

Juan Guillermo
Camacho Díaz

**Mapeo de la calidad ambiental urbana mediante
bioindicadores en la ciudad de Santiago de
Querétaro**

2013



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Mapeo de la calidad ambiental urbana mediante
bioindicadores en la ciudad de Santiago de Querétaro**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

Línea terminal en Recursos Hídricos y Ambiental

Presenta

Ing. Juan Guillermo Camacho Díaz

Dirigido por

Dr. Enrique González Sosa

Dra. Rocío García Martínez



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias en Ingeniería Recursos Hídricos y Ambiental

Mapeo de la calidad ambiental urbana mediante bioindicadores en la ciudad de Santiago de Querétaro

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de la
Maestría en Ciencias en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental

Presenta:

Ing. Juan Guillermo Camacho Díaz

Dirigido por:

Dr. Enrique González Sosa

SINODALES

Dr. Enrique González Sosa
Presidente

Firma

Dra. Rocío García Martínez
Secretario

Firma

Dr. Carlos Mastachi Loza
Vocal

Firma

Dr. Carlos Fuentes Ruíz
Suplente

Firma

M. en C. Víctor Manuel Mondragón Olguín
Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Abril/2013
México

Dedicado a mis padres Juan Patricio Camacho Medrano y María Dolores Díaz por su apoyo incondicional y por animarme en todo momento.

A mi esposa María Isabel González Nava. Las palabras no serán nunca suficientes para expresar mi amor y gratitud hacia ti.

A las personas que luchan contra el cáncer, quienes merecen mi admiración y respeto por no dejarse vencer. Esta dedicatoria va dirigida especialmente a la señora María Isabel Silva Pérez

Con mucho cariño

Ing. Juan Guillermo Camacho Díaz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), por brindarme la oportunidad de realizar los estudios de maestría.

A CONACyT por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría

A la universidad Autónoma de Tabasco (UJAT) por la beca otorgada en apoyo a sus egresados para la realización de estudios de posgrado.

A mi director de Tesis, el Doctor Enrique González Sosa por el tiempo brindado, su apoyo, consejos, asesoría y guía para la realización de esta tesis y mi formación como Maestro en Ciencias.

A la Doctora Rocía García Martínez por sus consejos y asesoría, además de brindarme parte de su tiempo y experiencia, las cuales fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Al Maestro en Ciencias Víctor Manuel Mondragón Olguín por brindarme su tiempo y paciencia para enseñarme a utilizar los equipos de laboratorio.

A todos los Catedráticos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería, quienes con sus conocimientos aportaron las bases para mi formación en el posgrado.

Gracias a los revisores por sus comentarios y aportes brindados para mejorar este trabajo de investigación.

RESUMEN

La contaminación del aire es uno de los principales problemas alrededor del mundo, por lo que la sociedad cada vez más se preocupa y muestra interés por ello y por sus consecuencias. Sin embargo es importante entender de qué manera la contaminación interactúa con las variables climatológicas, y lo que es más importante, utilizar organismos biológicos que nos permitan cuantificar elementos que son dañinos para los seres humanos en grandes o pequeñas cantidades. La isotopía, entre sus usos, se utiliza para determinar la cantidad de un elemento, y su uso se potencializa al utilizar un elemento bioindicador. Estos bioindicadores son importantes debido a que reducen el costo por el uso de métodos y equipos de monitoreo *in situ*, sin embargo tiene el inconveniente de que los resultados pueden sobreestimarse o subestimarse si no se tiene especial cuidado al realizar el muestro o las pruebas de laboratorio. En este caso, durante ésta investigación se obtuvieron resultados de isotopía de carbono y nitrógeno de muestras de plantas de *Tillandsia Recurvata*, así como de metales. Después de calcular estos elementos se utilizó el programa Weather Research and Forecasting de modelación de variables climatológicas para observar la variación en el tiempo de esas variables y notar como estos cambios afectan la dispersión de contaminantes, comparándolos a su vez con las rosas de vientos del período de estudio.

Palabras Clave: bioindicador, contaminante, isótopo, variable climatológica, *Tillandsia Recurvata*, Weather Research and Forecasting

SUMMARY

Pollution is one of the main problems around the world, that's the main reason why society is even more concerned and shows interest for its consequences. Nevertheless is important to understand how pollution interact with climatological variables, and more important to use biological organisms which would be able to determine the quantity of elements which are dangerous for human beings, in large or small quantities. Isotopy sometimes is used to determine an amount of element, and It's better used with biological indicators. These bioindicators are important because reduce the cost of using *in situ* monitoring station, but it has the inconvenience the results could be underestimate or overestimated if we don't have careful to make the field sample and laboratory experiment right. During this investigation it obtained results about carbon and nitrogen isotopy on *Tillandsia Recurvata* samples and also metals elements. After calculate the amount of those elements we used a climatological model program to observe the variation in time about some climatic variables and observe how these changes affect the dispersion of these pollutants comparing them with wind roses from research period.

Palabras Clave: bioindicator, pollutant, isotope, climatic variable, *Tillandsia Recurvata*, Weather Research and Forecasting

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	4
RESUMEN	5
SUMMARY	6
ÍNDICE	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE FIGURAS	10
I. INTRODUCCIÓN	11
I.1 Hipótesis	12
I.2 Objetivos	12
II. ANTECEDENTES	13
III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	18
III.1 Ubicación Geográfica	18
III.2 Problemática en la Ciudad	19
III.3 Justificación	21
IV. MARCO TEÓRICO	22
IV.1 Musgo (<i>Tillandsia Recurvata</i>)	22
IV.2 Isotopía del carbono 13 y del nitrógeno 15	23
IV.2.1 Fraccionamiento Isotópico	23
IV.2.2 Espectrometría de masas	27
IV.3 Aspectos generales de los metales pesados	29
IV.3.1 Propiedades físicas y químicas de los metales pesados	29
IV.3.1.1 Propiedades físicas	29
IV.3.1.2 Propiedades químicas	30
IV.3.2 Fuentes de emisión de los metales	31
IV.3.2.1 Fuentes antropogénicas	31
IV.3.2.2 Fuentes naturales	33
IV.3.3 Caracterización de los metales en la precipitación	34

	Pluvial	
	IV.3.4 Biodisponibilidad de los metales pesados	35
	IV.4 Modelos matemático	36
	IV.4.1 Ecuaciones básicas	37
	IV.4.2 Sistemas de integración	39
V.	WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF-NMM)	40
	V.1 Descripción del núcleo ARW	42
VI.	METODOLOGÍA	45
	VI.1 Muestreo	45
	VI.1.1 Sitio de estudio	45
	VI.1.2 Diseño del muestreo	46
	VI.2 Técnicas de muestreo	49
	VI.2.1 Identificación de los arboles	49
	VI.2.2 Recolección de la muestra	49
	VI.3 Determinación de C y N en material orgánico	50
	VI.3.1 Preparación de la muestra	50
	VI.3.2 Condiciones del horno de microondas	51
	VI.3.3 Determinación del contenido de Isotopos de C y N	52
	VI.3.4 Determinación de elementos metálicos	53
	VI.4 Modelo de simulación	53
VII.	RESULTADOS	57
	VII.1 Análisis Isotópico de Carbono y Nitrógeno	57
	VII.2 Análisis Isotópico de metales pesados	62
	VII.3 Variables Climatológicas	65
	VII.3.1 Rosas de Viento	65
	VII.3.2 Precipitación Anual	68
	VII.3.3 Simulación de Variables Climatológicas WRF	69
	VII.3.4 Imágenes SEM	73
VIII.	CONCLUSIONES	75
IX.	LITERATURA CITADA	77

ÍNDICE DE TABLAS

IV.1.	Emisiones de contaminantes atmosféricos	32
IV.2	Emisiones estimadas de metales generadas por fuentes naturales	34
VI.1	Árboles y arbustos más comunes en la ciudad de Querétaro	46
VI.2	Sitios de muestreo por sectores	48
VI.3	Condiciones del horno de microondas para la digestión de muestras	51
VII.1	Resultados de la concentración de isótopos	57
VII.2	Concentración de metales pesados. Análisis semicuantitativo ICP-MS	63
VII.3	Media de la concentración de metales pesados por sectores	64

ÍNDICE DE FIGURAS

III.1	Zona de Estudio	19
III.2	Parques Industriales de Querétaro	20
IV.1	<i>Tillandsia Recurvata</i>	23
IV.2	Esquema de la separación iónica en un espectrómetro de masas	27
IV.3	Caja de Faraday	29
V.1	Principales componentes del modelo WRF	42
V.2	Diagrama del modelo WRF	43
VI.1	División de zonas para el monitoreo	45
VI.2	Procesos de WRF	54
VI.3	Dominio utilizado para las simulaciones numéricas	56
VII.1	Análisis Isotópico Abril 2011	58
VII.2	Análisis Isotópico Mayo 2011	59

VII.3	Análisis Isotópico Junio 2011	60
VII.4	Análisis Isotópico Julio 2011	60
VII.5	Análisis Isotópico acumulativo	61
VII.6	Mapa de concentraciones de C y N	61
VII.7	Mapa de Valores de Pb	64
VII.8	Rosas de viento febrero-abril 2011, previo al muestreo	65
VII.9	Rosas de viento del año 2011	65
VII.10	Rosas de viento enero-marzo 2011, previo al muestreo	66
VII.11	Rosas de viento del año 2012	67
VII.12	Precipitación anual 2011	68
VII.13	Precipitación anual 2012	69
VII.14	Dirección de vientos (10 m) y precipitación (mm). Anidamiento 1. 21 de marzo al 2 abril 2011	69
VII.15	Dirección de vientos (10m) y precipitación (mm). Anidamiento 2. 21 de marzo al 2 abril 2011	70
VII.16	Dirección de vientos (10m) y precipitación (mm). Anidamiento 1. 9 al 22 de julio 2011	71
VII.17	Dirección de vientos (10m) y precipitación (mm). Anidamiento 2. 9 al 22 de Julio 2011	72
VII.18	Imágenes SEM 3C2b Parque Querétaro 200	73
VII.19	Imágenes SEM 4b	74
VII.20	Imágenes SEM FE1	74

I. INTRODUCCIÓN

Un organismo se considera bioindicador cuando presenta alguna reacción que puede ser identificada frente a diferentes grados de calidad del medio donde se desarrolla. Muchas especies son incapaces de adaptarse ecológica, o genéticamente a la condición ambiental alterada, de modo que su ausencia es, de hecho, un indicio del problema. Los bioindicadores se han utilizado desde el siglo XIX (Nylander, 1866).

El éxito de su aplicación es lo moderado del costo respecto a los métodos de medición *in situ*. Por otra parte, las actividades industriales y agrícolas han tenido como resultado la dispersión de contaminantes virtualmente en todas las partes de la atmósfera, hidrósfera, pedósfera y biósfera. El análisis de la abundancia de los isótopos estables en los materiales naturales orgánicos e inorgánicos constituye una herramienta útil para la determinación del origen e historia de un material presente en un ambiente. Específicamente, se puede emplear en el estudio de la contaminación de nitrógeno por abonos, contaminación fecal de las aguas subterráneas, identificación de compuestos contaminantes de azufre y nitrógeno en la atmósfera, y su posterior precipitación en forma de lluvia a los ambientes acuáticos. Por último, y entre muchos otros, puede utilizarse para la estimación de la contaminación de los sedimentos por derivados del petróleo (MacKinnon *et al.*, 2001).

En la ciudad de Santiago de Querétaro, existe una participación creciente en el desarrollo nacional por ser un corredor industrial entre las ciudades más importantes que son México, Monterrey y Guadalajara; Además el crecimiento poblacional en el estado es uno de los más representativos pues ocupa el tercer lugar a nivel nacional, esto se debe a que el promedio de crecimiento fue de 2.7% en los últimos 10 años. La ciudad de Querétaro, alberga el 43.9% de la población total del estado, alrededor de 801,883 habitantes (SEDESU, 2011), lo que representa aproximadamente un 1.63% del total del país (INEGI, 2010); lo que conlleva la concentración de industrias, transporte público y privado, consumo energético y otras actividades que resultan en grandes emisiones de contaminantes.

La utilización de un bioindicador como la *Tillandsia Recurvata* en árboles de Huizache ha sido importante para identificar los puntos y/o lugares donde existe una mayor concentración de carbono y nitrógeno atmosférico, a la vez que se determina que las lluvias, el efecto de dispersión de la misma y de los vientos afectan la deposición de polvo atmosférico determinando la absorción por parte del musgo, lo que lo convierte no sólo en un indicador sino en una fuente de absorción de contaminantes.

I.1 Hipótesis

La determinación de isótopos en muestras vegetales indican deterioro de las condiciones naturales del ambiente, además de los riesgos a la salud y por lo tanto la calidad de vida de la población.

I.2 Objetivos

Objetivo General

Estudiar la calidad ambiental mediante la utilización de una especie vegetal nativa y un programa de modelación atmosférica para determinar la distribución de la contaminación en la ciudad de Santiago de Querétaro.

Objetivos Específicos

- Obtener mediciones de isótopos representativos de carbono, nitrógeno y trazas de elementos metálicos estableciendo su distribución espacial en la zona urbana de Querétaro.
- Analizar la influencia de los vientos, la precipitación y la humedad en la deposición de partículas en las hojas de la especie *Tillandsia recurvata*.

II. ANTECEDENTES

Un organismo se considera bioindicador cuando presenta alguna reacción que puede ser identificada frente a diferentes grados de calidad del medio donde se desarrolla. Muchas especies son incapaces de adaptarse ecológica, o genéticamente a la condición ambiental alterada, de modo que su ausencia es, de hecho, un indicio del problema. Su comportamiento ante dichas condiciones difiere del natural en aspectos tales como hábito, fisiología, demografía y relaciones con otros organismos (García y Rubiano, 1984).

Las especies vegetales han sido utilizadas ampliamente como biomonitores y/o bioindicadores desde el siglo XIX (Nylander, 1866). De manera especial, en esa época, las especies epífitas tales como los líquenes fueron reconocidos por primera vez como posibles bioindicadores, pero no fue hasta 1960 (al ser identificado el dióxido de azufre como el factor principal que influencia el crecimiento, distribución y salud de los líquenes) cuando ocurrió un crecimiento exponencial de los estudios que utilizaban a los líquenes como bioindicadores, teniéndose hoy en día 2,000 trabajos publicados sobre este tema, incluyendo varios libros (Hawksworth *et al.*, 2005).

La cantidad de trabajos sobre las plantas epífitas como indicadores de la calidad ambiental ha ido en aumento. Se utilizan para estudios sobre contaminación atmosférica, metales pesados y radiactivos, contaminación acuática, niveles de cauces, caudales y mareas, cambio climático y continuidad ecológica (Hawksworth *et al.*, 2005).

En lo referente a la contaminación atmosférica, los organismos epífitos reciben la mayor parte de sus nutrientes a partir de la atmósfera por lo que son más susceptibles a los factores indicadores de contaminación. Entre éstos, resaltan los *epífitos folícolas* (simbiosis entre hongos y plantas), ya que dependen, todavía en mayor grado, de los factores atmosféricos, porque su unión al sustrato es menos pronunciada para que la superficie foliar permanezca intacta (Lücking, 1997). Por ejemplo, los líquenes han sido reconocidos por su capacidad para capturar y acumular iones metálicos de la atmósfera, por lo que han sido valiosos indicadores biológicos y geológicos de los diferentes tipos y grados de contaminación, lo cual se debe a sus propiedades metabólicas, lento crecimiento y longevidad que les permite incorporar agua, minerales disueltos y micropartículas metálicas (Aspiazu, *et al.*, 2007). El empleo de los musgos para controlar la deposición de metales pesados por vía atmosférica, fue desarrollado a finales de los años 60 en el norte de Europa (Rühling y Tyler, 1968), siendo cada vez más utilizado por su eficacia y facilidad en otros países (Grodzinka y Godzick, 1991; Sergio *et al.*, 1993;

Makert *et al.*, 1994; Rühling, 1994; Bargagli *et al.*, 1995; Berg *et al.*, 1995; Türkan *et al.*, 1995; Wolterbeek *et al.*, 1995; Oldal y Papp, 1996; Bargagli *et al.*, 1997; Carballeira y Fernández, 1997). En este rubro la utilización de líquenes ha sido la más extendida, realizándose estudios para la estimación de concentraciones de metales, tales como Aluminio, Cadmio, Hierro, Manganeso, y Plomo, y de otros elementos como el Zinc (Aspiazu, *et al.*, 2007). Ejemplos de ello es el estudio de la tolerancia de *Lichen Xanthoriaparietina* al stress ocasionado por la exposición a los metales mencionados en la ciudad de Kosice, Slovak Republic (Dzubaj *et al.*, 2008), la valoración de la acumulación de metales pesados en dos especies de *Tillandsia* en relación a las fuentes de emisión atmosféricas en Argentina (Wannaz, *et al.*, 2006) y para la identificación de fuentes de emisión de metales (Wannaz, *et al.*, 2012). El análisis con *Tillandsia* ha dado como resultado estudios donde se utilizan dos o más especies, dando como resultado que la *Tillandsia Recurvata* es un bioacumulador efectivo que proporciona datos confiables (Bermudez, *et al.*, 2009). También, se han realizado investigaciones sobre la relación entre la diversidad de especies de epífitas existentes y la concentración de contaminantes en la atmósfera. Ejemplos de ello se observan en Loppi (2006) donde se evaluó el contenido de mercurio en la atmósfera de acuerdo a la relación de la diversidad de epífitas (*Xanthoriaparietina*) y la concentración de mercurio obtenida de las muestras de líquenes, mostrando una condición general de alteración ambiental moderada alrededor de las plantas geotérmicas. Basado en estos datos, la correlación entre la diversidad de líquenes y la concentración de Hg encontrado en las muestras fue posible calcular un umbral de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de H_2S . Por otra parte, Lijteroff *et al.* (2009) evaluaron la calidad del aire urbano en la Ciudad de San Luis Argentina, utilizando las comunidades de líquenes como bioindicadores y determinando un valor conocido como Índice de Pureza Atmosférica (IPA) que indica indirectamente la cobertura de los líquenes en la zona de muestreo y directamente la diversidad de especies determinando la gradualidad en los niveles de contaminación. La ausencia casi total de líquenes en la ciudad de San Luis reflejó la baja calidad del aire en el espacio urbano y la eficacia de los líquenes como bioindicadores de la contaminación aérea.

Como puede observarse en los ejemplos mencionados en el párrafo anterior, en los estudios de contaminación atmosférica es posible utilizar un espécimen vegetal como indicador, y mediante pruebas de isotopía se puede determinar la concentración de contaminantes atmosféricos. Dada la sensibilidad que presentan a los cambios en la calidad del aire, las plantas son los elementos utilizados para tal fin.

Los isótopos se han empleado como trazadores, los cuales nos permiten seguir la pista de los elementos, como el carbono, azufre, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, en las plantas, suelo, agua o atmósfera. Generalmente, sus aplicaciones se han centrado en estudios de ecología (ciclos biogeoquímicos, cadenas tróficas, contaminantes) y paleontología. En hidrología, específicamente en hidrogeología, se utilizan los isótopos para la determinación de las corrientes y dirección del flujo, así como la edad del agua subterránea. También se utilizan como trazadores naturales en la identificación y caracterización del origen y dinámica de los flujos de agua en el entorno de presas y embalses. El estudio isotópico de restos fosilizados, en rocas sedimentarias, permite utilizarlos como posibles biomarcadores para la detección de vida antigua. Más recientemente, se ha utilizado como herramienta en el diagnóstico médico, bien de enfermedades infecciosas o enfermedades metabólicas (Guerrero, 2000).

Las actividades industriales y agrícolas han tenido como resultado la dispersión de contaminantes virtualmente en todas las partes de la atmósfera, hidrósfera, pedósfera y biósfera. El análisis de la abundancia de los isótopos estables en los materiales naturales orgánicos e inorgánicos constituye una herramienta útil para la determinación del origen e historia de un material presente en un ambiente. Específicamente, se puede emplear en el estudio de la contaminación de nitrógeno por abonos, contaminación fecal de las aguas subterráneas, identificación de compuestos contaminantes de azufre y nitrógeno en la atmósfera, y su posterior precipitación en forma de lluvia a los ambientes acuáticos. Por último, y entre otros muchos, puede utilizarse para la estimación de la contaminación de los sedimentos por derivados del petróleo (MacKinnon *et al.*, 2001). La mayor parte del nitrógeno de la biósfera e hidrósfera proviene de la fijación del nitrógeno atmosférico por microorganismos, aunque en algunos lugares el nitrógeno es consecuencia de la deposición antropogénica. Los abonos industriales se producen utilizando la síntesis química de Haber- Bosch, la cual describe el proceso de la reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseosos para producir amoníaco, por lo que esta molécula conserva las características isotópicas del nitrógeno en el aire. Valores aproximados a $10^{0/00}$ (0.010) de ^{15}N en los suelos es indicativo de la aplicación de abonos sintéticos (Guerrero, 2000).

Ejemplos del empleo de isótopos en estudios de contaminación atmosférica son las investigaciones realizadas por Liu *et al.* (2010), Respuesta del isótopo estable de carbón a la deposición de nitrógeno en plantas epilíticas (que se desarrollan en rocas), y Cipro (2011), Correlación de contaminantes orgánicos con isótopos estables en la vegetación de la isla King George, Antártida. En el primero se menciona que se utilizaron musgos epilíticos para evaluar la respuesta a la deposición de nitrógeno utilizando trazas de

carbono, e isótopos de carbono (^{13}C), en esta investigación se realizaron correlaciones entre las trazas de carbono, ^{13}C y nitrógeno, ^{15}N , demostrando que la respuesta de los isótopos de carbono respecto a la deposición de nitrógeno no depende de los factores de fijación de los musgos sino de otros factores, los cuales, sin embargo, no pueden diferenciarse claramente. Por lo tanto concluye que se necesitan estudios sobre los mecanismos fisiológicos del musgo para la fijación del nitrógeno para obtener una aproximación más precisa de la deposición del nitrógeno utilizando isótopos y señales de carbono. En el segundo estudio se utilizaron muestras de especies de líquenes (*Usneaaurantiaco-atra* y *Usneaantarctica*), especies de musgos (*Sanioniauncinata*, *Syntrichia princeps* y *Brachytecium sp.*) y una especie angiosperma (*Colobanthusquitensis*). Estas especies fueron analizadas mediante el uso de ^{13}C y ^{15}N . Los contaminantes encontrados fueron HCB, DDTs, PCBs y PBDEs, presentando mayores niveles de concentración en los musgos (0.779 ng g^{-1} , 1.22 ng g^{-1} , 15.7 ng g^{-1} y 0.276 ng g^{-1} respectivamente) que en los líquenes (0.141 ng g^{-1} , 0.353 ng g^{-1} , 7.76 ng g^{-1} y 0.236 ng g^{-1} respectivamente), mientras que la especie de angiosperma utilizada obtuvo rangos similares al musgo. Lo anterior supone que los procesos biogeoquímicos específicos de cada especie influyen en el transporte, exposición y absorción de los contaminantes.

En la concentración de los contaminantes mediante bioindicadores, También se investiga la dispersión de los mismos en un área de estudio específica, para ello se utilizan los modelos de dispersión atmosférica, los cuales, son una representación matemática de los procesos de transporte y difusión que se presentan en la atmósfera.

En este contexto los modelos de dispersión son un medio para identificar y en su caso pronosticar a que grado afectarían ciertos contaminantes atmosféricos emitidos por una fuente o un grupo de fuentes, a la calidad del aire a diferentes distancias de la fuente.

En la década de 70's, el manejo de los modelos de dispersión, involucraba por lo general el uso de soluciones estándar que permitían obtener concentraciones relativas para diferentes condiciones de mezclado atmosférico y de distancia de la fuente emisora. Sin embargo, el desarrollo y uso generalizado de las computadoras personales posterior a 1980 ha permitido la utilización de modelos de dispersión más versátiles y más exactos, que anteriormente resultaban difíciles de aplicar por los requerimientos de esfuerzo y tiempo que eran necesarios para su solución (EPA, 1983).

Entre los modelos más utilizados para la determinación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera se encuentran los siguientes programas, SCREEN, el cual es de tipo preliminar, y los de tipo detallado como el programa ISCT3 (Industrial Source Complex), y los programas CALINE (California Line Model), AERMOD (AMS/EPA Regulatory *Model*) y CALPUFF (California Puff Model).

Actualmente se ha incrementado la utilización de los programas de dispersión de contaminantes atmosféricos. Ejemplo de ello, es el uso del programa MM5, utilizado para evaluar el impacto en la calidad del aire por el uso de incineradores en el norte de España (San José et al., 2008) y la evaluación de la calidad del aire en América del norte (Ferreira et al., 2011). Cabe mencionar que el programa MM5 permite utilizar resoluciones de hasta 12 km², las cuales, para el caso de los artículos mencionados fue de 40 x 40 km² y 24 x 24 km² respectivamente.

Otro programa utilizado ampliamente es el WRF (Weather Research and Forecasting)., este programa se utiliza en simulaciones a mesoescala, con resoluciones de hasta 3 km², en estudios que incluyen análisis de sensibilidad atmosférica (Borge, 2008), comparación entre mediciones de concentraciones de contaminantes (Zhang, 2009), sensibilidad de concentraciones de contaminantes a diferentes horas del día y en diferentes estaciones del año (Zhang, 2010), en la modelación de aerosoles orgánicos e incluso en la dispersión de arsénico (Jiang, 2012).

La mayoría de los programas utilizados en la actualidad incluyen los mecanismos de dispersión de los contaminantes más representativos, por lo que la utilización de un programa en particular depende de los alcances de la investigación, la escala a la cual se desea modelar y la resolución que se puede alcanzar.

III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

III.1 Ubicación Geográfica

El estado de Querétaro se localiza en la región central de la República Mexicana. Está comprendido entre los paralelos $20^{\circ} 01' 02''$ y $21^{\circ} 37' 17''$ de latitud norte y los meridianos $99^{\circ} 03' 23''$ y $100^{\circ} 34' 01''$ de longitud oeste, en relación con el Meridiano de Greenwich. Limita al norte y noroeste con el estado de San Luis Potosí, al este con el estado de Hidalgo, al sur con el estado de Michoacán, al sureste con el estado de México y al oeste con el estado de Guanajuato. La superficie del estado es de $11,769 \text{ km}^2$ con una elevación promedio de $1,813 \text{ msnm}$. El municipio de Santiago de Querétaro se localiza al sureste del estado, comprendido entre los $20^{\circ} 30'$ a $20^{\circ} 56'$ de latitud norte y los $100^{\circ} 17'$ a $100^{\circ} 36'$ de longitud oeste, con una extensión territorial de 690 km^2 . Colinda al este con el municipio de El Marqués, al sur con el municipio de Huimilpan y con el municipio de Corregidora, al oeste con los municipios guanajuatenses de Apaseo el Grande y San Miguel de Allende, y al norte con el de San José Iturbide.

A continuación se presenta la zona de estudio que comprende la zona metropolitana de la ciudad.

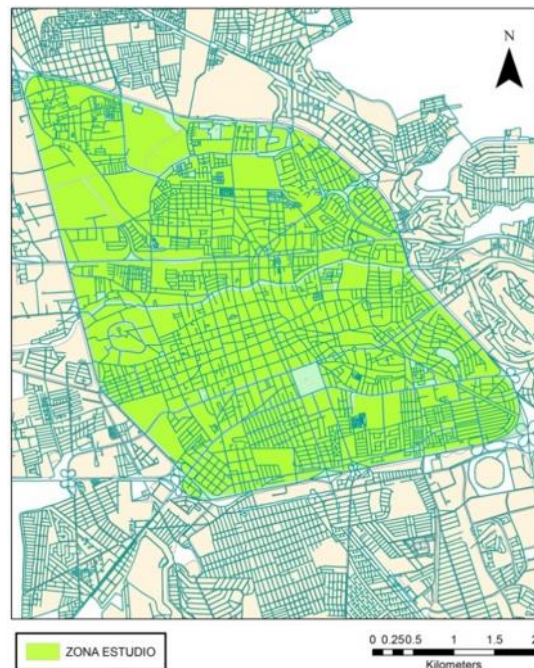


Figura III.1 Zona de Estudio

III.2 Problemática en la ciudad.

