust, and Haze Fundamentals of Aerosol Dynamics*. Oxford University Press. New York, N.Y.
- Gilbert, RO. 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York, N.Y. pp 177-185.
- González, A. M. 1979. *Crisis Ecológica/ Crisis Social*. Editorial Concepto.
- Goswami, E., Larson, T., Lumley, T., Sally Liu, L. (2002). Spatial Characteristics of Fine Particulate Matter: Identifying Representative Monitoring Locations in Seattle, Washington. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 52:324-333.
- Griffin, R.D. 1994. *Principles of Air Quality Management*, Lewis Publishers.
- Haining R. 2003. *Spatial Data Analysis Theory and Practice*. Ed. Cambridge University Press. pg. 115
- Handscombe, C.M., and D.M Eldsom. 1982. Rationalization of the National Survey of Air Pollution Monitoring Network of the United Kingdom Using Spatial Correlation Análisis: A Case-Study of the Greater London Area. *Atmos. Environ.*, 16:1061-1070
- INEGI. 1999. *Estadísticas del Medio Ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana*. INEGI, México.
- Jacobson, M. Z. 1999. *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Ed. Cambridge University Press. pg. 400-509
- Jaklevic J. M., Gatti r. C., Guolding F. S., Loo B. W. 1981. A  $\beta$ -Gauge Method Applied to Aerosol Samples. *Environ. SCI. Technol.* 15:680-686.
- Jáuregui E. O. 2000. *El Clima de la Ciudad de México*. Editorial Plaza y Valdez, S.A. de C.V. 1ª edición.
- Keith L. H. 1996. *Principles of Environmental Sampling*. Second Edition. American Chemical Society. Washington, D.C.
- Kim, Y.P. and Seinfeld, J.H. 1995. *Atmospheric Gas-Aerosol Equilibrium III*. *Aerosol Sci. Technol.* 22:93-110.

- Lamoree, D.P.; Turner, J.R. In PM<sub>2.5</sub>: A Fine Particle Standard;
- Larsen, R.I. 1969. A New Mathematical Model of Air Pollutant Concentration Averaging Time and Frequency. *J. Air Poll. Control Assoc.*, 19:24-30
- M. Castillejos, V. H. Borja-Aburto, D.W. Dockery, D. R. Gold, D. Loomis. Airborne Coarse Particles and Mortality, *Inhalation Toxicologic*, 12(Supplement 1), 61 – 72, 2000
- Martínez, A.P., Romieu, I. 1997. *Introducción al Monitoreo Atmosférico*. Hermes Impresores, México
- Meyer M. B., Patashnick H., Ambs J. L., Rupprecht E. G. 2000. Development of Sample Equilibration System for the TEOM Continuous PM Monitor. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 50:1345-1349.
- Muun, R.E. (1975). *Suspended Particulate Concentrations: Spatial Correlations in the Detroit-Windsor Area*. *Tellus*, 27:197-405
- Muun, R.E. (1981). *The Design of Air Quality Monitoring Networks*. London: Macmillan Ltd. Noll, R.E: and T. L. Miller. (1977). *Air Monitoring Survey Designee*. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science.
- OMS (2000). *Guidelines for Air Quality*. This document is not a formal publications of the WHO. Patashnick H., Rupprecht E. G. 1991. Continuous PM-10 Measurements Using the Tapered Element Oscillating Microbalance. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 41:1079-1083.
- Priz B. (1986). *Effects of Aerosols on Vegetation and Ecosystems: General Considerations and some Examples*, en Lee S: et al., *Aerosols*. Lewis Publishers, INC, second edition, Michigan, E.U.A., pp. 837-853
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Secretaría del Medio Ambiente del GDF (SMA) y el Centro de Investigación en Geografía y Geomática (Centro Geo). 2003. *GEO Ciudad de México (Una visión del sistema urbano ambiental)*. PNUMA y Centro Geo. P. 16-48, México, DF.
- Rizzo M., Scheff P. A., Kaldy W., 2003. Adjusting Tapered Element Oscillating microbalance Data for Comparison with Federal Reference Meted PM<sub>2.5</sub> Measurements in Region 5. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 53:596-607.
- Romieu, I. Ramírez, F. Meneses, D. Ashley, S. Lemire, S. Colome, Fung and M. Hernández-Ávila, A. 1999. *Environmental Exposure to Volatile Organic Compounds Among Workers in Mexico City as Assessed by Personal Monitors and Blood Concentrations*. *Environ. Health Perspect.* 107: 511-515
- Romieu I., F. Meneses, Huerta, J.J. Sierna, *Effects of Air Pollution on the Respiratory Health of Asthmatic Children Living in Mexico City*, *American Journal Epidemiology*, 141:546-53, 1995
- Rosas I., McCartney H.A., Payne R.W., Caderón C., Lacey J., Chapela R., Ruíz-Velazco S., Analysis of the relationships between environmental factors (aeroallergens, air pollution, and weather) and asthma emergency admission to a hospital in Mexico, *City. Allergy* 53: 194-401, 1998

- Secretaría de Salud (SSA). 2005. *NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM<sub>10</sub>, y partículas menores de 2.5 micrómetros PM<sub>2.5</sub> de la calidad del aire ambiente.* Diario Oficial. México. Septiembre.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA), 2000. *Proyecto: Bases Para el Manejo de la Zona Oriente del Valle de México.* Secretaría del Medio Ambiente del G.D.F.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA), 2002. *Inventario de Emisiones 2000*, 22-36pp. Secretaría del Medio Ambiente del G.D.F.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA). 2002b. *Pronostico de Calidad del Aire del día 26 de Enero de 2002.* Secretaría del Medio Ambiente.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA). 2002c. *Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2002 para la ZMVM.* Secretaría del Medio Ambiente.
- U. S. EPA. 1998. *Guidance for Using Continuous Monitors in PM<sub>2.5</sub> Monitoring Networks.* Research Triangle Park, NC: Office of Air Quality Planning and Standards. Report No. EPA-454/R-98-012.
- U.S. EPA. 1994. *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement System.* EPA-600/R-94/038a. April.
- U.S. EPA. 1997a. *Revised Requirements for Designation of Reference and Equivalent Methods for PM<sub>2.5</sub> and Ambient Air Quality Surveillance for Particulate Matter.* 40 CFR Part 53 and 58. Federal Register, 62(138):38763-38854. July 18.
- U.S. EPA. 1997b. *Guidance for Network Design and Optimum Site Exposure for PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>.* EPA-454/R99-002. December.
- U.S. EPA. 1997c. *National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter. 40 CFR Part 50.* Federal Register. 62(138):38651-38960. July 18.
- U.S. EPA. 1998. *Guidance For Using Continuous Monitoring in PM<sub>2.5</sub> Monitoring Networks.* EPA-454/R-98-012, May.
- U.S. EPA. 1999. *Improve Particulate Monitoring Network Procedures For Site Selection.* Retrieved October 30, 2004 from <http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/visible/select22.pdf>
- U.S. EPA. 2000. *Guidance for Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection.* EPA/240/R-02/005, p 10, December.
- U.S. EPA. 2002. *Ambient Air Monitoring Reference and Equivalent Methods: Designation of One New Reference Methods for PM<sub>2.5</sub>, and One New Reference Method for NO<sub>2</sub>.* Federal Register, 67(63):15566-15568. April.

- V. H. Borja-Aburto, M. Castillejos, D. R. Gold, S. Bierzwinski, D. Loomis. Mortality and Ambient Fine Particles in Southwest Mexico City, 1993-1995; *Environmental health Perspectives* V. 106, No. 12, 1998
- World Health Organization, 2005. *Guidelines for Air Quality*. p. 82 Consulta realizada en Febrero, de <http://www.who.int/peh/>
- Yu, Chong Ho. 2005. *Resampling methods: concepts, applications, and justification. Practical Assessment, Research & Evaluation*. 8(19). Consulta realizada en Marzo, de <http://PAREonline.net/getvn.asp?v=8&n=19>
- Zannetti, P. 2003. Air Quality Modeling (Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software). *EnviroComp Institute and A&WMA*, p. 5-6, Pittsburgh, PA.

## **Anexo A**

### **Bases de datos**

## Bases de datos.

Tabla A.1. Datos de la campaña de muestreo del proyecto "Diseño, adquisición e instalación de una red para el monitoreo de partículas finas en la ZMCM". Región Noreste.

Id	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
	17/01	20/01	23/01	26/01	19/03	22/03	25/03	28/03	03/06	06/06	09/06	12/06	02/08	05/08	08/08	11/08	16/10	19/10	22/10	25/10
01	64.62	46.57	45.53	56.39	55.03		58.84	28.90	53.06	27.20	4.69	39.01		14.77	31.12	34.01	47.01	37.83	43.57	39.36
02	48.50		20.63	88.85	36.79		43.43	19.72	39.37	36.57	7.16	16.03		42.01	27.25	40.34	31.94	31.71	33.38	29.33
03	64.88	38.60	28.18	53.01	36.41	22.12	30.64	18.38	41.64	23.27	7.27	20.90	25.89	38.43	21.42	24.74	37.32	26.78	23.30	27.24
04	44.68	42.39		47.55	37.64	16.69	33.12	18.64	45.10	21.12	7.56	21.84		42.42	19.90	34.41	37.72	33.05	30.74	25.38
05	38.82	31.34	28.60	37.33	35.76	15.16	33.37	21.81	39.40	24.50	6.96	13.21		33.46	4.09	31.02	32.36	27.85	25.15	24.85
06					34.53	7.29	20.94	23.47	39.08	15.98	8.97	22.49	24.23	32.87	24.04		30.41	26.20	31.16	23.37
07					37.26	11.46	35.00	31.26	39.11	22.96	5.95	18.28		25.19	21.72		31.43	26.80	30.93	24.27
08	39.86	37.58	33.45	46.23		12.10	31.93	18.67	39.45	27.20	5.40	9.96	24.14	26.42	21.15	10.01	33.42	26.74	22.95	25.84
09	36.18	30.51	33.41	41.49	34.67	12.28	27.82	18.16	40.61	21.92	3.73	15.60	23.48	24.29	14.05	24.83	32.56	22.68	16.45	25.67
10	33.23		33.36	49.81	37.62	22.96	31.39	9.91	37.88	18.86	1.38	14.26	21.58	18.00	20.66	28.66	31.81	6.50	29.31	22.61
11		26.14	18.13	41.31	35.79	16.85	35.91	24.58	28.33	20.18	3.74	16.76	22.93	18.75	18.31	25.09	39.09			31.25
12					35.08	19.84	36.52	23.60	32.65	27.84	4.09	17.15	26.01	18.55	20.96	24.48	38.57	28.70	30.53	26.65
13		22.62	17.19	44.63	37.77			27.19	30.27	19.91	7.36	16.69	25.66	22.05	21.66	24.18		32.48	33.20	23.46
14		21.00	12.02	42.10	38.40	23.72	36.87	22.81	27.08	22.41	7.31	21.86			21.07	23.46	46.59	29.64	38.82	30.39
15		17.76	17.17		31.17		34.83			21.72		19.01	34.92	20.47	18.91	19.81				
16		16.58	12.01	36.22		17.85	30.81	21.47	24.23	16.69	4.53	15.86	19.70	16.81	15.92	22.00	32.81		27.89	21.13
17			15.34	37.58	31.56	18.64	31.94	24.36	27.83	17.51	4.41	14.05	21.33	16.79	17.44	18.70	31.49	22.25	27.25	18.77
18		18.84	15.06	40.95	30.23	21.39	30.73	19.32	25.12	18.42	6.47	15.78	23.37	19.51	18.57	21.83	36.05	21.98	27.80	17.83
19										16.89					22.60	24.75	38.12	24.40	33.94	22.56
20		14.46	19.14	30.60	30.87	16.95		18.05	25.91	21.50	4.32	14.51		20.51	15.24	18.15	34.05	23.76	30.09	16.49
81	60.80	54.56	38.18	55.98										23.42	24.26	26.28		36.36	56.60	33.06
82														25.73	23.50	22.94	48.27	25.16	38.35	20.65

## Bases de datos.

Tabla A.2. Datos de la campaña de muestreo del proyecto "Diseño, adquisición e instalación de una red para el monitoreo de partículas finas en la ZMCM". Región Noroeste.

Id	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
	01/02	04/02	07/02	10/02	06/04	09/04	12/04	15/04	18/06	21/06	24/06	27/06	17/08	20/08	23/08	26/08	31/10	03/11	06/11	09/11
21		33.28	64.90	18.93	36.00	45.07	27.65	24.53	36.19	10.69	48.54	32.13	30.02	18.35	19.32	54.89	29.95	17.63	35.52	40.51
22		44.99		10.66		38.94	5.59	28.00	25.13	11.66	27.83	37.08	28.94	16.78	18.35	25.88	25.70	14.73	24.26	43.30
23		38.54	51.93	21.41	35.38	36.68	44.21	30.46	27.60	6.42	6.44	43.46	25.36	28.70	13.00	29.16	30.22	16.60	21.98	36.68
24		29.18	32.47	27.50		33.48	23.07	26.78	21.49	4.17	23.26	34.22	31.96	32.31	12.79	25.76	23.65	16.75	19.09	33.60
25		26.52	27.57	15.89		33.53	21.42	27.83	19.67	4.52	12.33	31.05	28.55	21.08	15.71	24.62	26.23	17.47	16.32	31.99
26		26.40	30.51	14.99		10.60	19.13	23.33	20.15	11.01	18.53	24.23	25.58	11.36	12.17	39.43	21.58	17.39	15.72	33.28
27		28.06	23.05	23.54	33.13	34.26	19.89	29.34	22.69	9.68	18.08	21.56	31.50	22.61	12.48	29.13	21.71	19.14	22.95	30.04
28		31.19	26.07	20.24	36.28		21.37	30.87	21.07	15.67	21.39	26.34	27.05	20.06	22.57	27.60	27.49	18.36	19.61	36.38
29		34.52	30.61	25.61		37.59	22.99	34.91	26.01	11.74	33.12		28.01	18.58	21.72	20.89	29.12	15.16	25.58	50.05
30		29.61	23.73	17.69		31.15	18.97		22.87	14.21	10.90	23.00	27.25	22.13	17.98	11.56	25.73	11.86	21.77	33.18
31	25.57				32.56		23.92	36.08	20.74	11.69	20.97	23.75	27.04	19.77	15.87	17.51	23.28	11.11	18.83	31.73
32		25.02	27.30	20.65	23.22	24.68	23.88	29.02	20.20	6.55	17.25	20.84	22.91	19.33	15.56	15.44	18.81	10.01	17.57	29.63
33		25.13	29.68	21.37	24.71	34.08	22.23	31.09	15.84	7.60	16.00	22.01	22.12	20.36	12.00	13.46	15.25	10.03	15.15	
34	23.09	26.76	27.89	23.96	24.21	29.88	24.36	28.19	17.31	8.04	17.36	19.40	24.98	17.95	13.05	16.55	14.07	11.90	16.93	28.26
35		29.91	27.32	23.64		32.39	25.77	29.50	15.77		18.08	22.18	24.31	16.95	15.79	18.27		11.96	17.48	28.67
36	24.01		28.54	21.20	24.68	30.88	23.43	28.74	17.31		17.46	19.25	22.54	23.56	15.23	17.67	19.97	12.12	15.81	27.53
37	27.40	31.41	32.19	28.57	32.19	36.48	28.85	33.92	19.83	6.59	20.86	25.21	27.98	24.08	15.81	18.57	24.20	12.37	21.73	34.47
38	20.69	27.17	28.85	23.22	26.73	27.02	24.97	28.46	19.31	5.86	17.60		22.85	16.03	12.55	16.18	19.85	10.25		
39	20.12		28.68	24.64	26.13	30.79	25.76	28.39	23.31		18.85	23.46		21.07	13.57	17.41	23.49	12.07	18.27	29.36
40				27.75	38.31			35.60	23.41	6.19	21.17	28.12	28.29		17.05	12.75			26.48	35.49

Tabla A.3. Base de datos final utilizada en el proyecto. Región Noreste.

Id	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
	17/01	20/01	23/01	26/01	19/03	22/03	25/03	28/03	03/06	06/06	09/06	12/06	02/08	05/08	08/08	11/08	16/10	19/10	22/10	25/10
01			45.53	56.39	55.03	<b>17.00</b>	58.84	28.90	53.06	27.20	4.69	39.01		14.77	31.12	34.01	47.01	37.83	43.57	39.36
02			20.63	88.85	36.79	<b>15.25</b>	43.43	19.72	39.37	36.57	7.16	16.03		42.01	27.25	40.34	31.94	31.71	33.38	29.33
03			28.18	53.01	36.41	22.12	30.64	18.38	41.64	23.27	7.27	20.90		38.43	21.42	24.74	37.32	26.78	23.30	27.24
04			<b>31.02</b>	47.55	37.64	16.69	33.12	18.64	45.10	21.12	7.56	21.84		42.42	19.90	34.41	37.72	33.05	30.74	25.38
05			28.60	37.33	35.76	15.16	33.37	21.81	39.40	24.50	6.96	13.21		33.46	4.09	31.02	32.36	27.85	25.15	24.85
06			<b>21.86</b>	<b>51.08</b>	34.53	7.29	20.94	23.47	39.08	15.98	8.97	22.49		32.87	24.04	<b>26.76</b>	30.41	26.20	31.16	23.37
07			<b>19.96</b>	<b>44.37</b>	37.26	11.46	35.00	31.26	39.11	22.96	5.95	18.28		25.19	21.72	<b>23.67</b>	31.43	26.80	30.93	24.27
08			33.45	46.23	<b>36.65</b>	12.10	31.93	18.67	39.45	27.20	5.40	9.96		26.42	21.15	10.01	33.42	26.74	22.95	25.84
09			33.41	41.49	34.67	12.28	27.82	18.16	40.61	21.92	3.73	15.60		24.29	14.05	24.83	32.56	22.68	16.45	25.67
10			33.36	49.81	37.62	22.96	31.39	9.91	37.88	18.86	1.38	14.26		18.00	20.66	28.66	31.81	6.50	29.31	22.61
11			18.13	41.31	35.79	16.85	35.91	24.58	28.33	20.18	3.74	16.76		18.75	18.31	25.09	39.09	<b>28.76</b>	<b>31.10</b>	31.25
12			<b>18.79</b>	<b>42.51</b>	35.08	19.84	36.52	23.60	32.65	27.84	4.09	17.15		18.55	20.96	24.48	38.57	28.70	30.53	26.65
13			17.19	44.63	37.77	<b>17.56</b>	<b>32.65</b>	27.19	30.27	19.91	7.36	16.69		22.05	21.66	24.18	<b>33.10</b>	32.48	33.20	23.46
14			12.02	42.10	38.40	23.72	36.87	22.81	27.08	22.41	7.31	21.86		<b>20.74</b>	21.07	23.46	46.59	29.64	38.82	30.39
15			17.17	<b>41.85</b>	31.17	<b>18.61</b>	34.83	<b>22.75</b>	<b>29.60</b>	21.72	<b>5.42</b>	19.01		20.47	18.91	19.81	<b>37.76</b>	<b>26.88</b>	<b>30.67</b>	<b>23.89</b>
16			12.01	36.22	<b>33.85</b>	17.85	30.81	21.47	24.23	16.69	4.53	15.86		16.81	15.92	22.00	32.81	<b>25.87</b>	27.89	21.13
17			15.34	37.58	31.56	18.64	31.94	24.36	27.83	17.51	4.41	14.05		16.79	17.44	18.70	31.49	22.25	27.25	18.77
18			15.06	40.95	30.23	21.39	30.73	19.32	25.12	18.42	6.47	15.78		19.51	18.57	21.83	36.05	21.98	27.80	17.83
19			<b>16.83</b>	<b>40.08</b>	<b>33.26</b>	<b>18.07</b>	<b>33.06</b>	<b>21.96</b>	<b>29.17</b>	16.89	<b>5.42</b>	<b>16.94</b>		<b>20.95</b>	22.60	24.75	38.12	24.40	33.94	22.56
20			19.14	30.60	30.87	16.95	<b>33.08</b>	18.05	25.91	21.50	4.32	14.51		20.51	15.24	18.15	34.05	23.76	30.09	16.49
81			38.18	55.98	<b>49.95</b>	<b>17.31</b>	<b>42.02</b>	<b>23.09</b>	<b>44.07</b>	<b>24.25</b>	<b>5.80</b>	<b>24.43</b>		23.42	24.26	26.28	<b>42.02</b>	36.36	56.60	33.06
82			<b>34.10</b>	<b>52.58</b>	<b>39.87</b>	<b>17.27</b>	<b>37.64</b>	<b>21.68</b>	<b>41.42</b>	<b>23.64</b>	<b>5.93</b>	<b>21.83</b>		25.73	23.50	22.94	48.27	25.16	38.35	20.65

\* Los datos en negrillas fueron estimados con el método de distancias inversas.

Tabla A.4. Base de datos final utilizada en el proyecto. Región Noroeste.

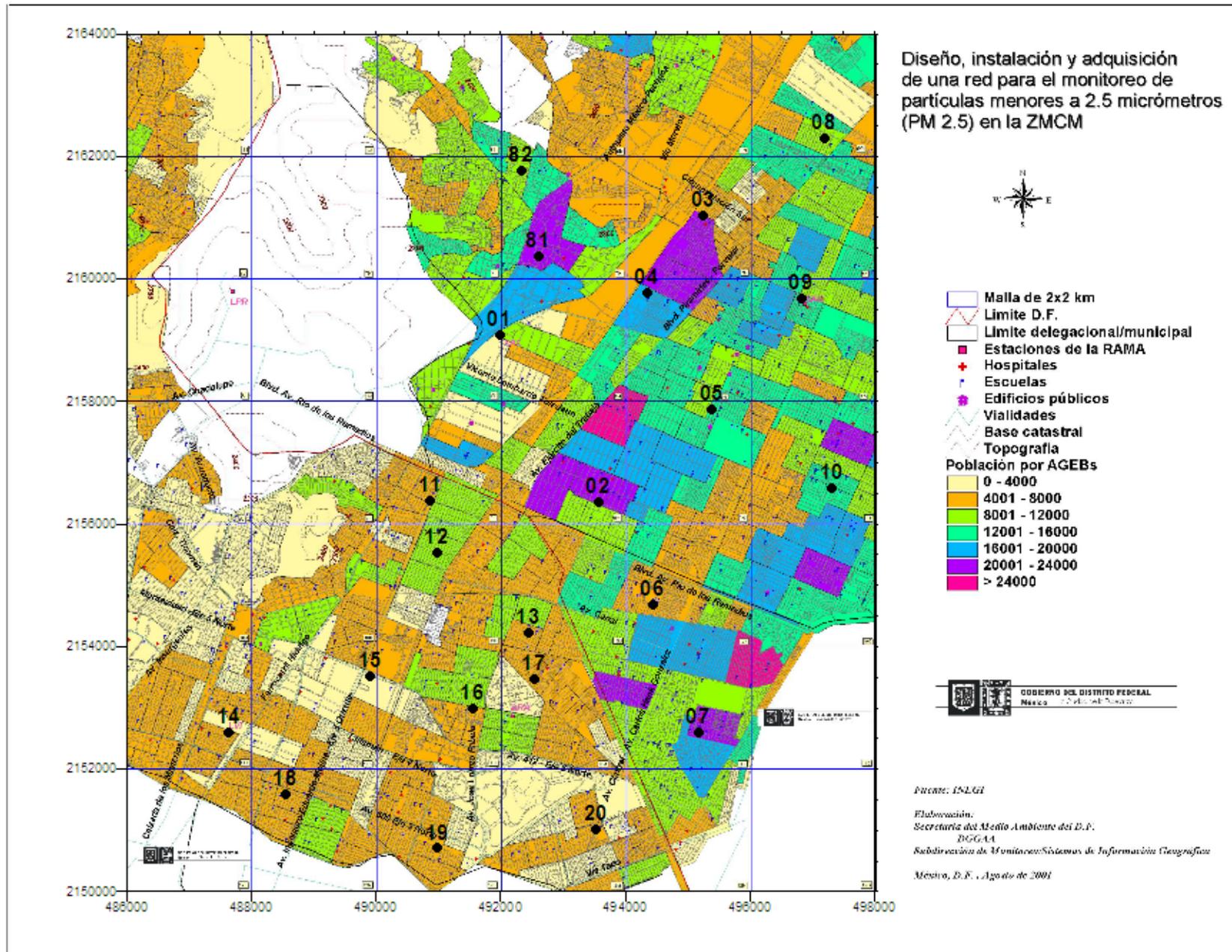
Id	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20
	01/02	04/02	07/02	10/02	06/04	09/04	12/04	15/04	18/06	21/06	24/06	27/06	17/08	20/08	23/08	26/08	31/10	03/11	06/11	09/11
21		33.28	64.90	18.93		45.07	27.65	24.53	36.19	10.69	48.54	32.13	30.02	18.35	19.32	54.89	29.95	17.63	35.52	40.51
22		44.99	<b>36.59</b>	10.66		38.94	5.59	28.00	25.13	11.66	27.83	37.08	28.94	16.78	18.35	25.88	25.70	14.73	24.26	43.30
23		38.54	51.93	21.41		36.68	44.21	30.46	27.60	6.42	6.44	43.46	25.36	28.70	13.00	29.16	30.22	16.60	21.98	36.68
24		29.18	32.47	27.50		33.48	23.07	26.78	21.49	4.17	23.26	34.22	31.96	32.31	12.79	25.76	23.65	16.75	19.09	33.60
25		26.52	27.57	15.89		33.53	21.42	27.83	19.67	4.52	12.33	31.05	28.55	21.08	15.71	24.62	26.23	17.47	16.32	31.99
26		26.40	30.51	14.99		10.60	19.13	23.33	20.15	11.01	18.53	24.23	25.58	11.36	12.17	39.43	21.58	17.39	15.72	33.28
27		28.06	23.05	23.54		34.26	19.89	29.34	22.69	9.68	18.08	21.56	31.50	22.61	12.48	29.13	21.71	19.14	22.95	30.04
28		31.19	26.07	20.24		<b>33.65</b>	21.37	30.87	21.07	15.67	21.39	26.34	27.05	20.06	22.57	27.60	27.49	18.36	19.61	36.38
29		34.52	30.61	25.61		37.59	22.99	34.91	26.01	11.74	33.12	<b>35.33</b>	28.01	18.58	21.72	20.89	29.12	15.16	25.58	50.05
30		29.61	23.73	17.69		31.15	18.97	<b>29.45</b>	22.87	14.21	10.90	23.00	27.25	22.13	17.98	11.56	25.73	11.86	21.77	33.18
31		<b>28.92</b>	<b>30.61</b>	<b>24.28</b>		<b>31.82</b>	23.92	36.08	20.74	11.69	20.97	23.75	27.04	19.77	15.87	17.51	23.28	11.11	18.83	31.73
32		25.02	27.30	20.65		24.68	23.88	29.02	20.20	6.55	17.25	20.84	22.91	19.33	15.56	15.44	18.81	10.01	17.57	29.63
33		25.13	29.68	21.37		34.08	22.23	31.09	15.84	7.60	16.00	22.01	22.12	20.36	12.00	13.46	15.25	10.03	15.15	<b>31.29</b>
34		26.76	27.89	23.96		29.88	24.36	28.19	17.31	8.04	17.36	19.40	24.98	17.95	13.05	16.55	14.07	11.90	16.93	28.26
35		29.91	27.32	23.64		32.39	25.77	29.50	15.77	<b>7.89</b>	18.08	22.18	24.31	16.95	15.79	18.27	<b>19.83</b>	11.96	17.48	28.67
36		<b>29.10</b>	28.54	21.20		30.88	23.43	28.74	17.31	<b>7.57</b>	17.46	19.25	22.54	23.56	15.23	17.67	19.97	12.12	15.81	27.53
37		31.41	32.19	28.57		36.48	28.85	33.92	19.83	6.59	20.86	25.21	27.98	24.08	15.81	18.57	24.20	12.37	21.73	34.47
38		27.17	28.85	23.22		27.02	24.97	28.46	19.31	5.86	17.60	<b>26.25</b>	22.85	16.03	12.55	16.18	19.85	10.25	<b>22.51</b>	<b>34.22</b>
39		<b>30.03</b>	28.68	24.64		30.79	25.76	28.39	23.31	<b>8.87</b>	18.85	23.46	<b>27.01</b>	21.07	13.57	17.41	23.49	12.07	18.27	29.36
40		<b>29.57</b>	<b>30.58</b>	27.75		<b>31.64</b>	<b>24.70</b>	35.60	23.41	6.19	21.17	28.12	28.29	<b>20.68</b>	17.05	12.75	<b>20.68</b>	<b>12.46</b>	26.48	35.49

\* Los datos en negrilla fueron estimados con el método de distancias inversas.