La ubicación geográfica del estado de Querétaro y en particular de la ciudad de Santiago de Querétaro, su capital, hace que la ciudad tenga una participación creciente en el desarrollo nacional por ser un corredor industrial entre las ciudades más importantes que son México, Monterrey y Guadalajara; Además el crecimiento poblacional en el estado es uno de los más representativos pues ocupa el tercer lugar a nivel nacional, esto se debe a que el promedio de crecimiento fue de 2.7% en los últimos 10 años. Tan solo la ciudad de Querétaro, alberga el 43.9% de la población total del estado, alrededor de 801,883 habitantes (SEDESU, 2011), lo que representa aproximadamente un 1.63% del total del país (INEGI, 2010); lo que conlleva la concentración de industrias, transporte público y privado, consumo energético y otras actividades que resultan en grandes emisiones de contaminantes.

La principal causa de la contaminación del aire se puede atribuir al parque vehicular, tanto al local como al de paso, ya que este sector emite aproximadamente el 75% de los contaminantes. En Querétaro, las fuentes móviles han aumentado de manera importante en los últimos años, tanto las registradas en el Estado, como los vehículos no registrados. El incremento vehicular en el estado de Querétaro en el periodo 1998-2003 fue de 124,949 vehículos registrados en circulación (INEGI, 2003), este incremento representa una TCMA (Tasa de crecimiento medio anual) del 10.2%. Para el 2010 la cantidad de vehículos registrados era de 304,062 (INEGI, 2010). Mientras que en el municipio de Querétaro en el mismo periodo, el incremento fue de 64,037 vehículos, este incremento representa una TCMA del 8%, siendo la cantidad de vehículos de aproximadamente 195, 515 para el año 2010 (INEGI, 2010). La tasa de motorización para el municipio de Querétaro en el año 2000 fue de 242 vehículos por cada 1,000 habitantes, mientras que para el 2003 fue de 284, este incremento representa un TCMA del 5.5% (PNUMA *et al.*, 2008).

Otro rubro importante de contaminación es el derivado de las fuentes fijas. El sector industrial es el segundo generador más importante de contaminantes a la atmósfera en la entidad, con un 15% del total.

En la Zona Metropolitana de la Ciudad de Querétaro se encuentran ubicados 8 parques industriales (figura III.2) que de acuerdo al censo de 1998, albergan a 3,980 asentamientos fabriles de distintos giros y diferentes tamaños (SEDESU, 2004). De acuerdo con el censo de 1993 (INEGI, 1994), el número de empresas era de 2,874., lo que significa que para el año 2000 hubo un incremento de 38%. Estas plantas

industriales, junto con más de 30,000 establecimientos de todo tipo de servicios, constituyen una fuente de contaminación atmosférica importante.

Si se considera que las industrias contribuyen con un 15% de la contaminación atmosférica y las fuentes naturales con un 10%, la estimación de la contaminación emitida a la atmósfera por unas y otras en el período comprendido entre 1997 y 2004, ha fluctuado entre 25,632 y 64,354 toneladas por año en el primer caso y entre 17,088 y 42,902 toneladas por año en el segundo. Un tipo de establecimiento fabril muy rudimentario es el de las ladrilleras, las cuales utilizan como combustible el combustóleo y la basura, que contiene una cantidad de productos como: bolsas de plástico, hule espuma, zapatos, llantas, aceites residuales de la industria, aceite automotriz, aserrín, leña, pedacería de madera, trapos, papel, cartón, residuos de curtiduría y excremento animal, por lo que emiten una gran cantidad de contaminantes (PNUMA *et al.*, 2008).

En la entidad existen más de 1,200 ladrilleras, algunas clandestinas y los municipios que más presentan este problema son Amealco, Tequisquiapan y Colón. En los municipios de la zona conurbada también existe un número importante (sobre todo en la zona de Santa Rosa Jáuregui) y estas podrían estar usando los mismos combustibles que en San Nicolás, Tequisquiapan, en donde se han encontrado concentraciones muy elevadas de bifenilospoliclorados.



Figura III.2 Parques Industriales, Santiago de Querétaro.
Fuente: SEDESU 2012

III.3 Justificación

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más preocupantes a los que se enfrenta la humanidad, siendo un aspecto crítico en determinadas zonas que presentan una mayor tasa de crecimiento tanto industrial como humano (Calvo, 2008).

En México se miden y norman los siguientes contaminantes atmosféricos: bióxido de Azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros de diámetro (PM10) y plomo (Pb). Para cada uno de estos contaminantes se cuenta con un estándar o norma de calidad del aire. Las normas de calidad del aire establecen las concentraciones máximas deseables de contaminantes en el ambiente que no debieran sobrepasarse más de una vez por año, para que pueda garantizarse que se protege adecuadamente la salud de la población, inclusive la de los grupos más susceptibles como los niños, los ancianos y las personas con enfermedades respiratorias crónicas, entre otros (Gutiérrez, 2005).

El análisis isotópico en la región de Querétaro se ha utilizado principalmente para estudios hidrogeoquímicos (CONCYTEQ, 2006), y estudios geohidrológicos (Carrillo, 2011). Los estudios realizados sobre contaminación ambiental se basan en métodos clásicos de muestreo y determinación de contaminantes, así mismo se han realizado inventarios de emisiones, tal como el inventario de emisiones de carreteras federales de Querétaro (IMT, 2010). Sin embargo no se han realizado estudios utilizando técnicas isotópicas mediante bioindicadores para la medición de ciertos contaminantes.

Las plantas epífitas (*Tillandsia Recurvata*) son indicadores sensibles de la contaminación ambiental y útiles en la determinación de concentración de contaminantes por métodos de laboratorio. En esta investigación se pretende aplicar un método de laboratorio mediante la utilización de isotopía ¹³C y ¹⁵N, para caracterizar el grado de contaminación en la atmósfera a través del uso de muestras de *Tillandsia Recurvata* estableciendo la relación entre las partículas de contaminantes atmosféricos, velocidad y dirección del viento.

IV. MARCO TEÓRICO

IV.1 Musgo (*Tillandsia recurvata*)

La *Tillandsia recurvata* es una planta epífita de 8 cm de radio, agrupada por lo general en varias masas esféricas con un sistema rudimentario de raíces (Madison, 1977). Suele colonizar árboles y cables telefónicos. Es una especie de lento crecimiento que posee tricomas foliares higroscópicos que le permiten condensar la humedad del viento, lo que le da una extraordinaria capacidad para obtener agua y así absorber nutrimentos de la atmósfera (Rzedowski, 1981; Aspiazu *et al.*, 2007). No ataca el sistema vascular de sus forofitos, sólo los utiliza como soporte y tiene fotosíntesis tipo C3 (Smith *et al.*, 1986). Las semillas son fusiformes, muy pequeñas y poseen vellos blancos y sedosos que le facilitan su adherencia a cualquier superficie (Miranda y Hernández, 1963).

Dependiendo de su habilidad para compensar fluctuaciones pequeñas en el suministro de agua y el índice de evaporación, las plantas terrestres se clasifican como poiquilohídricas u homoidricas. Los musgos son organismos poiquilohídricos. Esto significa que son incapaces de mantener su contenido de agua constante por lo que este depende de la humedad del medio ambiente. Cuando el ambiente está húmedo absorben el agua, pero cuando alrededor está seco, la pierden por evaporación entrando en estado de dormancia (en pausa), hasta que la humedad del entorno aumente. Estos organismos tienen pequeñas células que carecen de vacuolas centrales, cuando se secan, estas células se encogen de manera uniforme, sin perturbación de la estructura protoplásmica, por lo que las células permanecen viables. Cuando el contenido de agua disminuye, las funciones vitales son gradualmente suprimidas. Al disponerse de nuevo de suficiente agua, tales plantas, regresan a su actividad metabólica normal.

Las plantas epífitas tienen la ventaja de colonizar el dosel de árboles y arbustos sin la necesidad de invertir recursos en la producción de sistemas vasculares complejos (Madison, 1977; Smith *et al.*, 1986; Benzing, 1990; Reyes-García, 2001) y en algunas ocasiones, no establecen relaciones metabólicas con el forofito (Lüttge, 1989; Richards, 1995); sin embargo, han sido llamadas parásitas de espacio debido a que compiten con el hospedero por la luz (Valdivia, 1977; Lüttge, 1989; Richards, 1995). En contraparte, algunas veces son consideradas como comensalistas, excepto cuando modifican significativamente la morfología del forofito y además le ocasionan daños físicos (Benzing, 1990).



Figura IV.1 *Tillandsia Recurvata*

Por ejemplo, Stevens (1987) indica que las lianas son parásitos estructurales de los árboles femeninos de *Bursera simaruba* (L.) Sarg. Las lianas para crecer necesitan estar en contacto físico con el forofito pero no extraen agua ni nutrimentos de su sistema vascular y sin embargo, su presencia reduce la producción de frutos del forofito.

Las plantas epífitas, son eficientes como biomonitores de la contaminación del aire debido que obtienen sus nutrientes de la atmósfera sin tener contacto con el suelo. Por lo tanto, la composición elemental de sus tejidos y su respuesta fisiológica reflejan la entrada a la atmósfera de contaminantes tales como los gases tóxicos y los metales pesados (Figuereido *et al.*, 2001).

IV.2 Isotopía del carbono 13, ^{13}C y nitrógeno 15, ^{15}N .

IV.2.1 Fraccionamiento isotópico

Un mismo elemento (definido por su número atómico) puede tener diferente número de neutrones, y por tanto diferente peso atómico. Los átomos con el mismo número atómico pero con diferente peso atómico se denominan isótopos (igual lugar). Los átomos de carbono tienen generalmente 6 protones y 6 neutrones, y por tanto un peso atómico de 12. Pero hay átomos de carbono con peso atómico 13, isótopo estable y pesado, o con peso atómico 14, isótopo inestable o radiactivo, ya que emite radiactividad a medida que se transforma en un elemento estable. Una cosa similar ocurre con el hidrógeno: existe el hidrógeno normal, el deuterio (pesado y estable, con un neutrón), y el tritio (radiactivo e inestable, con dos neutrones).

Las moléculas que componen las sustancias están compuestas por átomos. La mayor parte de las moléculas tienen átomos normales, pero algunas, menos frecuentes, tienen átomos pesados. Así, por ejemplo, la mayor parte de las moléculas de CO₂ del aire pesan 44 (12+16+16), pero una minoría pesan 45 (13+16+16), porque tienen carbono pesado. Los organismos fotoliotótrofos y quimioliotótrofos fijan CO₂ para formar materia viva. La materia viva tiene carbono, que en su mayor parte es ¹²C, pero también hay átomos ¹³C (y, por supuesto, también ¹⁴C). Como el ¹³C es estable, esta cantidad no va disminuyendo a partir de la muerte del organismo, como ocurre con la cantidad de ¹⁴C, que se va desintegrando. Sorprendentemente, la cantidad o proporción de ¹³C (respecto al ¹²C) en la materia viva es menor que la que existe en el material de partida, en este caso el CO₂ del aire. No se sabe el mecanismo molecular último, pero las enzimas de los seres vivos discriminan negativamente las moléculas de CO₂ que tienen el isótopo pesado, y escogen preferentemente las que tienen el isótopo normal. Y lo mismo ocurre en el caso de las moléculas con oxígeno (donde escogen el ¹⁶O, y no el ¹⁸O), con nitrógeno (donde prefieren el ¹⁴N, y no el ¹⁵N), o con azufre (donde eligen mayormente el ³²S, y no el ³⁴S). Nadie sabe la causa pero el efecto es que la materia viva discrimina en contra de las moléculas que tienen isótopos pesados.

Midiendo la cantidad de ¹⁴C de un resto orgánico se puede saber su edad, es decir, el tiempo que hace que dejó de incorporar nuevo ¹⁴C; que murió. Midiendo la cantidad de isótopos estables en una sustancia no se puede saber su edad pero sí si es de origen biológico. La materia viva prefiere las moléculas con isótopos ligeros e incorpora menos de los pesados que están a su disposición en el material de partida. Y además, lo hace diferencialmente. Las distintas vías metabólicas (que tienen enzimas distintas) producen moléculas con diferente disminución de isótopos pesados. Viendo la proporción de éstos en un producto biológico puede deducirse las posibles vías metabólicas que lo han originado. La discriminación isotópica de un elemento se indica por la letra delta minúscula (δ). Para hacer comparables las frecuencias obtenidas en distintas muestras, los resultados se refieren a un valor estándar, un material que se toma como referencia del valor del isótopo pesado con respecto al ligero. Además, para facilitar la expresión de los resultados, los números resultantes se multiplican por mil, por ejemplo 0,004 ó 0,040 se escribirían así 4^{0/00} y 40^{0/00}. Así, la discriminación de un isótopo pesado, ^AX, en partes por mil ($\delta^{0/00}$), es:

$$\delta^{0/00} \text{ } ^A\text{X} = \{[R_m - R_{st}] / R_{st}\} \times 1000 \quad (\text{IV.1})$$

Donde R es la cantidad de isótopo pesado dividida por la cantidad del ligero, tanto en la muestra, (m), como en el estándar, (st). Es evidente que si los organismos discriminan contra el isótopo pesado, los valores de $\delta^{0/00}$ de la materia viva serán negativos. Los principales elementos de interés para el fraccionamiento isotópico son el carbono, azufre, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno. Los respectivos estándares son: para el C, el PDB (PeeDeeBelemnite); para el S, el CDM; para el N, el aire; para el O y el H, el SMOW. La medición de la cantidad de los distintos isótopos se lleva a cabo mediante el espectrómetro de masas.

Los valores de isótopos ^{13}C referidos en $^{0/00}$ (para abreviar, $\delta^{13}\text{C}$) se calculan respecto al estándar PDB (PeeDeeBelemnite), que corresponde a un fósil marino del Cretácico (*Belemnitella americana*) de la formación PeeDee en Carolina del Sur, EE. UU. Dado que la fijación biológica de CO_2 discrimina contra ^{13}C , los valores $\delta^{13}\text{C}$ del material celular biosintetizado son más negativos que el sustrato de carbono utilizado, generalmente, CO_2 atmosférico o carbonato marino. Los principales pasos de discriminación isotópica en la incorporación biológica del carbono son: (I) la captación y difusión intracelular del CO_2 , y (II) la fijación fotosintética del CO_2 .

Se conocen tres vías fotosintéticas principales: el ciclo de Calvin-Benson o C3, el ciclo de Hatch-Slack, o C4, y el ciclo CAM (*Crassulaceanacidmetabolism*). La vía C3 opera en aproximadamente el 85% de las plantas y domina los ecosistemas terrestres. Las plantas C3 fijan el CO_2 con la enzima rubisco (ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa oxigenasa). Sin embargo, ésta también puede admitir oxígeno como sustrato alternativo del CO_2 , proceso que se denomina fotorrespiración, que disminuye el rendimiento fotosintético. Parece ser que esta dualidad enzimática es resultado de un artefacto evolutivo, ya que en la atmósfera no había apenas oxígeno y en consecuencia, la fotosíntesis de los primeros organismos no estaba disminuida por la fotorrespiración. Fue precisamente la acción de los organismos fotosintéticos la que determinó un aumento de la concentración de O_2 en la atmósfera. Pero lo que en principio no era un problema, significó una disminución sustancial de la eficacia fotosintética. El desarrollo de las plantas con fotosíntesis C4, que se expandieron rápidamente a finales del Mioceno (aproximadamente entre 8 a 4 millones de años) les permitió ciertas ventajas selectivas, al menos en zonas de elevada temperatura y secas, e incluso a veces en ambientes salinos. Las C4 representan menos del 5 % de las fanerógamas. Las plantas C4 tienen un paso inicial en la fijación donde el fosfoenol piruvato (PEP) aporta más carbono a la rubisco para la fijación de CO_2 . La mayoría de plantas C3 tienen valores de ^{13}C entre -24 a -30 $^{0/00}$. La PEP carboxilasa discrimina menos que la rubisco, de tal manera que, en plantas C4, los valores de ^{13}C se

sitúan entre -10 y -16 ‰. Estas diferencias de composición isotópica sirven para saber si una planta tiene fotosíntesis C4 o C3. Y aparte del interés académico, dicho resultado permite distinguir, por ejemplo, el azúcar de caña (planta C4) del azúcar de remolacha (planta C3), lo que puede tener valor económico. Finalmente, la fotosíntesis CAM domina en los ecosistemas desérticos, con plantas tales como los cactus. Tienen la capacidad de cambiar de una fotosíntesis C3 durante el día a otra C4 durante la noche. El fraccionamiento isotópico es intermedio entre las plantas C3 y las C4.

Las plantas y algas, cianobacterias, bacterias rojas del azufre y bacterias rojas no del azufre (y la mayor parte de las bacterias quimiolitótrofas), fijan CO_2 mediante el ciclo de Calvin-Benson. Por el contrario, las bacterias verdes (y algunas bacterias quimiolitótrofas) lo hacen mediante el ciclo del ácido carboxílico reductivo (ciclo de Arnon, anabólico), posiblemente el precursor anaeróbico del ciclo de Krebs (oxidativo y catabólico). Hay que destacar la diferencia entre el fraccionamiento isotópico de las cianobacterias cultivadas y las naturales. Análisis detallados han mostrado que muchos tapetes microbianos (en cuya capa superior dominan las cianobacterias) actuales están enriquecidos con carbono pesado. Este hecho, sin embargo, no se debe a una vía especial de asimilación fotótrofa, sino al resultado de una baja concentración de CO_2 en el ambiente, característica de los hábitats hipersalinos, ya que las cianobacterias cultivadas, no sujetas a estas restricciones ambientales, presentan valores de ^{13}C compatibles con los obtenidos mediante la vía C3. No cabe duda de que la eliminación de la barrera de difusión por aumento en la presión ambiental de CO_2 , situación que pudo darse en la atmósfera Precámbrica (estudio de los valores ^{13}C de los estromatolitos), podría restablecer instantáneamente la carboxilación enzimática de la vía fotosintética como principal paso de discriminación del fraccionamiento isotópico.

IV.2.2 Espectrometría de masas para los isótopos estables

Un espectrómetro de masas es capaz de separar átomos o incluso iones con diferente masa y medir sus abundancias relativas. En la Fig. IV.2A se muestra este principio, donde el gas que contiene diferentes isótopos de un mismo elemento (por ejemplo, ^{12}C y ^{13}C en CO_2), se ioniza en la fuente de iones. Los iones positivos son acelerados por una diferencia de potencial elevada y por consiguiente se ven arrastrados hasta un campo magnético que es perpendicular al campo eléctrico (en la fig. IV.2A el campo magnético es perpendicular al plano del papel). A partir de este momento, el camino que siguen los iones se vuelve circular como consecuencia de la fuerza de Lorentz (Fig. IV.2B). El radio de la circunferencia depende de la masa del ión: los iones con mayor masa describirán

círculos más grandes. De esta manera, los diferentes iones isotópicos se separan y se pueden recoger en colectores. En tales colectores los iones pierden su carga eléctrica, causando así pequeñas corrientes cuantificables (Fig. IV.3).

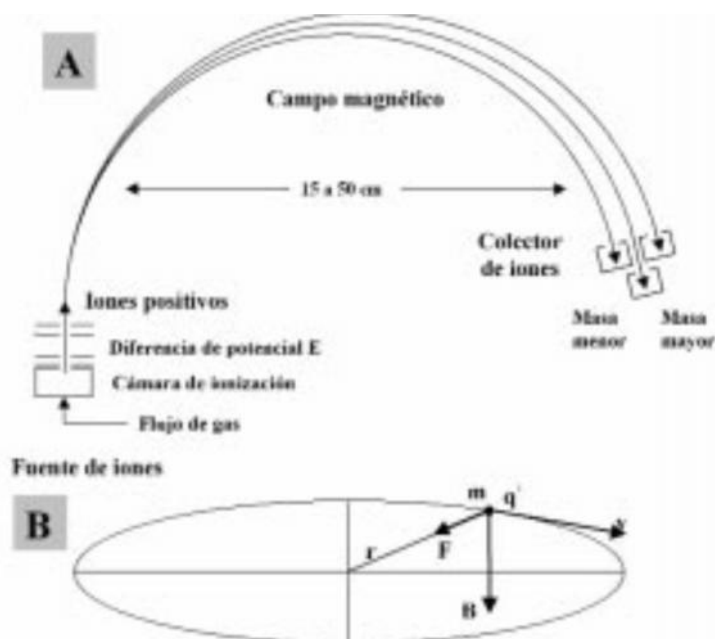


Figura IV.2 Esquema de la separación iónica en un espectrómetro de masas.

De la figura anterior.

A. El gas que contiene moléculas isotópicas entra en el productor de iones y se ioniza mediante un bombardeo de electrones. Los iones positivos salen de la cámara de ionización y sufren una aceleración causada por la diferencia de potencial E que hay en la fuente de iones. Los isótopos ligeros y pesados se separan gracias a la existencia de un campo magnético perpendicular al plano del papel y posteriormente se recogen en el colector. Esto genera unas corrientes eléctricas que se pueden medir con bastante precisión.

B. Representación de la fuerza de Lorentz: una partícula con una carga positiva $q+$ y una masa m se mueve con una velocidad v en un campo magnético B perpendicular a la superficie plana de desplazamiento; la fuerza de Lorentz F resultante es perpendicular a B y v , y hace que la partícula describa un círculo de radio r .

La magnitud de la fuerza de Lorentz F es:

$$\vec{F} = \vec{b} \times q \times \vec{v} \tag{IV.2}$$

Esta fuerza es igual a la fuerza centrípeta que se requiere para mantener a la partícula en su movimiento circular:

$$F = \frac{mv^2}{r} = Bqv \quad (\text{IV.3})$$

La velocidad de la partícula se debe a la aceleración provocada por la diferencia de potencial en la fuente de iones (Fig. IV.2B):

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = qV \quad (\text{IV.4})$$

De la Ec. IV.3 y IV.4 se obtiene el radio del círculo que describen los diferentes isótopos:

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{q}} = \left(\frac{\sqrt{2V/q}}{B} \right) \sqrt{m} \quad (\text{IV.5})$$

donde q es igual a la carga del electrón = $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$, y B y V dependen de las condiciones establecidas en la instrumentación. Durante una medida la diferencia de potencial y el campo magnético se mantienen invariables, de tal manera que el radio sea proporcional a la raíz cuadrada de la masa del ión: $r \sim m^{1/2}$. Si se deriva (con la aproximación de dr/dm igual a Dr/Dm) se obtiene:

$$\frac{\Delta r/r}{\Delta m/m} = \left(\frac{\sqrt{2V/q}}{B} \right) y m/\Delta m = \left(\frac{\sqrt{2V/q}}{B} \right) r/\Delta r \quad (\text{IV.6})$$

La última expresión proporciona una posible medida de la resolución del espectrómetro de masas: para $Dm = 1$, m será la resolución del instrumento cuando Dr sea tan grande como para permitir una clara distinción entre los picos de las masas m y $m+1$ que aparecen en el espectro de masas.

Los Espectrómetros de Masas de Relación Isotópica, EMRI (Isotope Ratio Mass Spectrometers IRMS) tienen una resolución típicamente baja (del orden de 100), en contraposición de los espectrómetros de masa "orgánicos" que poseen unas resoluciones superiores a 10^4 . No obstante, estos últimos tienen una sensibilidad inferior, lo que les convierte en métodos no adecuados para medir la relación isotópica.

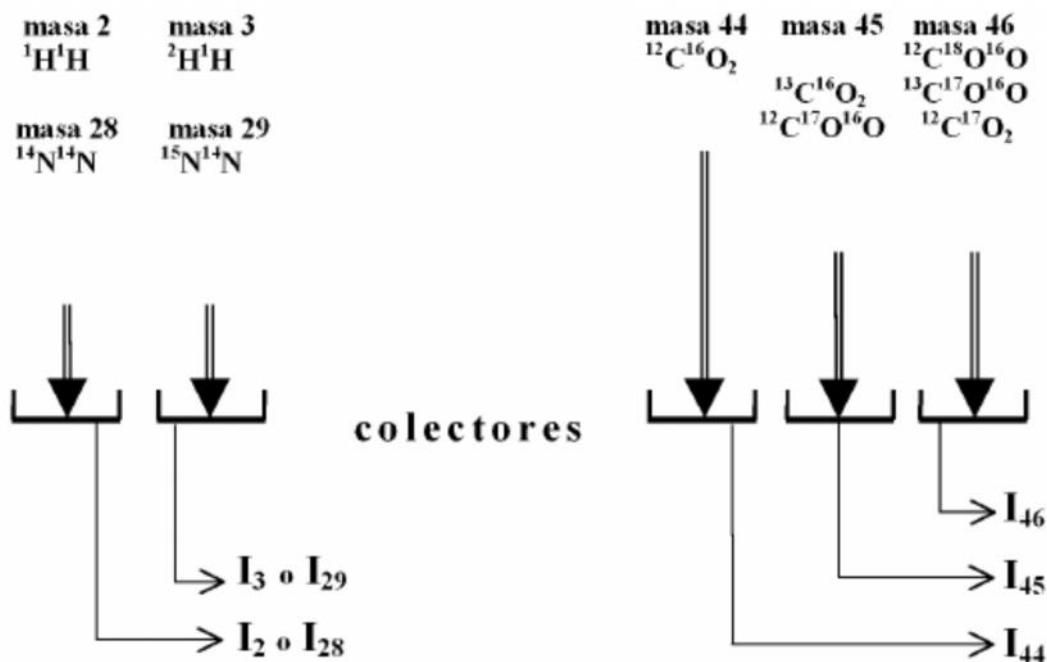


Figura IV.3 En el colector (caja de Faraday) se focalizan, respectivamente, los diferentes iones isotópicos del hidrógeno y del dióxido de carbono. Estos recogen las cargas eléctricas (los iones positivos atraen a los electrones) generando corrientes eléctricas para las diferentes moléculas isotópicas. A partir de las razones de las mismas se pueden deducir las relaciones isotópicas del H_2 o el N_2 (izquierda) y el CO_2 (derecha).

IV.3 Aspectos generales de los metales pesados

IV.3.1 Propiedades físicas y químicas de los metales pesados

IV.3.1.1 Propiedades físicas

Un metal se conoce por su habilidad para conducir calor y electricidad. Están agrupados en la tabla periódica de los elementos, los que tienen de 1 a 3 electrones de valencia, siendo sus átomos poco electronegativos y teniendo una baja energía de ionización. Los metales tienen ciertas propiedades físicas: pueden ser brillantes, tener alta densidad, ser dúctiles y maleables, tener un punto de fusión alto, ser duros y ser buenos conductores del calor y electricidad.

Los metales pueden formar aleaciones entre sí y se clasifican en:

Ultraligeros: Densidad en g/cm^3 , inferior a 2, los más comunes son el magnesio y berilio.

Ligeros: Densidad en g/cm^3 , de 2 a 4.5, los más comunes de este tipo son el aluminio y el titanio.

Pesados: Densidad en g/cm^3 , mayor a 5.0, son la mayoría de los metales.

Pearson (1973), clasificó a los metales de acuerdo al principio de ácidos fuertes o débiles. Según la denominación de ácidos fuertes, son moléculas pequeñas que tienen carga positiva y un par de electrones no compartidos en su valencia; esto resulta en una alta electronegatividad y baja polarización, que hace que el agua sea más fuertemente atraída a estos ácidos.

Nieboer y Richardson (1980), propusieron otro sistema de clasificación, esta se basa en la constante de equilibrio, que describe la formación del complejo entre el ión metálico y el ligando. Los metales se separaron en tres categorías, clase A, clase B y los iones en la frontera. La clase A tiene la siguiente secuencia para ligarse con $\text{F} > \text{Cl} > \text{Br} > \text{I}$; para metales que se unen donando electrones en ligandos con: $\text{O} > \text{S} > \text{Se} > \text{N} > \text{As}$. La clase B tiene preferencia por: $\text{O} > \text{N} > \text{S}$. Los elementos en la frontera forman un grupo intermedio y se ligan a cualquiera de estos ligandos sin ninguna preferencia de secuencia.

IV.3.1.2 Propiedades químicas

Los metales son especialmente importantes debido a su característica de acumulación en los organismos. Muchos metales se llaman “pesados” debido a que su densidad es mayor a 5 g/cm^3 , o cuyo número atómico es superior a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-terreos. Como su presencia en la corteza terrestre es inferior a 0.1% y casi siempre menor del 0.01%, también se les conoce como metales traza (Scheiner *et al.*, 1989).

Desde el punto de vista químico, los metales pesados están constituidos por elementos de transición y post-transición, incluyendo algunos metaloides como el arsénico y selenio. Estos elementos tienen una gravedad específica significativamente superior a la del sodio, calcio y otros metales ligeros. Por otro lado, estos elementos se presentan en diferentes grados de oxidación en agua, aire y suelo y presentan diversos grados de reactividad,

carga iónica y solubilidad en agua. Una forma opcional de nombrar a este grupo, es “elementos tóxicos”, de acuerdo a la lista de contaminantes tóxicos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA, 1993).

Los metales considerados tóxicos por la Asociación Oficial de Control de Alimentos de los Estados Unidos (por sus siglas en inglés AAFCO, 1996) son: aluminio (Al), arsénico (As), cadmio (Cd), cromo hexavalente (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (V) y zinc (Zn). Los elementos que pierden electrones fácilmente para formar iones positivos, es otra forma de denominar a los metales. La mayoría de los metales forman la porción catiónica de las sales que contienen aniones portadores de oxígeno, tales como los nitratos (NO_3) y los sulfatos (SO_4^{2-}), formando al menos un óxido, con características básicas moderadamente fuertes. Esta última, no es una norma general, debido a la solubilidad limitada de algunos óxidos e hidróxidos.

La solubilidad de los iones metálicos aumenta por la presencia de “agentes quelantes o secuestradores”. La molécula quelante forma un anillo, en el que el ión metálico se sostiene por su fuerza de atracción entre átomos, de modo que el ión no se separa para formar una sal insoluble. La fuerza de atracción de la molécula está formada por átomos, que generalmente son átomos de nitrógeno, oxígeno y azufre, cada uno de los cuales dona dos electrones para formar un enlace “coordinado” con el ión (Tucker, 1991). La quelatación permite que el ión metálico central se pueda unir a más de un sitio, dando como resultado compuestos con propiedades químicas diferentes a las del metal original (Adriano, 1992; Facchinelli, 2000). El material orgánico natural presente en el agua, como las sustancias húmicas, pueden secuestrar a los metales y definir su destino final y transporte en el ambiente.

IV.3.2 Fuentes de emisión de los metales

IV.3.2.1 Fuentes antropogénicas

Los metales se asocian frecuentemente a fuentes de origen antropogénico, la contribución antropogénica de metales tóxicos a la atmósfera, puede derivarse de procesos industriales de forma directa o indirecta, debido a las actividades humanas. El problema de la contaminación por metales tóxicos, lo originan diversos factores, entre ellos la cantidad y la variedad de las fuentes que los emiten. La presencia en la atmósfera de elementos como arsénico (As), manganeso (Mn), mercurio (Hg) y selenio (Se), provienen en su mayoría, de fuentes naturales; sin embargo, en el plano regional, las fuentes

antropogénicas pueden contribuir de manera importante a las emisiones de metales pesados a escala local (Wiersman y Davidson, 1986; Wood y Goldberg, 1998; Tucker, 1991; Kabatas-Pendias y Pendias H, 1992;).

Un ejemplo de ello, es como los metales llegan a los cuerpos de agua a través de la descarga de diversos efluentes. Entre los efluentes principales se encuentran los de la extracción minera, refinamiento de productos mineros o por la liberación al ambiente de corrosiones, tanto industriales como vehiculares. La inadecuada disposición de residuos metálicos, surgida de procesos industriales, tales como la industria metalúrgica y la industria química, ocasionan la contaminación de los suelos, agua superficial y subterránea. Una gran variedad de aguas residuales contienen metales pesados en solución, a menudo estas aguas se descargan en el sistema de alcantarillado municipal y federal (Nriagu y Pacyna, 1998; Durán de Bazúa, 1994; Díaz-Báez *et al.*, 2000). Las emisiones de metales pesados que se atribuyen a las actividades humanas o fuentes antropogénicas se presentan en la Tabla IV.1 y se clasifican en cuatro categorías: combustión de combustibles y procesos industriales, emisiones de partículas fugitivas de procesos industriales, fuentes fugitivas no industriales (polvos provenientes de calles pavimentadas y sin pavimentar, erosión eólica de áreas agrícolas, etc) y fuentes móviles (autos, camiones, etc.)(Migliavacca *et al.*, 2005).

Fuente	Emisiones estimadas (Tg/año)
Combustión de combustibles y procesos industriales.	15
Emisiones de partículas fugitivas de procesos industriales.	5.3
Fuentes fugitivas no industriales.	115 – 470
Fuentes móviles.	2.5
Total	138 – 470

Tabla IV.1 Emisiones de contaminantes atmosféricos en los Estados Unidos. Valores tomados de Migliavacca *et al.*, 2005.

La industrialización y la emigración de zonas rurales a centros urbanos, han dado lugar a un aumento en la contaminación atmosférica de los núcleos urbanos, además de haberse centralizado las necesidades energéticas. Sin embargo, la concentración de contaminantes no suele permanecer localizada, sino que con frecuencia se difunde e incluso atraviesa fronteras nacionales o continentales.

IV.3.2.2 Fuentes naturales

Las emisiones de metales por fuentes naturales, provienen fundamentalmente de los volcanes, las tormentas de arena en los desiertos, las tolvaneras en lugares propensos a la erosión, evaporación de aguas de superficies naturales, incendios forestales de bosques que emiten ciertas cantidades de metales, descomposición de la materia orgánica en el suelo debida a la acción de las bacterias. Por ejemplo el aluminio es el elemento más abundante en suelos y si bien está unido a los minerales que lo constituyen, la acidez de la precipitación pluvial, favorece en gran parte la solubilidad de Al y su incorporación a la atmósfera (Cyrus *et al.*, 2003; Chandra *et al.*, 2006).

Para estimar las emisiones de metales generados por los incendios forestales, es necesario conocer los aspectos fundamentales en este proceso: el tipo y carga de combustible. Los incendios forestales son fuentes potenciales de contaminantes atmosféricos, que deben ser considerados al intentar correlacionar las emisiones con la calidad del aire. El tamaño e intensidad de un incendio forestal depende directamente de variables como: tipos de vegetación, grado de humedad y tipo de suelo (Danecker, W. y Schroder, B. 1990; Turner y Baker, 1998; Sosa *et al.*, 2004). En la Tabla IV.2 se muestran las emisiones estimadas de metales generadas por fuentes naturales.

Fuente	Emisiones estimadas (Tg/año)
Polvos	50 – 250
Incendios forestales	1 – 50
Sal marina	300
Emisiones volcánicas	25 – 150
Partículas formadas a partir de emisiones gaseosas (H ₂ S, NH ₃ , NO _x y HC)	345 – 1100
Total	721 – 1850

Tabla IV.2 Emisiones estimadas de metales generadas por fuentes naturales. Valores tomados de Migliavacca *et al.*, 2005.

Mientras las modificaciones geológicas y biológicas de las superficies terrestres han sido muy lentas, los cambios inducido y/o estimulados por actividades humanas se han acumulado con extensa rapidez en años recientes. Todos los cambios por actividades humanas perturban el equilibrio natural de cada ecosistema, formado a lo largo del tiempo mediante el cambio evolutivo. Estos cambios han conducido a un deterioro del ambiente natural, por ejemplo, el fomento de actividades agropecuarias ha transformado a ecosistemas en agro-ecosistemas artificiales. Aunque la influencia del hombre sobre la biósfera data del período neolítico, el problema del deterioro de los ecosistemas por contaminación, ha crecido a un ritmo alarmante los últimos veinte años.

IV.3.3 Caracterización de los metales en la precipitación pluvial

La concentración de contaminantes a nivel del suelo, varía como consecuencia del desequilibrio entre los índices de producción de contaminantes y los de dilución y dispersión de los mismos. Es decir, la concentración de contaminantes dependerá de la relación de fuerzas entre las fuentes contaminantes y las condiciones de autodepuración atmosférica (Lee *et al.*, 2000).

La contaminación por metales a la atmósfera será determinada por la diferencia entre los presentes en la naturaleza y los que se eliminan a través de los procesos de remoción

atmosférica, que incluyen la disolución, deposición, precipitación y erosión de los suelos. Estos procesos de incorporación a la atmósfera causan acumulación excesiva de metales traza en otros medios (vegetación, suelos, lagos, etc.), incluso lejos del punto de emisión del contaminante, como consecuencia del arrastre atmosférico producido por el viento. En las áreas en las que se dé una alta concentración de fuentes de emisión de metales, pueden producirse episodios de fuerte contaminación local, como consecuencia de la persistencia de situaciones meteorológicas adversas para la difusión de contaminantes. Estos episodios se manifiestan con grandes aumentos en la concentración de contaminantes en un área más o menos extensa, alrededor de focos contaminantes y pueden verse forzados por las condiciones topográficas de la zona o por la localización de barreras artificiales (edificios), que pueden favorecer la acumulación de contaminantes. En otros casos, los metales se incorporan a las masas de aire que forman las corrientes generales de vientos sobre la tierra, siendo arrastrados a muchos kilómetros de las fuentes de emisión.

IV.3.4 Biodisponibilidad de los metales pesados

Los metales pesados son considerados contaminantes tóxicos para los ecosistemas acuáticos y terrestres, debido a su persistencia y elevada toxicidad; los de mayor importancia toxicológica y ecotoxicológica son: As, Cd, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, V y Zn, ya que para la mayoría de los organismos, la exposición por encima de una concentración umbral puede ser perniciosa (Pain, D.J, 1995; Castañe et al., 2003). La captación y la toxicidad de los metales pesados están influenciadas no sólo por su concentración, sino también por el tiempo de exposición, por factores bióticos y abióticos del ambiente.

Es importante enfatizar que la acidez y alcalinidad de la lluvia, influyen sobre la incorporación de los metales en la precipitación pluvial, así como en la biodisponibilidad de éstos, en los suelos, debido al efecto buffer que caracteriza los mismos, por otro lado, las aguas en los lagos son siempre más ácidas que las aguas subterráneas, por la función del filtro que desempeña el suelo, removiendo así gran parte de los metales en medio ácido, siendo capaces de disolverse y estar presentes como compuestos de SO_4^{2-} , NO_3^- , óxidos etc., (Tucker, 1991; Turner *et al.*, 1998; Decesari *et al.*, 2000).

Hasta la fecha, se ha estudiado más la composición química de la precipitación pluvial que la del agua de nubes; como parte del problema de lluvia ácida, la deposición húmeda debe incluir la contribución del agua de niebla, al igual que la de la precipitación, las fracciones ácidas en niebla son más altas que las de los aerosoles, pero más bajas que

las de precipitación, es decir, los componentes traza varían de modo inverso al contenido de agua líquida y este incremento de la acidez relativo al contenido de agua líquida, puede atribuirse a las reacciones de oxidación en fase acuosa (Schemenauer, 1986). La acidez en la precipitación está determinada dinámicamente por la neutralización de compuestos ácidos (CO_2 , SO_2 , H_2SO_4 , HNO_3 , y HCOOH), impactando en la acidificación de suelos, provocando la liberación de metales tóxicos, como el aluminio (Al), mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), etc, y aumentando su concentración en el aire (García *et al.*, 2006)

IV.4 Modelo matemático

Un modelo matemático es un conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento de un determinado sistema físico – químico. Para resolver las expresiones que definen un modelo matemático se recurre a la modelización numérica, hablándose de modelo numérico cuando se implementan dichas expresiones en un entorno computacional que hoy en día implica el uso de un soporte informático.

Es importante poner de manifiesto la simplificación que se introduce a cada tipo de modelo. A partir de un estudio teórico se desarrollan las expresiones que describen el sistema físico-químico, siendo éstas, en medida variable, aproximaciones al propio fenómeno, ya que no siempre se tiene el conocimiento complejo del mismo. La resolución de dichas expresiones conduce usualmente, en casos complejos como es la física de la atmósfera, a realizar aproximaciones al no poder encontrar soluciones analíticas para las ecuaciones que se plantean. Asimismo al final se tiene una solución aproximada de la situación de estudio.

Los modelos regionales y de meso-escala son los que describen óptimamente fenómenos comprendidos entre la macro-escala y la micro-escala. No hay una clara división entre estos dos tipos, pero se puede considerar que un modelo regional trabaja con resoluciones de 50-150 km y los de meso-escala de 1-50 km. Los modelos regionales, meso-escalares y modelos de nubes se conocen también con el nombre de modelos de área limitada al centrarse en regiones específicas y poseer unos límites laterales bien establecidos, a diferencia de los modelos globales (Jorba, 2005).

IV.4.1 Ecuaciones básicas

La mayoría de modelos numéricos usan una formulación similar, al resolver las leyes fundamentales de la física atmosférica. Las ecuaciones básicas que rigen el comportamiento de la atmósfera son las que describen el comportamiento de un fluido newtoniano en un sistema de referencia de rotación, y por lo tanto, los principales fenómenos que se producen en él, como son su movimiento y los intercambios de energía entre distintos puntos del fluido (Calbó, 1993). Estos modelos son una representatividad computacional física y dinámica de la atmósfera y de la superficie terrestre. Así plantean un conjunto de principios de conservación que gobiernan el estado atmosférico, que se detallan a continuación respecto a un sistema de coordenadas cartesianas y con notación tensorial (se utiliza el convenio de Einstein para la suma: subíndices iguales indican suma respecto de ese índice)(Pielke, 1984; Calbó, 1993):

- Conservación de la masa:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (IV.7)$$

donde $x_i (i = 1,2,3)$ son las tres coordenadas espaciales

t el tiempo

u_i las tres componentes del vector viento

ρ densidad del aire

- Conservación del momento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j u_i = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] + \rho g_i - 2\rho \varepsilon_{ijk} \Omega_j u_k \quad (IV.8)$$

donde

μ es la viscosidad molecular del aire

g_i es el vector aceleración de la gravedad (0,0, -g)

Ω_j es el vector de la velocidad angular de la Tierra

δ_{ij} es la delta de Kronecher

ε_{ijk} es el tensor de Levi-Civita

- Conservación de la energía:

$$\delta c = \delta w_T + \delta u_e = \frac{S_c}{\rho} dt \quad (\text{IV.9})$$

donde

δc es el calor intercambiado en un proceso por unidad de masa de un cierto volumen de aire

δw_T es el trabajo por unidad de masa ejercido por el volumen de aire en este proceso

du_e es la variación de energía interna por unidad de masa del volumen de aire durante este proceso

S_c es el termino de fuentes y sumideros de energía por unidad de volumen y tiempo

- Ecuación de estado:

$$p = \rho r_d T_V \quad (\text{IV.10})$$

Donde

p es la presión atmosférica

r_d es la constante termodinámica del aire seco

T_V es la temperatura virtual del aire

- Conservación del vapor de agua, y del agua líquida y sólida:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho X + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j X = D_x \frac{\partial^2 \rho X}{\partial x_j^2} + S_x \quad (\text{IV.11})$$

donde

X es la relación de masa de un componente de la atmósfera (vapor de agua, agua líquida, hielo)

D_x es la difusividad molecular de este componente del aire

S_x es el termino de fuentes y sumideros adecuado a cada distancia (cambios de fase y precipitación)

La ecuación IV.8 resuelve la conservación del momento para las tres componentes del viento. Para simplificar la formulación y el tiempo de cálculo, algunos modelos asumen la hipótesis hidrostática, con lo que se sustituye la ecuación de pronóstico del momento vertical por la ecuación hidrostática que se muestra a continuación.

$$\frac{\partial z}{\partial p} = -\frac{R \cdot T}{p \cdot g} \quad (\text{IV.12})$$

La hipótesis hidrostática asume que las aceleraciones verticales del movimiento son despreciables. Obviamente, esta hipótesis no se cumplirá cuando los movimientos verticales y las aceleraciones verticales sean importantes. Esto se produce en terrenos abruptos y complejos o cuando se desarrollan convecciones fuertes. La hipótesis hidrostática es válida para escalas sinópticas y planetarias, y para algunos fenómenos mesoscales. Los modelos que se basan en esta simplificación se denominan hidrostáticos, y los que por el contrario resuelven la ecuación de conservación de momento. Para las tres componentes del viento explícitamente se denominan modelos no-hidrostaticos. Así, los modelos no-hidrostaticos se aplican en casos donde se necesita trabajar con elevadas resoluciones horizontales (desde decenas de metros a pocos kilómetros). La mayor complejidad en las ecuaciones planteadas hace que los modelos no-hidrostaticos necesiten unos recursos computacionales superiores a los modelos hidrostáticos, y que se haya tendido hasta hace poco a aplicarlos con una resolución vertical limitada.

IV.4.2 Sistemas de integración

Las leyes de la física atmosférica se desarrollan en una serie de expresiones matemáticas que son transformadas para implementarlas en un entorno informático. Debido a la

incapacidad de ser integradas analíticamente, la resolución de las mismas se debe hacer a partir de la aplicación de métodos numéricos como son:

- Diferencias finitas.
- Técnicas espectrales.
- Técnicas pseudo-espectrales.
- Elementos finitos.
- Esquemas de interpolación.

De todas estas técnicas, las más utilizadas son las diferencias finitas, elementos finitos y los esquemas de interpolación. Aunque las técnicas espectrales han demostrado ser muy precisas, su uso no se ha extendido debido a la complejidad de las expresiones con las que se tiene que trabajar. Las técnicas pseudo-espectrales son una opción viable que, sin embargo, no ha sido utilizada por los desarrolladores de modelos numéricos (Jorba, 2005).

El conjunto de leyes que describen los procesos físicos y dinámicos de la atmósfera tienen una naturaleza altamente no lineal. Esto se refiere a que hay una interacción entre los distintos procesos haciendo que la evolución de la atmósfera sea sensitiva a las condiciones iniciales, tratándose de un sistema energéticamente disipativo.

El sistema atmosférico por sus propiedades tiene un límite temporal en la predicción de la evolución atmosférica, o sea que el fenómeno descrito en la predicción sea representativa de la realidad.

Hay varios factores que limitan temporalmente la utilidad de una predicción meteorológica. Algunos de estos son:

- Cobertura y representatividad de los datos observados.
- Tamaño del dominio donde realizar una predicción.
- Sensibilidad específica de la atmósfera a las condiciones iniciales en un instante determinado.

El estudio de la sensibilidad de la atmósfera a las condiciones iniciales se realiza a partir de las predicciones por conjuntos, conocido como ensemble forecasting. Esta técnica consiste en realizar varios pronósticos de una situación determinada variando ligeramente las condiciones iniciales de la predicción. Con lo cual se tienen un conjunto de predicciones formando una muestra estadística. Cuando más rápido diverge una predicción del comportamiento mayoritario menor es la probabilidad que la predicción sea representativa.

V. WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF-NMM)

El modelo numérico atmosférico *Weather Research and Forecasting Model* (WRF) es un sistema de predicción numérica del tiempo diseñado para la investigación y para aplicaciones operativas. Es administrado por la comunidad universitaria, científica y operacional, con el fin de dirigir su desarrollo en beneficio de esta comunidad. Diversas instituciones apoyan en proyecto con el objetivo de construir un modelo de pronóstico numérico de mesoescala de siguiente generación (modelos como el MM5 pertenecen a la generación anterior), para lograr un avance en el entendimiento de los procesos atmosféricos y la predicción del tiempo (Skamarock, 2008). Las principales instituciones encargadas de su desarrollo son: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), *Earth System Research Laboratory* (ESRL), *Air Force Weather Agency* (AFWA), *Naval Research Laboratory* (NRL), *Center for Analysis and Prediction Storms* (CAPS) y *Federal Aviation Administration* (FAA).

El código del modelo es abierto a la comunidad y ha sido optimizado de manera que puede ser adaptado, tanto en supercomputadoras que trabajan en paralelo, como en computadoras portátiles de reciente generación. Debido a la diversidad de la comunidad que lo desarrolló y que lo utiliza, el modelo tiene una gran diversidad de aplicaciones, por ejemplo, simulaciones ideales, simulaciones reales (predicción numérica en tiempo real), modelación de la calidad del aire y estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acoplamiento con modelos oceánicos. En este trabajo se utiliza la versión 3.4.

Los principales componentes del modelo se muestran en la figura V.1. El *WRF Software Infrastructure* (WSI) contiene los programas que resuelven las ecuaciones de la física del modelo (*dynamic solvers*) y los programas que hacen la interfase con la iniciación del modelo, la asimilación de datos y la utilización de algunas opciones relacionadas con la química atmosférica. Fuera del WSI se encuentra la parte de pre-procesamiento y post-procesamiento de las simulaciones numéricas. El modelo cuenta con dos núcleos que resuelven la física del modelo, el *Advanced Research WRF* (ARW) y el *Nonhydrostatical Mesoscale Model* (NMM), en este trabajo se ha utilizado el núcleo ARW por lo que a continuación se describe brevemente.

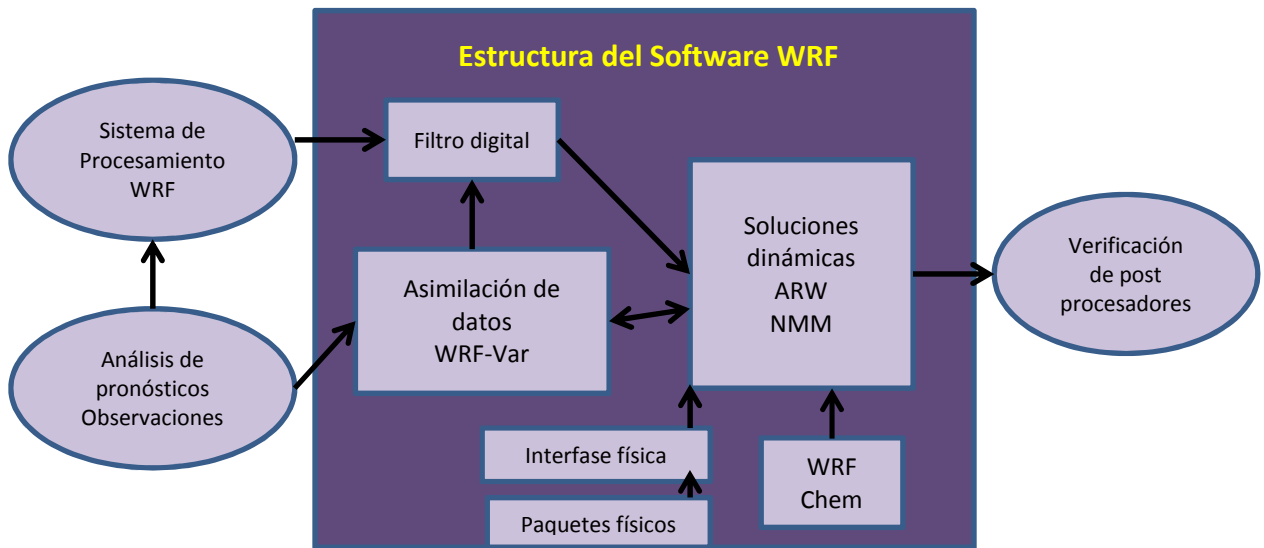


Figura V.1 Principales componentes del modelo WRF

V.1 Descripción del núcleo ARW

Las características del núcleo ARW, utilizado para resolver los procesos atmosféricos, son las siguientes:

- **Ecuaciones:** Consideran un fluido totalmente compresible, no-hidrostático y basado en flujo Euleriano. Cuenta con una opción hidrostática.
- **Coordenada vertical:** Coordenada que sigue el terreno y que permite un estiramiento en los niveles verticales. El tope del modelo es una superficie de presión constante.
- **Malla horizontal:** Malla escalonada tipo Arakawa C.
- **Integración en tiempo:** Runge-Kutta de 2do y 3er orden con paso de tiempo menor para ondas acústicas y de gravedad.
- **Discretización espacial:** Opcional de 2do y 6to orden en la horizontal y vertical.
- **Condiciones de frontera laterales:** Periódicas, abiertas y simétricas.
- **Condiciones de frontera en superficie:** Física o *free-slip*.
- **Anidamientos:** Interactivos en un sentido, interactivos en dos sentidos y móviles, estos últimos pueden usarse a través de movimientos especificados por el usuario o con un algoritmo que sigue el movimiento de un vórtice.
- **Malla global:** Cuenta con capacidad para realizar simulaciones globales.
- **Microfísica:** Esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos que resuelven explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.
- **Parametrizaciones de cúmulus:** Diversos esquemas para modelos de mesoescala modificados y adaptados para el modelo.
- **Capa límite planetaria:** Esquema de energía cinética turbulenta y esquemas no locales.

La figura V.2 muestra el diagrama de flujo del modelo WRF, en donde se puede observar que existen 4 pasos necesarios para obtener una simulación numérica con el modelo.

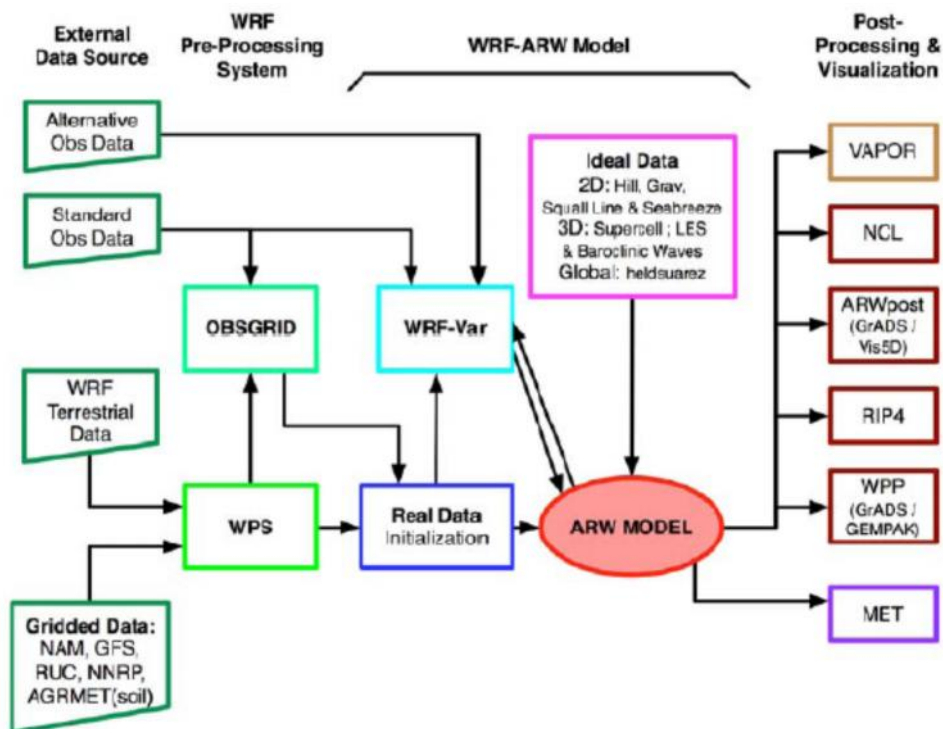


Figura V.2 Diagrama del modelo WRF

WRF Preprocessing System (WPS). Esta componente del modelo es utilizada para simulaciones reales; aquí el usuario puede definir los dominios de la simulación, interpolar los datos terrestres a los dominios (por ejemplo, topografía, tipo de suelo, uso de suelo, etc.), así como decodificar e interpolar los datos meteorológicos que alimentan al modelo.