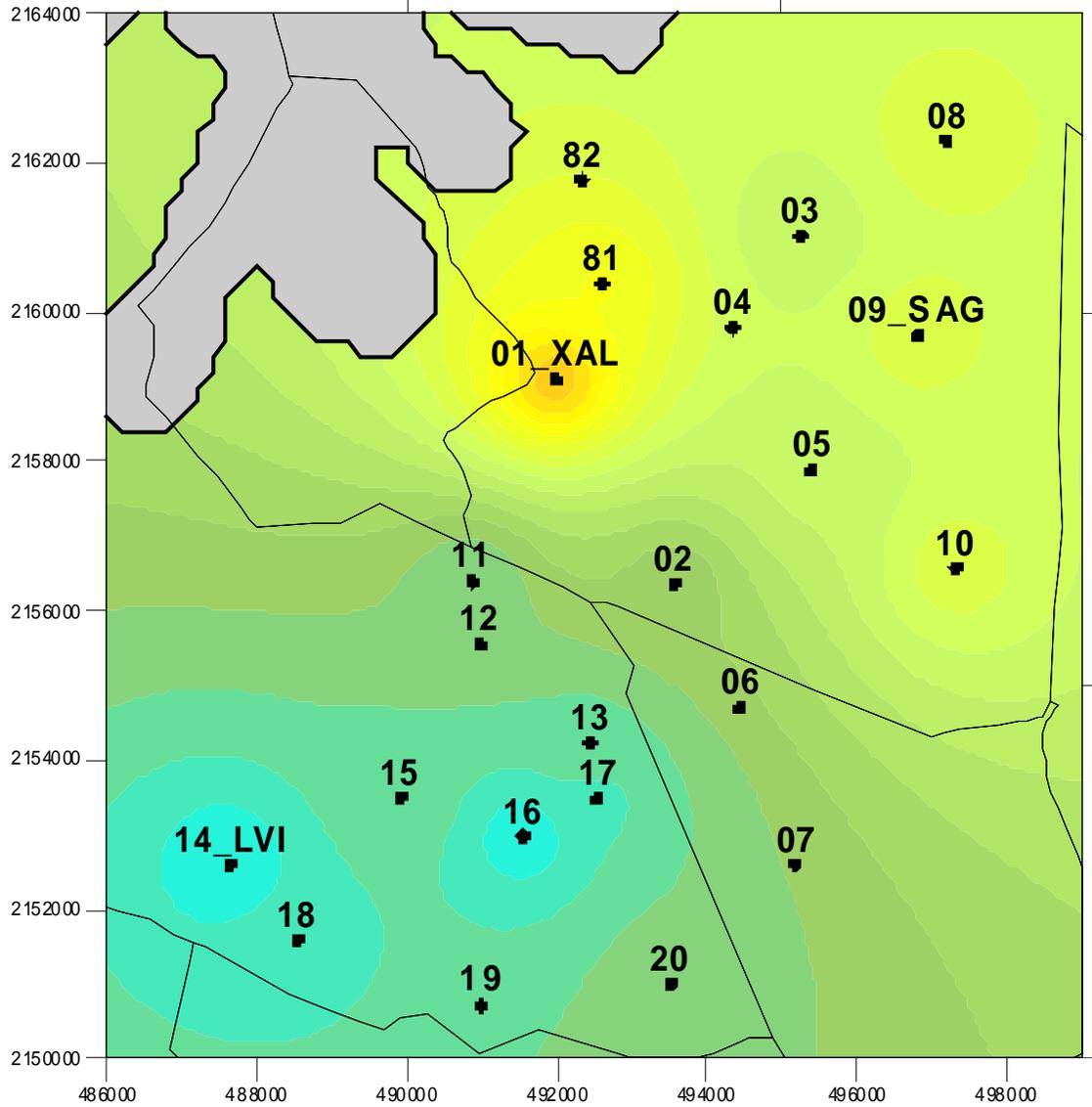
## **Anexo B**

### **Mapas de distribución espacial**

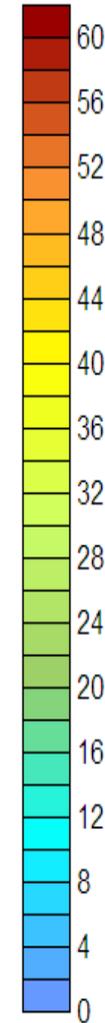
# AREA DE ESTUDIO (REGIÓN NORESTE)



# Fecha de muestreo: 23/01/02

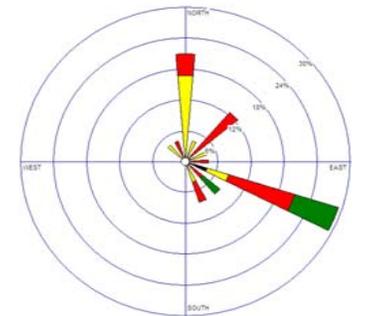


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

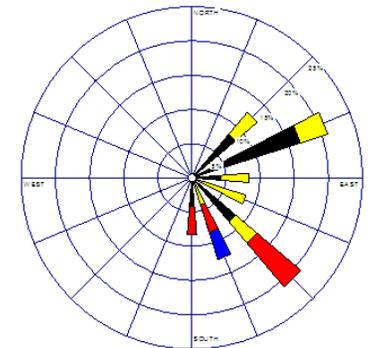


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



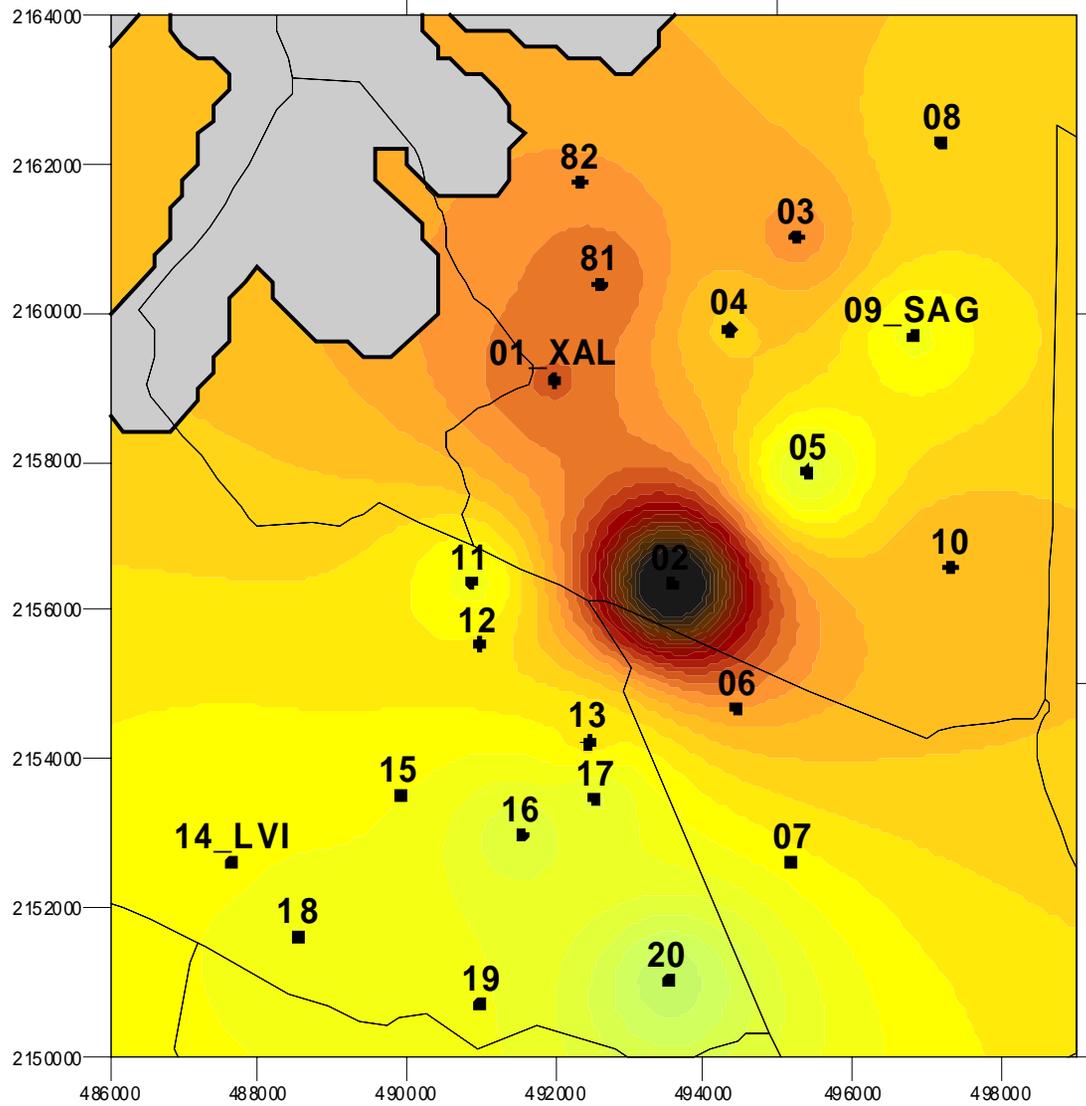
Estación HAN



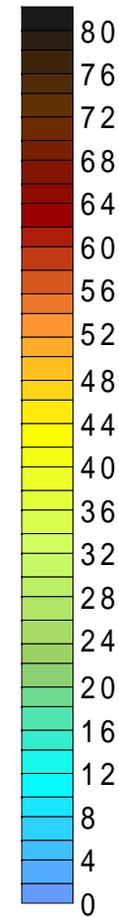
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 26/01/02

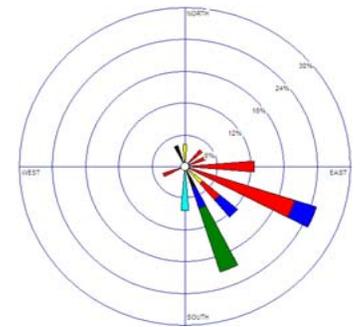


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

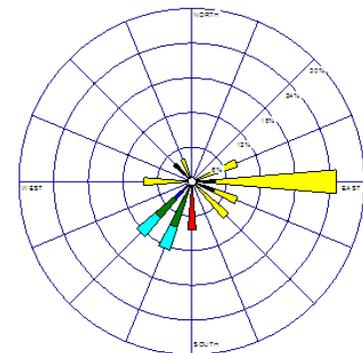


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



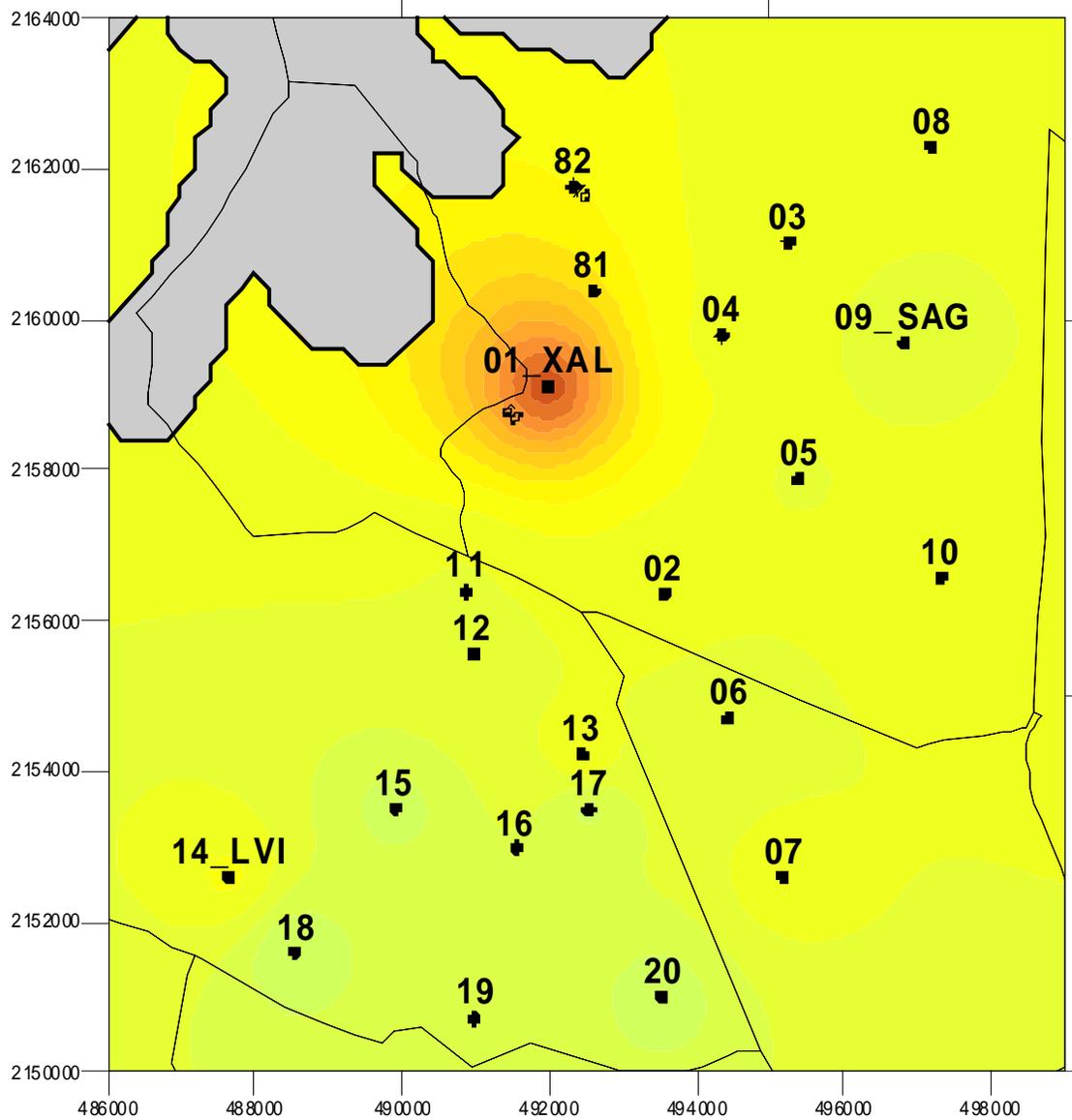
Estación SAG



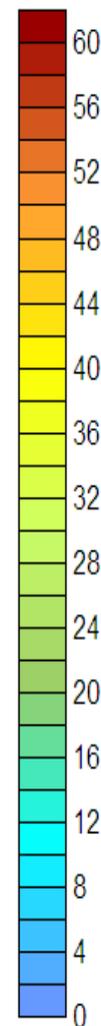
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 19/03/02

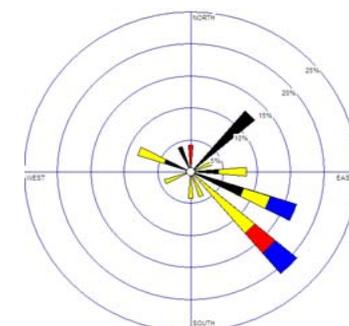


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

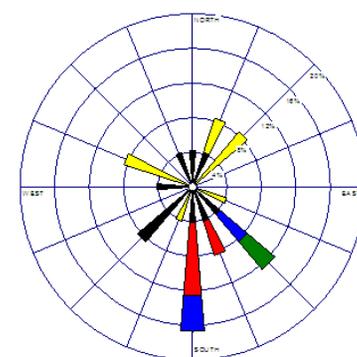


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



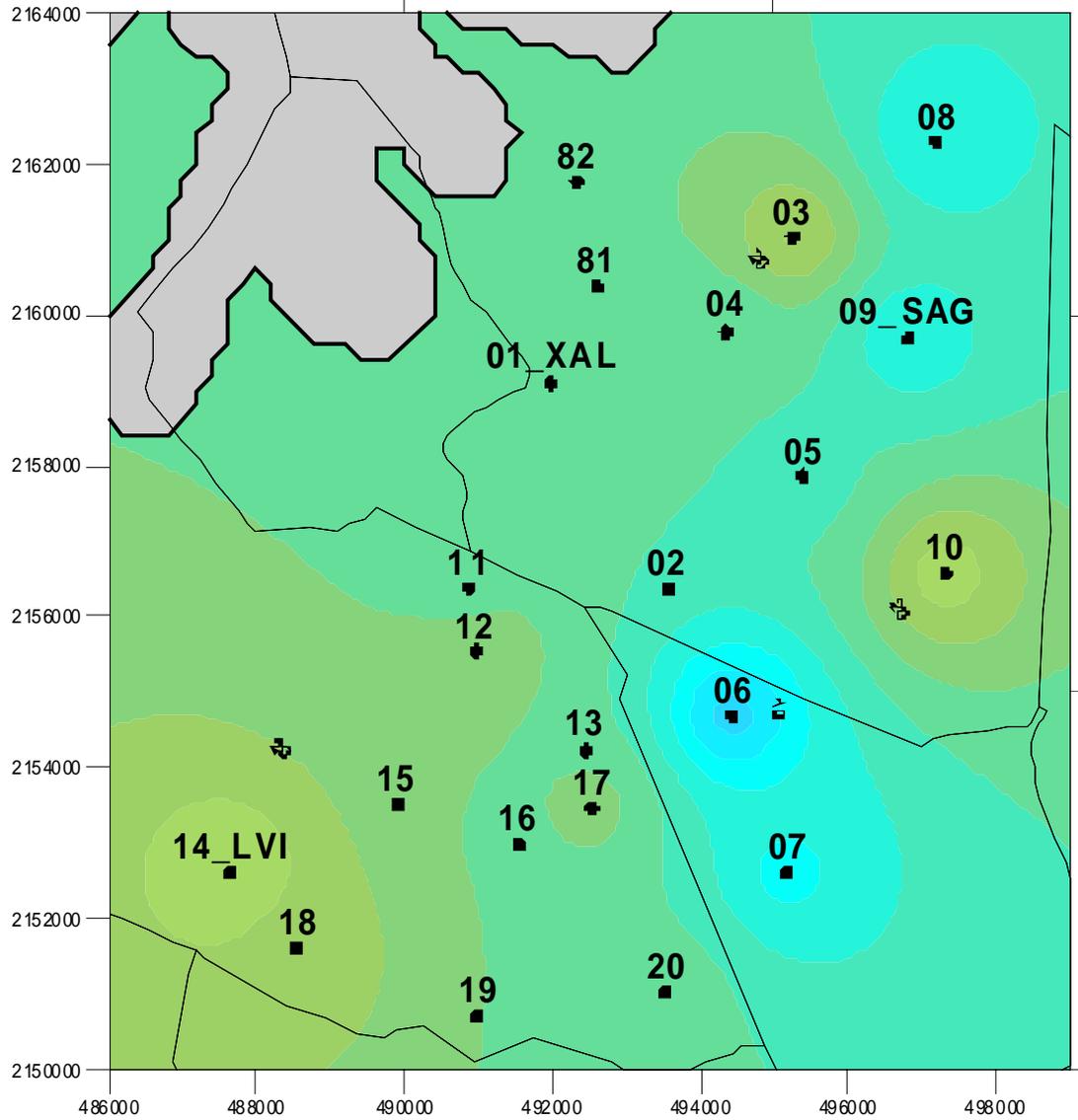
Estación HAN



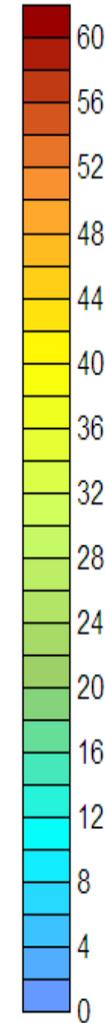
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 22/03/02

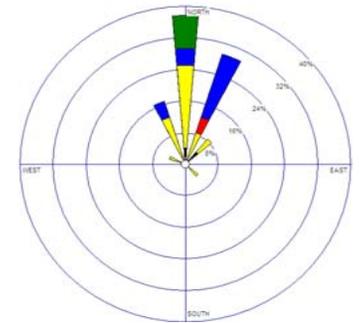


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

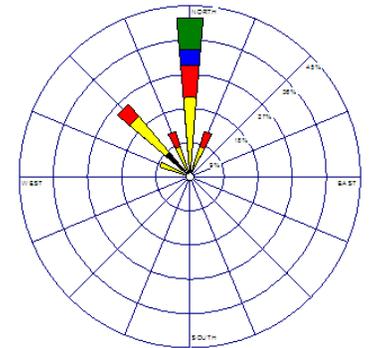


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



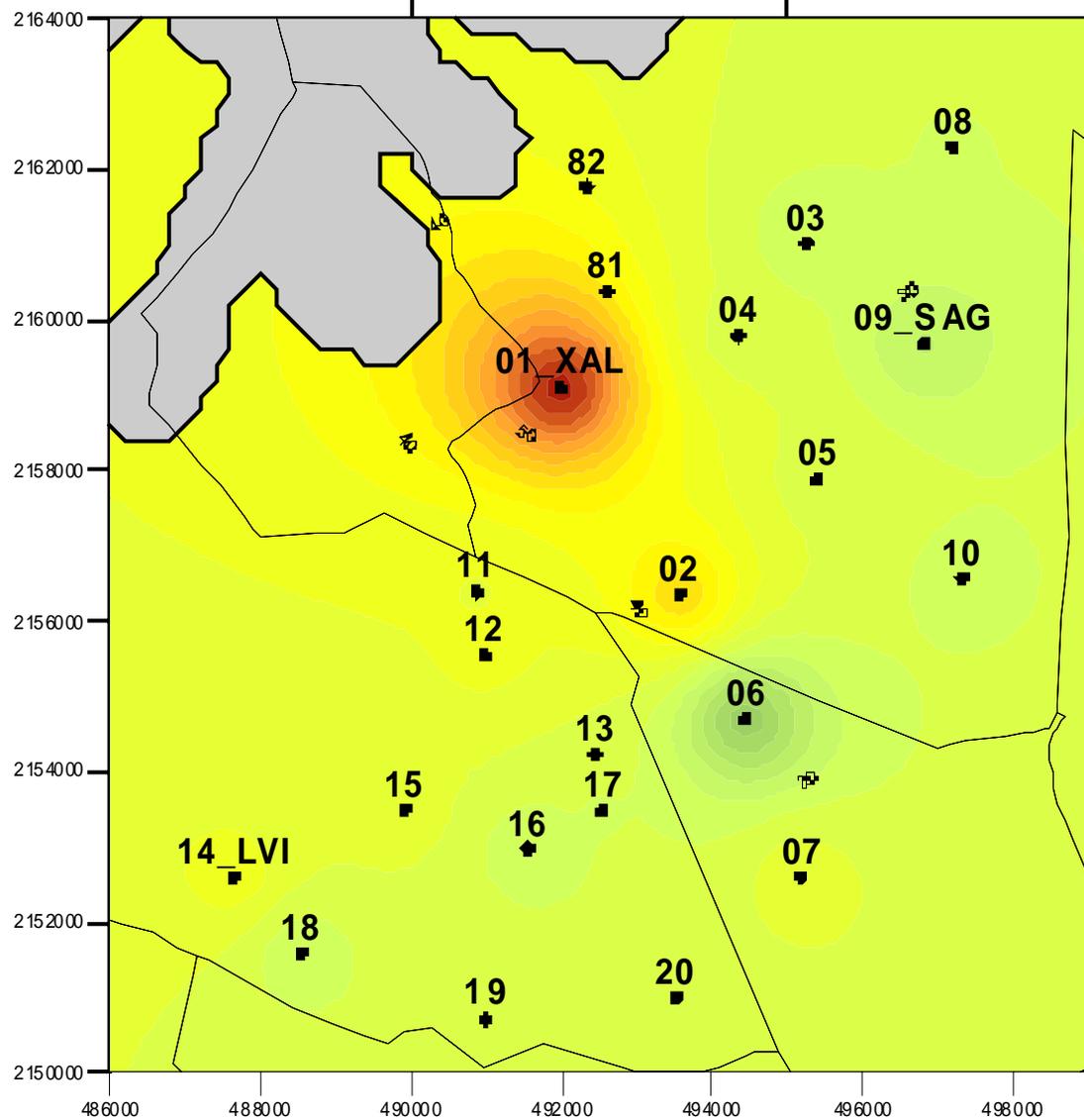
Estación HAN



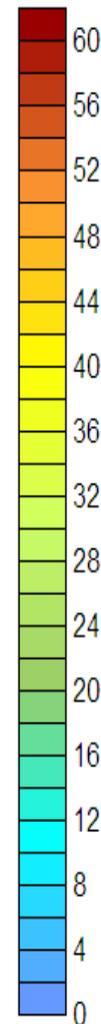
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 25/03/02