WRF-Var. Este programa es opcional, se encarga de introducir observaciones a los análisis interpolados que fueron creados con el WPS (por ejemplo, datos de superficie, radiosondeos, datos de radar, etc.), generando así una actualización en las condiciones iniciales que utilizará el modelo.

ARW. Este es el principal componente del modelo, aquí se realiza la iniciación del modelo para cualquiera de los casos de simulación, ideal o real, y se hace la integración numérica del dominio principal y de los anidamientos, si es el caso.

Post-procesamiento y visualización. Esta componente es independiente de los códigos del modelo y queda a consideración del usuario. Existe una gran cantidad de herramientas gráficas que pueden ser utilizadas para visualizar las simulaciones

numéricas. Algunas de estas opciones son: *NCAR Command Language* (NCL), *Read/Interpolate/Plot* (RIP4), *Grid Analysis and Display System* (GrADS), *Vis5D*, *Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers* (VAPOR), *General Equilibrium Modelling Software* (GEMPAK) y *MATrix LABoratory* (MATLAB).

VI. METODOLOGÍA

VI.1 Muestreo

VI.1.1 Sitio de estudio

La delimitación de la zona se realizó en base al crecimiento urbano de la ciudad de Querétaro, tomando como referencia sitios o lugares tales como avenidas principales, parques o zonas universitarias. De esta manera se procedió a determinar los sectores de muestreo correspondientes a la zona urbana de la ciudad de Querétaro de la siguiente forma:

Se tomó como referencia el centro histórico y la alameda de la ciudad trazando una paralela a la prolongación Corregidora Sur, posteriormente se trazó una perpendicular que cruce el centro histórico y de esta manera dividimos el área de estudio en 4 zonas o sectores.

Después se tomó como referencia el anillo que forman la avenida 5 de febrero, el boulevard Bernardo Quintana y la carretera México, y se dividió a su vez, en zona interior y exterior. Las zonas o sectores se muestran en la figura siguiente.



Figura VI.1. División de zonas para el monitoreo

VI.1.2 Diseño del muestreo

Previo a la campaña de recolección de muestras de musgo, se procedió a realizar un muestreo de la vegetación que se encuentra en la zona metropolitana de la ciudad. Este muestreo se realizó en el año 2011 y se pudo distinguir la vegetación mayoritaria de la ciudad, tanto endémica como inducida. De esta manera se observa que una de las especies endémicas de mayor cantidad fue el árbol Huizache (Tabla VI.1). El Huizache (*Acacia farnesiana*) como especie endémica de Querétaro, presenta una abundancia relativa de 13%, la más alta entre las especies nativas, compartiéndolo solamente con el Xicote (*Bursera fagaroides*)

El musgo utiliza como sustrato esta especie endémica (Huizache), por lo que para los fines y alcances de la investigación se decidió utilizar este árbol y así poder tener un estándar y disminuir el sesgo en el muestreo del musgo, o el que se produciría en los análisis al muestrear diferentes especies de árboles como sustrato.

Árboles y Arbustos más comunes en la ciudad de Querétaro					
Nativos		Abundancia relativa %	Introducidos		Abundancia relativa %
Especie	Nombre común		Especie	Nombre común	
<i>Bursera fagaroides</i>	Xicote	13	<i>Ficus microcarpa</i>	Laurel de la India	35
<i>Acacia farnesiana</i>	Huizache	13	<i>Shinus molle</i>	Pirul	13
<i>Mimosa monacistra</i>	Uña de gato	10	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Eucalipto	13
<i>Prosopis laevigata</i>	Mezquite	10	<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	8
<i>Myrtillocactus geometrizans</i>	Garambullo	9	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	7
<i>Ipomea murocoides</i>	Palo bobo	8	<i>Cupressus lusitanica</i>	Ciprés	7
<i>Lysiloma microphyllum</i>	Palo de arco	6	<i>Thuja orientalis</i>	Tuja	3
<i>Karwinskia humboldtiana</i>	Tullidora	6	<i>Melia azedarach</i>	Paraiso	3
<i>Celtis ehrenbergiana</i>	Granjeno	5	<i>Ficus elastica</i>	Hule	2
<i>Yuca filifera</i>	Yuca	4	<i>Ficus benjamina</i>	Ficus, laurel	2
<i>Bursera palmeri</i>	Xicote colorado	4	<i>Populus alba</i>	Álamo blanco	2
<i>Opuntia imbricata</i>	Cardón	4	<i>Populus fremontii</i>	Alamillo	2
<i>Opuntia streptacantha</i>	Nopal cardón	4	<i>Shinus terebinthifolius</i>	Pirul chino	1
<i>Stenocereuss dumortieri</i>	Organa	4	<i>Nerium oleander</i>	Rosa laurel	1
			<i>Araucaria heterophylla</i>	Araucaria	1

Tabla VI.1 Árboles y arbustos más comunes en la ciudad de Querétaro. Fuente: Castañeda 2012

Las campañas de muestreo se dividieron en visitas prospectivas y períodos de muestreo. Las visitas prospectivas se realizaron en dos días, correspondientes al 1 y 2 de abril de 2011. Básicamente, fueron visitas de campo con el propósito de encontrar líquenes y/o plantas susceptibles de ser usados como biomonitores en el área de estudio, para familiarizarse con su paisaje, vegetación, caminos y ubicación de las principales fuentes contaminantes. Se hicieron dos visitas prospectivas de un día al área de estudio en abril del 2011. Se encontraron dos especies de líquenes (*Flavopunctelia* sp. y *Flavoparmelia* sp.) y una planta vascular, el musgo o heno, como se le conoce localmente (*Tillandsia recurvata*), con características apropiadas para ser usadas como biomonitores: las tres son epifitas del mezquite, tienen distribución geográfica amplia, lo que permite comparar sitios y zonas más o menos lejanas entre sí.

De cada zona se eligieron diferentes sitios de muestreo de acuerdo a las especies de *Tillandsia Recurvata* encontradas en la zona correspondiente. Debido a los lugares donde se encontró la especie de bioindicador a utilizar, se dividió la zona metropolitana de Santiago de Querétaro en sectores. La siguiente tabla muestra los sitios de muestreo por sectores.

Zona	Sitios de muestreo
Sector 1	Cerro de las Campanas
	Cerro de las campanas – CU
	San Gregorio
	Tecnológico de Monterrey
Sector 2	Alamos 2°
	Bernardo Quintana – Circuito Jardines
	De Jacarandas
	Externo Paseo Constituyentes-Corregidora norte
	Plaza del Parque
	Plaza del Parque - Corregidora Norte
Sector 3	Carretas
	Paseo Quintas del Marques-Distribuidor vial
Sector 4	Externo Jardines de la hacienda
	Panteón Municipal

Tabla VI.2 Sitios de muestreo por sectores.

La fase de muestreo se realizó en el área correspondiente a la zona metropolitana de la ciudad de Querétaro, durante los años 2011, 2012. Dividiéndose a su vez en 2 períodos de muestreo, Abril – Julio de 2011 y Marzo – Abril de 2012. El muestreo realizado fue de tipo aleatorio estratificado. En este tipo de muestreo se divide la población en grupos en función de un carácter determinado y después se muestrea cada grupo aleatoriamente, para obtener la parte proporcional de la muestra. Este método se aplica para evitar que por azar algún grupo de arboles este menos representado que los otros. (Casal y Mateu, 2003).

Se recolectaron un total de 190 muestras de 14 sitios, de las cuales, 100 corresponden al primer período de muestre y 90 al segundo período. También se recolectaron muestras de referencia de una zona ubicada a 30 km del área de estudio. Estas muestras se

consideran como “limpias” al estar lejos del área de influencia y estar menos expuestas a fuentes de contaminación antropogénica.

VI.2 Técnicas de muestreo

VI.2.1 Identificación de los árboles

La identificación de los árboles, se basó en el muestreo de la vegetación y las visitas prospectivas. Se registraron 5 características, ubicación, fecha de muestreo, diámetro del árbol (DBH), altura del árbol y altitud. Éstas se registraron en fichas u hojas de campo de muestreo diseñadas para ello (Anexo A).

La ubicación del árbol se realizó mediante coordenadas geográficas utilizando dispositivo GPS marca Garmin, modelo Geko 101, a su vez que se escribieron referencias a la ubicación mediante direcciones, características del sitio o establecimientos cercanos al mismo. Se agregó además un mapa de ubicación y/o fotografía aérea a cada una de las hojas de muestreo.

VI.2.2 Recolección de la muestra

Se identifican las especies de *Tillandsia Recurvata* que se encontraban en el árbol. La persona encargada de la recolección debía estar cercano al tronco del árbol y orientado hacia el norte. De esta manera se tendría que obtener una muestra de cada cuadrante.

A su vez, se registraron esquemas de la ubicación de la muestra en los árboles. Lo cual se realizó localizando la dirección norte tomando como punto de referencia el tronco del árbol, por lo tanto se dividió el árbol en 4 partes, A, B, C y D. Por ejemplo, si el árbol del lugar a muestrear es el primero, se le asigna el número 1. Si la muestra a coleccionar se encuentra entre el noroeste corresponderá a la parte C. Posteriormente se divide el árbol en dos dependiendo de su altura. Debajo de la parte media del árbol se dará valor de 0, y de la parte media hacia arriba se le dará un valor de 1. Por ejemplo si la muestra se a coleccionar se encuentra arriba de la parte media en el lado noreste del árbol número 2, tendrá la clave 2B1. En caso de que se colecciona otra muestra del mismo cuadrante a una altura similar, entonces quedaría 2B1’.

En cada sitio se obtuvieron de tres a cuatro muestras de *Tillandsia recurvata* (Figura IV.1) a menos que el árbol tuviera menor cantidad de musgos. Cada muestra consistió de cuatro o más individuos recolectados de las ramas de al menos dos árboles diferentes. Para evitar contaminar las muestras con las manos y reducir la posibilidad de contaminación cruzada entre las ellas, cada muestra se recogió con guantes de látex nuevos y libres de polvo. Las muestras tuvieron un peso aproximado de 25-30 g. Fueron guardadas en bolsas de papel estraza y se trasladaron al laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en estado seco al aire. Ahí se mantuvieron deshidratadas y protegidas del polvo local hasta la realización de los análisis (ver fichas de muestreo, Anexo A).

VI.3 Determinación en laboratorio de $U^{13}C_{VPDB}$ y $U^{15}N_{AIR}$ en material orgánico

VI.3.1 Preparación de la muestra

- Antes de analizarse el contenido de carbono y nitrógeno, cada muestra se limpió manualmente, sin utilizar agua, con guantes de látex nuevos y sin polvo con el siguiente procedimiento:
- A cada ejemplar se le separaron sus vástagos (hoja y tallo) sobre servilletas de papel nuevas en una superficie limpia.
- A cada vástago se le removieron las hojas muertas y raíces, así como todo tipo de restos macroscópicos ajenos a la planta: insectos, telarañas, fragmentos de hojas y ramas de otras plantas, etc. También se eliminaron las raíces y las inflorescencias.
- Las muestras analizadas consistieron de los 2-4 pares de hojas más recientes de los ejemplares. Esto con el fin de minimizar la variación debida a la edad de las muestras del mismo sitio o de diferentes sitios. Se estima que las hojas analizadas representan al menos un año de exposición en campo, pero no se cuenta con información sobre el desarrollo de esta especie que ayudará a determinar ese tiempo con mayor precisión.
- Se obtuvo una cantidad aproximada de 5 g de cada muestra. Se colocaron en bolsas de polietileno nuevas e identificadas con la clave del sitio y número de muestra. Cada sitio estuvo representado por tres muestras para poder derivar un promedio y

estimar la variación. Las muestras limpias se mantuvieron en congelación (-4°C) hasta la realización de los análisis.

Los siguientes pasos del análisis fueron completados en los laboratorios de nanotecnología y química de la UAQ campus aeropuerto. Las muestras se colocaron en crisoles prelavados con agua corriente y jabón, un rociado con una solución de HNO₃ al 10% y enjuague con abundante agua desionizada. Para facilitar la digestión ácida y determinar el peso seco, las muestras fueron llevadas a sequedad total a temperatura constante (60°±1°C) por tres días en una estufa marca Lindberg/Blue. Las muestras secas se molieron en mortero de ágata, prelavados al igual que los crisoles, y pasadas por una malla de No. 20 para homogeneizar el tamaño del grano. Todo el material de cristalería se lavó antes de ser utilizado con agua y jabón y puesto en una solución 10% de HNO₃ por 24 h. Posteriormente fue enjuagado con agua destilada. Los matraces aforados de volumen certificado (25 ml) fueron secados al ambiente para evitar la descalibración del volumen al secarlos en estufa.

VI.3.2 Condiciones del horno de microondas

La digestión ácida de las muestras se realizó en un horno de microondas (marca Anton Paar modelo: Multiwave 3000) con el programa Pine Needleless incluido en el software del equipo. Previo a cada corrida de digestión los materiales del horno se limpiaron de acuerdo a especificaciones del fabricante y el programa incluido en el equipo. Se digirieron 0.15 a 0.2 g (peso seco) del material vegetal pulverizado de cada muestra en los viales de Teflón del equipo añadidos con: HNO₃ (5.0 ml), HCl (1.0 ml), H₂O₂ (1.0 ml) y HF (0.2 ml). El programa de digestión fue el siguiente:

Fase	Potencia (W)	Plataforma (min)	Tiempo (min)	Descarga
1	1,400	10.0	35.0	1
2	-	-	30.0	2

Tabla VI.3 Condiciones del horno de microondas para la digestión de muestras

Incremento de presión, p= 0.8 bar/s, temperatura IR para todos los vasos de digestión: 190°C. Presión máxima para cada vaso: 20 bar.

Al finalizar las digestiones, los extractos se aforaron a 15 ml de agua destilada. A continuación se describe la técnica para la determinación de contenido de isótopos de carbono y nitrógeno de la muestra

VI.3.3 Determinación de contenido de isótopos de ^{13}C y ^{15}N de la muestra

Se utiliza la metodología modificada por Coplen *et. al.* (2006). El equipo utilizado en la determinación de los $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ se muestra en el Anexo B. La determinación del contenido de carbono ^{13}C fue llevado a cabo en un régimen de flujo continuo usando un Espectrómetro de Masas marca Thermo Finnigan Delta^{Plus}XL de Relaciones Isotópica, en interfaz con un analizador elemental automático La precisión de ^{13}C fue de 0,1‰. Estos datos fueron tabulados en hojas de cálculo y luego realizados los cálculos estadísticos elementales utilizando el mismo programa.

De cada muestra se obtiene la alícuota correspondiente, la cual es analizada para medir $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ y $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ conforme al método de combustión dinámica tipo Dumas con un Analizador Elemental Flash EA 1112, a una temperatura de 1020 °C en la columna de combustión y 650 °C en la columna de reducción, seguida de una columna de perclorato de magnesio para atrapar el agua producto de la combustión. La separación de los gases de combustión N_2 y CO_2 se realiza mediante una columna cromatográfica C/N a 35 °C. Este sistema dinámico utiliza Helio como gas acarreador llamado flujo continuo, el cual se acopla mediante la interfase Conflo III al Espectrómetro de Masas (Thermo Finnigan MAT 253). Como patrones de trabajo se utiliza un tanque de CO_2 con una pureza de 99.998% y un tanque de N_2 con una pureza de 99.9999%, los cuales se calibran previamente con tanques Oztech.

Los valores de $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$, se normalizan con los materiales de referencia IAEAN1, USGS 25, USGS 26, USGS 40 y USGS 41 que tienen una precisión de 0.2%.

Los resultados de $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ de materia orgánica se normalizan utilizando materiales de referencia del NIST y del IAEA como son: NBS 22, PEF1, IAEA CH6, USGS 40 y USGS 41 de acuerdo con las correcciones descritas por Coplen *et al.* (2006a y b). Para esta técnica se utiliza una desviación estándar de 0.2% para el carbono.

Cada 10 muestras se insertan dos aminoácidos (Sigma) alternados con diferente composición isotópica para verificar la calidad de la combustión y reducción de las columnas; de lo anterior deberá obtenerse una precisión para Glicina $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -42.66 \pm 0.03$ $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = 1.38 \pm 0.03$ y para la L-Serina $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} = -6.79 \pm 0.03$ $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} = -7.91 \pm 0.07$.

VI.3.4 Determinación de elementos metálicos (Análisis semicuantitativo)

Posterior a la preparación de la muestras, se colocaron en tubos especiales para el análisis utilizando un equipo ICP-MS (Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo). Ver Anexo fotográfico, Anexo B. Cabe señalar que el análisis que se realizó es un análisis semicuantitativo utilizando una solución multielemental de sintonía de varios metales para la calibración del equipo. La medición de cada muestra se realiza por triplicado, es decir, cada dato que nos proporciona el equipo es de una serie de 3 mediciones, siendo el resultado el promedio de las 3 medidas.

En la práctica, este método sirve solamente para investigar en qué rango de concentraciones se encuentra la muestra, es decir es una cantidad aproximada. Se toma también como análisis cualitativo, pues la estimación de las concentraciones proporciona conocimiento de elementos encontrados en la muestra, la cual frecuentemente es utilizada como un análisis preliminar a la realización de análisis cuantitativos más detallados que involucren, curvas de calibración, cálculo del límite de detección e incertidumbre.

VI.4 Modelo de simulación

El Modelo de Mesoescala Nohidrostático (NMM) del sistema Weather Research and Forecasting (WRF) fue desarrollado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y la NCEP (National Centers for Environmental Prediction). El programa WRF-NMM está disponible para su utilización en un amplio rango de resolución, las cuales van desde metros hasta kilómetros.

La metodología utilizada se indica en el manual de usuario proporcionado por la NOAA y la NCEP en su página web.

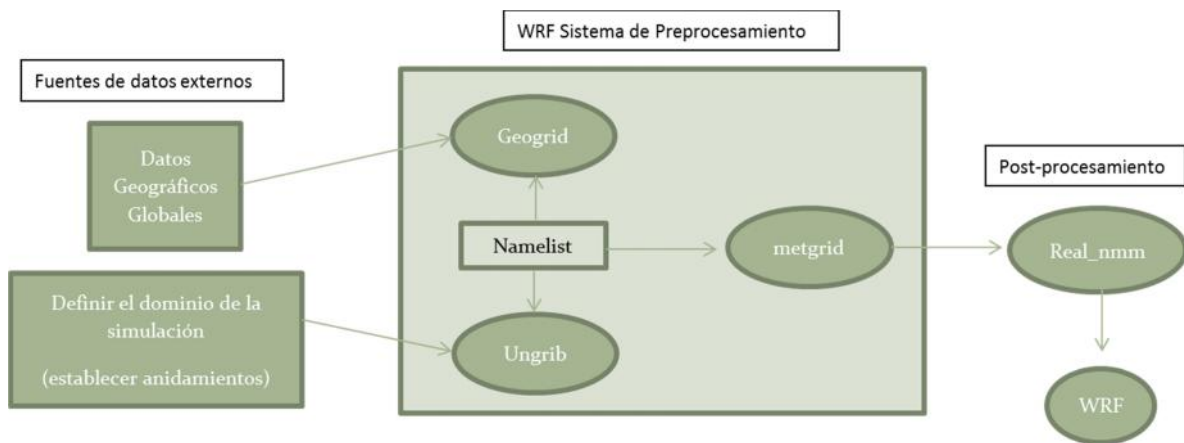


Figura VI.2. Procesos de WRF

Este programa incluye:

- Utilización de datos en tiempo real
- Investigación para la realización de pronósticos
- Aplicaciones de modelo acopladas
- Enseñanza

Para la realización de una simulación numérica de casos reales se requiere la utilización de los siguientes paquetes del modelo

WPS. Es el sistema de pre-procesamiento de los datos de WRF.

WRF-NMM-SOLVER. El cuál general la simulación numérica.

Postprocessor Utilities (WRF postprocessor –WPP- y RIP), contiene herramientas para el post procesamiento tales como el graficado de la simulación numérica.

Model Evaluation Tools (MET). Las cuales incluyen herramientas de evaluación del modelo.

WRF Preprocessing System (WPS)

Se utiliza para simulaciones de datos reales. Sus funciones incluyen:

- Definir el dominio de la simulación. Esto significa delimitar el área de la simulación a realizar.
- Interpolación de datos terrestres. Entre ellos se incluyen el tipo de terreno, uso de suelo, tipo de suelo) al dominio.
- Interpolación de datos desde otro modelo al dominio de simulación y las coordenadas del modelo.

WRF-NMM-SOLVER

Las características claves de ésta herramienta son:

- Modelo no hidrostático con una opción hidrostática.
- Coordenadas verticales híbridas (presión sigma)
- Arakawa E-grid. Ésta es una forma de representar, computar, calcular y estimar cantidades físicas ortogonales, cantidades notables de velocidad y relaciones de masa en mallas (grid) rectangulares usados para modelos de sistema Tierra, sobretodo para meteorología y oceanografía. El tipo E es escalonado y además rotado a 45° relativo a otras orientaciones de grids. Esto permite que se definan todas las variables a través de una sola cara del dominio rectangular.
- Conservación de un número de cantidades de 1er y 2do orden, incluyendo energía y entropía.
- Opciones de física para la superficie terrestre, capa límite planetaria, radiación atmosférica y superficial, microfísica y convección de cúmulos.
- Una y dos formas de anidar con múltiples niveles y nido anidamientos.

Postprocesamiento

Unified Postprocessor (UPP)

El siguiente paso es el procesado de la información, consistente en la ejecución del modelo numérico. Para cada celda de la malla se resuelven ecuaciones que rigen el comportamiento de la atmósfera. La resolución se realiza iterativamente cada cierto tiempo, normalmente un minuto dependiendo de los requerimientos de la simulación.

Por último a partir de los resultados pronosticados por el modelo, temperatura, humedad, viento y precipitación, se calculan las variables atmosféricas más complejas como pueden ser la divergencia y la vorticidad. Una vez se dispone de toda la información que se desea se precede a la representación gráfica de ésta, siendo un punto importante para el estudio y comprensión de los fenómenos que se suceden.

Calibración del modelo

Para la realización de las simulaciones se utilizó una proyección Lambert Conformal, la coordenada vertical es sigma (siguiendo el terreno); Los parámetros utilizados para la calibración del modelo son los siguientes: Kain – Fritsch para la parametrización de cúmulos; Noah LSM (Land Surface Model) para el suelo; RRTM para la radiación de onda larga; Dudhia para la radiación de onda corta y el esquema de Yonsei University (YSU) para la capa límite. Estas parametrizaciones son descritas detalladamente en Skamarock

et al. (2008). Se realizaron dos corridas para la calibración del modelo para el período del día 24 de Febrero de 2011 de 6:00 a 18:00 hrs.

Condiciones de Frontera

Además de las condiciones mencionadas anteriormente, se realizaron anidamientos y se establecieron los parámetros necesarios para la ejecución del modelo. En la figura VI.3 se observan los 2 anidamientos utilizados, los cuales determinan el dominio utilizado para las simulaciones.

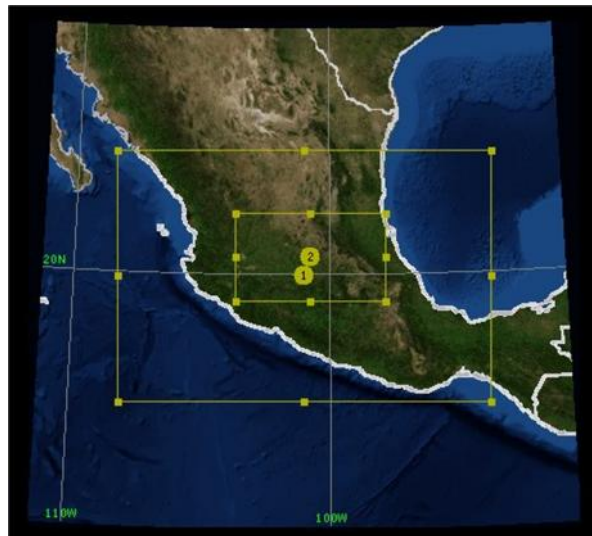


Figura VI.3 Dominio utilizado para las simulaciones numéricas.

La proyección del dominio fue de tipo Lambert Conformal. Una vez determinada la proyección se definieron los anidamientos de acuerdo a la siguiente información en la ventana Wizard Domain, la longitud estándar fue de -101, la latitud 1 fue de 20, la latitud 2 fue de 20. La longitud del punto central de -101 y la Latitud del punto central de 20. Se determinó que el anidamiento 1 tuviera un valor de 5 con respecto al anidamiento 2, lo que significa que el anidamiento 1 sea 5 veces mayor que el anidamiento 2.

Posteriormente se define el tamaño del grid (malla). Para las simulaciones utilizamos un tamaño de malla de 61 para la dimensión horizontal y de 41 para la dimensión vertical. La distancia de cada punto dentro de la malla fue de 25 km. La resolución utilizada fue de 10 m. Los siguientes parámetros se definen de la misma manera que los utilizados para la calibración del modelo.

VII. RESULTADOS

VII.1 Análisis Isotópico de Carbono y Nitrógeno

En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos del análisis de isotopía de Carbono y Nitrógeno.

FECHA	MUESTRA	SITIO	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}} (\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}} (\text{‰})$
04/04/2012	A-1D1	Álamos	-21.66	4.24
	A-1B1'	Álamos	-21.76	4.06
	A-1B1	Álamos	-15.52	1.77
	A-4AO	Álamos	-24.05	2.56
	A-4D1	Álamos	-23.76	1.80
28/05/2012	PEC-E-1DO	Externo Corregidora	-15.85	3.79
	PEC-E-1BO	Externo Corregidora	-18.20	3.64
28/05/2012	BC-1D1	Bernardo Quintana	-16.63	2.50
	BC-1DO	Bernardo Quintana	-17.35	2.75
07/06/2012	TM-1CO'	Tecnológico de Monterrey	-17.60	4.59
	TM-1D1	Tecnológico de Monterrey	-17.51	4.10
11/06/2012	PEC-3A1	Plaza Externo Corregidora	-16.52	11.94
	PEC-3AO'	Plaza Externo Corregidora	-18.02	13.02
11/06/2012	PEC-1BO	Plaza Externo Corregidora	-17.24	3.67
	PEC-2AO	Plaza Externo Corregidora	-16.64	3.76
18/06/2012	PM-1BO'	Panteón Municipal	-15.96	2.69
	PM-2A1	Panteón Municipal	-15.25	0.71
18/06/2012	PM-1DO	Panteón Municipal	-15.27	2.54
21/06/2012	PD-1CO	Paseo Externo Distribuidor	-16.28	3.54
	PD-1AO	Paseo Externo Distribuidor	-19.56	5.35
21/06/2012	CU-1CO	Ciudad Universitaria	-14.57	-1.63
	CU-1DO	Ciudad Universitaria	-15.21	-1.08
	CU-5D1	Ciudad Universitaria	-16.41	1.43
	CU-5AO'	Ciudad Universitaria	-15.95	0.84
	CU-7C1	Ciudad Universitaria	-17.26	0.70
	CU-7A0	Ciudad Universitaria	-16.16	0.96
21/06/2012	PD-1BO	Paseo Externo Distribuidor	-19.64	3.21
	CU-2BO	Ciudad Universitaria	-14.56	-1.67
	CU-2CO	Ciudad Universitaria	-18.61	-1.87
	CU-3D1	Ciudad Universitaria	-17.18	-1.43
	CU-3A1	Ciudad Universitaria	-16.21	-1.84
	CU-4D1	Ciudad Universitaria	-15.75	-1.57
	CU-4A1	Ciudad Universitaria	-16.89	-1.74
	CU-4BO	Ciudad Universitaria	-17.54	1.05
	CU-6D1	Ciudad Universitaria	-18.34	3.42
24/06/2012	C-1C1	Carretas	-17.67	3.21
	C-1B1	Carretas	-17.09	2.64
24/06/2012	C-1A1'	Carretas	-15.39	1.05
	C-1A1	Carretas	-14.18	-1.04
30/06/2012	PP-1AO	Plaza del Parque	-16.11	4.44
	PP-2B1	Plaza del Parque	-16.80	3.67
05/07/2012	JH-1A1	Jardines de la Hacienda	-15.16	0.16
	JH-1C1'	Jardines de la Hacienda	-16.08	0.53
09/07/2012	DJ-1DO	Jacarandas	-23.09	5.40
	DJ-1CO	Jacarandas	-19.81	5.53
	JH-1A1'	Jardines de la Hacienda	-15.32	-1.67

Tabla VII.1 Resultados de la concentración de isótopos

El crecimiento del musgo está influenciado por las condiciones microclimáticas tales como, luz, agua, temperatura, concentración de CO_2 . La adquisición de carbón de *Tillandsia Recurvata* depende del contenido del agua, la intensidad de la luz y la fijación de CO_2 . Los procesos de discriminación de ^{13}C pueden, por lo tanto, estar relacionados a los modos de fijación, la difusión de CO_2 , y las fuentes de CO_2 .