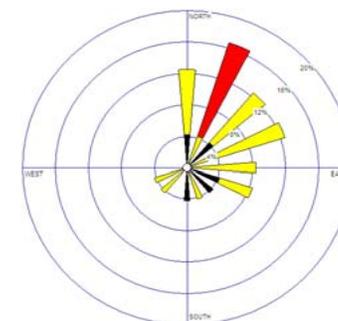


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

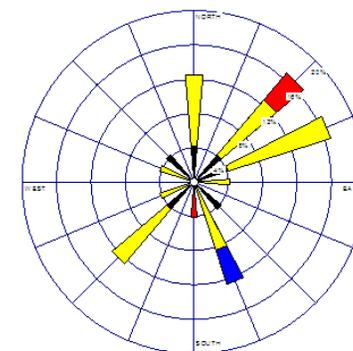


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



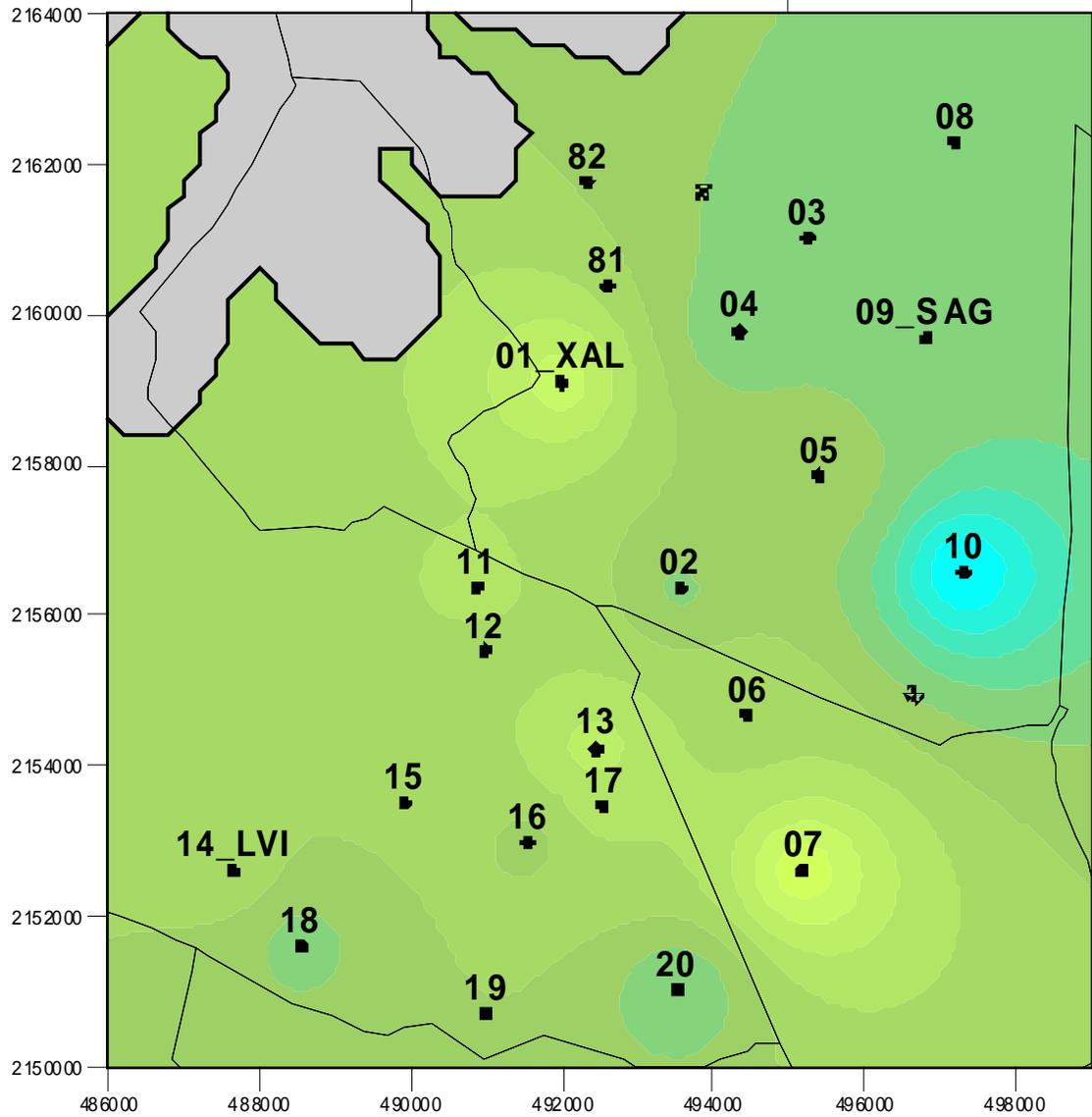
Estación HAN



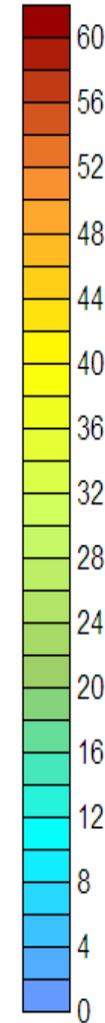
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 28/03/02

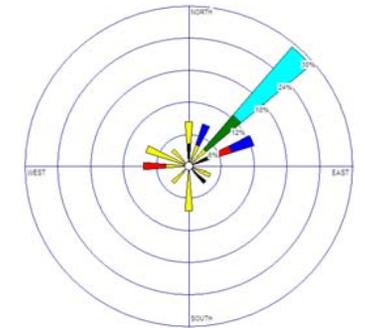


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

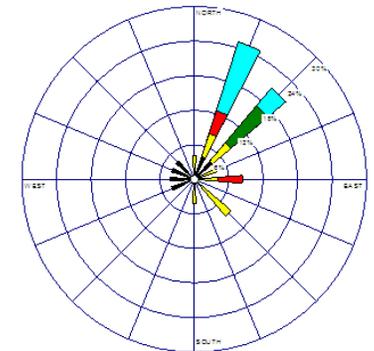


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



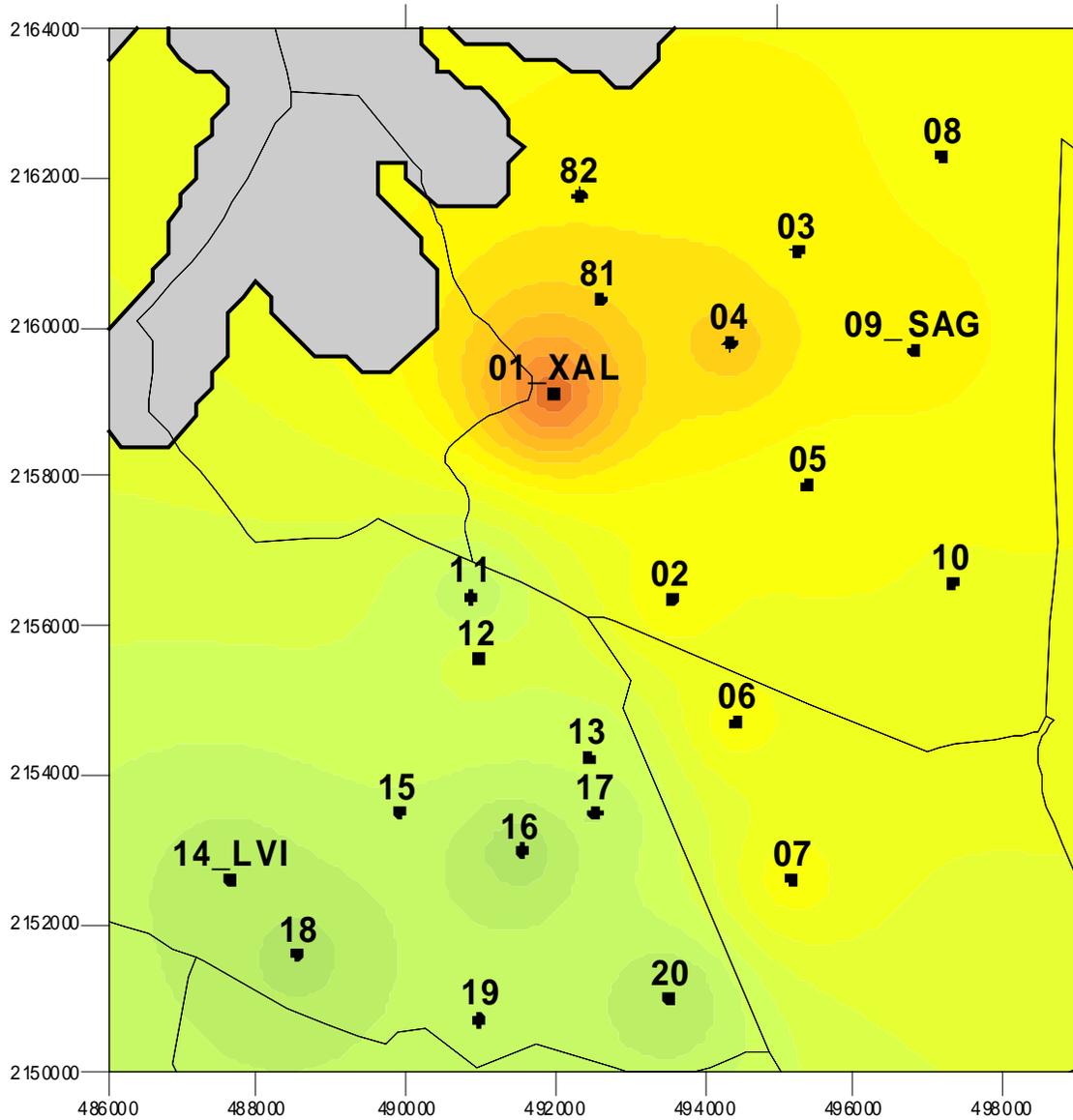
Estación HAN



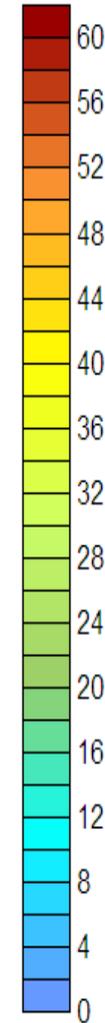
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 – 5.0
- 3.1 – 4.0
- 2.1 – 3.0
- 1.1 – 2.0
- 0.5 – 1.0

# Fecha de muestreo: 03/06/02

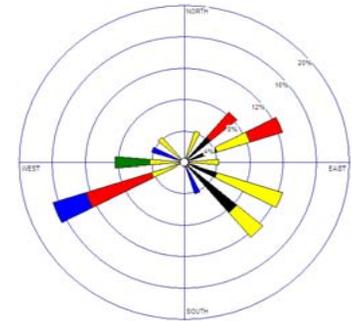


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

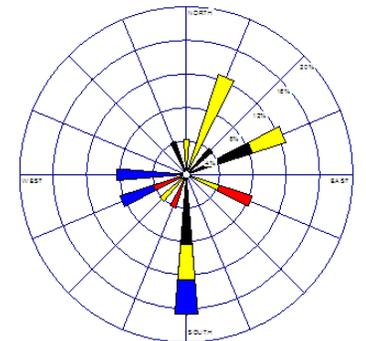


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



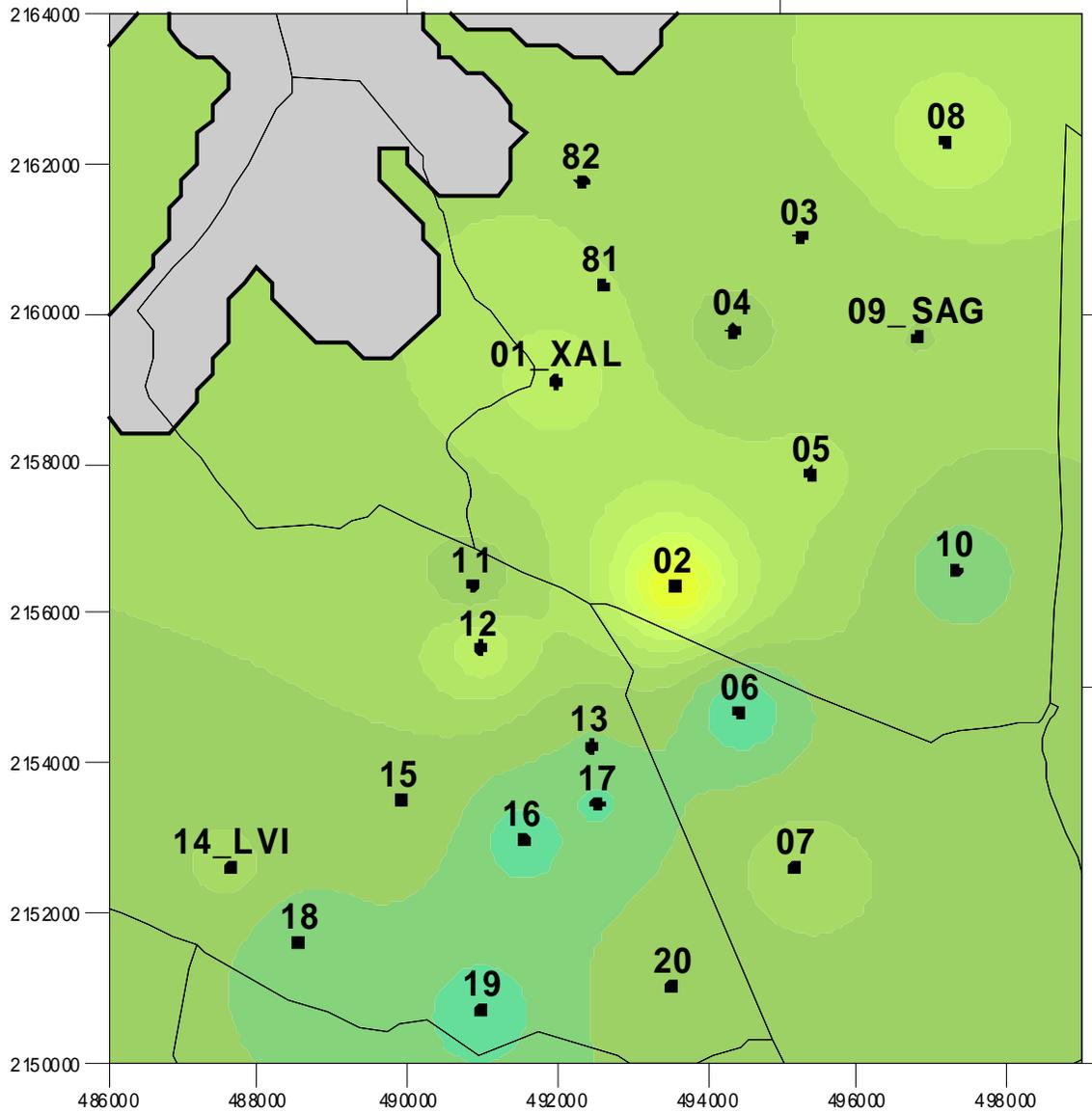
Estación HAN



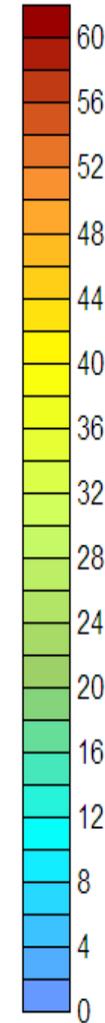
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 06/06/02

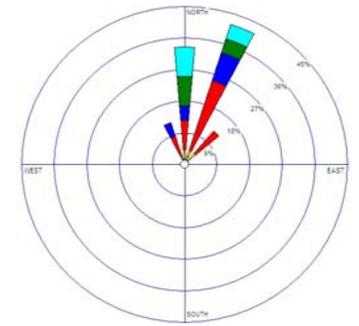


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)



- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

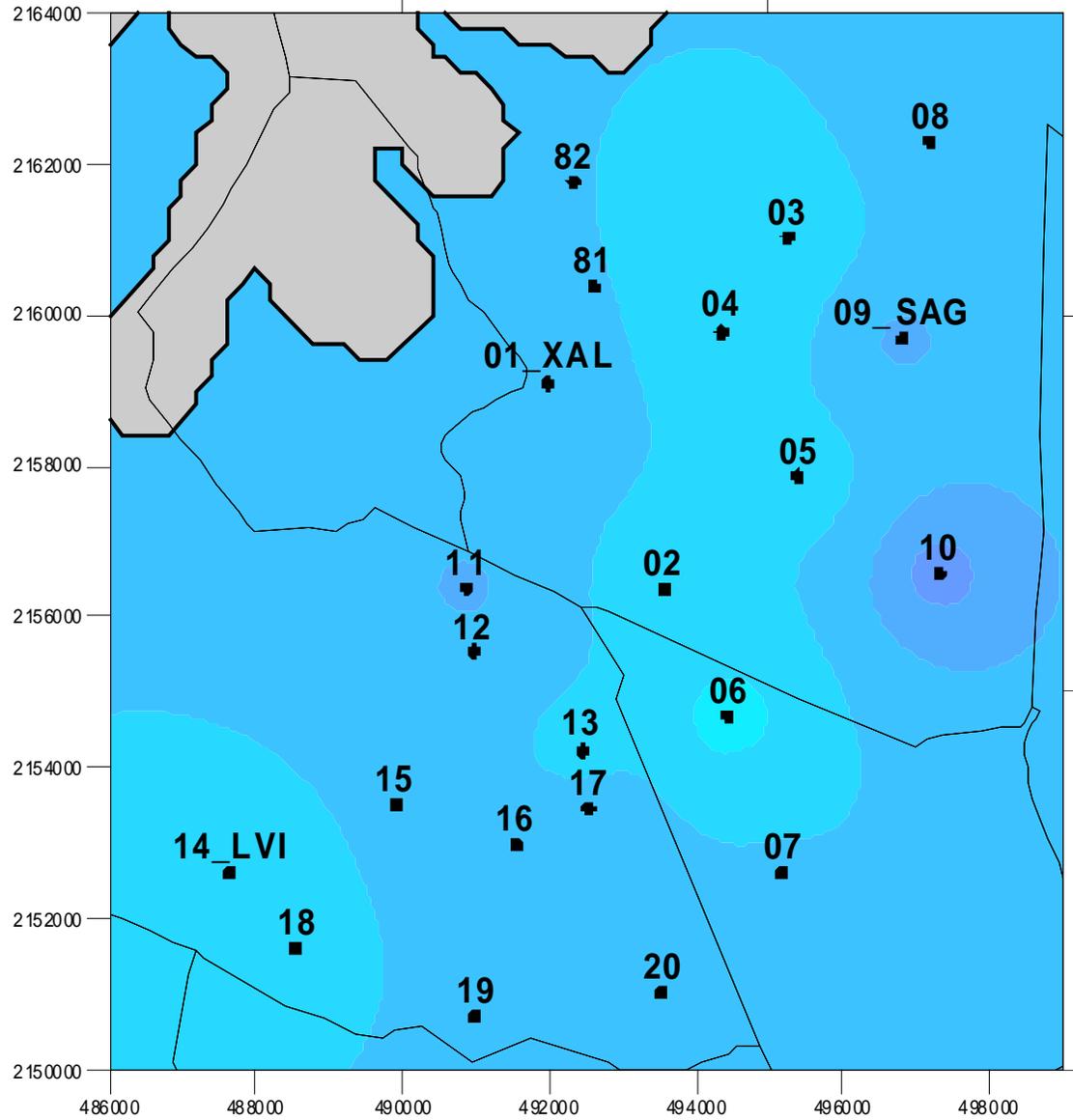
Estación XAL



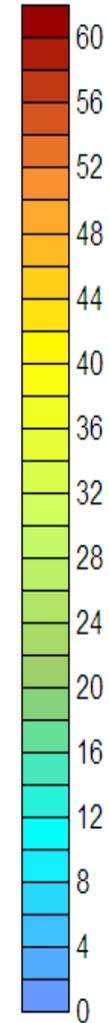
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 09/06/02

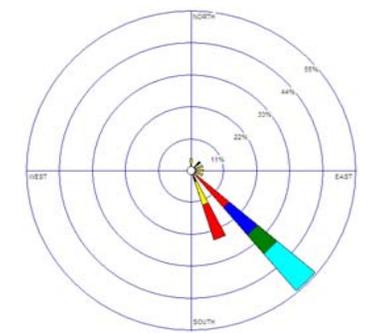


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

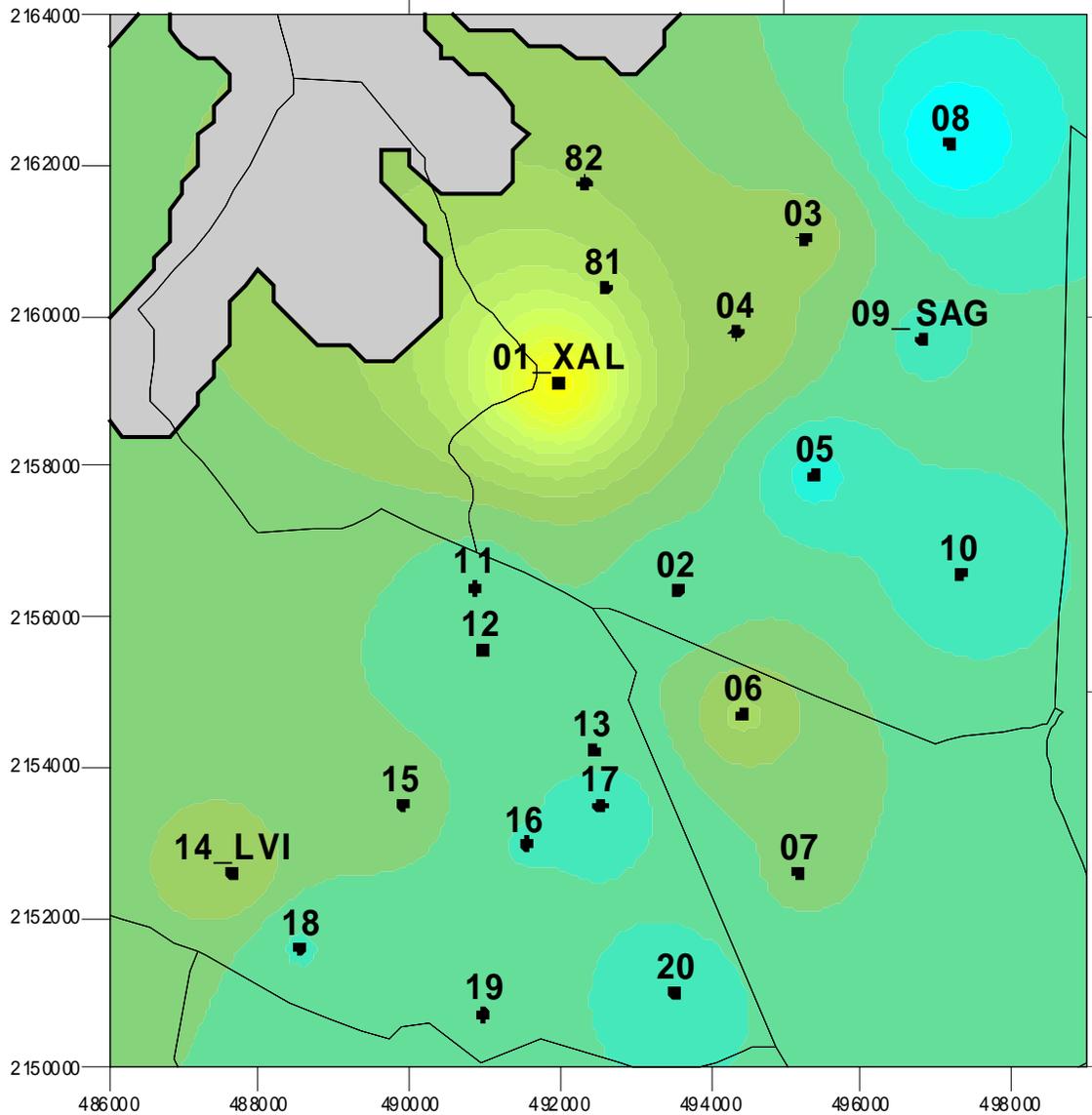
Estación XAL



Velocidad de viento  
m/s

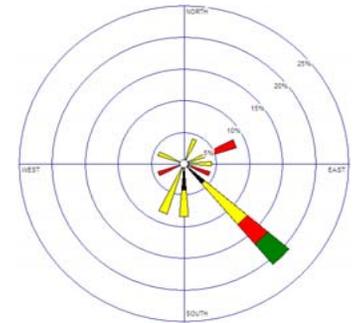
- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 12/06/02