Los mecanismos de concentración de CO₂ de la *Tillandsia Recurvata*, de manera general, varía entre -16‰ y -26‰. Es necesario contar con las características adecuadas para que esto suceda, tal como se mencionó en el párrafo anterior. Podemos observar en la tabla que en 14 sitios existe una concentración menor a -16‰ y por lo menos corresponden a un sitio de cada zona de muestreo. Así también se aprecia que no se encuentra valores mayores a -26‰, lo cual es normal debido a las condiciones climatológicas cálidas- seco que prevalecen en la zona (Mook, 2000).

Los valores reflejados en la tabla anterior muestran un incremento en el CO₂, correspondiente a carbono atmosférico mezclado con carbono antropogénico. De acuerdo a Mook (2000) el CO₂ atmosférico natural debe tener un valor entre -7‰ y -10‰, por lo tanto valores mayores significan que el CO₂ de la atmosfera y el antrópico se mezclan. Los resultados obtenidos muestran valores de hasta -24‰ con valores promedio de -14.6‰, por lo tanto corresponde a valores de CO₂ antropogénico.

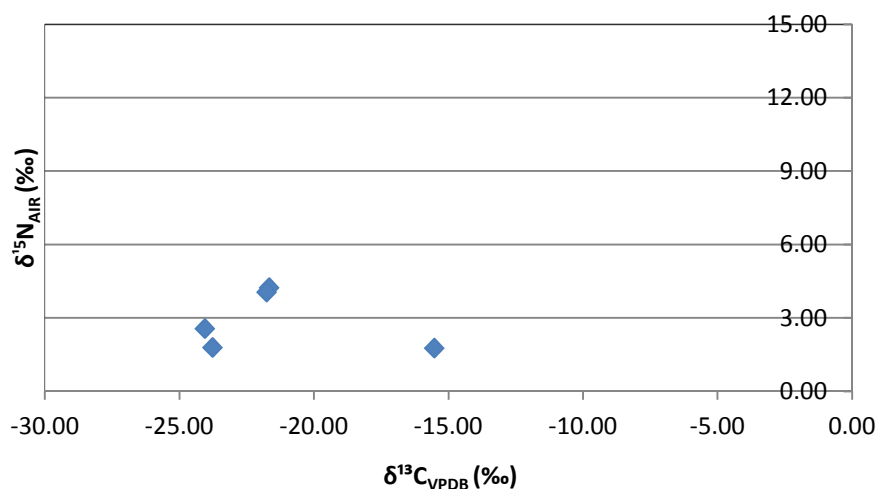


Figura VII.1 Análisis Isotópico de ¹³C y ¹⁵N de hojas de árbol de la especie Huizache correspondiente al mes de Abril 2011

El isótopo natural ¹⁵N presenta una abundancia en la naturaleza de 0.37%, mientras que el ¹⁴N es de 99.63%, sin embargo dado que el fraccionamiento isotópico del nitrógeno en la naturaleza es muy grande también es difícil de predecir (Mook, 2000). Sin embargo se puede realizar una distinción en el muestreo realizado para este análisis. Dado que el muestreo de *Tillandsia Recurvata* se realizó en árboles de Huizache y las muestras de musgo obtenidas estaban a menos de 4 metros, se puede atribuir la disminución o

aumento de los valores de ^{15}N a la combustión de combustibles fósiles y la producida por animales.

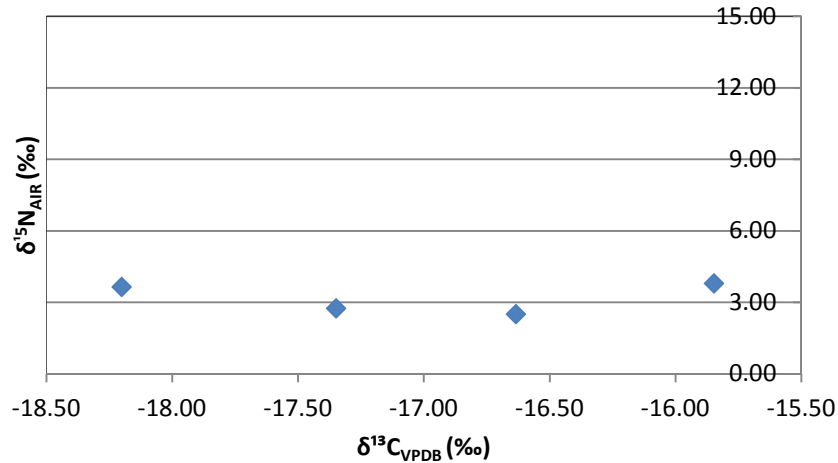


Figura VII.2 Análisis Isotópico de ^{13}C y ^{15}N de hojas de árbol de la especie Huizache correspondiente al mes de Mayo 2011

Para los meses de abril y mayo de 2011 (Figura VII.2) existe una ligera variación, entre los valores de nitrógeno (2.50 a 4.24‰) y carbono (-15.85 a -23.76 ‰), no se considera significativa porque corresponde a compuestos de nitrógeno y CO_2 antropogénico. Es de especial interés el hecho de que estos meses se encuentren entre el período de sequías, pues significa que no hay pulsos de afectación debido a las lluvias o frentes fríos que produzcan corrientes de viento mayores a los 5 m/s. Podemos distinguir que el ^{15}N prácticamente se mantiene constante, mientras que el ^{13}C no tiene una diferencia significativa. En este caso los procesos de la deposición seca no están influenciados por las variables climatológicas del viento, la lluvia y la humedad.

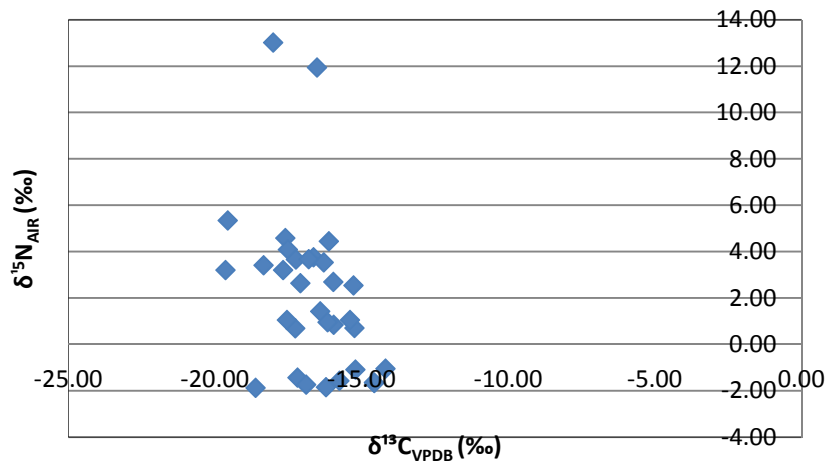


Figura VII.3 Análisis Isotópico de ^{13}C y ^{15}N de hojas de árbol de la especie Huizache correspondiente al mes de Junio 2011

En el mes de junio (Figura VII.3) se presenta una variación significativa de carbono van de -14 a -19.64 ‰. Es significativo por la cantidad de muestras que se recolectaron en esa fecha (32 muestras), sin embargo son valores menores a los obtenidos en los meses previos (Abril – Mayo), lo cual coincide con el inicio del período de lluvias en la región. Es decir la influencia de las precipitaciones y los vientos en estos casos puede ser un factor en la disminución de los valores en la concentración ^{13}C . Sin embargo los valores de ^{15}N presentaron una variación en dos puntos, observándose una desviación estándar de 3.5 para este mes de muestreo. Los valores que causaron esa variación pertenecen al árbol cercano a la avenida Prolongación Corregidora por lo que la influencia de gases producidos por automóviles es evidente. Este punto se tratará posteriormente.

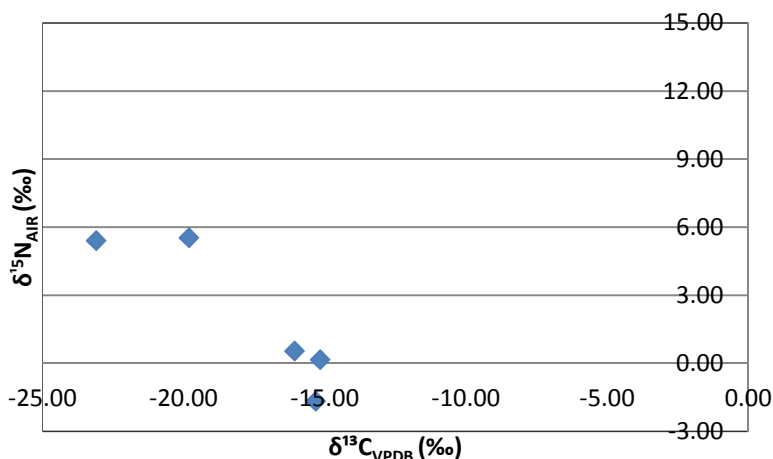


Figura VII.4 Análisis Isotópico de ^{13}C y ^{15}N de hojas de árbol de la especie Huizache correspondiente al mes de Julio 2011

Lo contrario sucede en los meses de Junio y Julio. El inicio de la temporada de lluvias es precisamente el mes de Junio, y puede notarse un cambio significativo en la distribución de los valores de carbono y nitrógeno, uno respecto a otro. Aunque podría pensarse en un efecto de dilución por parte de la lluvia, al parecer el mecanismo de alimentación de las plantas epífitas permite que absorban mayores nutrientes cuando llueve.

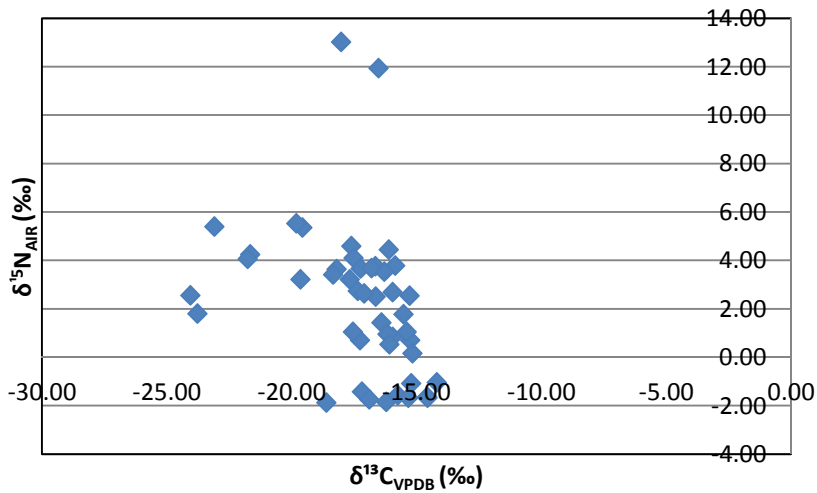


Figura VII.5 Análisis Isotópico de ^{13}C y ^{15}N de hojas de árbol de la especie Huizache, acumulativo

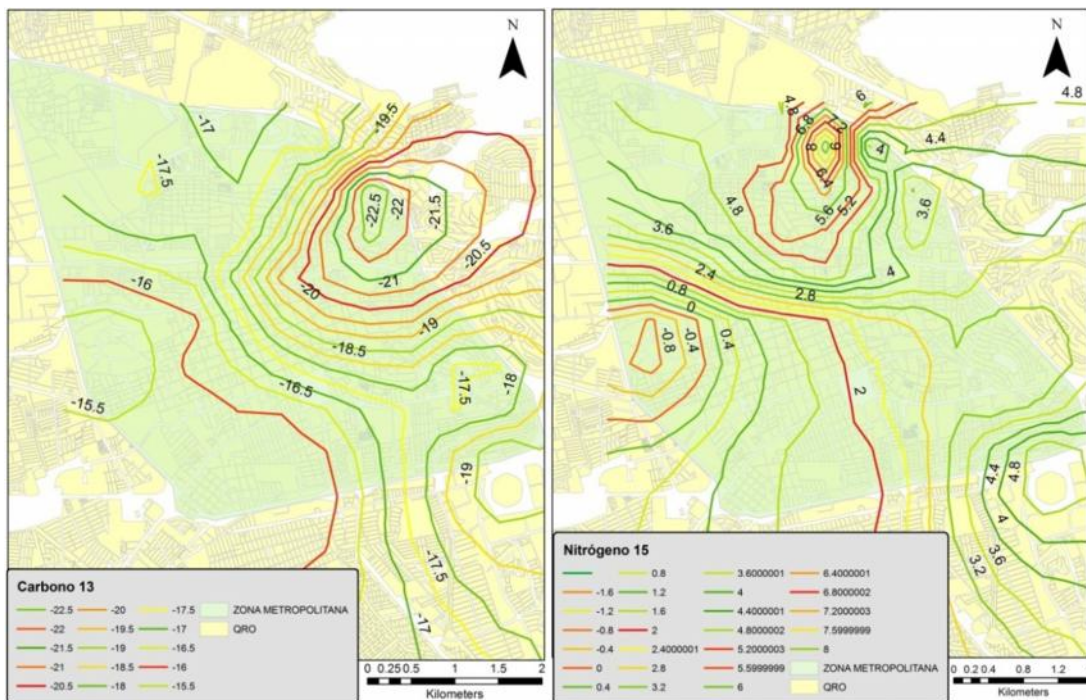


Figura VII.6 Mapa de valores ^{13}C y ^{15}N

De la figura VII.6 observamos que los valores máximos tanto de ^{13}C (-21 ‰) como de ^{15}N (hasta 13 ‰) son mayores en la zona 2 y los límites de la zona 3 (Jacarandas y Álamos). Lo anterior confirma la naturaleza antropogénica de los resultados, pues en esa zona se presenta una afluencia vehicular de 80, 157 vehículos al día que circulan en el boulevard Bernardo Quintana y el Circuito Jardines, así como la Prol. Corregidora Norte, de acuerdo a los datos de CONCYTEQ (2006) y aforos vehiculares del Departamento de Policía Municipal de Querétaro. Estos aforos señalan al boulevard Bernardo Quintana como el segundo en afluencia vehicular, sin tomar en cuenta las áreas cercanas a la ciudad de Querétaro de la Autopista México-Querétaro (126, 674 vehículos/día) y la carretera libre a Celaya (98, 388 vehículos/día).

La tendencia en las mediciones nos señala que aquellas muestras tomadas cerca de calles o distribuidores viales presentaban valores de ^{13}C . En el caso del ^{15}N los valores presentan un comportamiento similar (ver Tabla VII.1). Además, las rosas de viento generadas muestran una frecuencia mayor hacia la dirección noreste y nornoroeste. Este punto se discute en apartado VII.3.

Los resultados isotópicos observados presentan una asociación que no ha sido alterada, pese a que se pueden observar diferentes caminos de decaimiento de la vegetación. Los valores de la relación isotópica de carbono obtenidos de esta asociación son coincidentes con los valores obtenidos de las epifitas del sector II. Los valores de la relación isotópica de carbono presentan variaciones menores que deben tenerse en cuenta para la realización de estimaciones para modelos globales. Estas variaciones están relacionadas con la parte de la planta analizada y con factores paleoecológicos locales (estrés hídrico). Cabe mencionar que los datos de ^{13}C muestran una distribución en los valores que reflejan ubicación espacial, temporal y probablemente las alturas de colecta (copa de los arboles) y distribución geográfica.

VII.2 Análisis Isotópico Metales Pesados

A continuación se muestran la tabla y el mapa de los resultados obtenidos concernientes a los metales pesados, de manera específica se muestran los valores del arsénico, cadmio, cromo, mercurio, manganeso, níquel, plomo, vanadio y zinc debido a su persistencia en los ecosistemas tanto acuáticos como terrestres, su toxicidad y su persistencia en sistemas urbanizados. Cabe señalar que se utilizó una metodología semi-

cuantitativa con la finalidad de establecer elementos de interés y que puedan ser utilizados como marcadores. Por lo que el análisis se considera un análisis preliminar para la realización de estudios posteriores cuantitativos.

A continuación se muestra la tabla general (Tabla VII.2) de resultados de los elementos mencionados en el párrafo anterior. Así también se presenta la tabla VII.3 donde se puede ver la concentración media por sector. Cabe señalar que estos valores corresponden al segundo período de muestreo que incluye a los meses de Marzo – Abril de 2012.

Elemento	Al	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	As	Se	Cd	Hg	Pb
Lugar	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
Ciudad Universitaria 1A1	0.01	0.00	0.00	0.00		0.00	24.13	2.55	0.02	0.07	0.00	10.09
Ciudad Universitaria 1D0		0.00	0.00	0.00	21091.48	0.00	0.77	1.88	0.02	0.00	0.00	6.25
Ciudad Universitaria 2C1	294767.57	86.93	49.65	984.23	21716.65	10.23	212.58	26.35	6.47	0.00	0.00	4.95
Ciudad Universitaria 3C1	322802.34	37.84	7.96	236.96		1.66	95.19	0.00	0.27	0.00	0.00	8.85
Ciudad Universitaria 4C1	221.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Cerro de las Campanas 1C1		0.00	0.00	0.00	23608.24	0.00	0.00	2.12	0.02	0.00	0.00	10.41
Cerro de las Campanas 2D1	229729.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
Tecnológico Monterrey 1D1		180.98	62.49	1283.10		13.89	305.44	9.94	12.07	0.52	0.00	57.71
Álamos 1A1	328695.89	19.11	9.46	253.27		2.16	60.31	1.35	5.58	0.00	0.00	1.40
Álamos 1B1	0.01	0.00	0.00	0.00	10122.68	0.00	0.00	0.79	0.02	0.00	0.00	0.00
Álamos 3A1	264995.50	4.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.17	0.00	0.00	2.33
Álamos 4C0	0.01	0.00	0.00	0.00	11260.73	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Álamos 5B1	365950.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	1.26	0.00	6.00	0.00	0.01	0.00
Álamos 6B1	281066.23	94.16	71.17	1016.33	23030.89	16.98	239.48	19.26	12.46	0.68	0.00	9.34
Álamos 7A1	247765.09	103.42	50.27	1012.31		12.32	179.46	11.06	19.36	0.76	0.00	20.24
Bernardo Quintana 1A1'		107.72	62.86	958.38		14.13	334.39	13.76	8.60	0.39	0.00	21.08
Bernardo Quintana 1D0	0.01	0.00	0.00	0.00	14267.59	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	3.65
Jacarandas 1A0		71.10	10.38	708.13		3.12	192.75	0.00	6.16	0.34	0.00	21.14
Externo Corregidora 1B0	0.01	0.00	0.00	0.00	9957.12	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Plaza del Parque 1B0	437661.38	0.00	8.69	0.03		2.02	7.08	0.00	0.02	0.00	0.00	11.34
Plaza del Parque 2D0		186.19	84.77	1770.46		19.91	333.93	26.04	14.23	0.26	0.00	15.53
Corregidora Norte 1B1		0.00	0.00	290.26	0.00	0.00	58.33	0.00	7.33	0.00	0.00	0.00
Carretas 1C1'		98.58	45.31	902.50	26779.95	9.55	186.09	20.41	19.03	0.80	0.00	23.45
Carretas 1C1	0.01	0.00	0.00	0.00	17339.25	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	11.91
Márquez 1D1	411821.56	189.68	95.51	1629.48		22.44	747.15	39.23	9.02	0.53	0.00	23.36
Panteón Municipal 1B1	0.01	0.00	0.00	0.00	5650.84	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Panteón Municipal 1B1'	297750.52	18.50	0.00	0.04		0.00	1.73	0.00	0.02	0.00	0.00	18.01
Panteon Municipal 2A1		0.00	0.00	0.01	0.00	0.16	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00
Jardines de la Hacienda 1A1	295452.11	108.97	63.84	1107.42		14.18	279.85	20.67	7.04	0.00	0.00	6.52
J. Hacienda 1B1		220.73	100.83	1854.47		18.13	419.62	22.73	5.83	0.95	0.00	27.01
Jardines Hacienda 1C1'	0.01	0.00	0.00	0.00	9438.42	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	16.26

Tabla VII.2 Concentración de metales pesados. Análisis semicuantitativo ICP-MS.

Elemento	Al	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Zn	As	Se	Cd	Hg	Pb
Sector	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
Sector 1	169504.28	38.22	15.01	313.04	13283.28	3.22	79.76	5.36	2.37	0.07	0.00	12.28
Sector 2	192613.45	41.90	21.26	429.23	8579.88	5.05	100.50	5.16	5.79	0.17	0.00	7.57
Sector 3	205910.78	96.09	46.94	843.99	22059.60	10.66	311.08	19.88	9.36	0.45	0.00	19.58
Sector 4	148300.66	58.03	27.45	493.66	5029.76	5.41	116.87	7.24	2.31	0.16	0.00	11.30

Tabla VII.3 Media de la Concentración de metales pesados por sectores

De la tabla anterior se observa que el sector 1 y el sector 3 son los que muestran una mayor concentración de los elementos comparado con el resto de los sectores. El mercurio es el elemento que menos se encontró en los sitios de muestreo. Por el contrario el cromo, el zinc y el manganeso resonaron por su abundancia. El plomo demostró que es propio de la zona urbana, pues la afluencia vehicular en el sitio de estudio es muy alta comparado con las zonas periféricas.

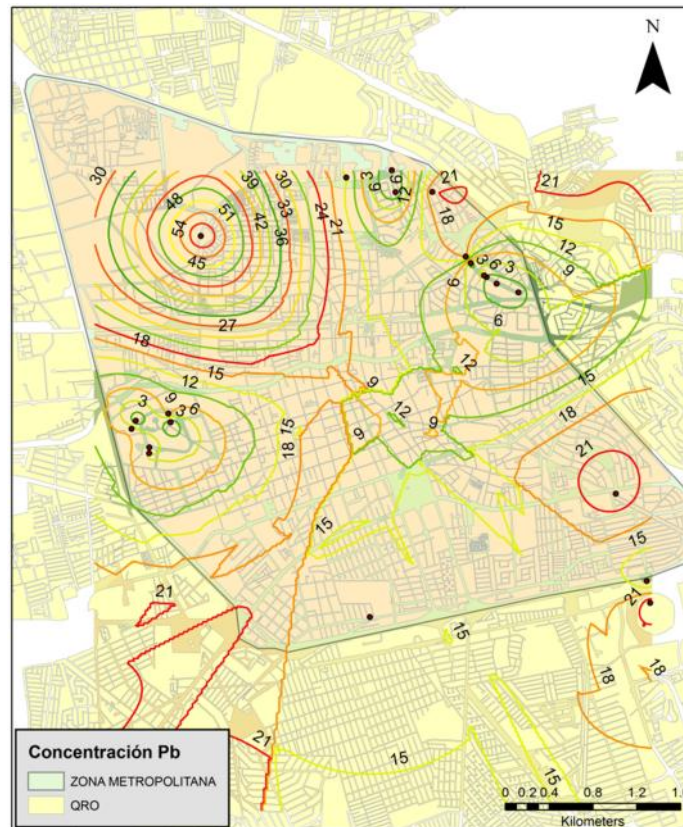


Figura VII.7 Mapa de Valores Pb

VII.3 Variables Climatológicas

A continuación se muestran las variables climatológicas utilizadas, a saber, las rosas de viento y las láminas de precipitación obtenidas de 5 estaciones climatológicas automatizadas, propiedad de la Comisión Estatal del Agua. Así también se presentan los mapas de vientos, presión y precipitación. Cabe señalar que estos mapas fueron creados basados en la simulación realizada con el programa WRF (Weather Research And Forecasting). Las rosas de viento que se presentan a continuación son de un período para 15 días antes del período de muestreo y 15 días después del período de muestreo para las mediciones correspondientes al año 2011 y del año 2012. Asimismo se presentan dos mapas anuales de rosas de viento de la región de los años en los que se realizó el muestreo.

VII.3.1 Rosas de Viento

Año: 2011

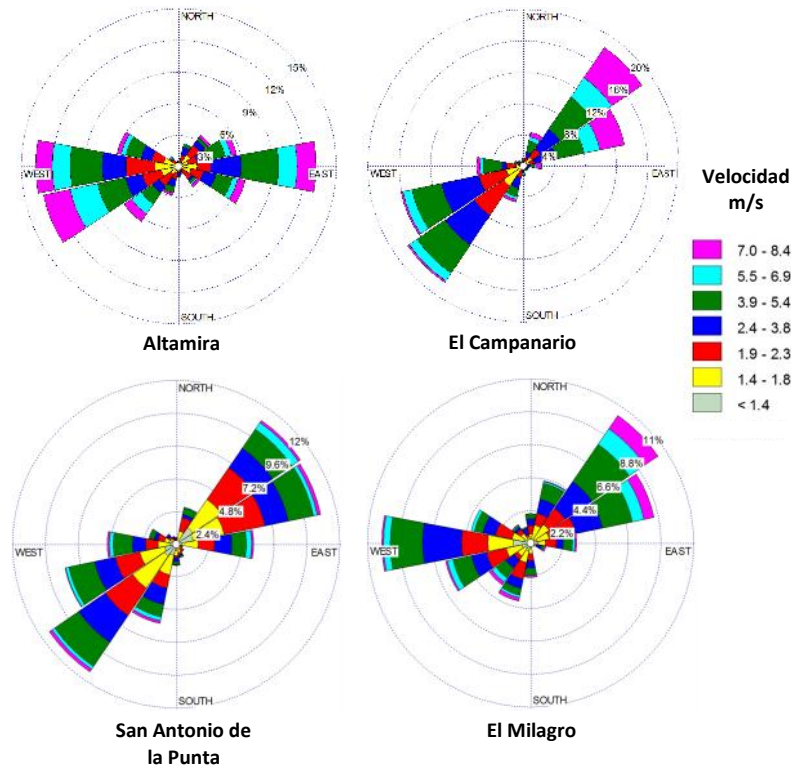


Figura VII.8 Rosas de viento, período Febrero – Abril 2011, previo al muestreo

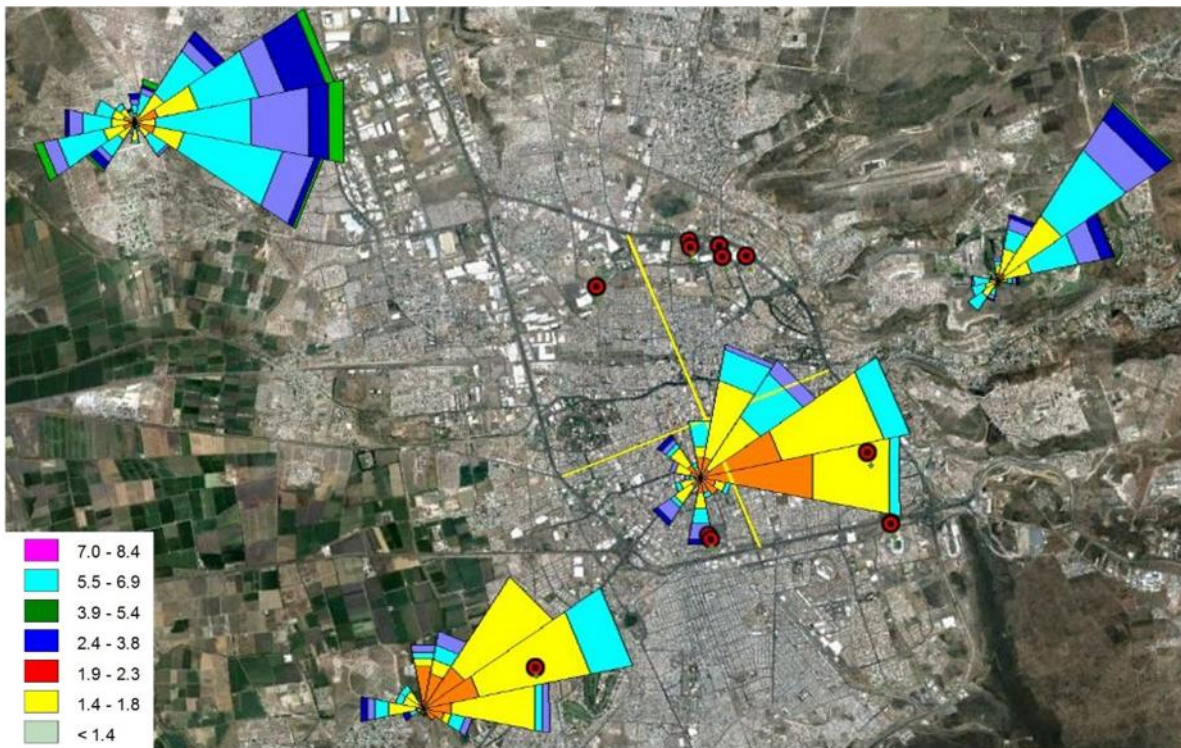


Figura VII.9 Rosas de Viento del año 2011.