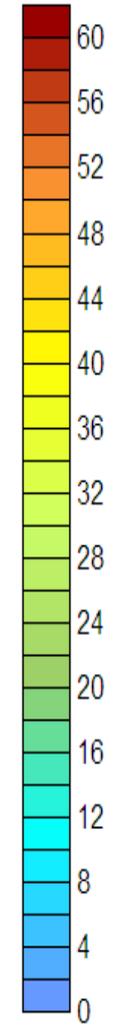
- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL

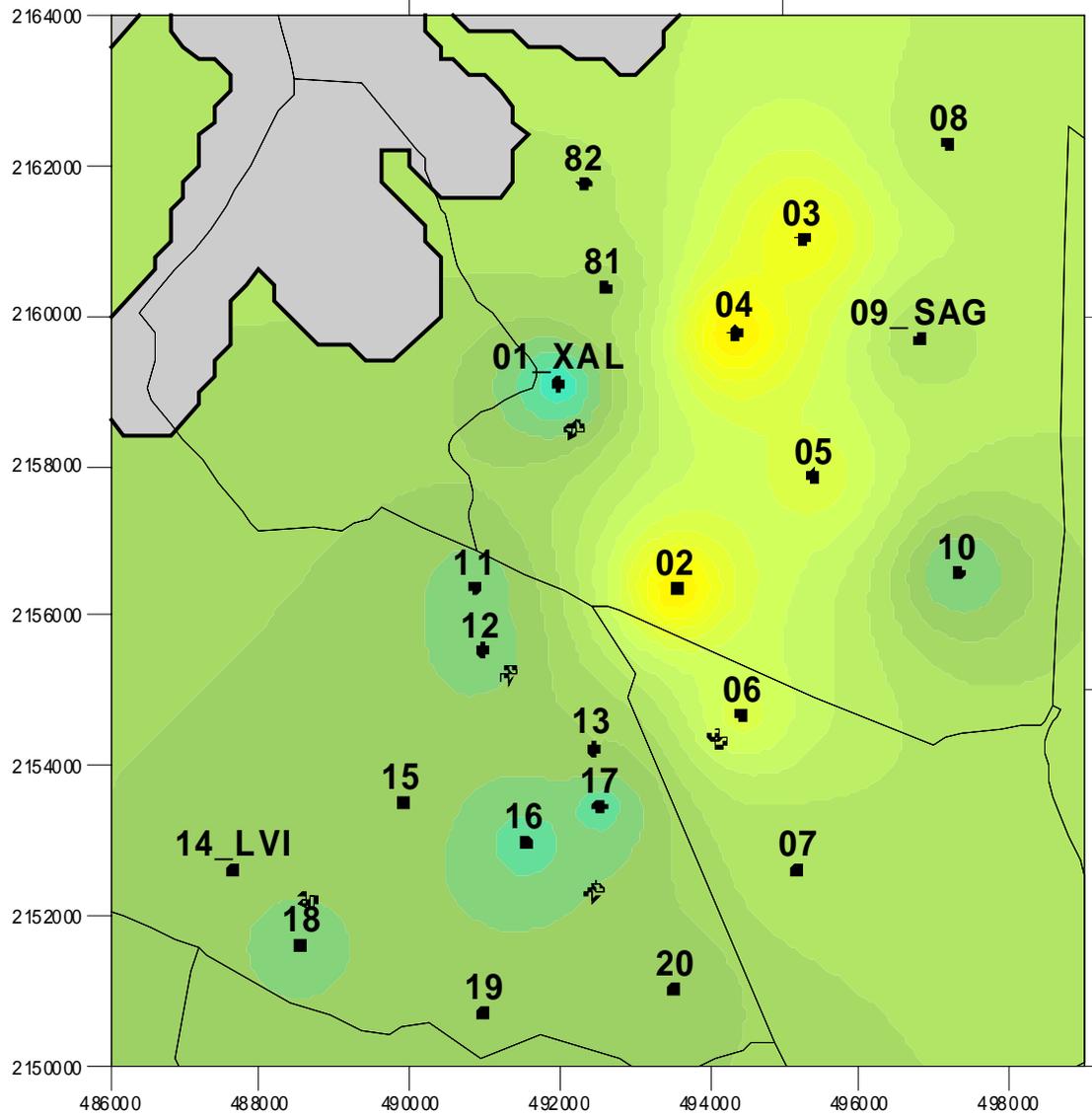


Velocidad de viento m/s

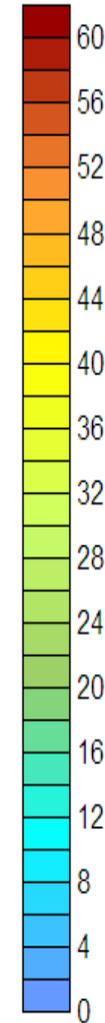
- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0



# Fecha de muestreo: 05/08/02

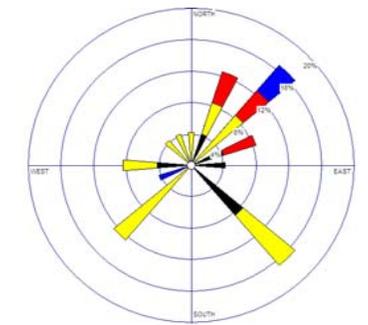


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

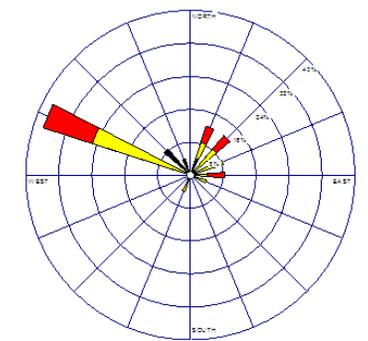


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



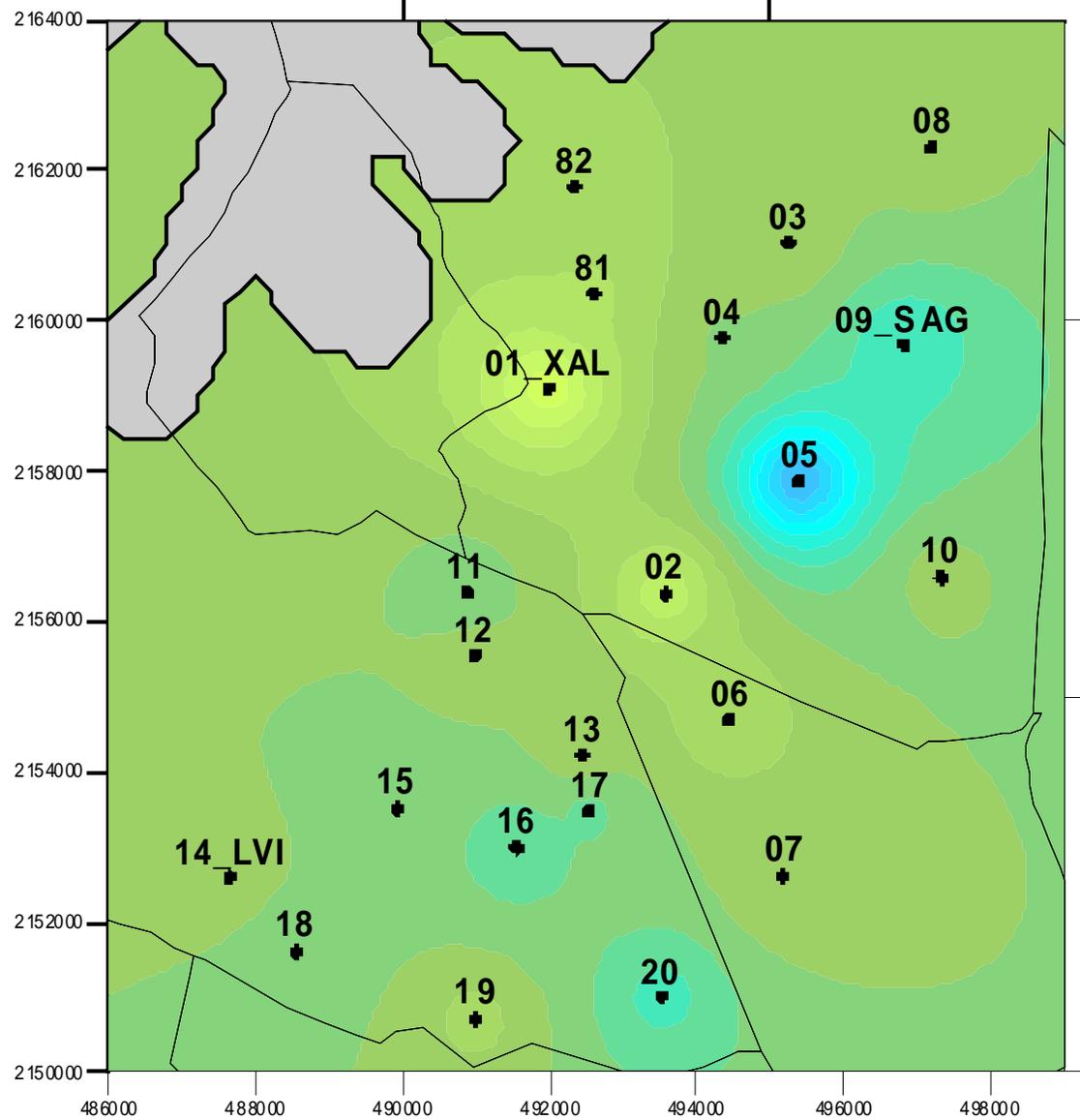
Estación HAN



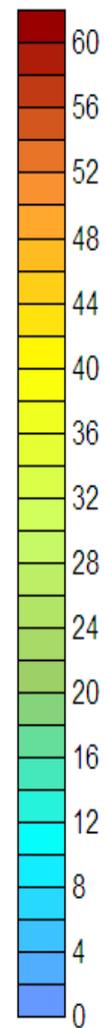
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 08/08/02

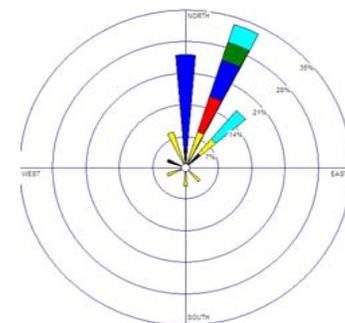


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

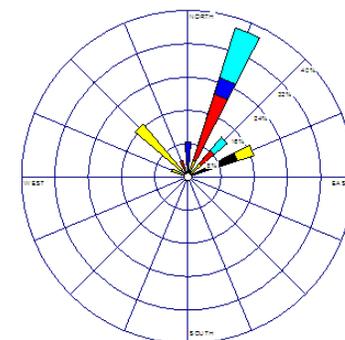


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



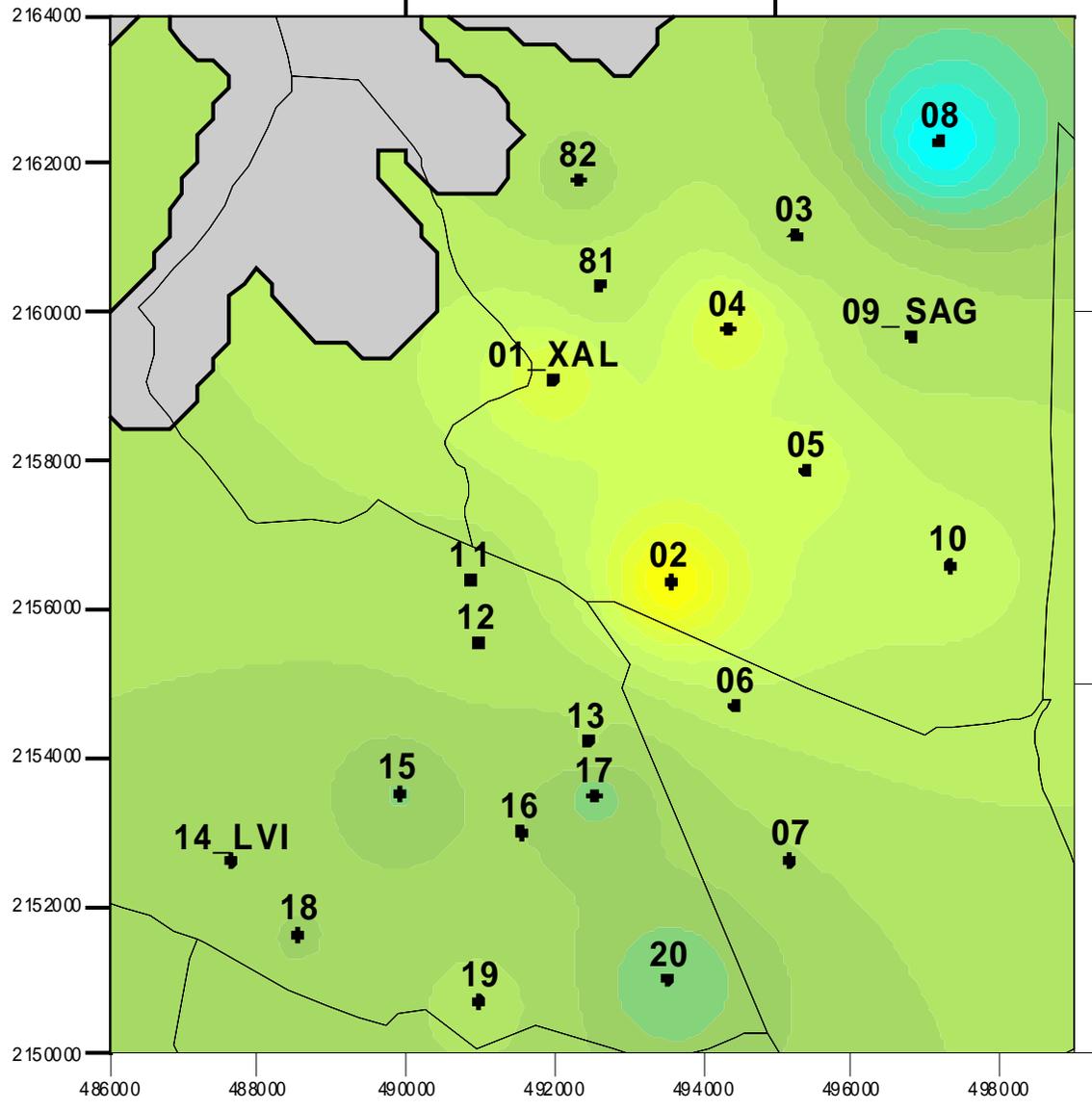
Estación HAN



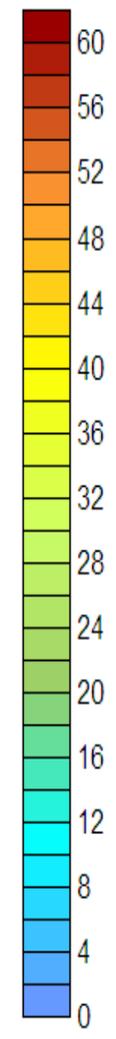
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 11/08/02

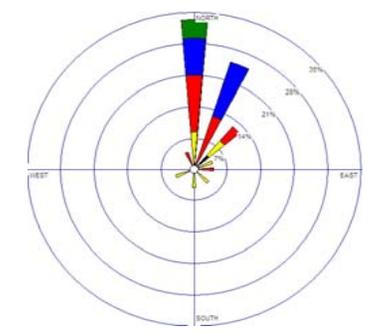


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

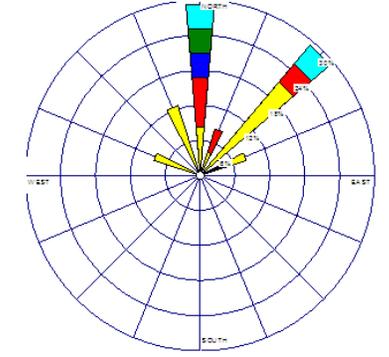


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



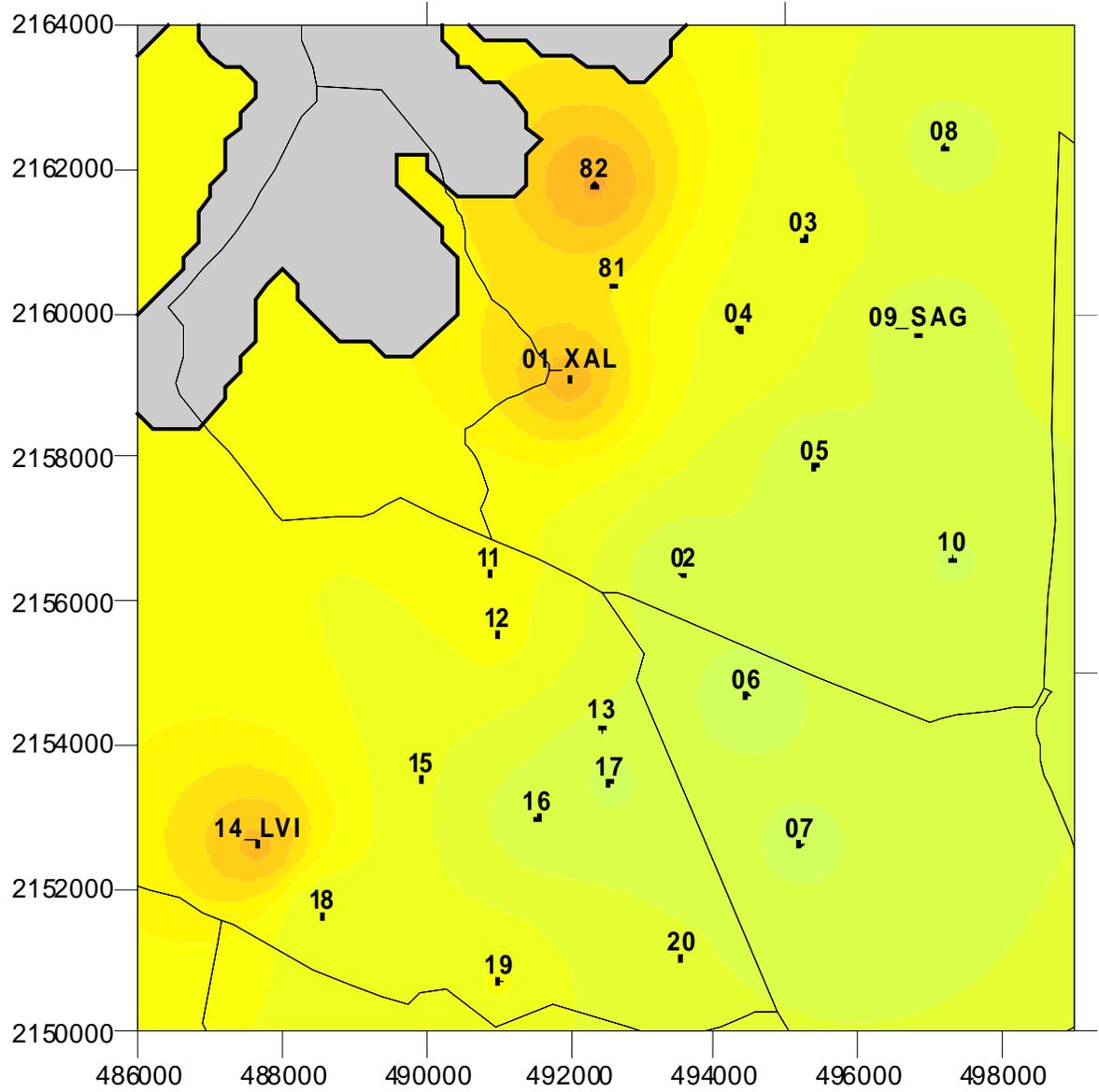
Estación HAN



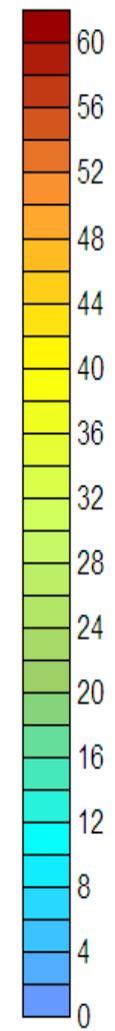
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 16/10/02

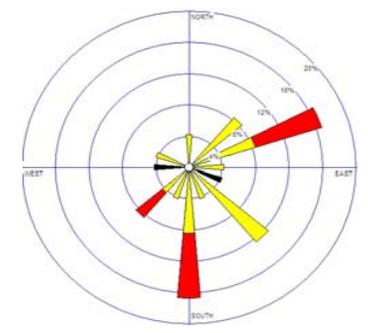


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

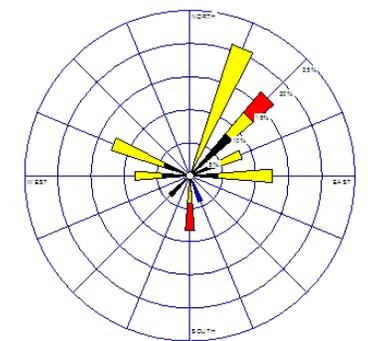


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



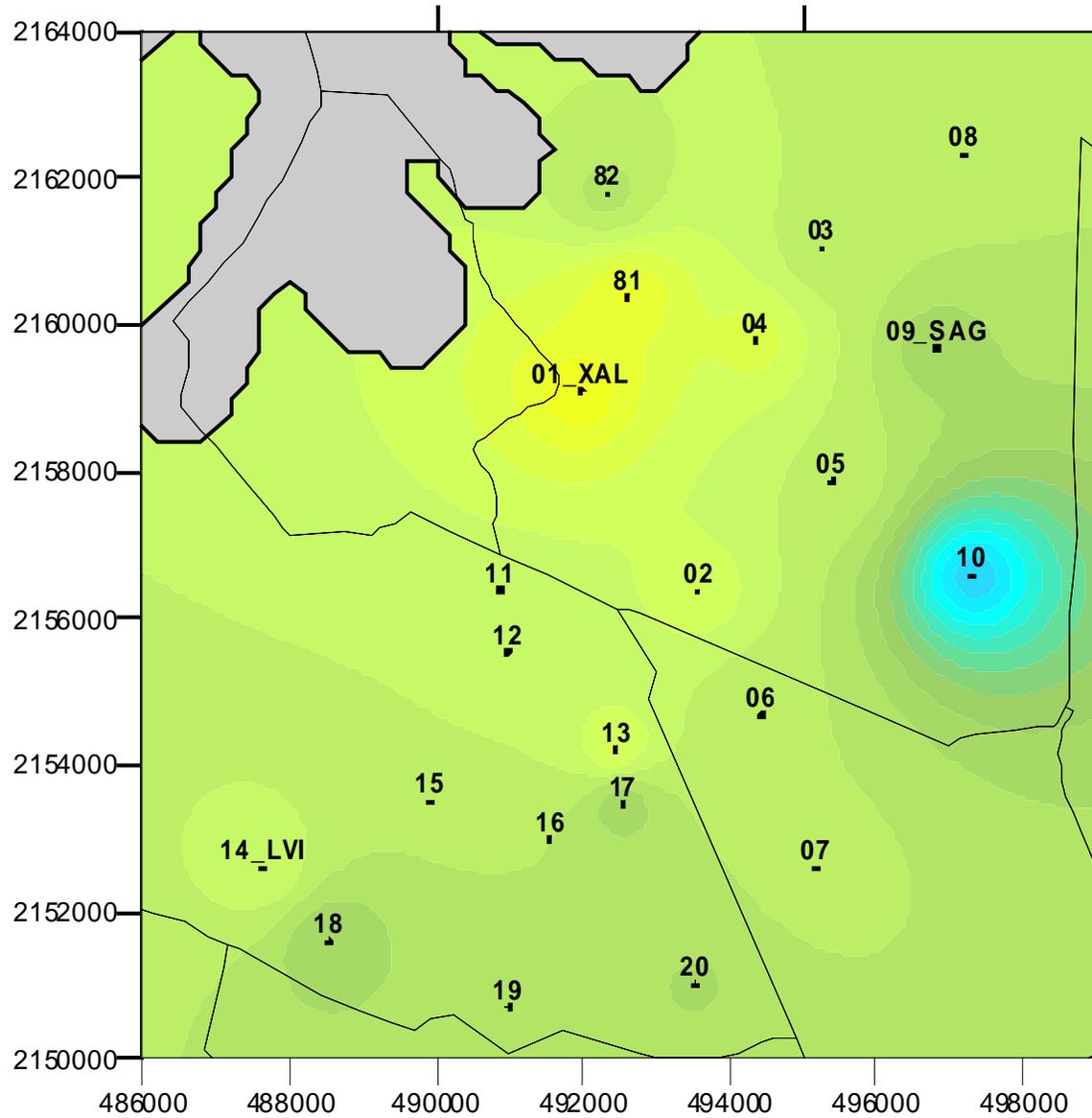
Estación HAN



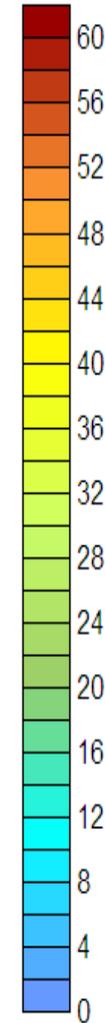
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 19/10/02

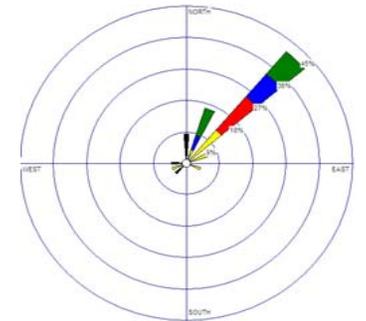


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

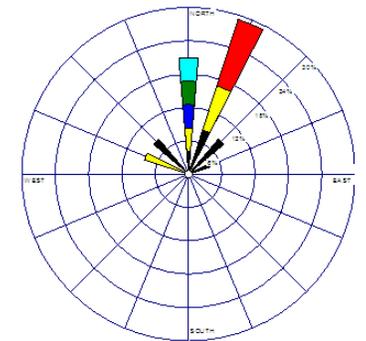


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



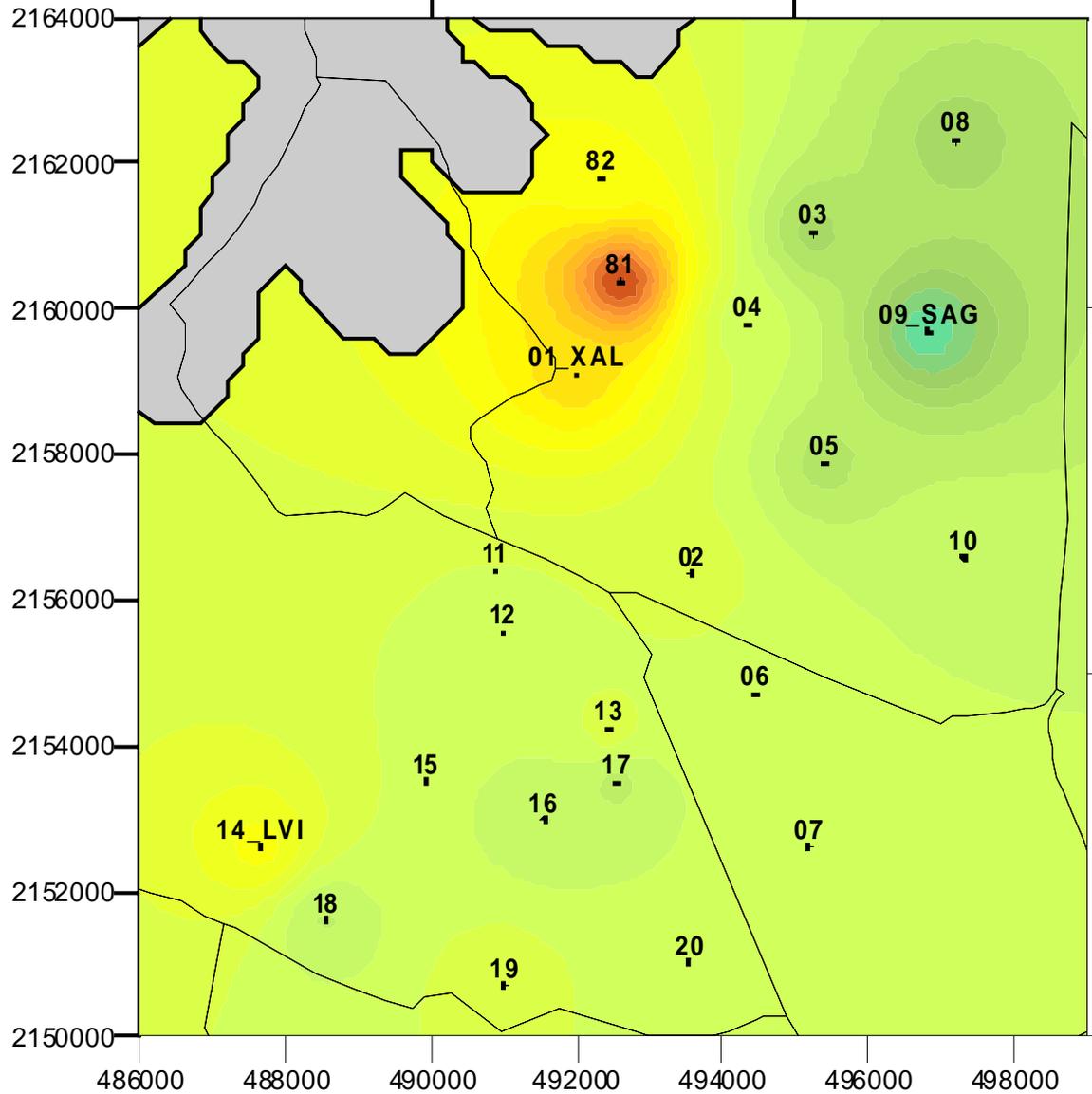
Estación HAN



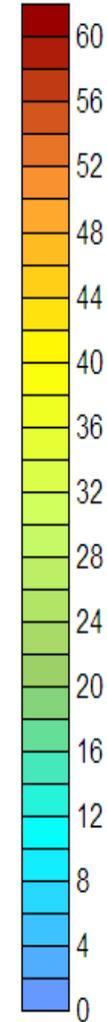
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 22/10/02

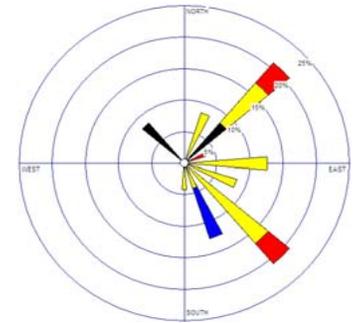


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

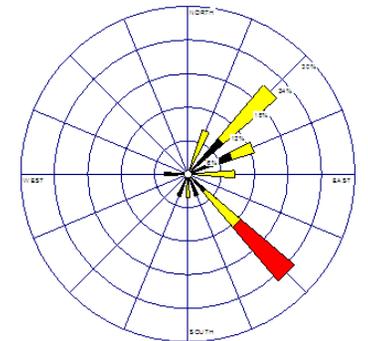


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



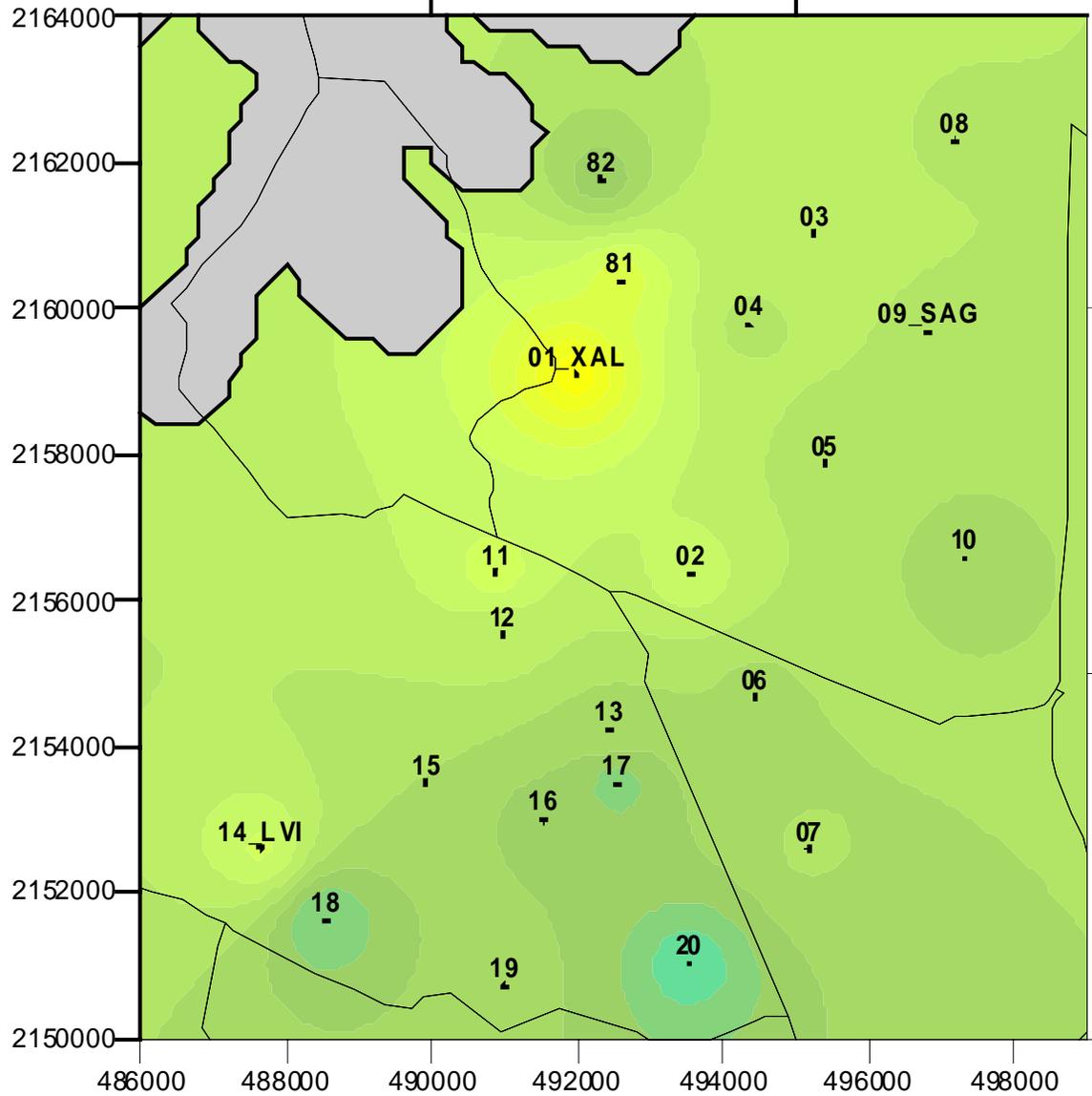
Estación HAN



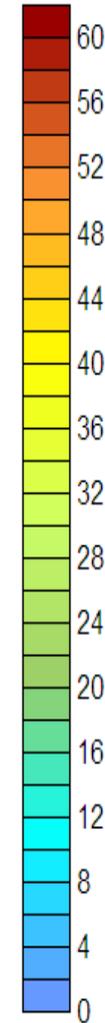
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 25/10/02

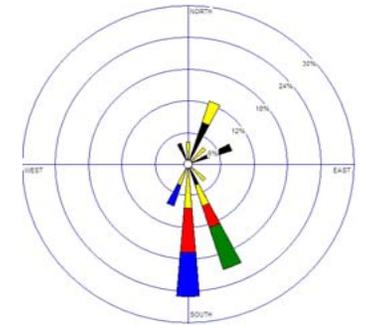


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

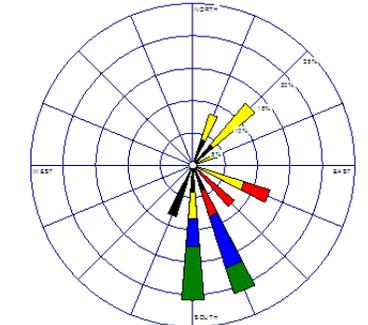


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación XAL



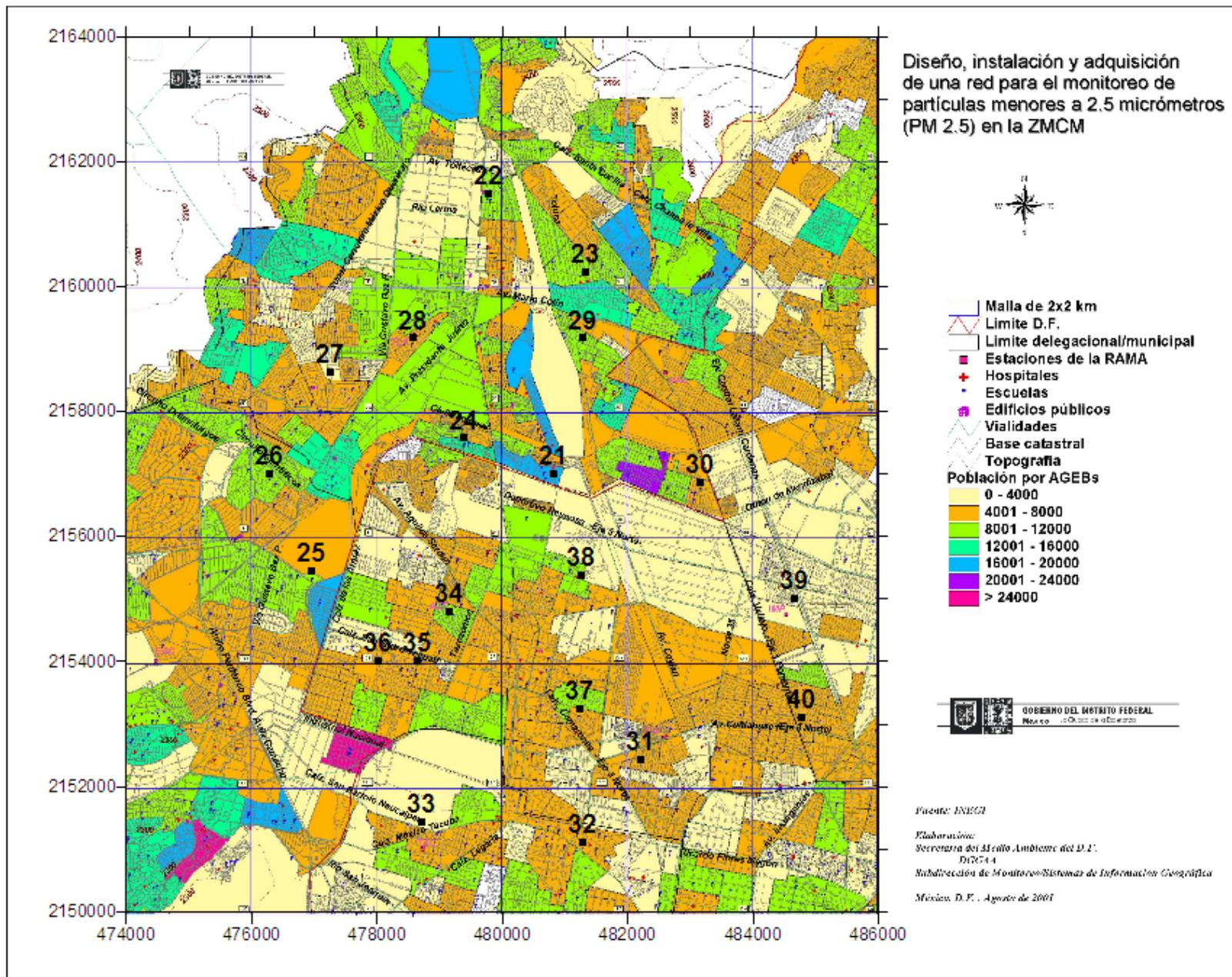
Estación HAN



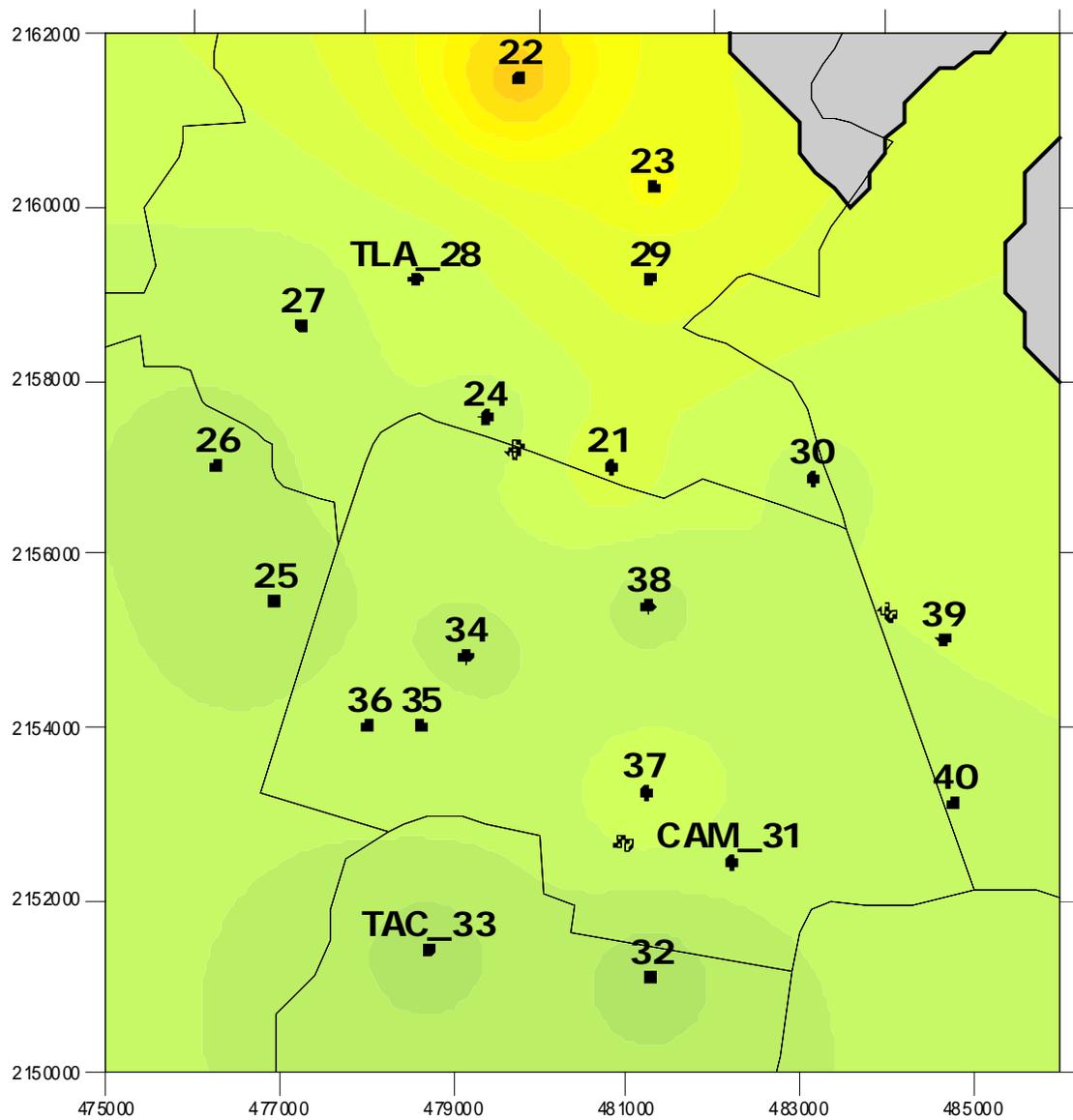
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

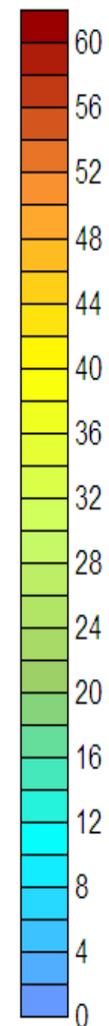
# AREA DE ESTUDIO (REGIÓN NOROESTE)



Fecha de muestreo: 04/02/02

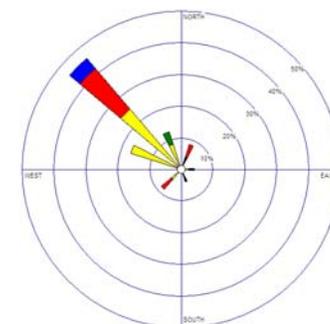


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

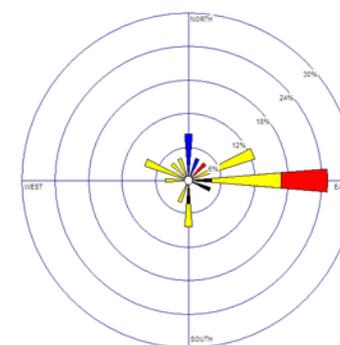


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



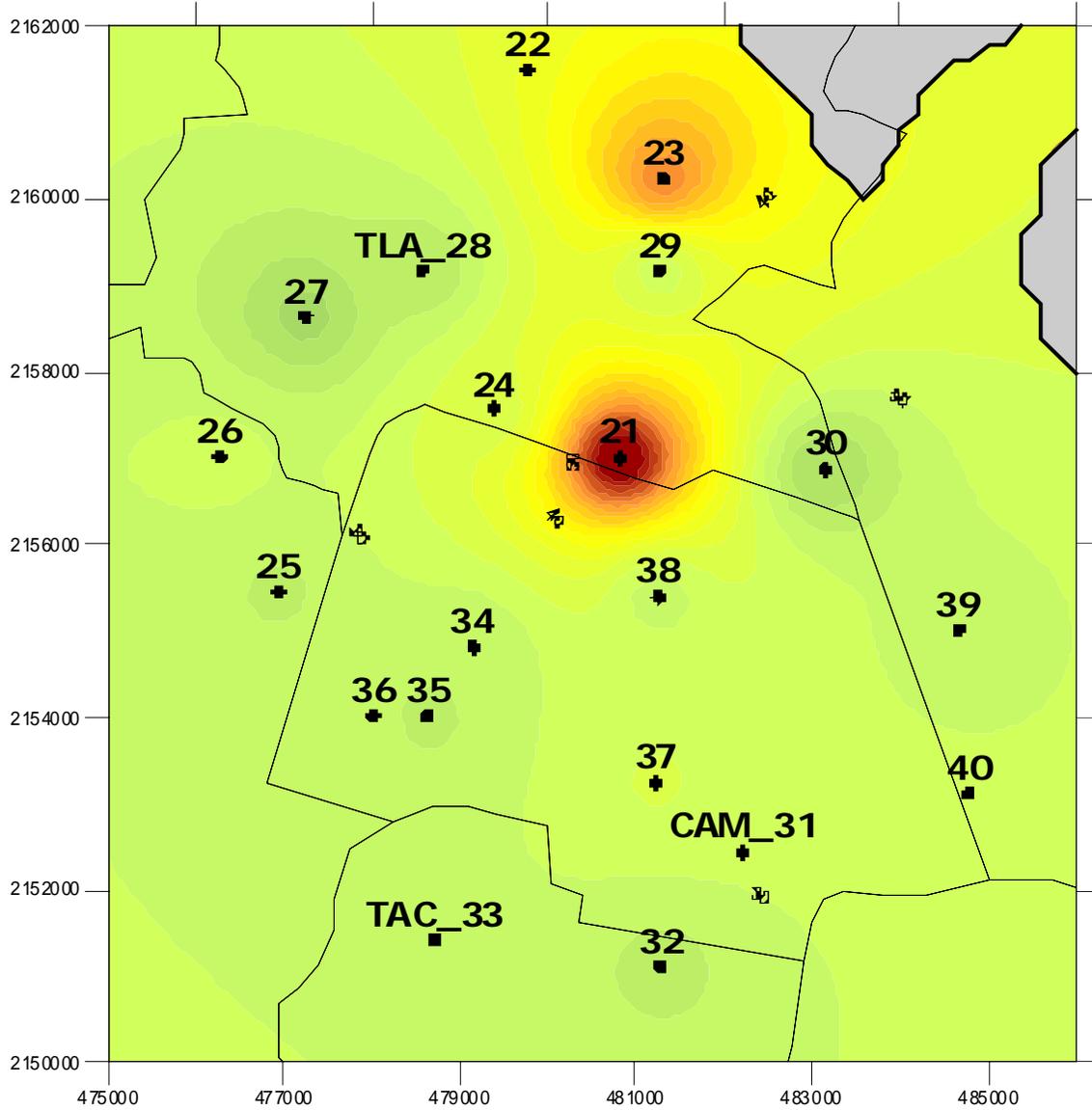
Estación TAC



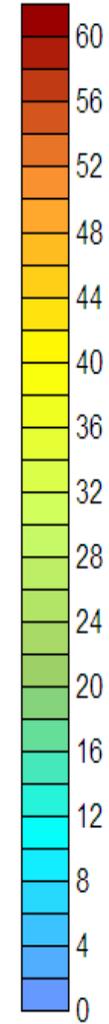
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 07/02/02

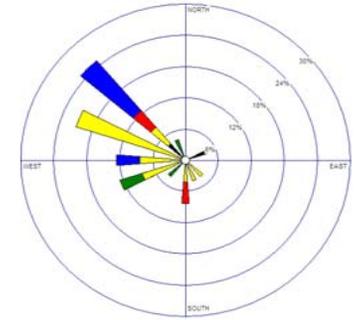


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

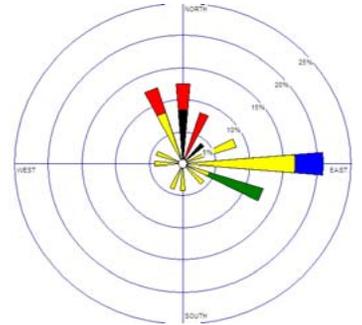


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



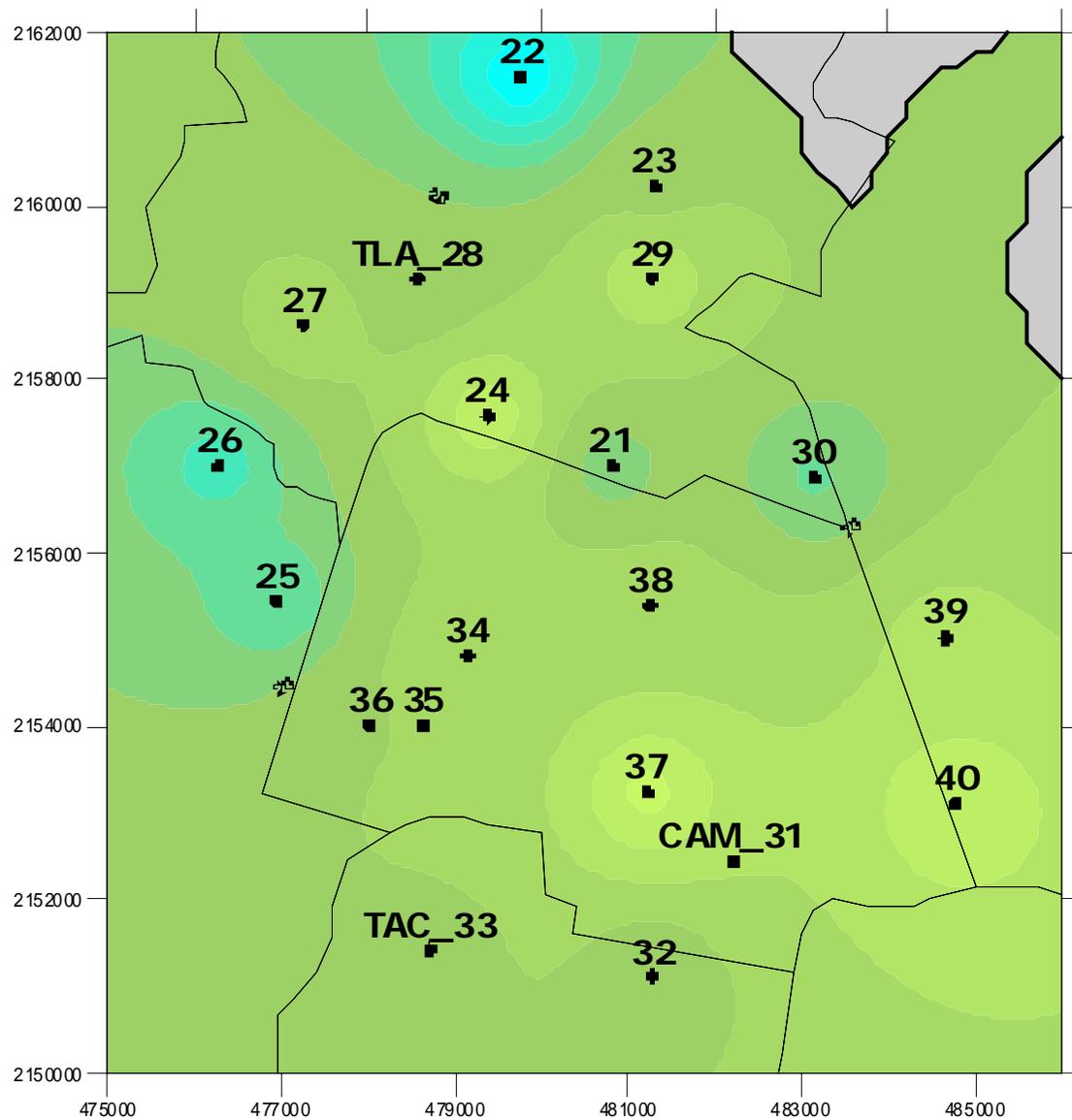
Estación TAC



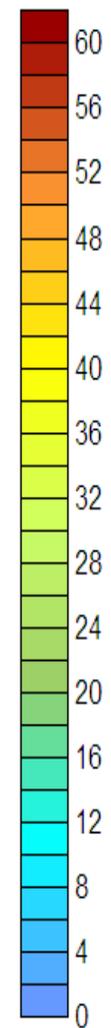
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 10/02/02