Se puede notar una dispersión de los vientos con dirección hacia el este y el noreste, con velocidades de hasta 8.4 m/s. Sin embargo también se observa un porcentaje de hasta 9.6 en la dirección del viento hacia el oeste. Esto significa que la mayor parte de la dispersión de contaminantes, que incluye al carbono y nitrógeno, se dirige hacia esa región. Observando el comportamiento de las demás estaciones se distingue una tendencia anual hacia el noreste y nornoreste.

Año 2012

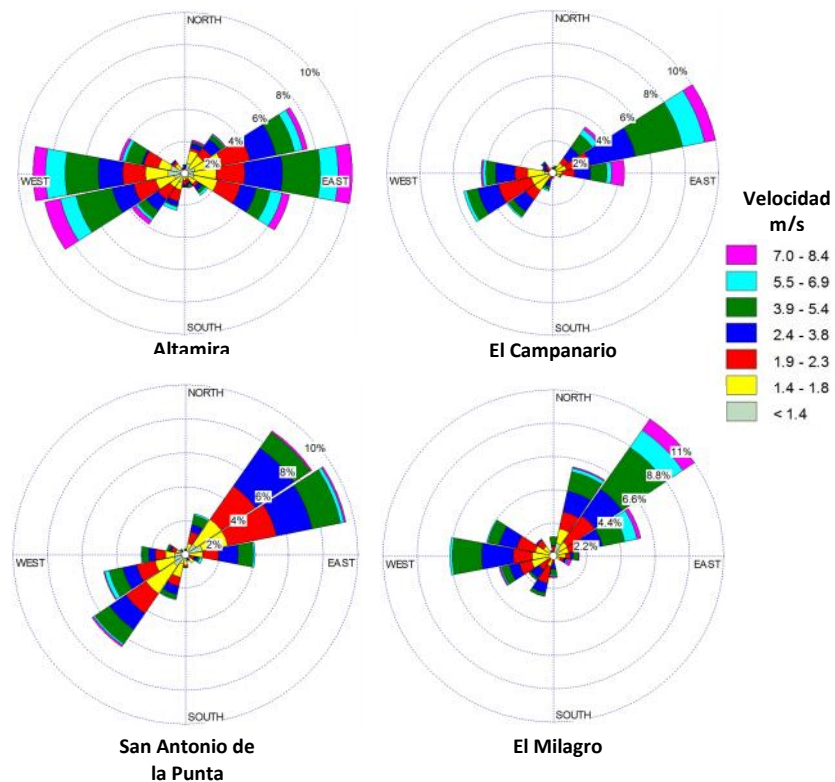


Figura VII.10 Rosas de viento, período Enero – Marzo 2012, previo al muestreo

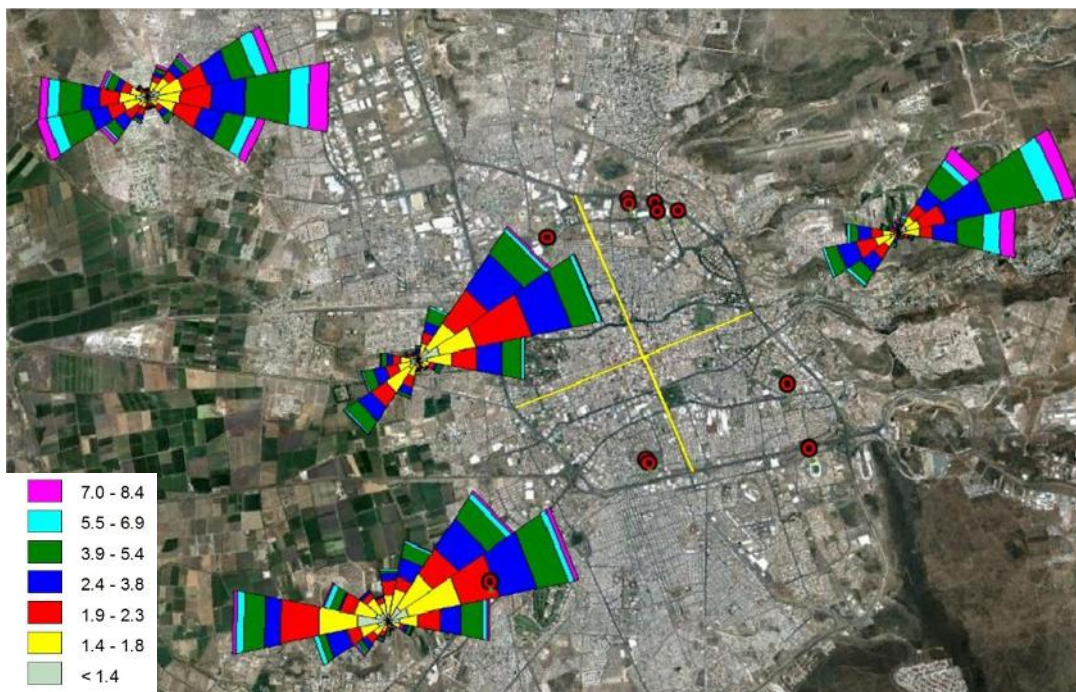


Figura VII.11 Rosas de Viento del año 2012

En el año 2012 la frecuencia de los vientos siguió un comportamiento similar al del año 2011. Cabe señalar que aunque la dirección fue la misma que el año anterior. Debe notarse que el efecto de deposición en la planta fue significativo, encontrando

concentraciones de metales traza que pudieran ser de riesgo para la población en general.

VII.3.2 Precipitación

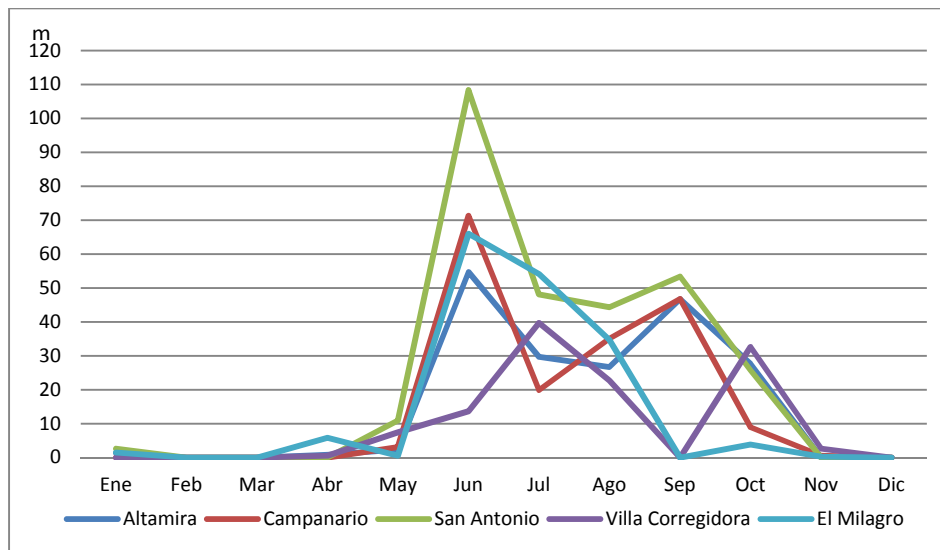


Figura VII.12 Precipitación anual 2011

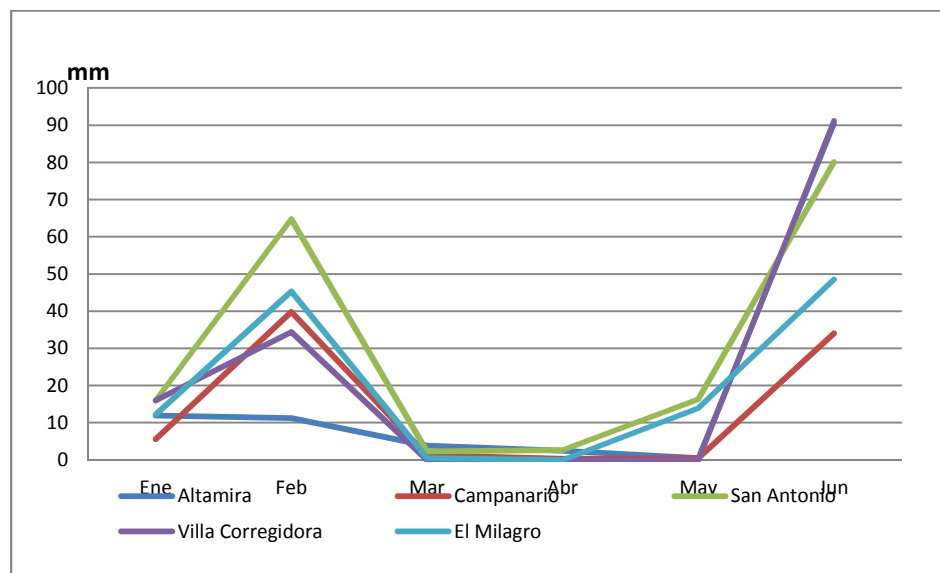


Fig. VII.13 Precipitación Anual 2012

VII.3.3 Simulación de variables climatológicas utilizando WRF

Para la modelación se utilizaron los siguientes períodos:

21 de marzo al 3 de abril de 2011, 9 al 22 de julio de 2011. Estas fechas corresponden a antes y después del primer período de muestreo.

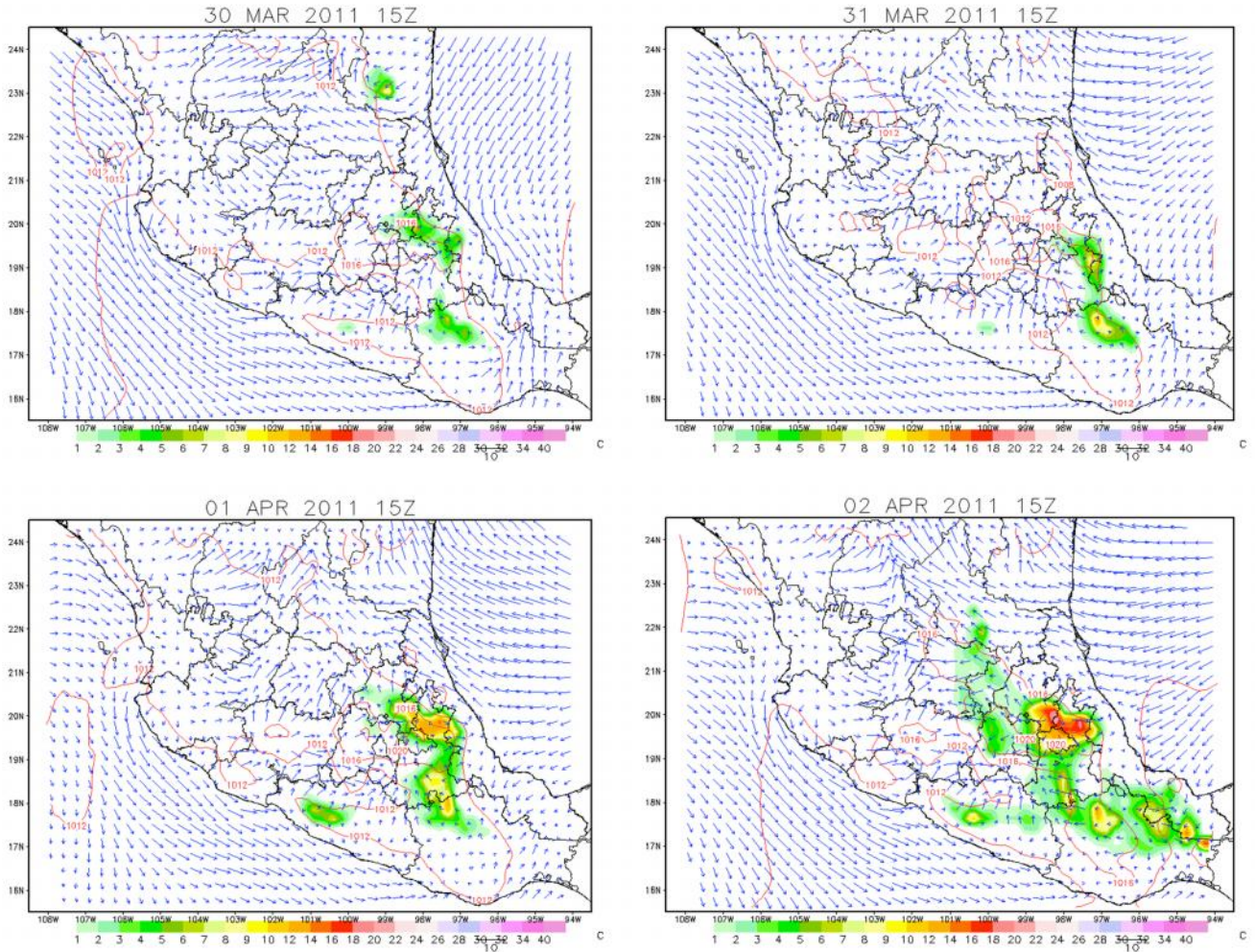


Figura VII.14 Dirección de Vientos a 10 metros y precipitación (mm). Anidamiento 1. Período 21 de marzo al 2 de abril

De la figura anterior se observa que se presenta entrada de viento del este por el Golfo de México, presencia de vientos también por el Pacífico vientos y vientos locales para los estados de Jalisco, Michoacán Guanajuato, Guerrero, de 5 a 10 m/s provocando precipitaciones en las regiones de Puebla, Oaxaca, Chiapas, Tamaulipas y en Querétaro hasta de 5 mm en la parte del Sur hasta el centro del estado, con vientos del este de 5 m/s de para el 2 de abril a las 15Z.

Durante los días 21 de marzo al 3 de abril de 2011 en el estado de Querétaro (Figura VII.16) se presentan vientos de todas las direcciones, donde a partir del 25 de marzo tienen la dirección suroeste y este. Lo anterior se debe a la entrada de los vientos del oeste del Pacífico representados en el anidamiento 1, Figura VII.15. Posteriormente estos vientos cambian de dirección suroeste, trayendo consigo la humedad, que se presentaba en el estado de Puebla e Hidalgo, presentando desde el día 1 de abril en el suroeste de Querétaro ubicando lluvias escasas de 1 mm. A medida que fueron pasando las horas la precipitación se incrementa hasta los 9 mm en el centro del estado y gran parte del sur hasta de 1 mm. Se puede apreciar como los vientos en el centro del estado convergen entrando del suroeste y del noroeste, sin embargo son más débiles.

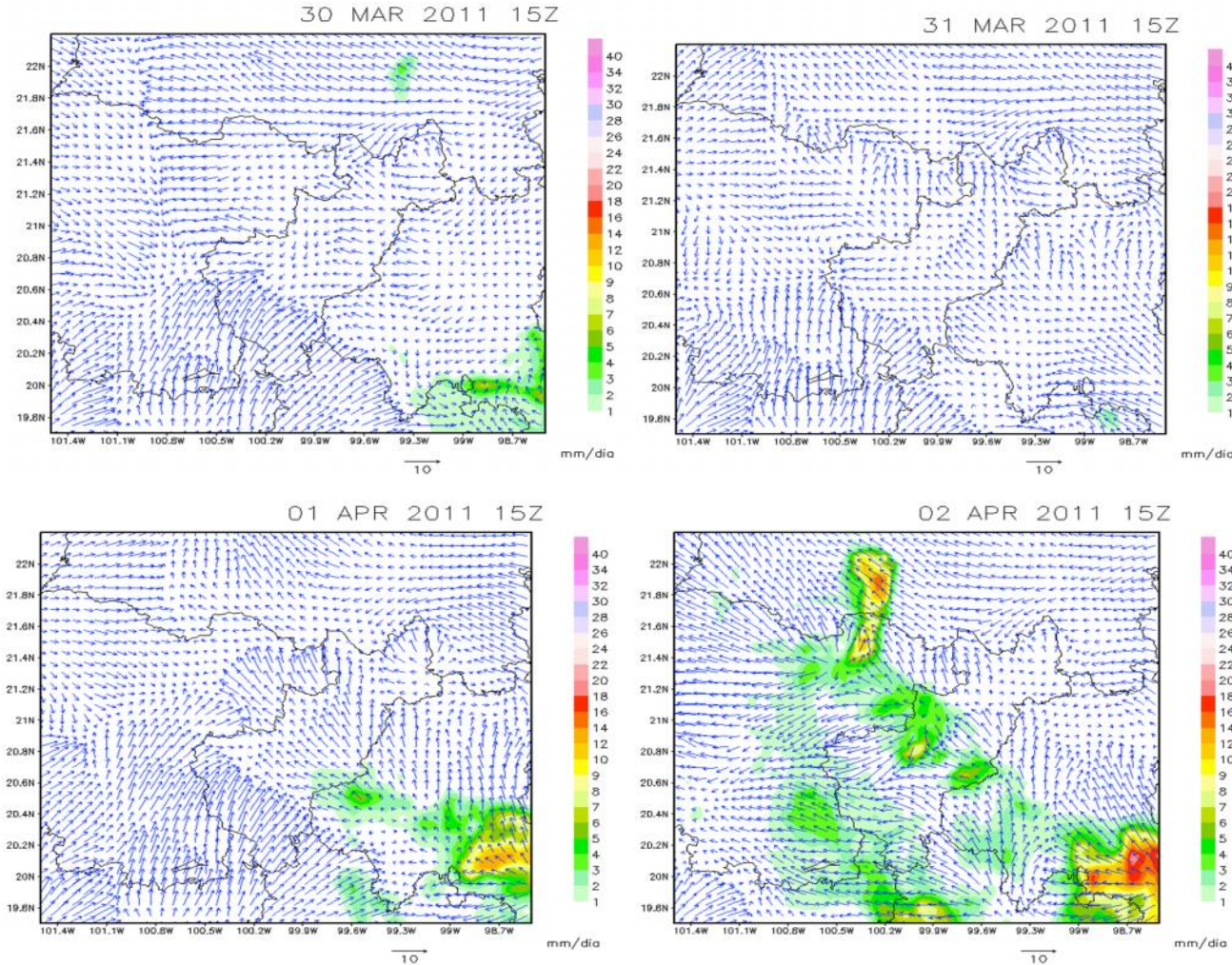


Figura VII.15 Dirección de Vientos a 10 metros y precipitación (mm). Anidamiento 2. Período 21 de marzo al 2 de abril de 2011

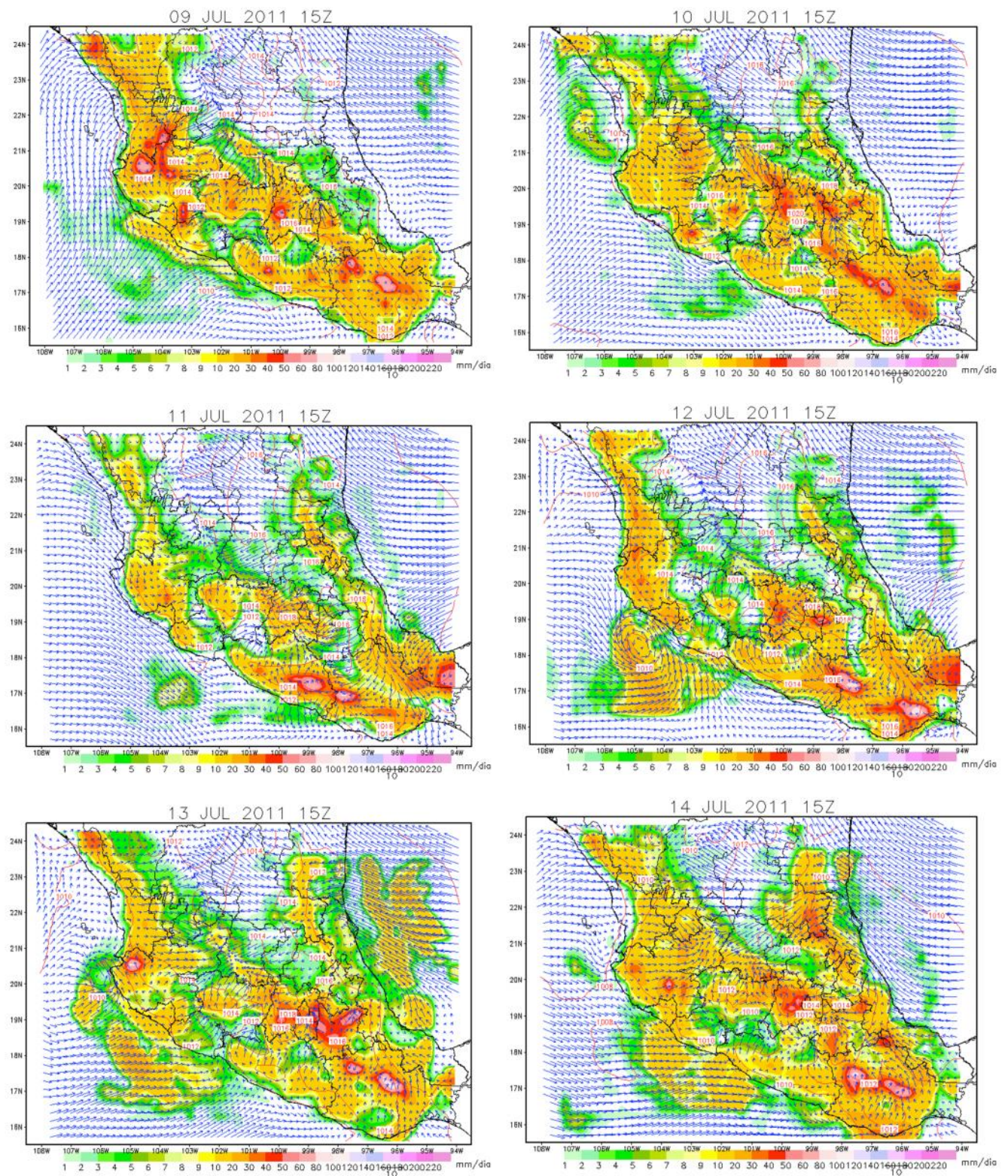


Figura VII.16 Dirección de Vientos a 10 metros y precipitación (mm). Anidamiento 1. Período 9 al 22 de Julio de 2011

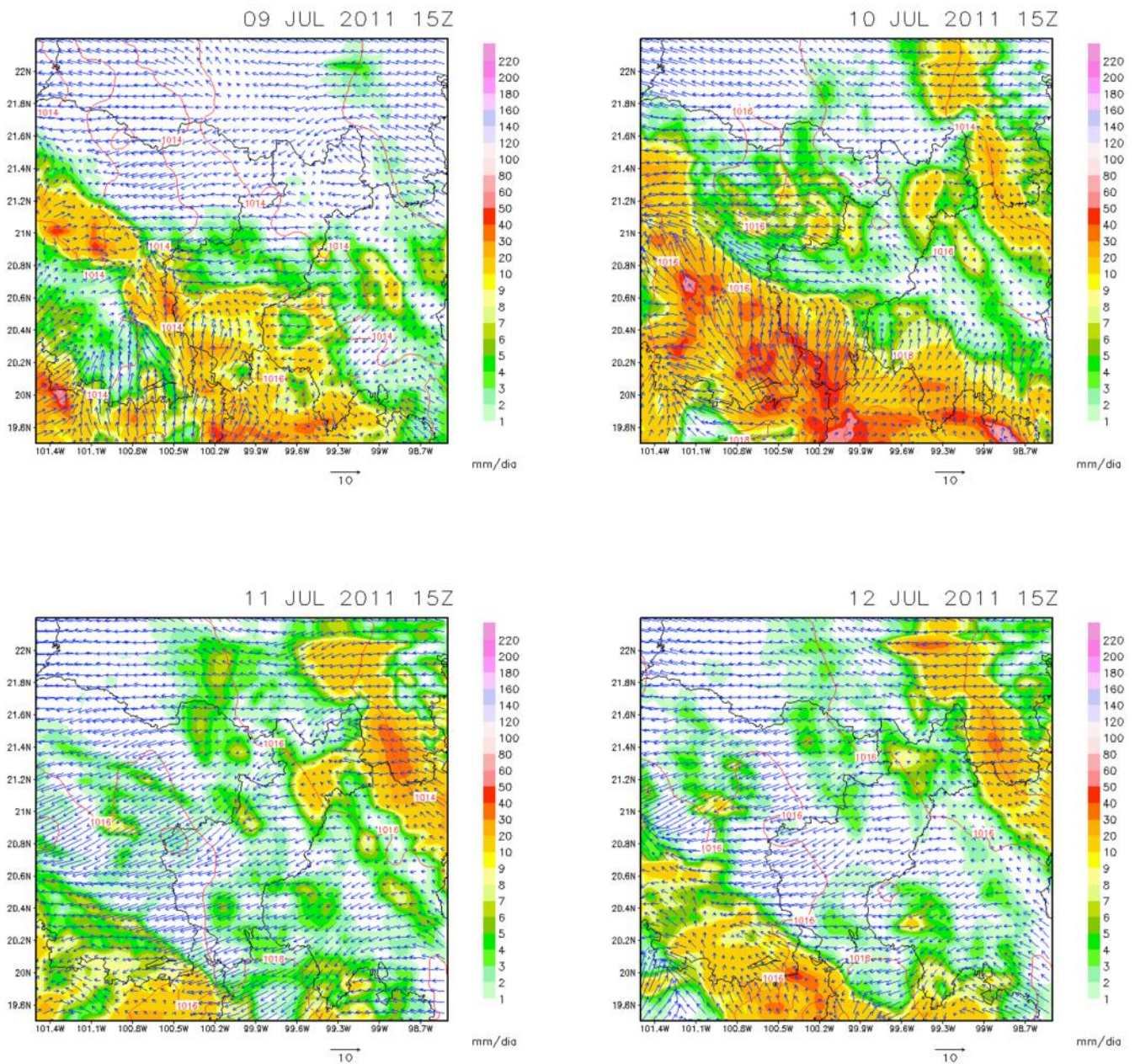


Figura VII.17 Dirección de Vientos a 10 metros y precipitación (mm). Anidamiento 2. Período 9 al 22 de Julio de 2011

Las variables de lluvia y viento, se presentan durante todo tiempo de las fechas de diagnósticos. Esto se debe a la entrada de humedad por el Golfo de México y el Pacífico. Para el Pacífico se encuentra una baja presión sobre el océano, para luego mostrar otros sistemas de baja presión cerca de las costas del Colima, Michoacán y Jalisco, lo cual genera este sistema entrada de humedad más a fondo del País con vientos de sur y sureste, para el día 12 de julio, haciendo convergencia los vientos tanto del Este contra los Oeste, lo cual provoca una línea de Vaguada desde los norte hasta al centro del país. Lo anterior genera más precipitación conforme pasa el tiempo.