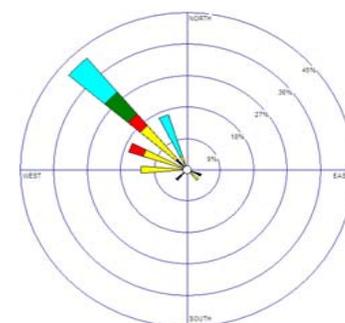


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

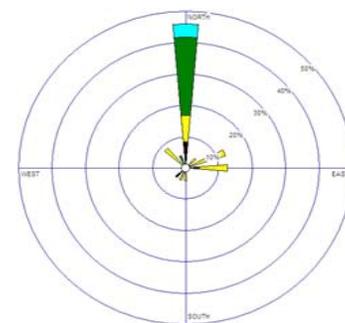


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



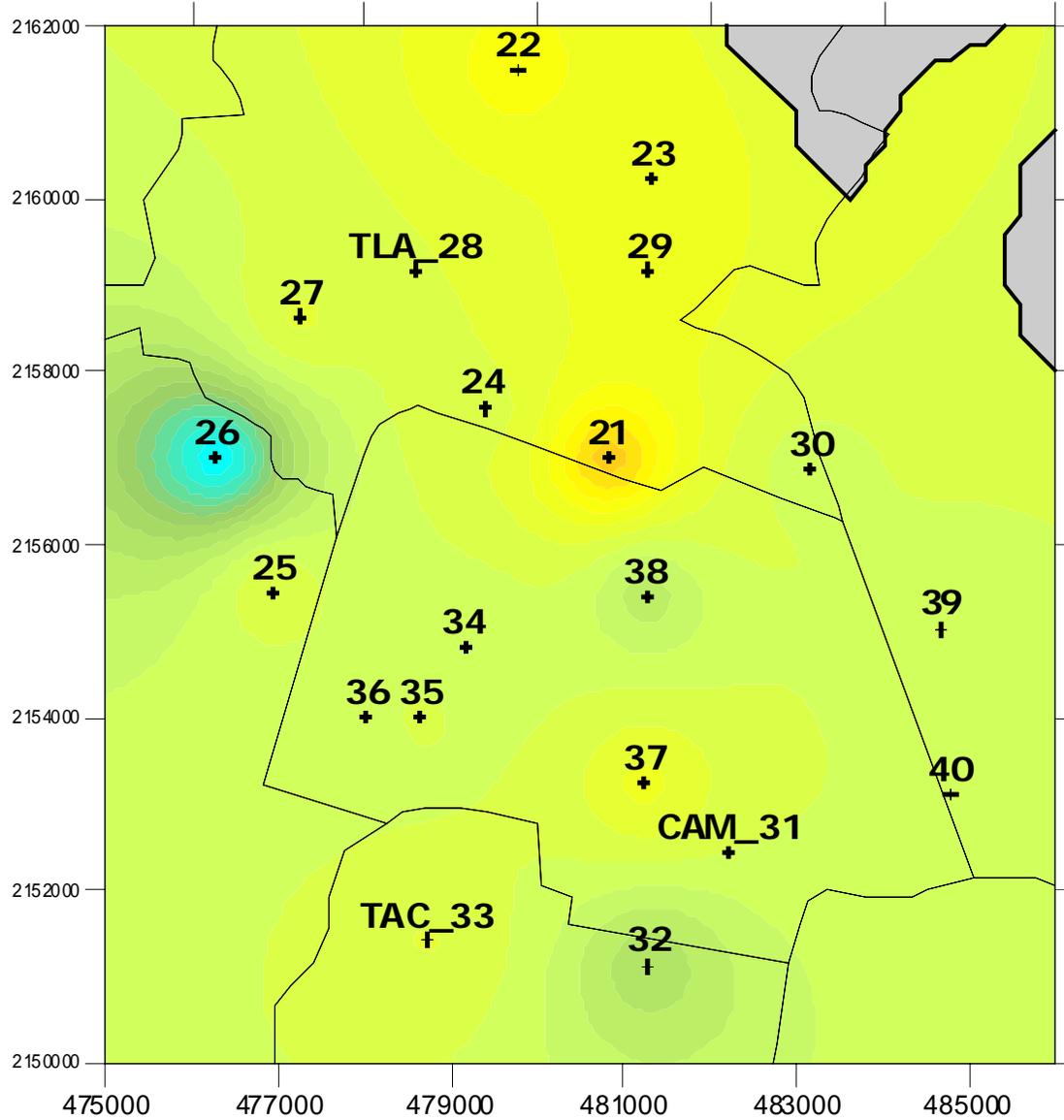
Estación TAC



Velocidad de viento  
m/s

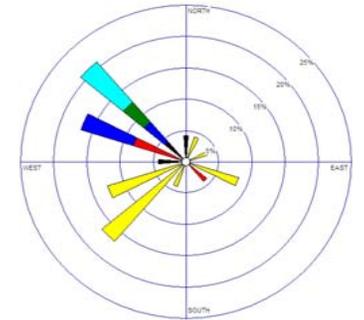
- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 09/04/02

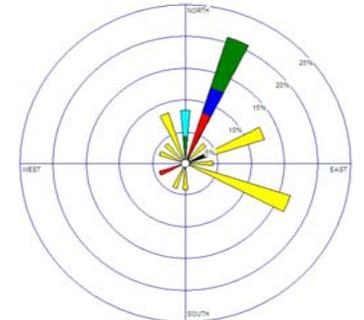


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



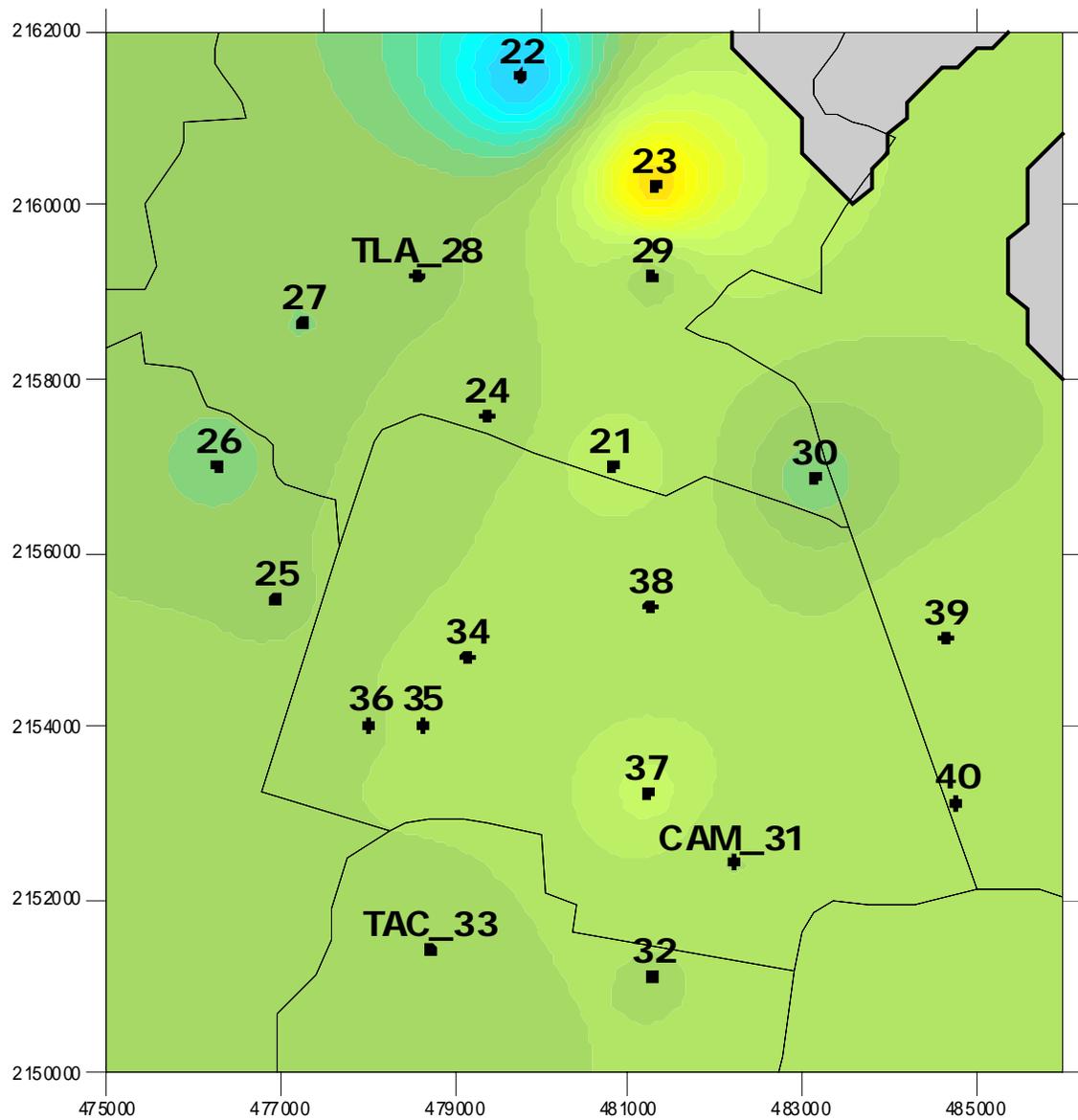
Estación TAC



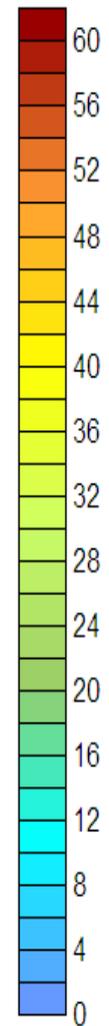
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 12/04/02

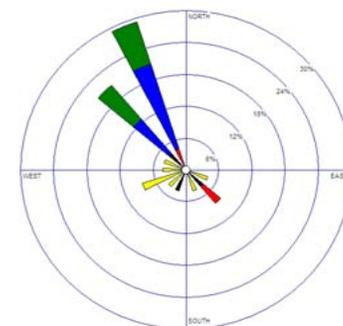


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

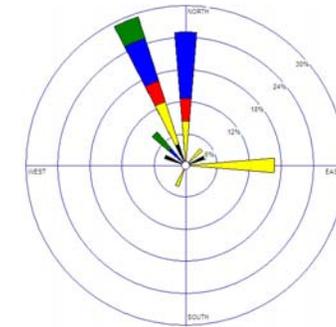


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



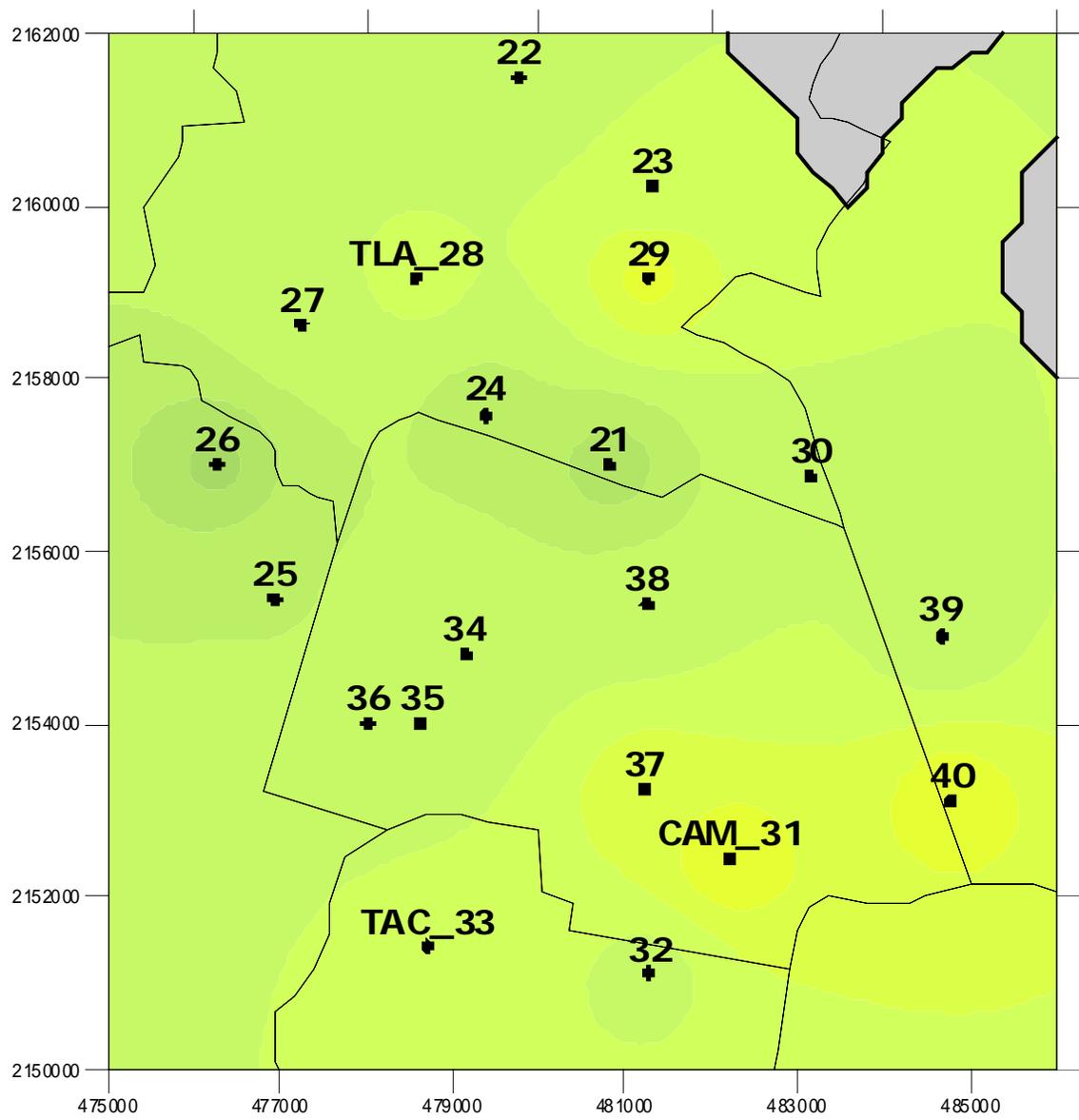
Estación TAC



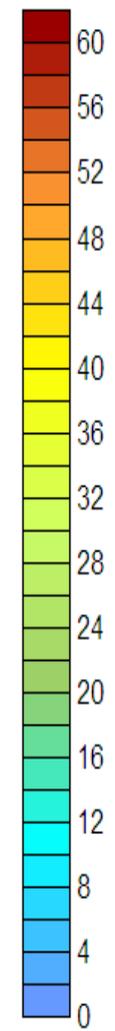
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 15/04/02

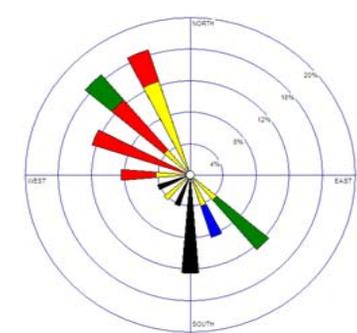


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

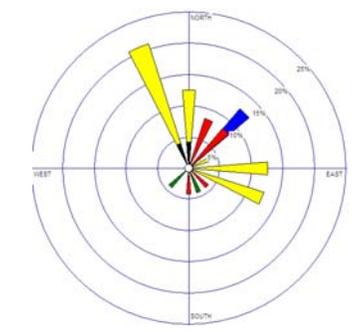


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



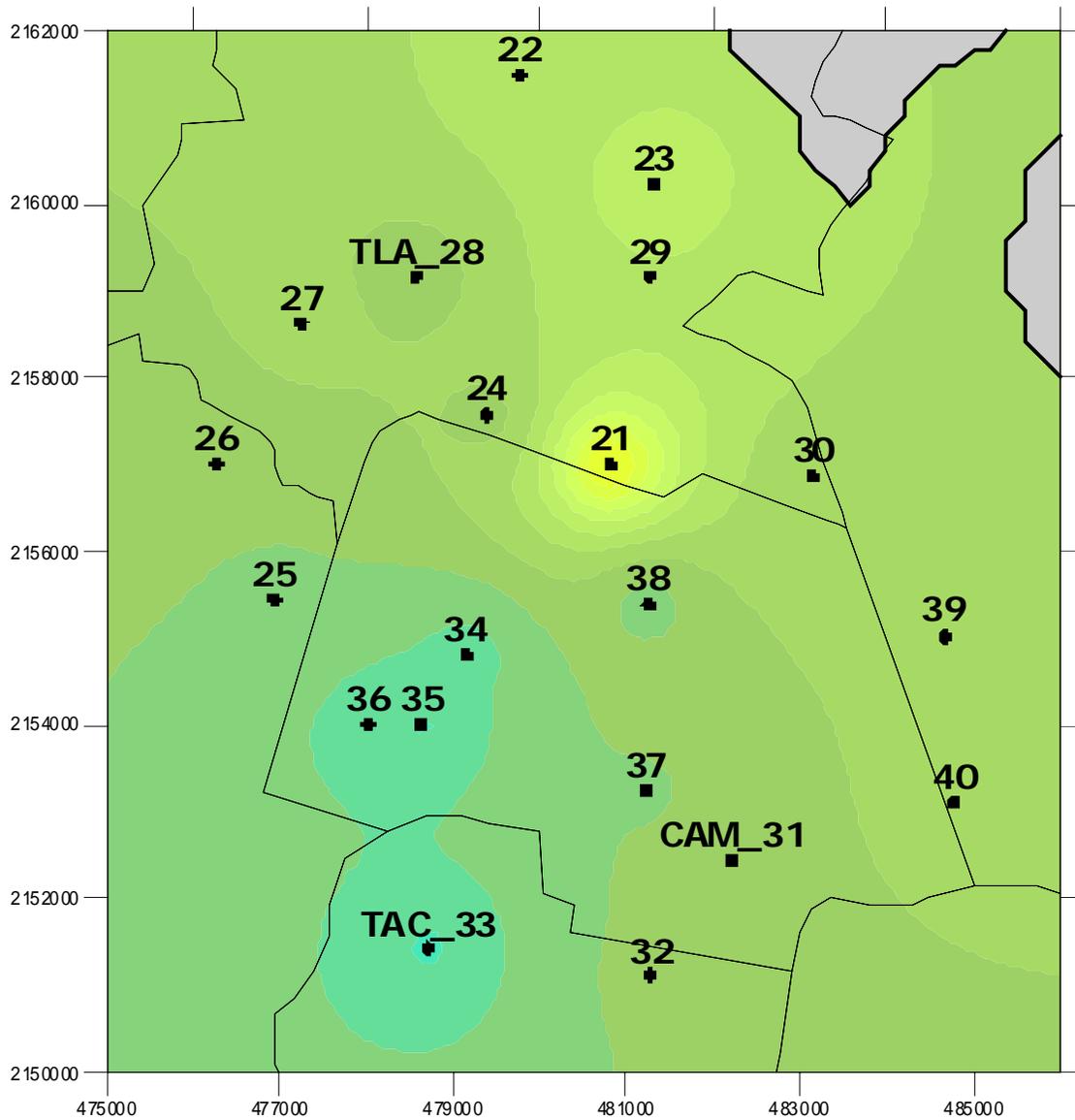
Estación TAC



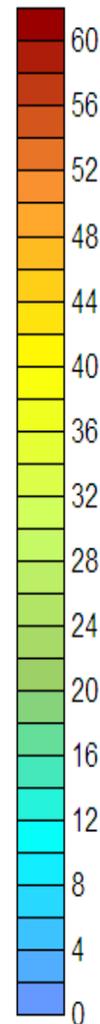
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 18/06/02

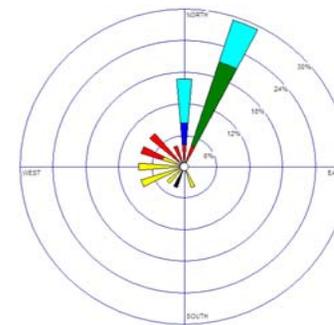


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

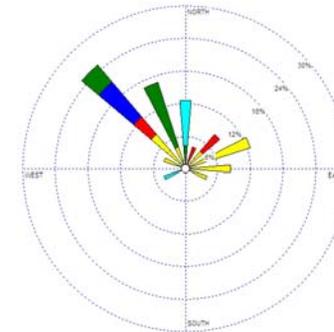


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



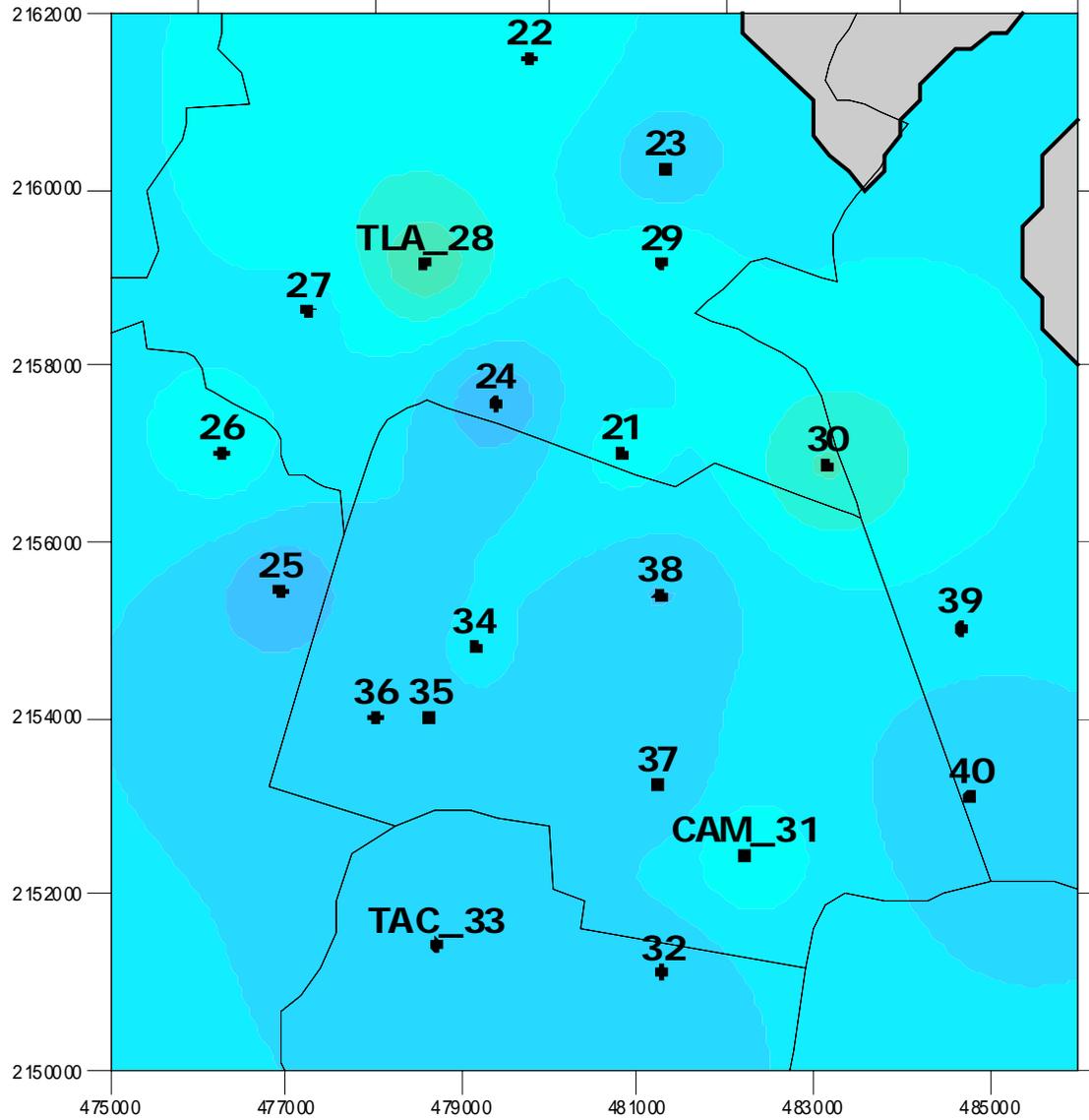
Estación TAC



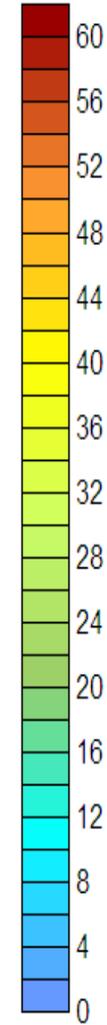
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 21/06/02