Como se había mencionado en el anidamiento 1, se observa entrada de vientos por Este por parte del Golfo de México y entrada de los vientos del Oeste del Pacífico, y que se encontraba una línea de convergencia. Para el primer día se aprecia que en el sur del edo. de Querétaro, hay un encuentro de estos vientos que vienen del Oeste y del este y por efecto de la orografía podría ser la presencia de lluvia a 40 y 50 mm. A pesar de la influencia de los sistemas de baja presión que se encontraron en el Pacífico cerca de las costas de Colima, Michoacán y Guerrero, no tuvieron gran influencia para generar lluvias al menos para el estado de Querétaro, El aporte para la generación de la precipitación fue de los vientos de Este que transportaban consigo humedad y por efecto de orografía, se presentaron fuertes vientos y lluvias hasta 50 mm, salvo para el día 19 solo hubo lluvias ligeras en el noreste del estado con 2 mm.

VII.3.4 Imágenes SEM

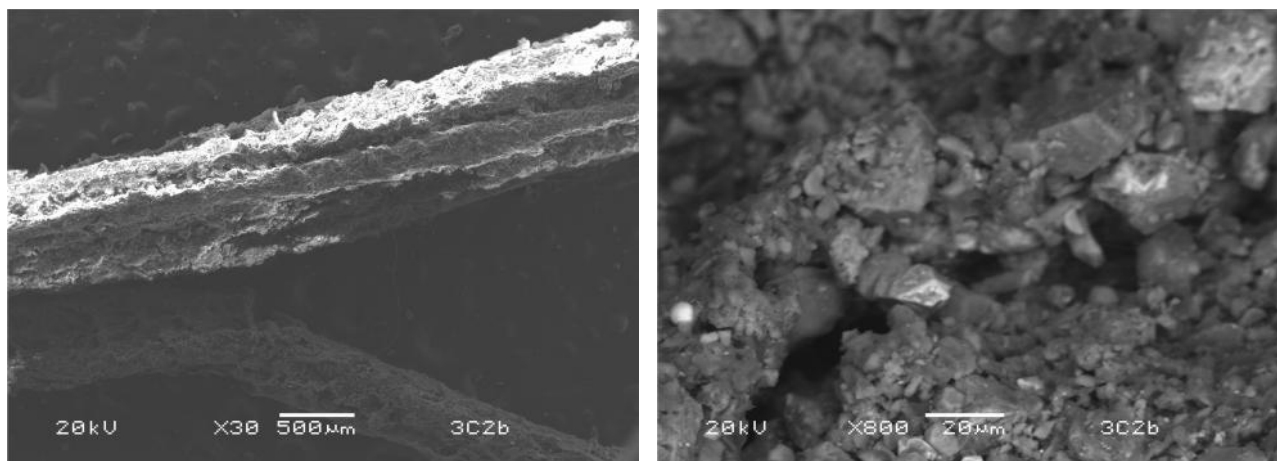


Figura VII.18 Imágenes SEM 3C2b (lado izquierdo) y 3C2b (Acercamiento, lado derecho) Parque Querétaro 200

La imagen que se muestra en la figura VII.19 es de una muestra contaminada, que al parecer sufre estrés debido a la acumulación de partículas ocasionada por el tráfico vehicular. Observamos una partícula de hierro, de un tamaño de 20 μm aproximadamente, lo que podría considerarse dentro de la fracción respirable.

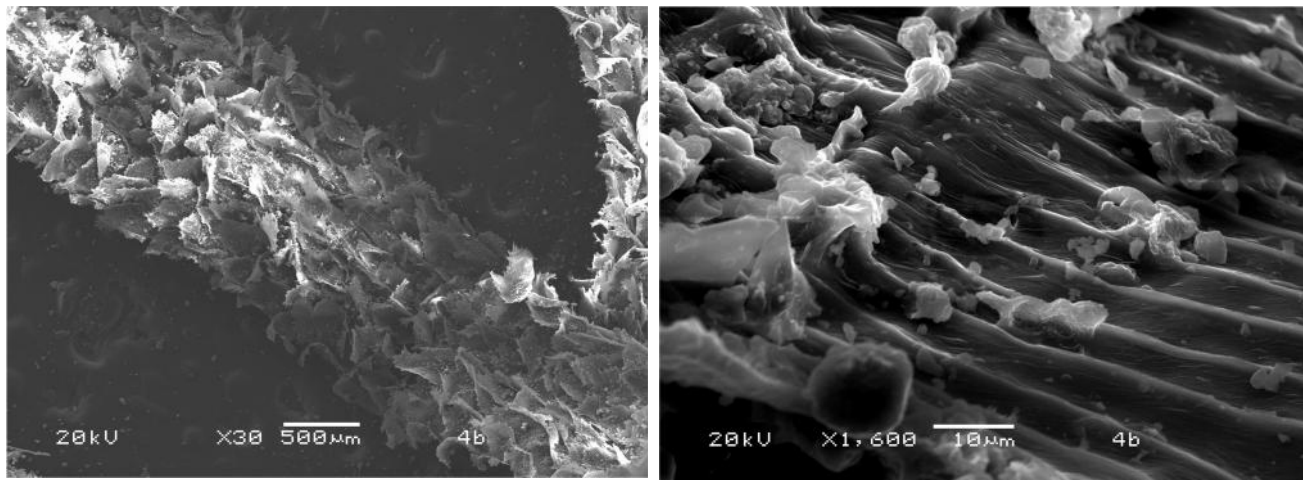


Figura VII.19 Imágenes SEM 4b

La figura VII.20 presenta una imagen de una zona intermedia, es decir de tráfico vehicular moderado, como puede ser el área de Jardines de la Hacienda o Carretas. En el acercamiento (imagen del lado derecho se distinguen partículas semi-redondas y de formas angulosas, estas formas angulosas se refiere a partículas que circulan en los alrededores de manera natural y que no incluye partículas significativas de contaminantes antropogénicos.

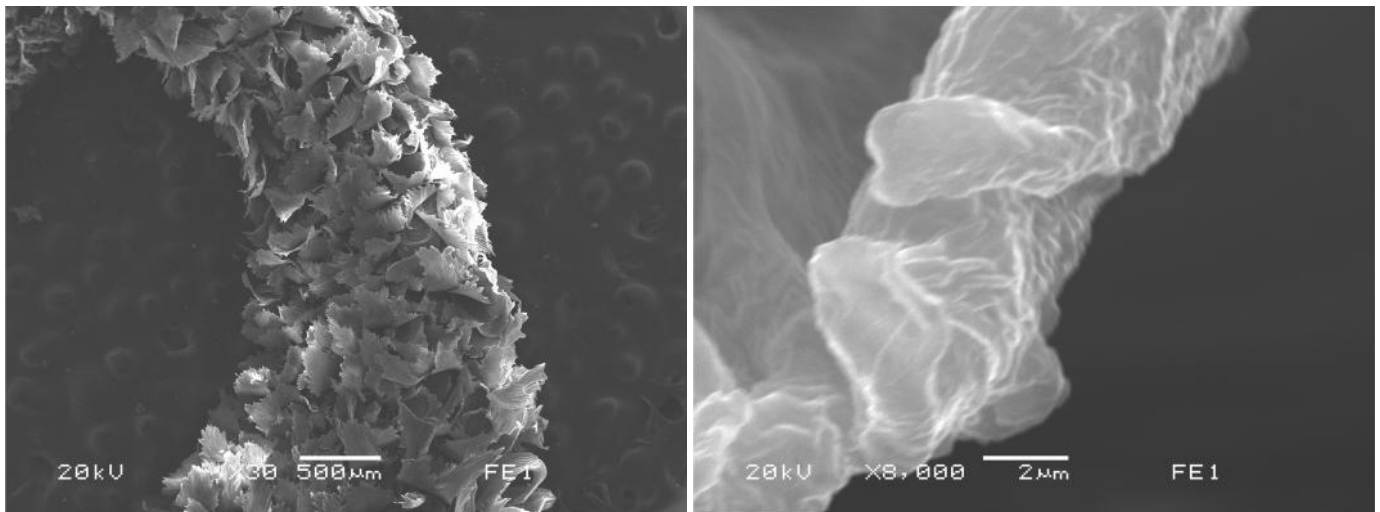


Figura VII.20 Imágenes SEM FE1

Las muestras FE1, fueron recolectadas en Juriquilla, en el Campus de la Universidad Autónoma de México (UNAM), dentro del campus existe poco tráfico vehicular, por lo que la planta se encuentra en buen estado y se ve limpia y sin partículas. Además se observa una textura diferente a la de las figuras anteriores. En el acercamiento de la figura VII.21 lado derecho se distinguen partículas naturales

VIII. CONCLUSIONES

El crecimiento del musgo está influenciado por las condiciones microclimáticas tales como, luz, agua, temperatura, concentración de CO₂. La adquisición de carbón de *Tillandsia Recurvata* depende del contenido del agua, la intensidad de la luz y la fijación de CO₂.

Los valores de ¹³C van de -16‰ (14 sitios) pero no se sobrepasa el valor de -26‰ lo cual es normal debido a las condiciones climatológicas cálidas- seco que prevalecen en la zona. Los resultados obtenidos muestran valores de hasta -24‰ con valores promedio de -14.6‰, lo cual se ha demostrado como típico de las plantas tipo C3.

Dado que el muestreo de *Tillandsia Recurvata* se realizó en árboles de Huizache y las muestras de musgo obtenidas estaban a menos de 4 metros, se puede atribuir la disminución o aumento de los valores de ¹⁵N a la combustión de combustibles fósiles y la producida por animales.

Para los meses de Abril y mayo de 2011 no existió una variación significativa entre los valores de nitrógeno y carbono, correspondiente al período de sequías. Por lo tanto no hay pulsos de afectación debido a las lluvias o frentes fríos que produzcan corrientes de viento mayores a los 5 m/s. Podemos distinguir que el ¹⁵N prácticamente se mantiene constante, mientras que el ¹³C no tiene una diferencia significativa. En este caso los procesos de la deposición seca no están influenciados por las variables climatológicas del viento, la lluvia y la humedad. Sin embargo para el mes de Junio si se presentaron variaciones (6 a 12 ‰) lo cual coincide con el inicio del período de lluvias en la región.

Aunque podría pensarse en un efecto de dilución por parte de la lluvia, al parecer el mecanismo de alimentación de las plantas epífitas permite que absorban mayores nutrientes cuando llueve por lo que, al menos para el carbono, no existe diferencia en los valores analizados.

Los valores máximos tanto de ¹³C como de ¹⁵N son mayores en la zona 2 y los límites de la zona 3. Lo que confirma la naturaleza antropogénica de los resultados pues en esa zona se presenta una afluencia vehicular mayor debido al boulevard Bernardo Quintana y el Circuito Jardines. Además las rosas de viento generadas muestran una frecuencia mayor hacia la dirección noreste y nornoroeste.

La metodología semi-cuantitativa señala que el sector 1 y el sector 3 son los que muestran una mayor concentración de los elementos comparado con el resto de los sectores. El mercurio es el elemento que menos se encontró en los sitios de muestreo. Por el contrario el cromo, el zinc y el manganeso resonaron por su abundancia. El plomo demostró que es propio de la zona urbana, pues la afluencia vehicular en el sitio de estudio es muy alta comparado con las zonas periféricas.

El comportamiento en la frecuencia y velocidad de los vientos fue similar en los años 2011 y 2012, se puede notar una dispersión de los vientos con dirección hacia el este y el noreste, con velocidades de hasta 8.4 m/s. Sin embargo también se observa un porcentaje de hasta de 9.6 en la dirección del viento hacia el oeste. Esto significa que la mayor parte de la dispersión de contaminantes, que incluye al carbono y nitrógeno, se dirige hacia esa región. Observando el comportamiento de las demás estaciones se distingue una tendencia anual hacia el noreste y nornoreste.

El programa WRF señala que en las fechas de muestreo, que abarca tanto la época de sequía como de lluvias, coincide con los resultados observados. Es decir se cumple con los requisitos mínimos que la planta requiere para su crecimiento.

IX. LITERATURA CITADA

Adriano D. C., 1992. Biogeochemistry of trace metal. Lewis Publishers. Ed., Boca Raton. p. 513.

Association of American Feed Control Officials. Oficial Publication (AAFCO), 1996. p. 230-236.

Aspiazu, J., Cervantes L., Ramírez J., López J., Ramos R., Muñoz R., Villaseñor P. 2007. Temporal and spatial trends studied by lichens analysis: atmospheric deposition of trace elements in Mexico. *Revista Mexicana de Física* S53(3) 87-96.

Benzing, D. H. 1990. Vascular epiphytes: general biology and related biota. Cambridge University Press. Cambridge, MA. USA. 690 p.

Bermudez, G., Rodriguez J., Pignata M. 2009. Comparison of the air pollution biomonitoring ability of three *Tillandsia species* and the lichen *Ramalina celastri* in Argentina. *Environmental Research* 109: 6-14.

Borge, R., Alexandrov V., del Bals J., Lumbreras J., Rodríguez E. 2008. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment* 42: 8560–8574.

Calvo, Diego. 2008. Medida en inmisión de la contaminación atmosférica. UNED: 1-39.

Calbó, J. 1993. Contribución al Desarrollo de un Modelo Numérico de Pronóstico Meteorológico de Mesoscala. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.

Carrillo A. 2011. Geoquímica e Isotopía de Hielo Glaciar. Registros Climático y Ambiental. UNAM

Casal, J., Mateu, E. 2003. Tipos de muestreo. *Revista Epidemiológica*. Universidad Autónoma de Barcelona. 1: 3-7.

Castañe P.M., Topalián M.L., Cordero R. Salibian A. 2003. Influencia de la especiación de los metales pesados en el medio acuático como determinante de su toxicidad. *Rev. Toxicología*. 20: 13-18.

Chandra Mouli P., Venkata Mohan S., Balaram V., Praveen Kumar M., Jayarama Reddy S. 2006. A study on trace elemental composition of atmospheric aerosols at semi-arid urban site using ICP-MS Technique. *Atmospheric Environment*. 40: 136-146.

Cipro V.Z. Yogui G. T., Bustamante P., Taniguchi S, Sericano J. L., Montone R. C. 2011. Organic pollutants and their correlation with stable isotopes in vegetation from King George Island, Antarctica. *Chemosphere* 85: 393-398.

Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ). 2006. Estudio exploratorio de las condiciones isotópicas e hidrogeoquímicas de afloramientos en la comunidad de El Arbolito, municipio de Cadereyta, Qro.

Coplen, T. B., W. A. Brand, M. Gehre, M. Gröning, A. J. Meijer Harro, B. Toman y R. M. Verkouteren. 2006. New Guidelines for $\delta^{13}\text{C}$ Measurements. *Analytical Chemistry* 78: 2439-2441.

Coplen, T. B. 2006. After two decades a second anchor for the VPDB $\delta^{13}\text{C}$ scale, *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20: 3165-3166.

Cyrus J., Stölzel M., Schroder, B. 1990. Organic and inorganic substances in highway tunnel exhaust air. *Science Total Environment*. 93: 293-300.

Dannecker, W., Schroder, B. 1990. Organic and inorganic substances in highway tunnel exhaust. *Science Total Environment*. 93:293-300.

Decesari, S., Facchini, M.C. Fuzzi, S., Tagliavani, E. 2000. Characterization of water soluble organic compounds in atmospheric aerosol: *Geophysical Research*. 105: 1481-1489.

Díaz-Báez, M.C., Cruz, L.E., Rodríguez, D., Pérez, J. and Vargas, C.M. 2000. Evaluation of three water concentration techniques as a prior step to test acute toxicity. *Environ. Toxicol.*, 15(4): 345-351.

Durán de Bazúa C. Saneamiento de aguas residuales y desechos en un ingenio azucarero. Sept-Oct 1994. *UNAM Hoy*, AÑO 3, N° 14. Pp. 57-62.

Dzubaj A., Backor M., Tomko J., Peli, E., Tuba Z., 2008. Tolerance of the lichen *Xanthoriaparietina* (L.) Th. Fr. to metal stress. *Ecotoxicology and environmental safety*. 70: 319-326

Environmental Protection Agency (EPA). 1983. Introduction to dispersion modelling course. North Carolina, USA. Environmental Research Center.

Facchinelli, A., 2000. Heavy metals in cultivated soil from Piemonte.

Figueiredo AMG., Saiki M, Ticianelli RB, Domingos M, Alves ES, Market B. 2001. Determination of trace elements in *Tillandsia usneoides* by neutron activation analysis for environmental biomonitoring. *J Radioanal Nucl Chem*. 249(2):391-5.

Ferreira J., Rodriguez A., Monteiro A., Miranda A.I., Dios M., Souto J.A., Yarwood G., Nopmongkol U., Borrego C. 2011. Air quality simulations for North America - MM5eCAMx modelling performance for main gaseous pollutants. *Atmospheric Environment* 1-13.

Finkelman J., Corey G., Calderón R. 1993. *Environmental Epidemiology: a Project for Latin America and the Caribbean*. Metepec: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud; Programa Internacional de Protección frente a los Productos Químicos (ONU/ILO/OMS). Global Environmental Epidemiology Network.

García L. y Rubiano O. 1984. Comunidades de Líquenes como indicadores de niveles de calidad del aire en Colombia. *Cont. Amb.* 8: 73-90.

García, R., Torres, Ma. del C., Padilla, H., Belmont, R., Azpra, E., Arcega-Cabrera, M., Báez, A., 2006. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the state of Mexico, Mexico. *Atmospheric Environment*. 40(32): 6088-6100.

Gasca J., et al. 2007. Modelación de posibles escenarios tecnológicos para la mitigación de GEI en México, Mapas Tecnológicos. INE. IMO, México.

Guerrero, R., Berlanga, M. 2000. Isotopos estables: Fundamentos y Aplicaciones. Departamento de Microbiología, Universidad de Barcelona. P. 1-17

Gutiérrez, Víctor, 2005. Situación Actual y Tendencias en la Calidad del Aire en México. CENICA. CEPAL serie de Seminarios y Conferencias. 9: 33-47

Hawksworth, David L., Iturriaga, T., Crespo, A. 2005. Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. Revista Iberoamericana de Micología. 22: 71-82.

Instituto Nacional de Estadística Geográfica e informática INEGI. 2003. Anuario Estadístico Querétaro de Arteaga. México.

Instituto Nacional de Estadística Geográfica e informática INEGI. 1994. XIV censo industrial, censos económicos.

Instituto Nacional de Estadística Geográfica e informática INEGI. 2010. Censo Nacional de Población y Vivienda.

Jiang F., Liu Q, Huang X, Wanga T, Zhuang B, Xie M. 2012. Regional modeling of secondary organic aerosol over China using WRF/Chem. Journal of Aerosol Science 43: 57-73

Jorba I, Oriol. 2005. Simulación de los Campos de Vientos de la Península Ibérica y el Área Geográfica de Catalunya con Alta Resolución Espacial para Distintas Situaciones Meteorológicas Típicas. Tesis.

Kabatas-Pendias D. and Pendias H. 1992. Trace elements in soil and plants. Vol. 1 CCR, Press Inc. Boca Ratón. Florida, USA. p. 365.

Lee, B.K., Hong, S.H., Lee, D.S. 2000. Chemical composition of precipitation and wet deposition of major ion son the korea Peninsula. Atmospheric Environmental. 34: 563-575.

Luna, J. C. 2004. Estudio del Comportamiento de la dispersión de la contaminación atmosférica de NOx. Caso: Santiago de Querétaro.

Liu Y., Xu Z., Duffy R., Chen W., An S., Liu S., Liu F. 2011. Analyzing relationships among water uptake patterns, rootlet biomass distribution and soil water content profile in a subalpine shrub land using water isotopes. European Journal of Soil Biology 47: 380-386.

Lijteroff R., Lima L., Prieri B., 2009. Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. Revista interamericana de contaminación ambiental. 25 (2): 111-120.

Loppi, S., Paoli L., Gaggi C., 2006. Diversity of Epiphytic Lichens and Hg Contents of *Xanthoriparietina* Thalli as Monitors of Geothermal Air Pollution in the Mt. Amiata Area (Central Italy). Journal of atmospheric chemistry. 53: 93-105.

Lücking R. 1997. Ecology of folicolous lichens as bioindicators in the tropics with special reference to the microclimate. Abstracta Botanica 1997. 21: 99-116.

Lüttge, U. 1989. Vascular plants and epiphytes: evolution and ecophysiology. *Naturewissenschaften* 72: 557-566.

MacKinnon G, MacKenzie A.B., Cook G.T., Pulford I.D., Duncan H.J., Scott E.M. 2001. Spatial and temporal variations in Pb concentrations and isotopic composition in road dust, farmland soil and vegetation in proximity to roads since cessation of use of leaded petrol in the UK. *Science Of Total Environment* 409: 5010-5019.

Madison, M. 1977. Vascular epiphytes: their systematic occurrence and salient features. *Selbyana* 2: 1-13.

Mendoza J. F., López M. G., Gonzalez O., Tellez R. 2010. Inventario de Emisiones en Carreteras Federales del Estado de Querétaro. Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Migliavacca D., Teixeira, E.C., Weigand, F., Machado, A.C.M., Sanchez, J. 2005. Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil. *Atmospheric Environment* 39: 1829-1844.

Miranda, F. y E. Hernández X. 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 28: 29-179.

Nieboer E, Richardson D. S. 1980. The replacement of the nondescript term heavy metals by biologically and chemically significant classification of metal ions. *Environ. Pollution /Ser. B.* 1.3

Nriagu, J.O., Pacyna, J.M. 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air water and soils by trace metals. *Nature.* 333: 134-139.

Nylander W. Les Lichens du Jardin de Luxemburg. *Bull Soc Bot France* 1866; 13: 364-372.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 1997. Salud y ambiente en el desarrollo sostenible, WHO/EHG/97.8, OMS.

Pain D.J. 1995. Lead in the environment in: *Handbook of ecotoxicology* by Hoffman D.J., Rattner B.A., Burton G.A. and Cairns J. Section II Chap. 16 Lewis Publishers USA 356-391 pp.

PNUMA, CONCYTEQ, SEDESU. 2008. Perspectivas del Medio Ambiente Urbano: GEO Zona Metropolitana Querétaro. 58-65.

Pearson G.R. 1973. *Hard and Soft Acids and Bases.* Wiley New York.

Pielke, R. A. 1984. *Mesoscale Meteorological Modeling.* Orlando, Academic Press. P. 611.

Reyes-García, C. 2001. *Ecofisiología de epífitas de selva baja caducifolia del genero Tillandsia (Bromeliaceae): estacionalidad y fotosíntesis.* Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F. México. 81 p.


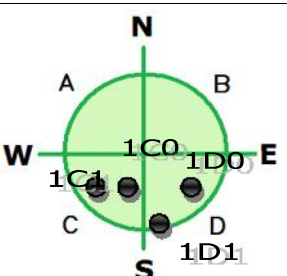
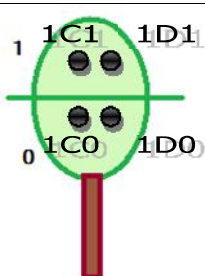
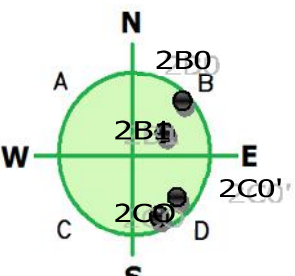
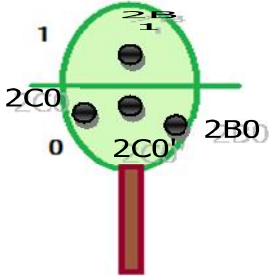
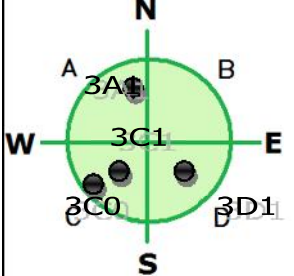
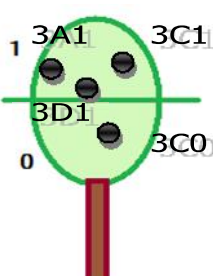
Rzedowski, J. 1981. *Vegetación de México.* Editorial Limusa. México D. F. México. 430 p.

Richards, P. W. 1995. *Tropical rain forest: an ecological study.* Cambridge University. Press, Cambridge, MA. USA. 670 p.


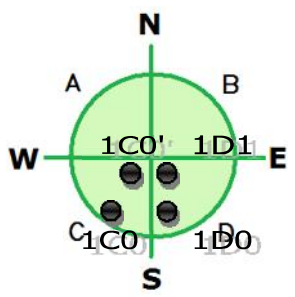
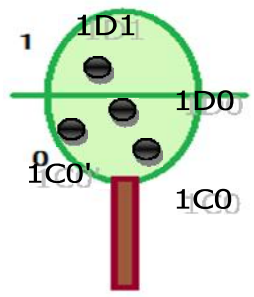

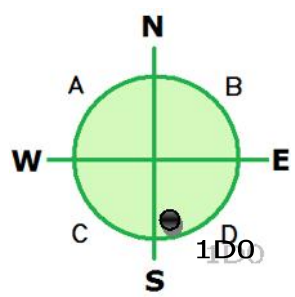
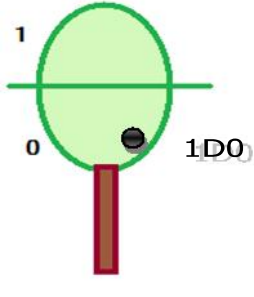
- San José R., Pérez J.L., González R.M., 2008. The evaluation of the air quality impact of an incinerator by using MM5-CMAQ-EMIMO modeling system: North of Spain case study. *Environment International* 34: 714-719.
- Scheiner, B., Doyle F, Kamatra S. 1989. *Biotechnology in minerals and metal processing*. Society of Mining Engineers. Inc., Littleton. 209.
- Schemenauer, R.S. 1986. Acid deposition to forests: The 1985 Chemistry of high elevation fog (CHEF). *Atmosphere-Ocean*. 24: 303-328.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable, SEDESU. 2004. *Anuario Económico del estado de Querétaro*.
- Secretaría de Desarrollo Sustentable, SEDESU. 2011. *Anuario Económico del estado de Querétaro*.
- Smith, J. A. C., Griffiths H., Lüttge U. 1986. Comparative ecophysiology of CAM and C3 Bromeliads: the ecology of the Bromeliaceae in Trinidad. *Plant Cell and Environment* 9: 359-376.
- Stevens, G. S. 1987. Lianas as structural parasites: the *Bursera simaruba* example. *Ecology* 68: 77-81.
- Tucker, M.E. 1991. *Sedimentary petrology*. Blackwell Science. 260 pp.
- Turner G.M., Baker W.E. 1998. Peterson C.J. and Peet R.K. Factor influencing succession. Lesson from large, infrequent natural disturbance. *Ecosystems*. 1: 511-523.
- U.S. EPA, 1993. *Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwaters and marine organisms*, 4th ed., EPA/600/4-90/027F, Office Research and Development, Washington, D.C.
- Valdivia, E. P. 1977. Las epífitas. Estudio botánico y ecológico de la región del Río Uxpanapa, Veracruz. *Biotica* 2: 55-71.
- Walter, J.T., Aneja, V.P., Dickey, D.A. 2000. Atmospheric transport and wet deposition of ammonium in the North Carolina. *Atmospheric Environment*. 34: 3407-3418.
- Wood, J.M., Goldberg, E.D. 1988. Impact of metals on the biosphere in: *Global chemical cycles and their alteration by man: Dahlem workshop*. 137-153.
- Wannaz, Eduardo D., Carreras H., Pérez C., Pignata M. 2006. Assessment of heavy metal accumulation in two species of *Tillandsia* in relation to atmospheric emission sources in Argentina. *Science of Total Environment* 361: 267–278
- Wannaz, Eduardo., Carreras H., Rodriguez J., Pignata M. 2012. Use of biomonitors for the identification of heavy metals emission sources. *Ecological indicators* 20 (2012) 163–169.
- Zhang Y., Dubey M. 2009. Comparisons of WRF/Chem simulated O₃ concentrations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the MILAGRO period. *Atmospheric Environment* 43: 4622–4631.
- Zhang Y., Olsen S., Dubey M. 2010. WRF/Chem simulated springtime impact of rising Asian emissions on air quality over the U.S. *Atmospheric Environment* 44: 2799-2812.

ANEXO A. HOJAS DE MUESTREO

1er. período de muestreo (Abril – Julio de 2011)

MUESTRAS		VISTA AÉREA	
Árbol 1 Sector 1 CU			
Altura: 2.7 m	Diámetro: 0.9 m		
Fecha de muestreo: 01/06/2011			
Ubicación: Ciudad Universitaria UAQ. Facultad de Química. Estacionamiento			
Coordenadas: : 20° 35' 27.98" N 100° 24' 38.99" W			
Altitud: 1805.3 m			
Observaciones: Bifurcación a los 60 cm. Podado a partir de esa bifurcación.			
			
MUESTRAS		VISTA AÉREA	
Árbol 2 Sector 1 CU		Árbol 3 Sector 1 CU	
Altura: 6.2 m	Diámetro: 1.4 m	Altura: 4.5 m	Diámetro: 1.1 m
Fecha de muestreo: 01/06/2011		Fecha de muestreo: 01/06/2011	
Ubicación: Al lado de edificio 3 de Química		Ubicación: Frente a edificio E de Ciencias Políticas	
Coordenadas: 20° 35' 26.23" N 100° 24' 39.08" W		Coordenadas: 20° 35' 33.43" N 100° 24' 44.72" W	
Altitud: 1821.70 m		Altitud: 1822.72 m	
Observaciones: Árbol alejado de vehículos.		Observaciones: De lado al paso vehicular frente a las peñas.	
			

MUESTRAS	
Árbol 4 Sector 1 CU	
Altura: 6.8 m	Diámetro: 1.2 m
Fecha de muestreo: 01/06/2011	
Ubicación: Jardinera entre cafetería y edificio E de ciencias políticas.	
Coordenadas: 20° 35' 35.93" N 100° 24' 43.33" W	
Altitud: 1821.60 m	
Observaciones: El árbol es frondoso y alto, se encuentra en medio de la jardinera.	


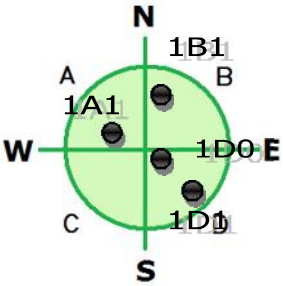
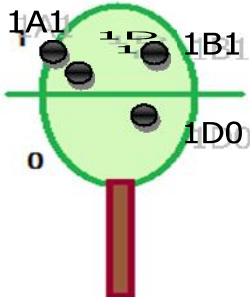
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 1 Tecnológico de Monterrey		
Altura: 15.6 m	Diámetro: 1.7 m	
Fecha de muestreo: 6/06/2011		
Ubicación: : Prolongación Tecnológico Norte		
Coordenadas: 20° 36' 37.59" N 100° 24' 24.50" W		
Altitud:		
Observaciones: El árbol esta sobre la banqueta, además de que está muy grande. Se dificulta la toma de muestras debido a la cercanía con la calle.		
		
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 San Gregorio		
Altura: 11.7 m	Diámetro: 1.3 m	
Fecha de muestreo: 8/07/2011		
Ubicación: Ejido - Fraternidad.		
Coordenadas:		
Altitud:		
Observaciones: El árbol se encuentra en medio de un camellón, sin embargo no se encontraba plagado de epifitas, por lo que solo conseguí 1 muestra de 2 detectadas.		
		


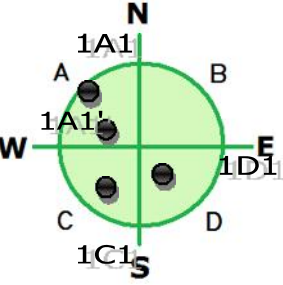
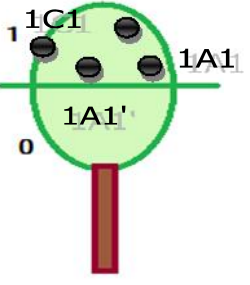
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 Bernardo Quintana – Circuito Jardines		
Altura: 4.1 m	Diámetro: 1.2 m	
Fecha de muestreo: 27/05/2011		
Ubicación: Bernardo Quintana - Circuito Jardines.		
Coordenadas: 20° 36' 51.37 N 100 23' 11.55" W		
Altitud:		
Observaciones: El árbol se encuentra al lado de Bernardo quintana. Presenta pocas epífitas por ello sólo se tomaron 3 muestras.		

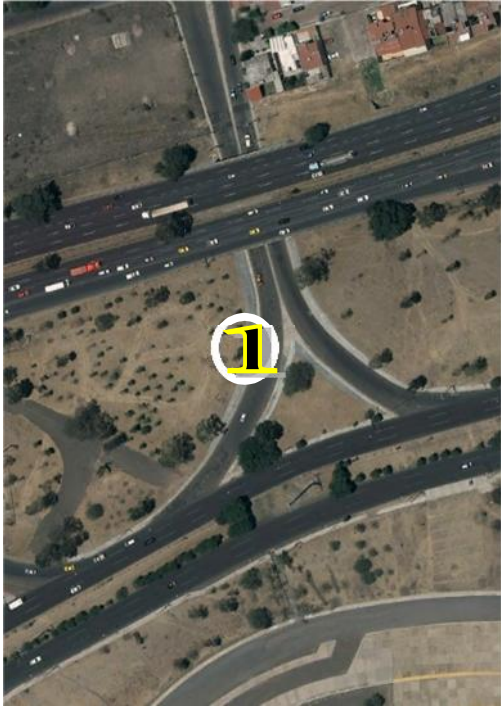
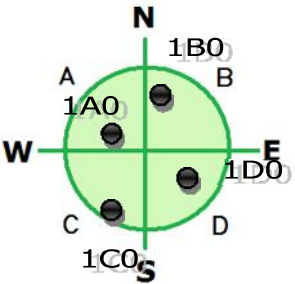
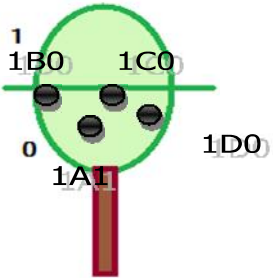
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 De Jacarandas		
Altura: 9.1 m	Diámetro: 1.03 m	
Fecha de muestreo: 8/07/2011		
Ubicación: Antiguo camino a San José – Boulevard Bernardo Quintana.		
Coordenadas: 20° 36' 58.75" N 100° 23' 47.10" W		
Altitud: 1815.84 m		
Observaciones: El árbol está sobre la banqueta y una barda lo cubre por un costado. El árbol tenía pocas especies de epífitas y al haber tránsito vehicular se dificulta la toma de muestras.		

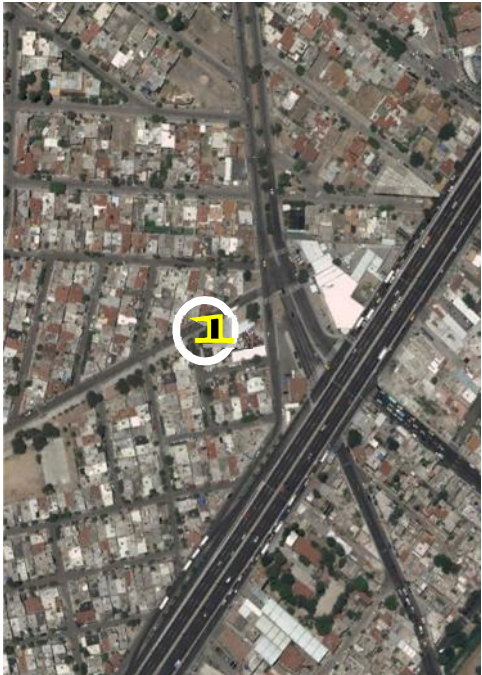
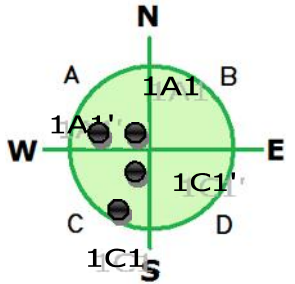
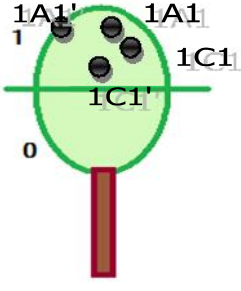
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 Plaza del Parque		
Altura: 7.9 m	Diámetro: 1.4 m	
Fecha de muestreo: 29/06/2011		
Ubicación: A lo largo de calle Mecánica, junto a estacionamiento en COTSCO.		
Coordenadas: 20° 36' 55.37" N 100° 23' 38.74" W		
Altitud: 1826.90 m		
Observaciones: El árbol está en una jardinera entre el estacionamiento y la calle Mecánica. Se encuentra sano y en buen estado.		

MUESTRAS	
Árbol 2 Sector 2 Plaza del Parque	
Altura: 11.9 m	Diámetro: 1.64 m
Fecha de muestreo: 29/06/2011	
Ubicación: Adelante del árbol 1 hacia la calle Bernardo Quintana.	
Coordenadas: 20° 36' 58.38" N 100° 23' 39.46" W	
Altitud:	
Observaciones: El árbol está en la glorieta, en una bifurcación del camino. Sólo se pudieron conseguir dos muestras debido a tenía muy pocas epífitas (<i>Tillandsia Recurvata</i>).	

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 Paseo Constituyentes - Corregidora		
Altura: 6 m	Diámetro: 0.59 m	
Fecha de muestreo: 27/05/2011		
Ubicación: Glorieta de paseo de la Constitución- Corregidora Norte.		
Coordenadas: 20° 37' 14.17" N 100° 23' 22.44" W		
Altitud: 1854.700 m		
Observaciones: El árbol se encuentra en buen estado y al parecer no fue removido de su lugar.		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 3 Carretas		
Altura: 6.3 m	Diámetro: 0.7 m	
Fecha de muestreo: 23/06/2011		
Ubicación: Entre las calles Plateros – Vizcaínas.		
Coordenadas: 20° 35' 21.90" N 100° 22' 12.76" W		
Altitud: 1833 m		
Observaciones: El árbol se encuentra en perfecto estado, contiene muchas epífitas destacando que la mayoría se encuentra en dirección a la calle.		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 3 Paseo Quintas del Marqués – Distribuidor Vial.		
Altura: 2.3 m	Diámetro: 0.4 m	
Fecha de muestreo: 20/06/2011		
Ubicación: Quintas del marqués – Distribuidor vial		
Coordenadas: 20° 34' 49.48" N 100° 22' 1.67" W		
Altitud: 1869 m		
Observaciones: El árbol se encuentra al lado de Bernardo Quintana, enfrente del estadio Corregidora, sin embargo no hay ningún edificio que afecte en su desarrollo		
		


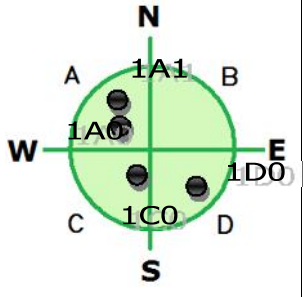
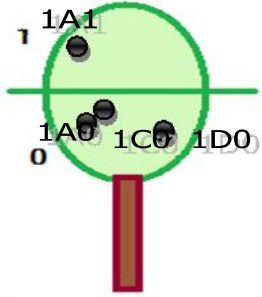
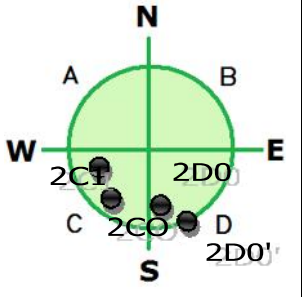
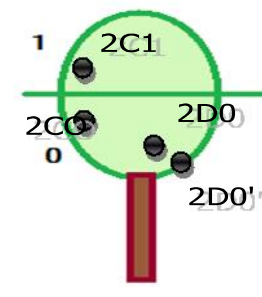
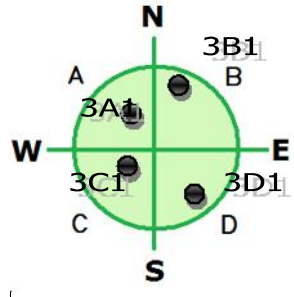
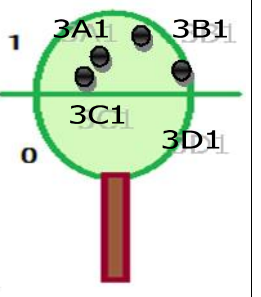
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 4 Jardines de la Hacienda		
Altura: 9.5 m	Diámetro: 1.3 m	
Fecha de muestreo: 4/07/2011		
Ubicación: María Luisa Medina - Moisés Saens.		
Coordenadas: 20° 33' 46.34" N 100° 24' 55.20" W		
Altitud: 1816.20 m		
Observaciones: El árbol ya no se encontraba seco como en el muestreo anterior.		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 4 Panteón Municipal		
Altura: 5.7 m	Diámetro: 1.1 m	
Fecha de muestreo: 17/06/2011		
Ubicación: En medio del panteón municipal.		
Coordenadas: 20° 34' 44.28" N 100° 23' 30.14" W		
Altitud: 1830.67 m		
Observaciones: Árboles en buen estado con buena cantidad de epífitas.		

MUESTRAS	
Árbol 2 Sector 4 Panteón Municipal	
Altura: 5.5 m	Diámetro: 0.8 m
Fecha de muestreo: 17/06/2011	
Ubicación: A un costado del árbol 1.	
Coordenadas: 20° 34' 44.51" N 100° 23' 30.08" W	
Altitud: 1831.70 m	
Observaciones: Árboles en buen estado con buena cantidad de epífitas.	

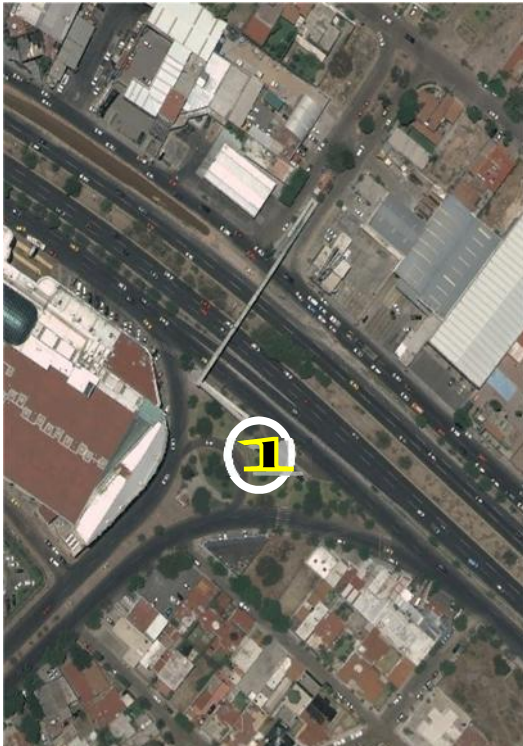
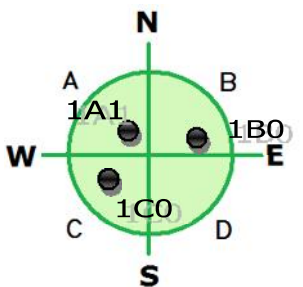
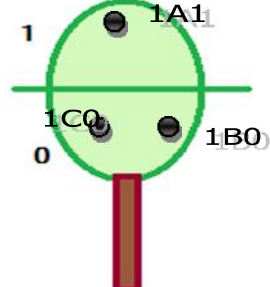
2do. período de muestreo (Marzo – Abril de 2012)



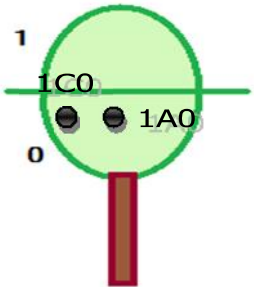
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 1 Cerro de las Campanas		
Altura:	Diámetro:	
Fecha de muestreo: 28/03/2012		
Ubicación: Cerro de las campanas		
Coordenadas: 20° 35' 38.10" N 100° 24' 33.15" W		
Altitud: 1810.18 m		
Observaciones: El árbol se encuentra en la entrada al cerro de las campanas y contiene muchas epífitas.		
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 2 Sector 1		
Altura:	Diámetro:	
Fecha de muestreo: 28/03/2012		
Ubicación: Cerro de las Campanas		
Coordenadas: 20° 35' 35.52" N 100° 24' 32.36" W		
Altitud: 1824.47 m		
Observaciones: El árbol se encuentra cerca del estanque para patos. Está en buen estado y contiene muchas epífitas.		

MUESTRAS		VISTA AÉREA			
Árbol 1 Sector 1 CU					
Altura: 2.7 m	Diámetro: 0.96 m				
Fecha de muestreo: 16/03/2012					
Ubicación: Ciudad Universitaria UAQ. Facultad de Química Estacionamiento					
Coordenadas: : 20° 35' 27.98'' N 100° 24' 38.99'' W					
Altitud: 1805.3 m					
Observaciones: Bifurcación a los 60 cm					
					
MUESTRAS		VISTA AÉREA			
Árbol 2 Sector 1 CU		Árbol 3 Sector 1 CU			
Altura: 6.2 m	Diámetro: 1.42 m	Altura: 4.5 m	Diámetro: 1.13 m		
Fecha de muestreo: 16/03/2012		Fecha de muestreo: 16/03/2012			
Ubicación: Al lado de edificio 3 de Química		Ubicación: Frente a edificio E de Ciencias Políticas			
Coordenadas: 20° 35' 26.23'' N 100° 24' 39.08'' W		Coordenadas: 20° 35' 33.43'' N 100° 24' 44.72'' W			
Altitud: 1821.70 m		Altitud: 1822.72 m			
Observaciones: Árbol alejado de vehículos.		Observaciones: De lado al paso vehicular frente a las peñas.			
					

MUESTRAS	
Árbol 4 Sector 1 CU	
Altura: 6.8 m	Diámetro: 1.21 m
Fecha de muestreo: 16/03/2012	
Ubicación: Jardinera entre cafetería y edificio E de ciencias políticas.	
Coordenadas: 20° 35' 35.93" N 100° 24' 43.33" W	
Altitud: 1821.60 m	
Observaciones: El árbol es frondoso y alto, se encuentra en medio de la jardinera.	


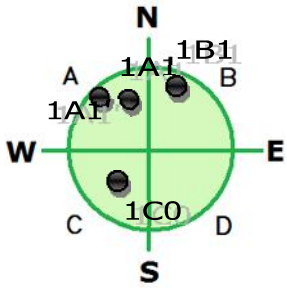
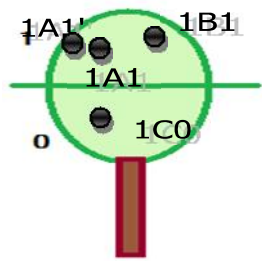
MUESTRAS	VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 1 Tecnológico de Monterrey	
Altura: 15.6	Diámetro: 1.73
Fecha de muestreo: 22/03/2012	
Ubicación: : Prolongación Tecnológico Norte	
Coordenadas: 20° 36' 37.59" N 100° 24' 24.50" W	
Altitud:	
Observaciones: El árbol esta sobre la banqueta, además de que está muy grande. Se dificulta la toma de muestras debido a la cercanía con la calle.	


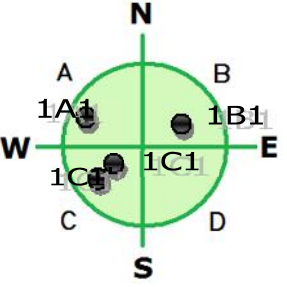
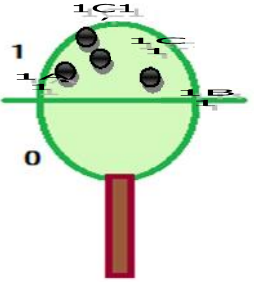
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 Bernardo Quintana – Circuito Jardines		
Altura: 4.1 m	Diámetro: 1.2 m	
Fecha de muestreo: 22/03/2012		
Ubicación: Bernardo Quintana - Circuito Jardines.		
Coordenadas: 20° 36' 51.37 N 100 23' 11.55" W		
Altitud:		
Observaciones: El árbol se encuentra al lado de Bernardo quintana. Presenta pocas epífitas por ello sólo se tomaron 3 muestras.		
 		

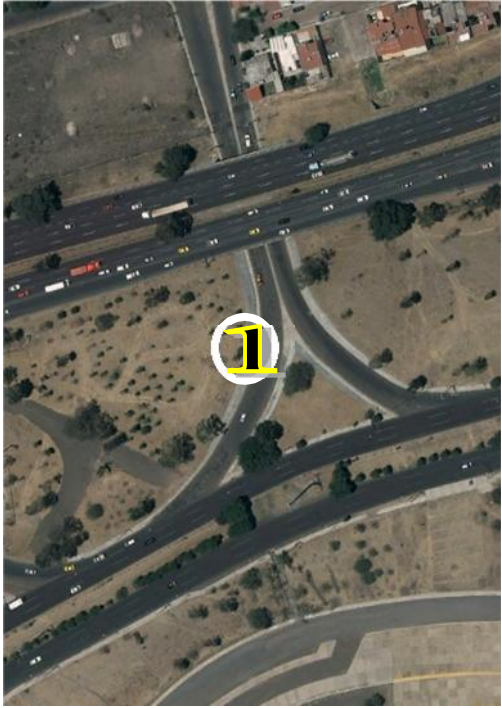
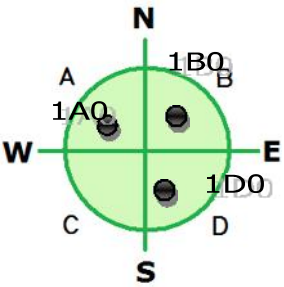
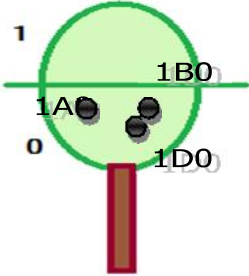
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 De Jacarandas		
Altura: 9.1 m	Diámetro: 1.03 m	
Fecha de muestreo: 29/03/2012		
Ubicación: Antiguo camino a San José – Boulevard Bernardo Quintana.		
Coordenadas: 20° 36' 58.75" N 100° 23' 47.10" W		
Altitud: 1815.84 m		
Observaciones: El árbol está sobre la banqueta y una barda lo cubre por un costado. El árbol tenía pocas especies de epífitas y al haber tránsito vehicular se dificulta la toma de muestras.		
 		

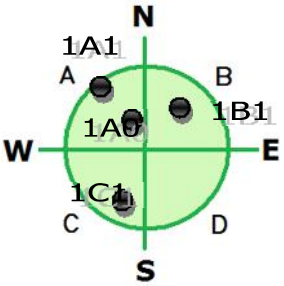
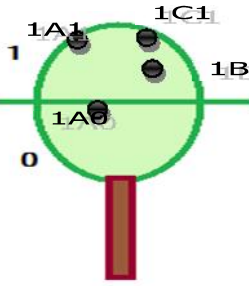
MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 Plaza del Parque		
Altura: 7.9 m	Diámetro: 1.42	
Fecha de muestreo: 21/03/2012		
Ubicación: A lo largo de calle Mecánica, junto a estacionamiento en COTSCO.		
Coordenadas: 20° 36' 55.37" N 100° 23' 38.74" W		
Altitud: 1826.90 m		
Observaciones: El árbol está en una jardinera entre el estacionamiento y la calle Mecánica. Se encuentra sano y en buen estado.		

MUESTRAS	
Árbol 2 Sector 2 Plaza del Parque	
Altura: 11.9 m	Diámetro: 1.64 m
Fecha de muestreo: 21/03/2012	
Ubicación: Adelante del árbol 1 hacia la calle Bernardo Quintana.	
Coordenadas: 20° 36' 58.38" N 100° 23' 39.46" W	
Altitud:	
Observaciones: El árbol está en la glorieta, en una bifurcación del camino. Sólo se pudieron conseguir dos muestras debido a tenía muy pocas epífitas (<i>Tillandsia recurvata</i>).	

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 2 Paseo Constituyentes - Corregidora		
Altura: 6 m	Diámetro: 0.59 m	
Fecha de muestreo: 29/03/2012		
Ubicación: Glorieta de paseo de la Constitución- Corregidora Norte.		
Coordenadas: 20° 37' 14.17" N 100° 23' 22.44" W		
Altitud: 1854.700 m		
Observaciones: El árbol se encuentra en buen estado y al parecer no fue removido de su lugar.		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 3 Carretas		
Altura: 6.3 m	Diámetro: 0.7 m	
Fecha de muestreo: 28/03/2012		
Ubicación: Entre las calles Plateros – Vizcaínas.		
Coordenadas: 20° 35' 21.90" N 100° 22' 12.76" W		
Altitud: 1833 m		
Observaciones: El árbol se encuentra en perfecto estado, contiene muchas epífitas destacando que la mayoría se encuentra en dirección a la calle.		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 3 Paseo Quintas del Marqués – Distribuidor Vial.		
Altura: 2.3 m	Diámetro: 0.4 m	
Fecha de muestreo: 27/03/2012		
Ubicación: Quintas del marqués – Distribuidor vial		
Coordenadas: 20° 34' 49.48" N 100° 22' 1.67" W		
Altitud: 1869 m.		
Observaciones: El árbol se encuentra al lado de Bernardo Quintana, enfrente del estadio Corregidora, sin embargo no hay ningún edificio que afecte en su desarrollo		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 4 Jardines de la Hacienda		
Altura: 9.5 m	Diámetro: 1.3 m	
Fecha de muestreo: 28/03/2012		
Ubicación: María Luisa Medina - Moisés Saens.		
Coordenadas: 20° 33' 46.34" N 100° 24' 55.20" W		
Altitud: 1816.20 m		
Observaciones: El árbol ya no se encontraba seco como en el muestreo anterior.		
		

MUESTRAS		VISTA AÉREA
Árbol 1 Sector 4 Panteón Municipal		
Altura: 5.7 m	Diámetro: 1.1 m	
Fecha de muestreo: 27/03/2012		
Ubicación: En medio del panteón municipal.		
Coordenadas: 20° 34' 44.28" N 100° 23' 30.14" W		
Altitud: 1830.67 m		
Observaciones: Árboles en buen estado con buena cantidad de epifitas.		

MUESTRAS	
Árbol 2 Sector 4 Panteón Municipal	
Altura: 5.5 m	Diámetro: 0.8 m
Fecha de muestreo: 27/03/2012	
Ubicación: A un costado del árbol 1.	
Coordenadas: 20° 34' 44.51" N 100° 23' 30.08" W	
Altitud: 1831.70 m	
Observaciones: Árboles en buen estado con buena cantidad de epifitas.	