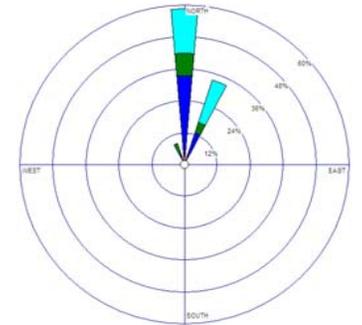


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

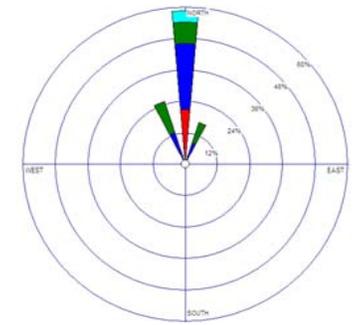


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



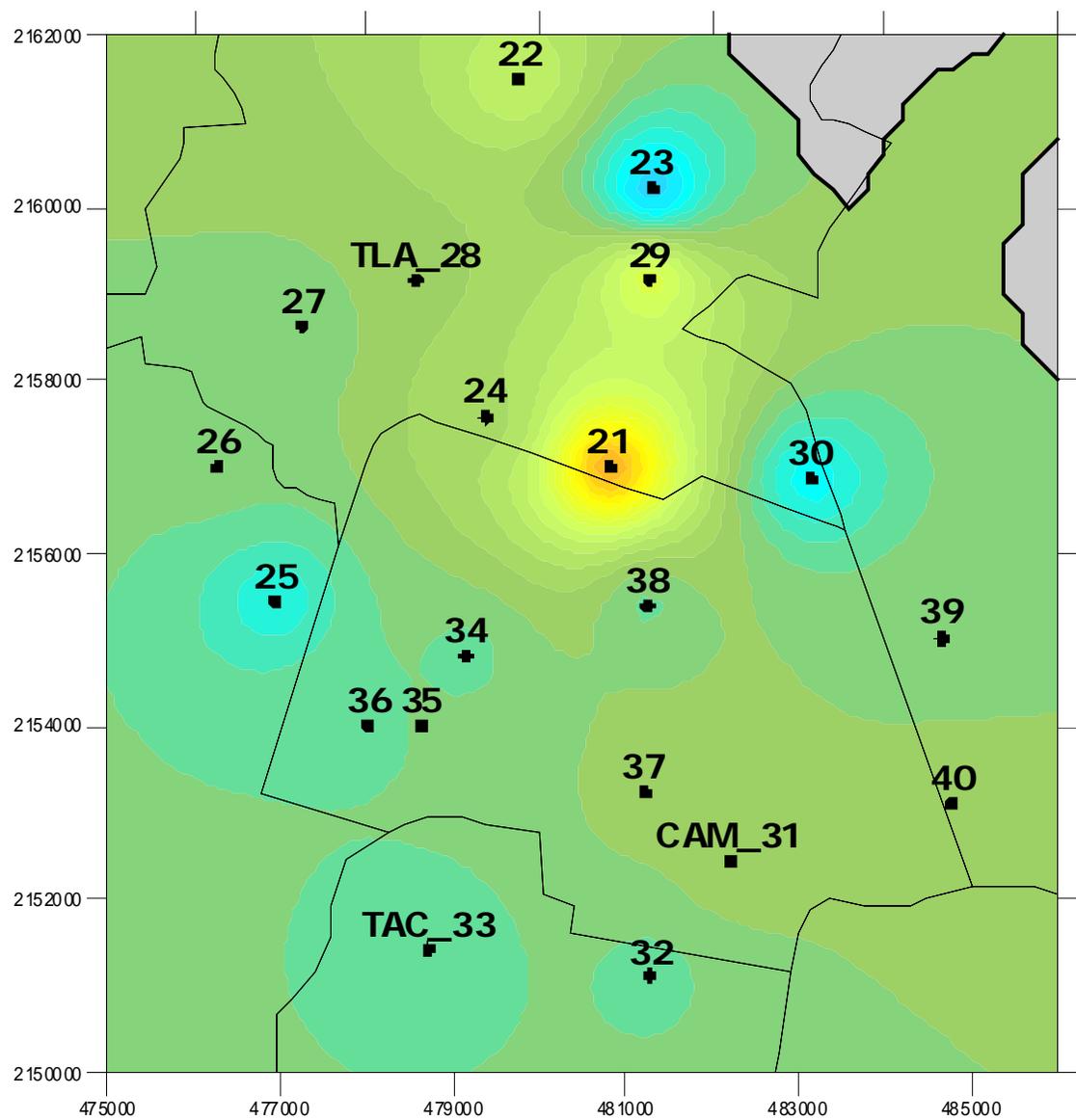
Estación TAC



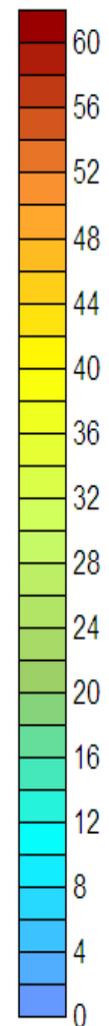
Velocidad de viento  
m/s

- $>= 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 24/06/02

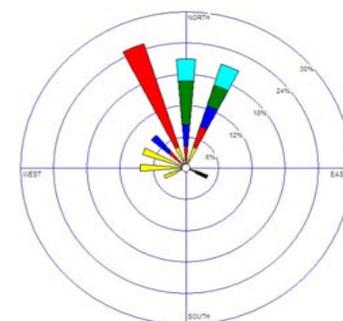


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

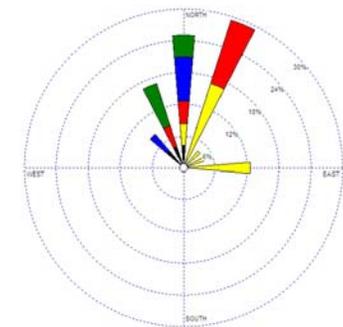


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



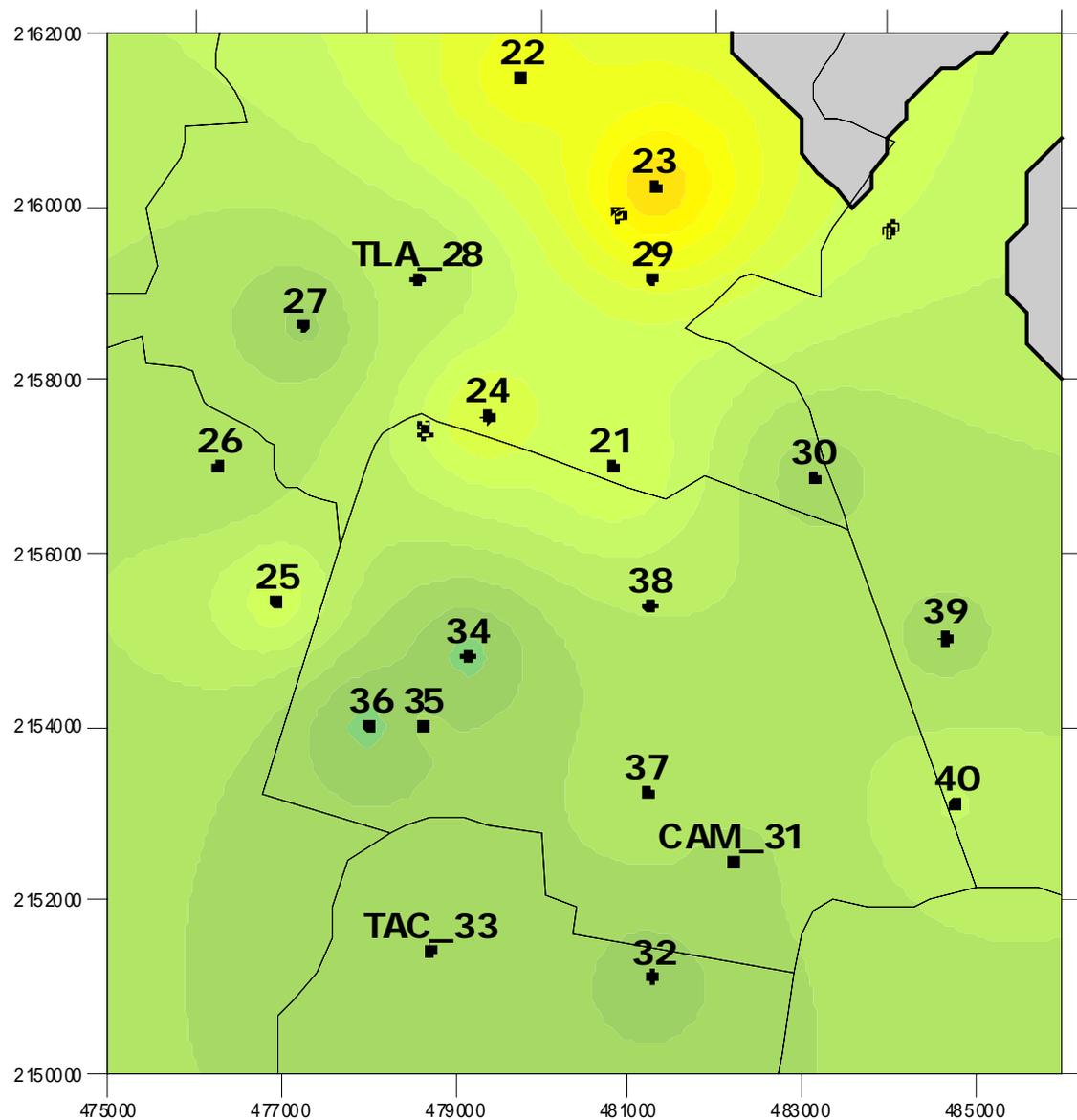
Estación TAC



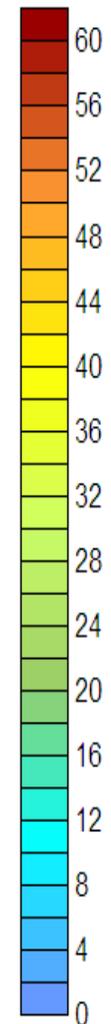
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 27/06/02

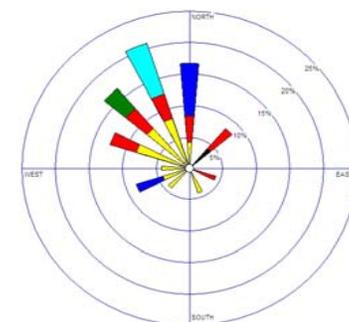


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

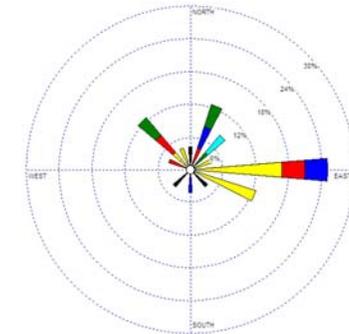


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



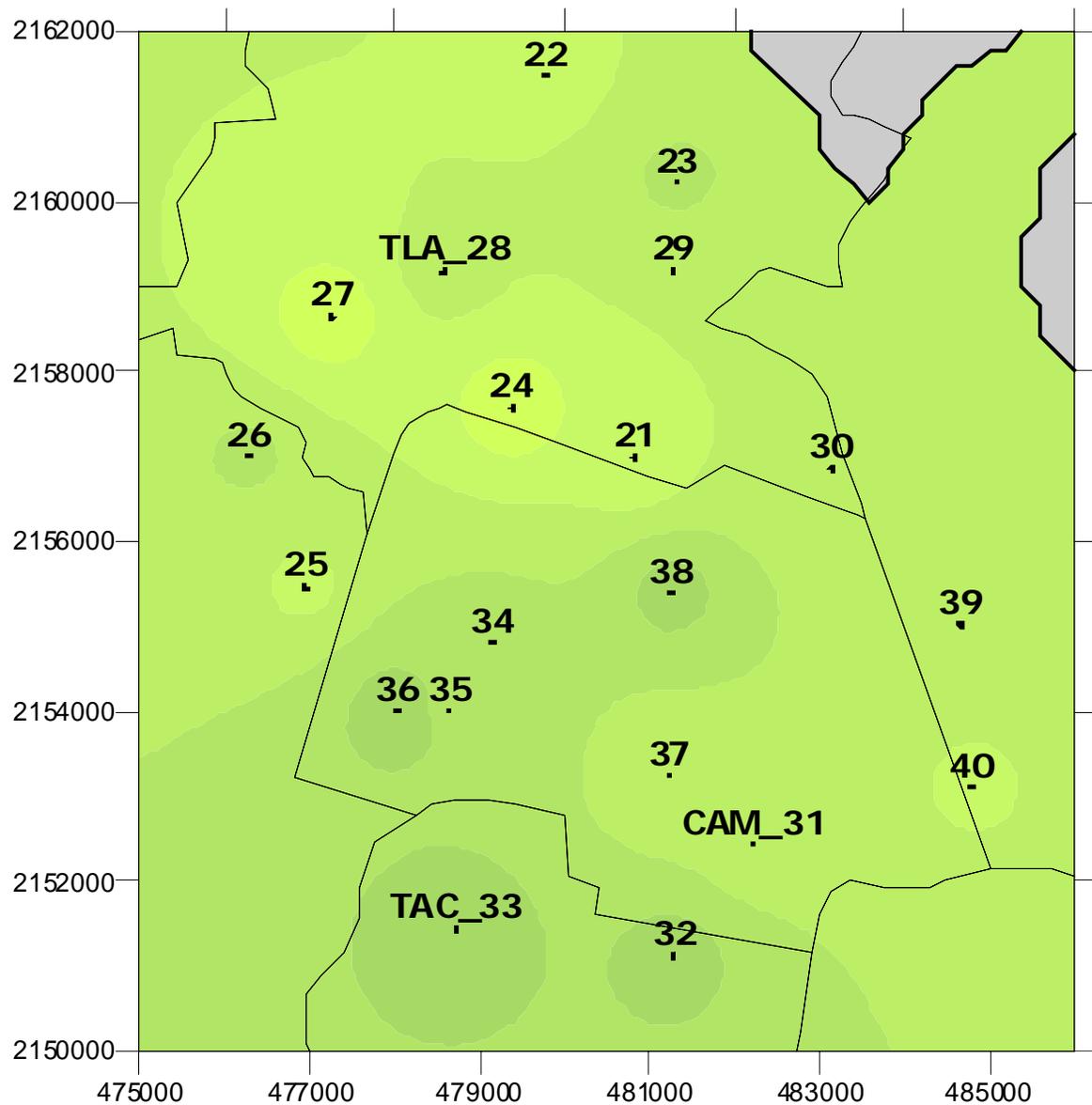
Estación TAC



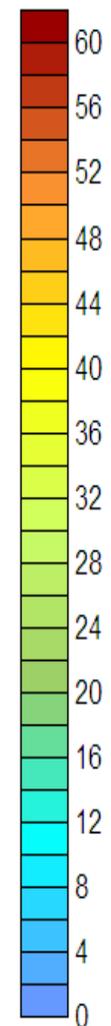
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 17/08/02

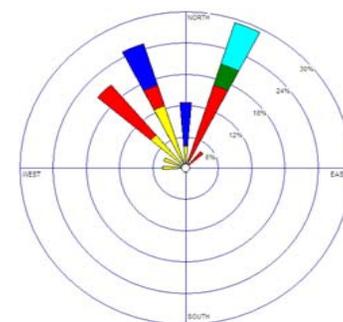


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

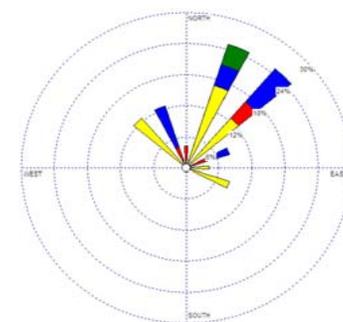


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



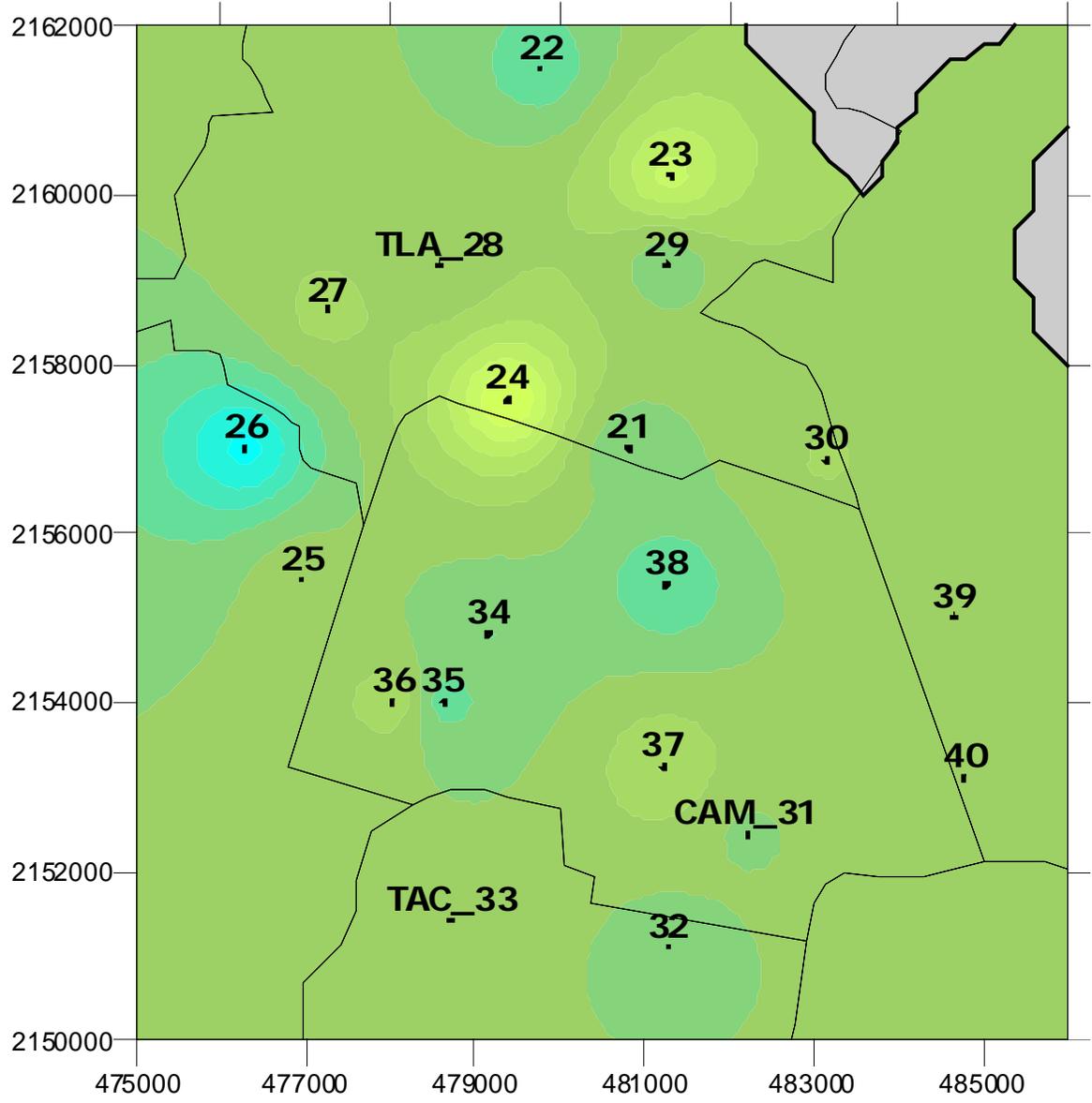
Estación TAC



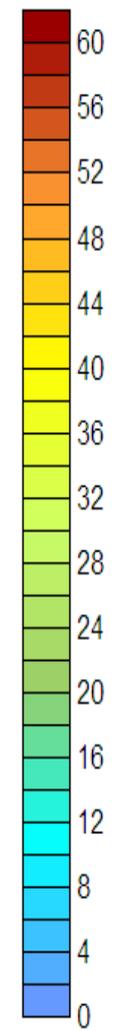
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 20/08/02

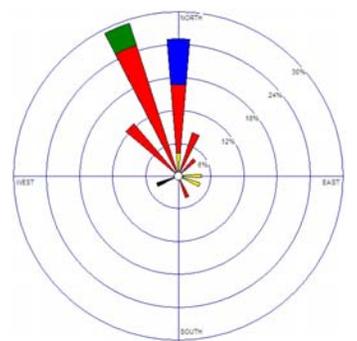


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

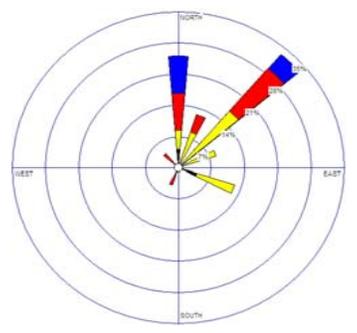


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



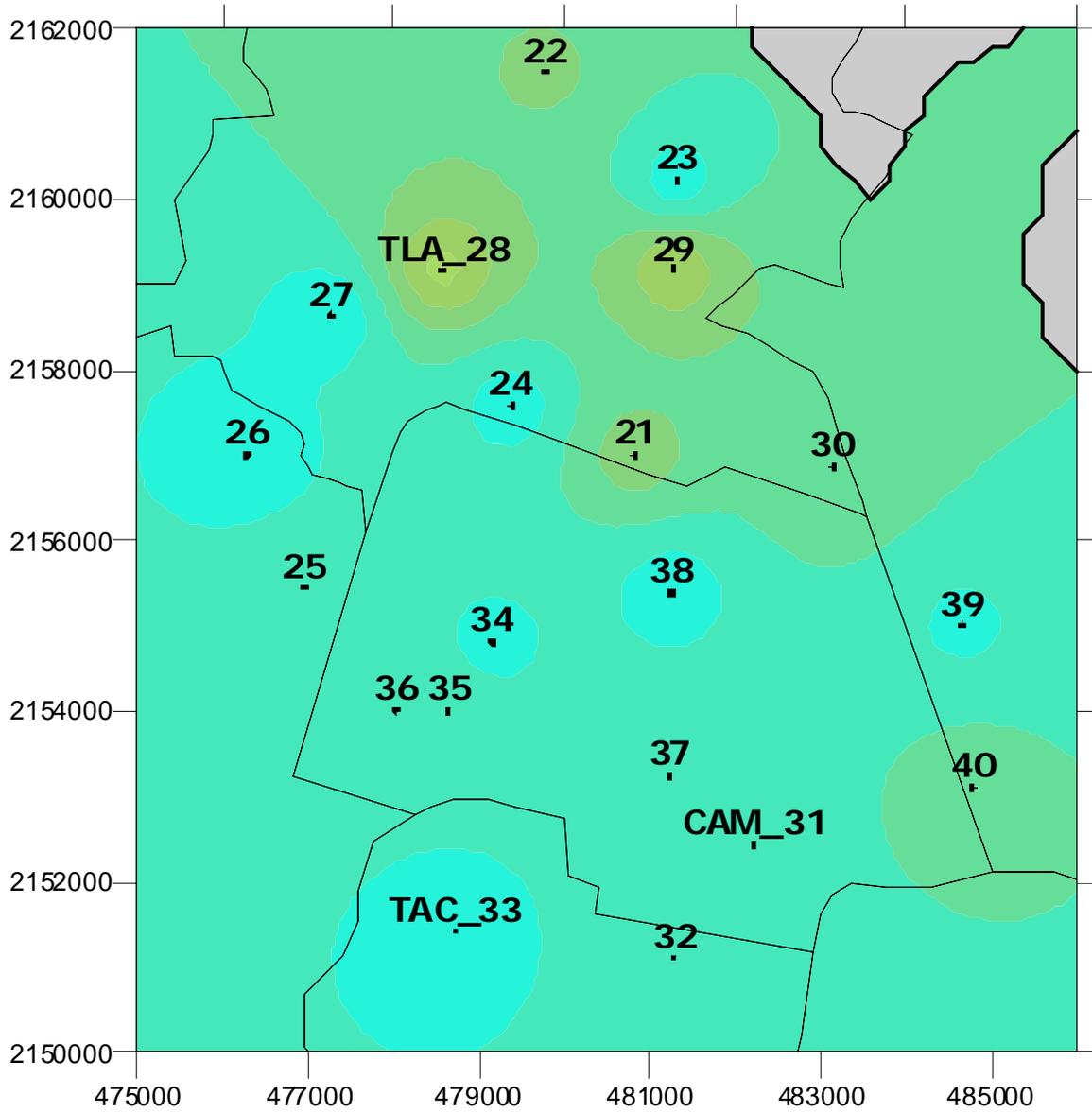
Estación TAC



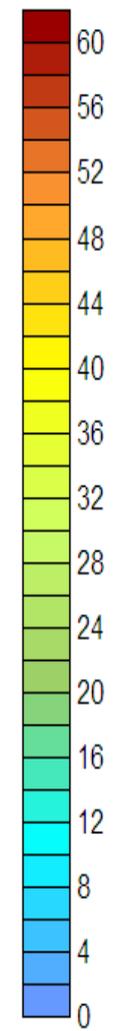
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 23/08/02

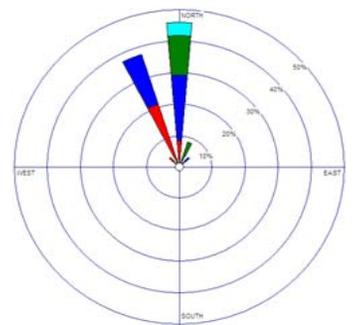


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

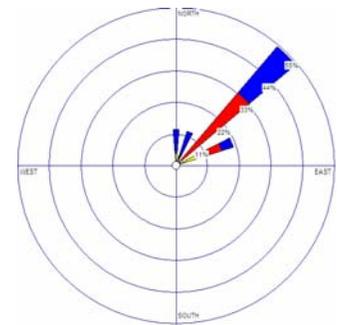


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



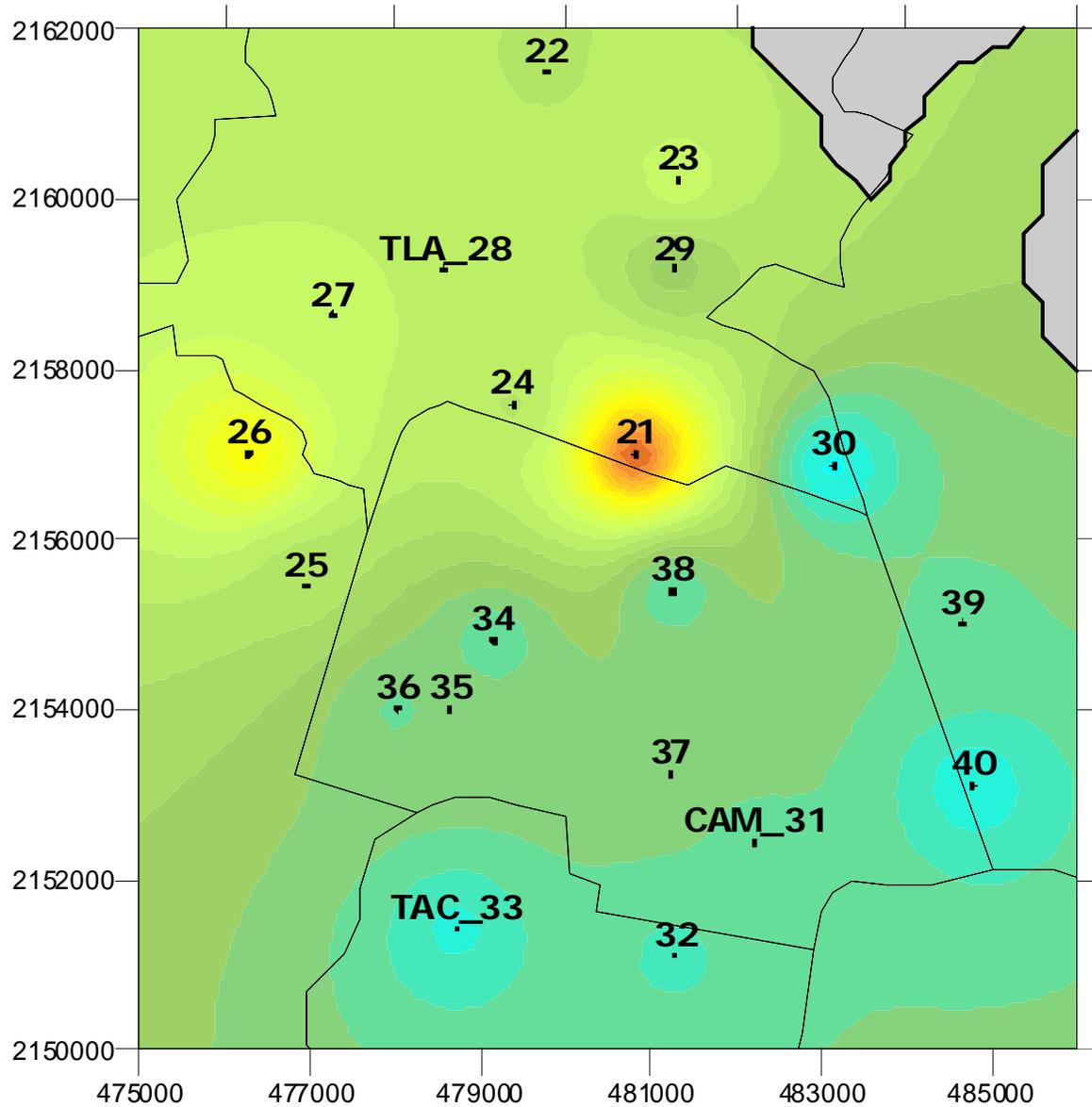
Estación TAC



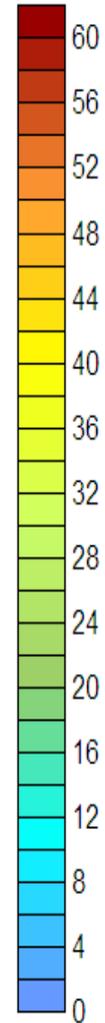
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

Fecha de muestreo: 26/08/02

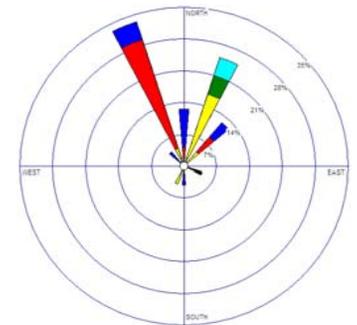


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



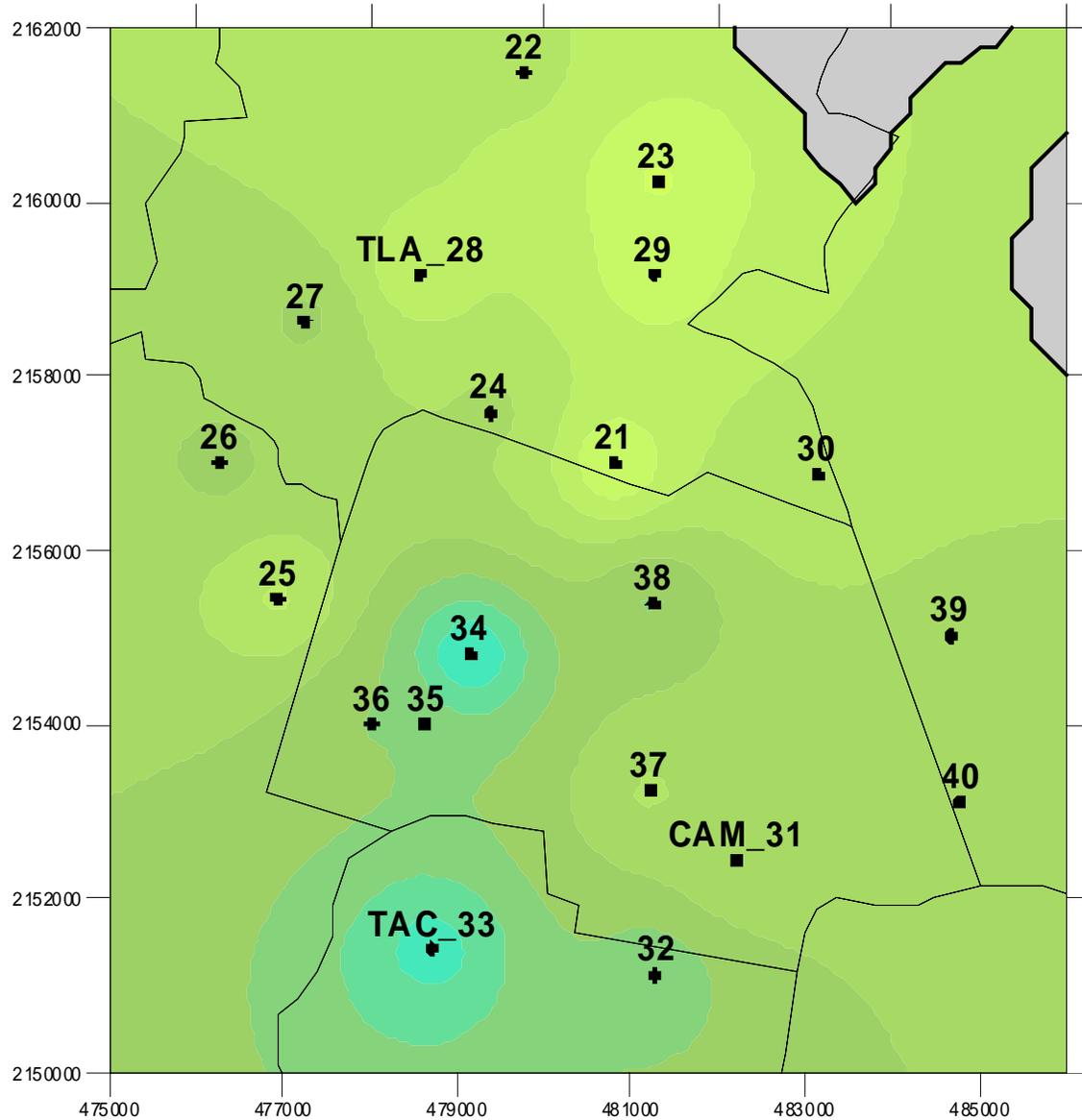
Estación TAC



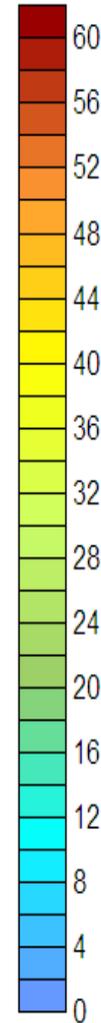
Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 31/10/02

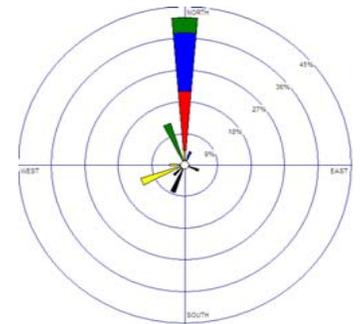


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

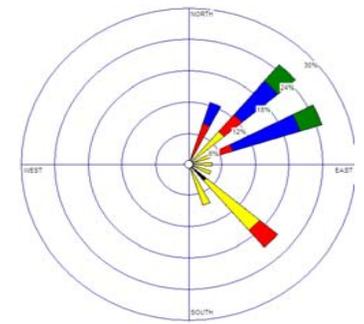


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



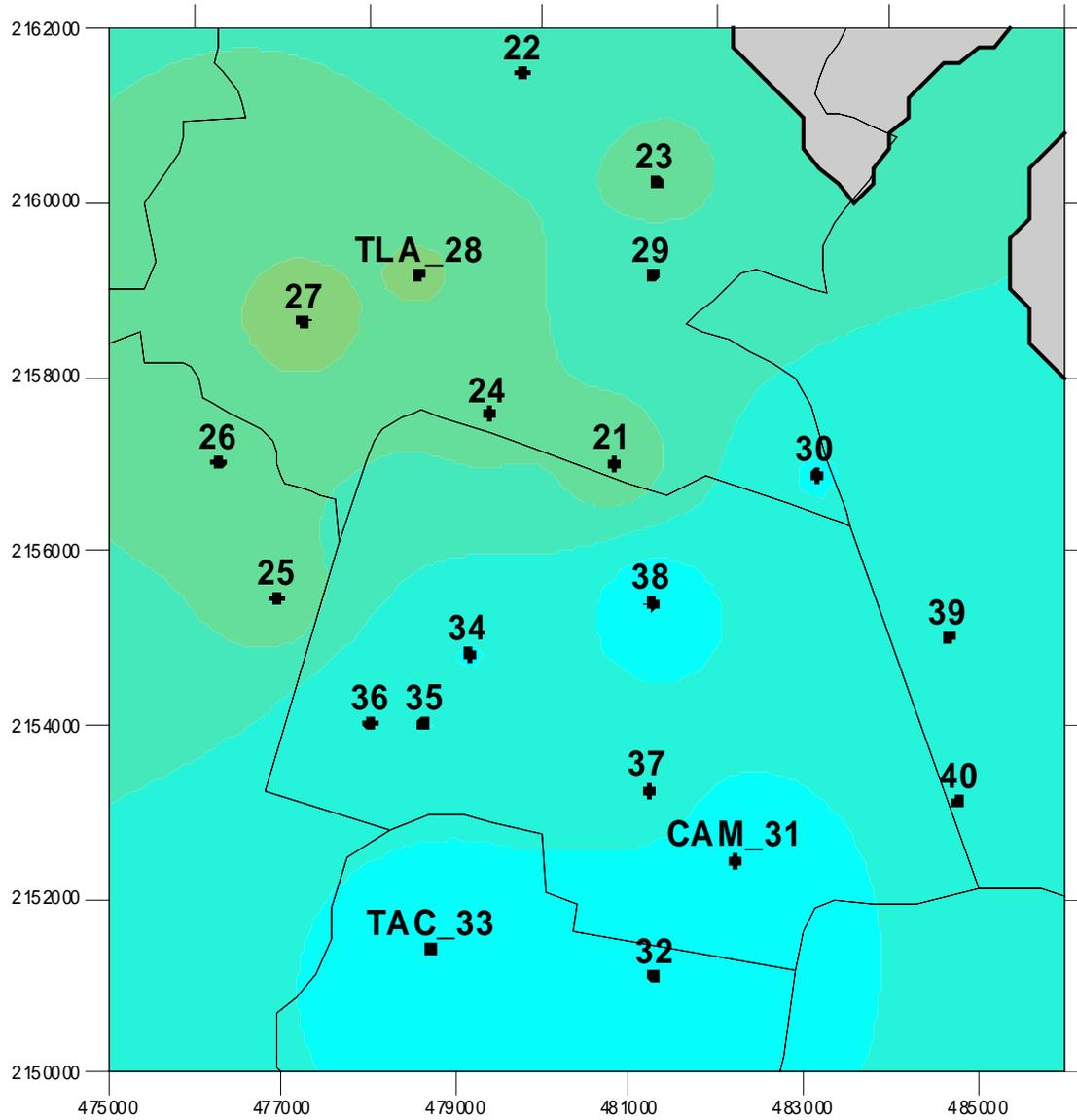
Estación TAC



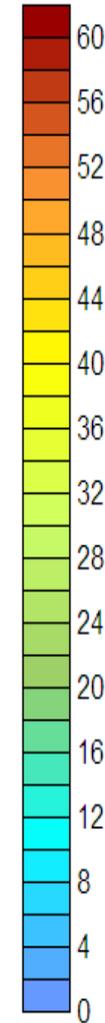
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 03/11/02

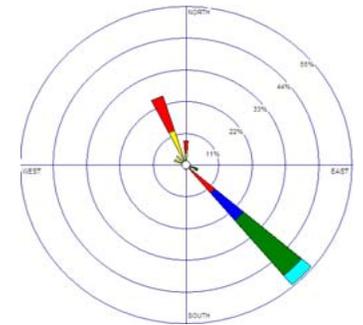


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

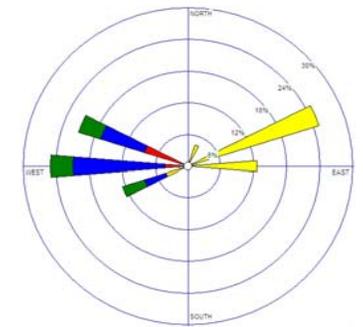


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



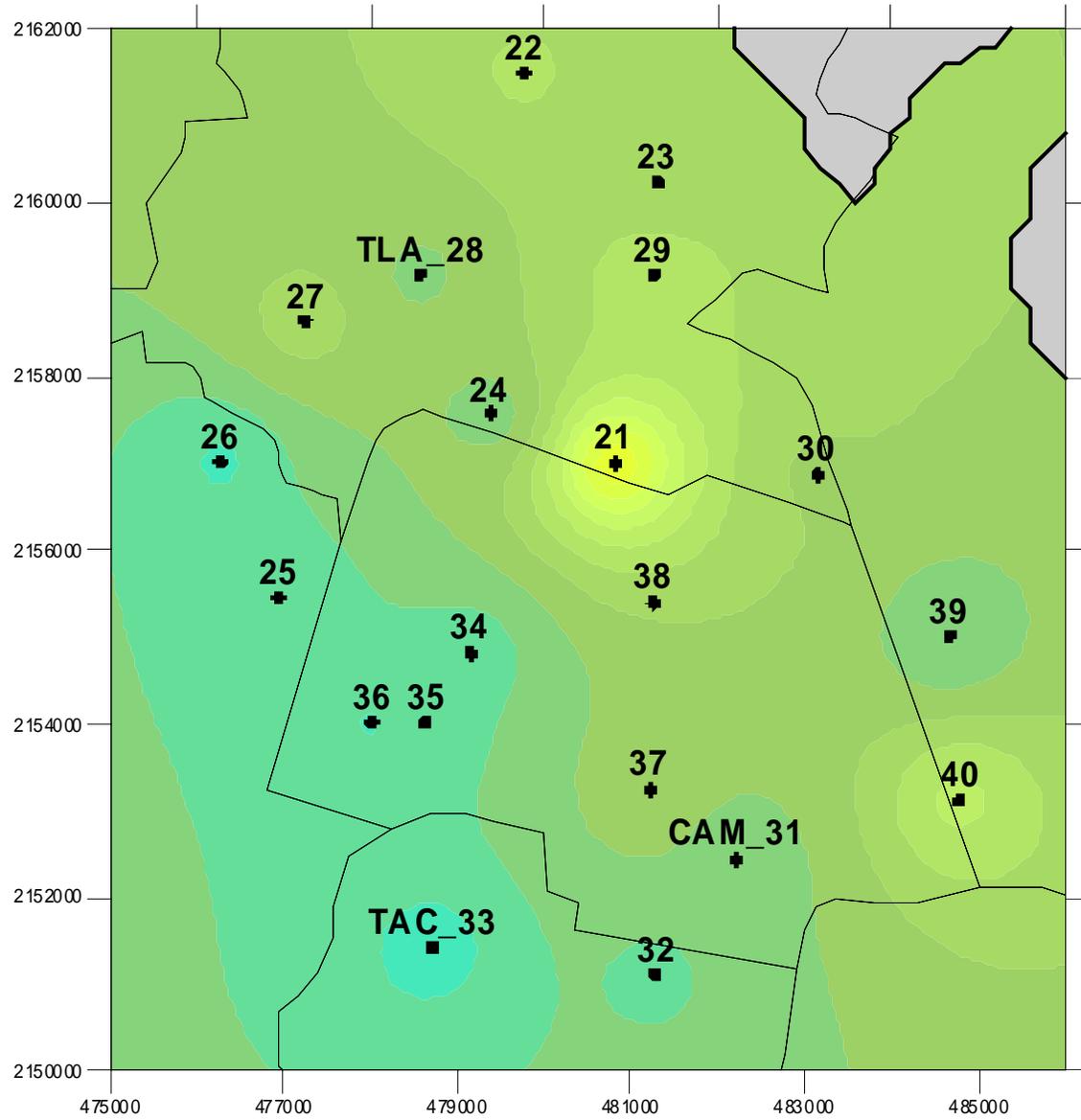
Estación TAC



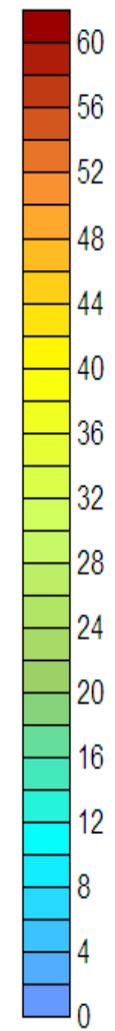
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 06/11/02

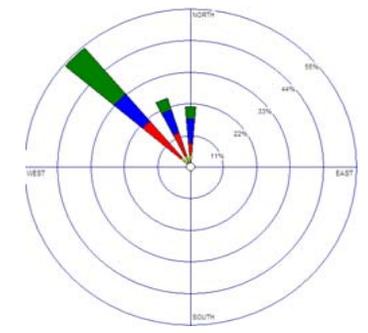


PM<sub>2.5</sub>  
(µg/m<sup>3</sup>)

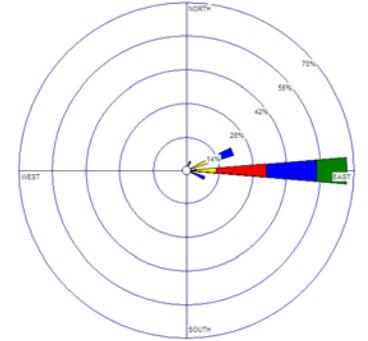


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



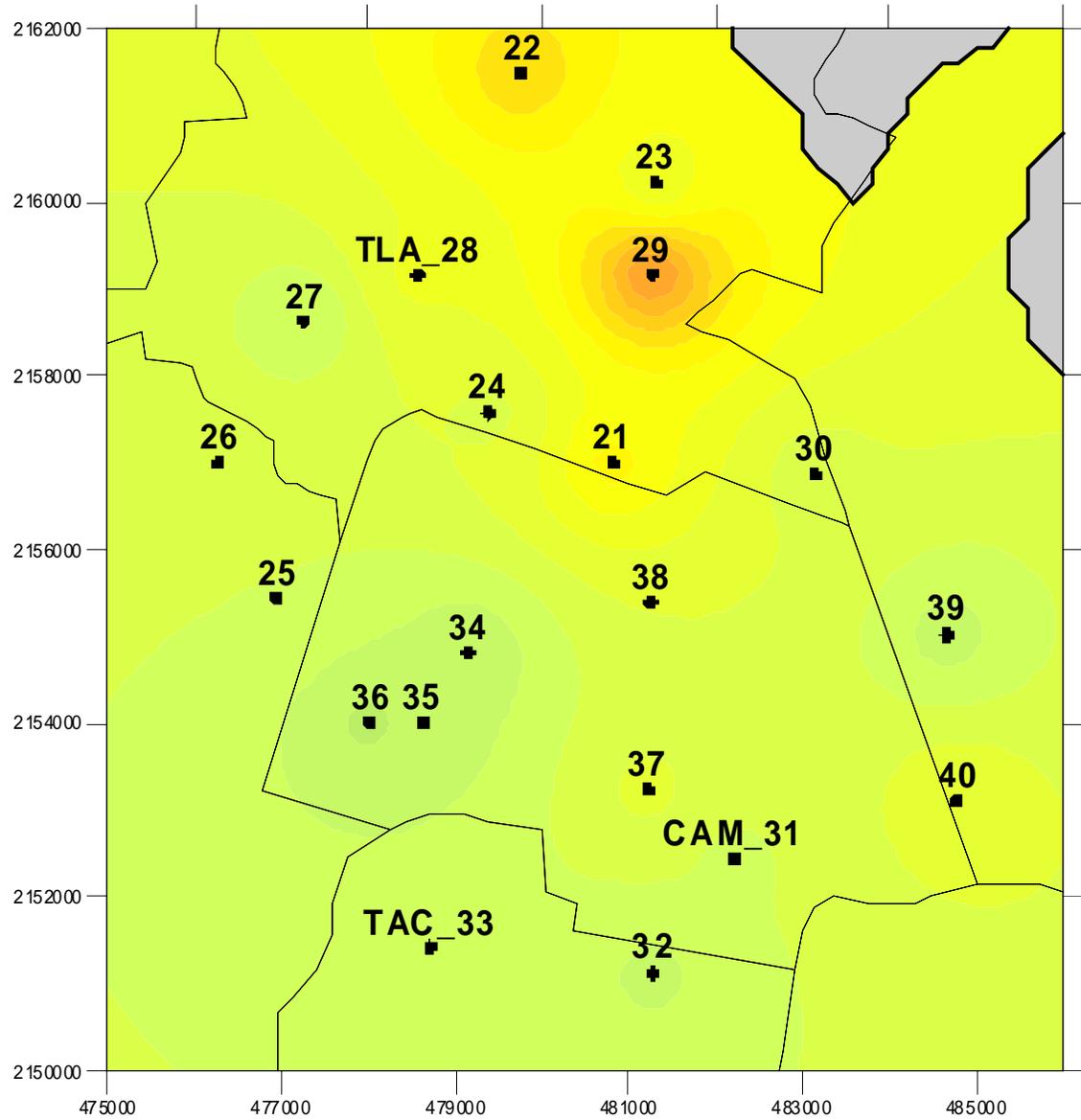
Estación TAC



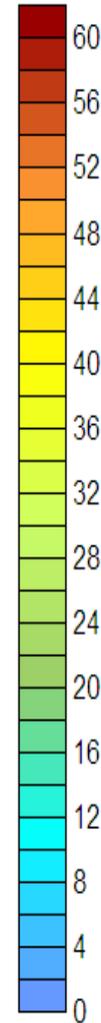
Velocidad de viento  
m/s

- >= 5.1
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

# Fecha de muestreo: 09/11/02

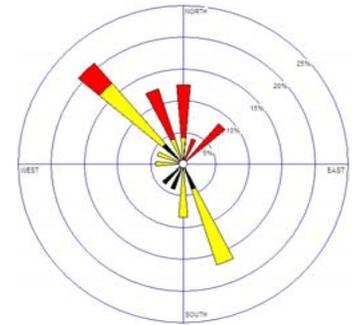


PM<sub>2.5</sub>  
( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

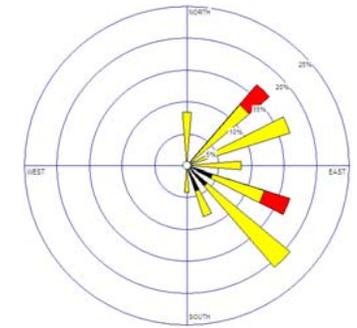


- Sitio de monitoreo
- Área sin interpolar

Estación TLA



Estación TAC



Velocidad de viento  
m/s

- $\geq 5.1$
- 4.1 - 5.0
- 3.1 - 4.0
- 2.1 - 3.0
- 1.1 - 2.0
- 0.5 - 1.0

D. J. Gracias otra vez