

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO Y AZUFRE EN *Tillandsia recurvata* (L.) L., OBTENIDO MEDIANTE UN BIOMONITOREO PASIVO EN LA ZONA CENTRAL DE CARACAS.

Trabajo Especial de Grado presentado ante la ilustre Universidad Central de Venezuela por el **Br. Janswill José Guzmán Rojas** como requisito para aprobar la asignatura Proyecto Geoquímico II y optar al Título de Licenciado en Geoquímica.

Caracas, Julio de 2015

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO Y AZUFRE EN *Tillandsia recurvata* (L.) L., OBTENIDO MEDIANTE UN BIOMONITOREO PASIVO EN LA ZONA CENTRAL DE CARACAS.

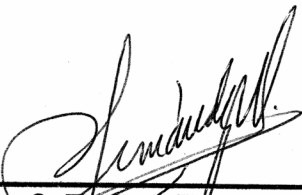
Tutor:
Profesora Raiza Fernández

Realizado por;
Janswill José Guzmán Rojas

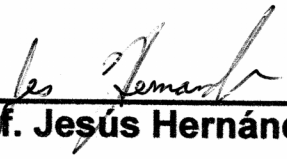
Caracas, Julio de 2015

ACTA

Los abajo firmantes asignados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: "DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO Y AZUFRE EN *Tillandsia recurvata* (L.) L., OBTENIDO MEDIANTE UN BIOMONITOREO PASIVO EN LA ZONA CENTRAL DE CARACAS.", presentado por el Br. Janswill José Guzmán Rojas, certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciado en Geoquímica.



Prof. Raiza Fernández
(Tutor)



Prof. Jesús Hernández
(Jurado)



Prof. Carlos Barrios
(Jurado)

*Dedicado a quienes me dieron la vida y han cuidado
de mí siempre: mis padres, mi tía Eli y mi abuelita
Maita; y a quién forma parte de la próxima
generación, mi hermosa hija Karen...*

LOS AMO

En los momentos de crisis, sólo la imaginación es más importante que el conocimiento.

Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada expreso mis infinitas gracias a Dios, que me ha permitido sentir su hermosa presencia a lo largo de todo el camino recorrido, sin importar lo bueno o lo malo, sé que siempre ha estado conmigo.

Igualmente gracias infinitas a mis padres, Georgy y Omar; es obvio que sin ellos no estaría aquí, y para bien o mal han sido los mejores padres que alguien podría esperar y desear; alentadores, apoyadores, regañones, modernos, tiernos, tranquilos, gritones y tantas otras cosas, pero sobretodo *echaos pa'lante!* Son luchadores como pocos y que, a veces sin decir nada de forma directa, me han demostrado con hechos como mantener el esfuerzo por un sueño hasta conseguirlo, seguir soñando con nuevas metas que cumplir y continuar en la lucha hasta alcanzarlo todo lo anhelado, subiendo poco a poco cada escalón, viendo siempre los siguientes pasos, pero sin olvidar los recorridos y de dónde venimos, conservando siempre la humildad y el amor por los demás.

Gracias a mi abuelita Maíta, para mí un símbolo humano de fuerza, lucha, buen espíritu y ánimo, bondad, alegría, humildad y tantas otras cosas que me ayudaron a seguir en ésta vía. Su sonrisa no tiene precio y las enseñanzas propias de sus experiencias son invaluable donde, aún sin saber leer, sacó adelante a una gran familia donde tuve la gran suerte de nacer. Gracias a Dios por ella y por sus 95 años. Écheme la bendición, desde allá arriba donde está...

Gracias a mi hija, mi enana, por ser una fuente de inspiración y de amor incondicional. Cada momento a tu lado es un instante de aprendizaje y evolución. Las palabras no alcanzarán a describir mi amor por ti. Todo mi trabajo es para ti y tu futuro. Te Amo Karen!

Gracias a esta gran y hermosa familia de la que soy parte. Gracias Tía Eli, Juancho, Chela, Oscar E., Checho, Tío Celso, Tía Altagracia, Abuela Josefina, Melvin, Marily, Tía Janeth, Roy, Tío William, Mamá Rosiris y Tía Marlenys; entre todos les agradezco a ustedes por ser, alegría, amor, apoyo e inspiración.

Gracias a cada amigo que encontré aquí y allá, a cada uno de los que de alguna u otra forma me apoyaron y me ayudaron a seguir, donde resaltan los nombres de aquellos que se trasnocharon conmigo, que se estresaban al igual que yo ante un examen o actividad y se alegraban y celebraban cuando todos cumplíamos alguna meta; aquellos que esperaban el siguiente *viernes de arepa, fushi, twister, jenga* y demás; aquellos con los que puede compartir tantas cosas y que jamás olvidaré; aquellos que, sin yo siquiera pedirlo me ayudaron en cada momento que pudieron; Aquellos que se voltearon conmigo en Enriqueta (y aun así nos quedaron ganas de reunir para volver a salir de campo *en avión!*) Gracias inmensas Ross, Nania, Nano, Kris, Fanshi, Made, Edu, Walt, Ñeta, Nay, Omi, Adri, Mara, Joha y Jaime. Pero éste agradecimiento se extienden a Dui, Leidy, Anny, Dubra, Joy, Liss, Mariana, Orlando, Nino, Jesús, Chichi, David, Rebe, Yuli, Francis, Gibrán, Gloria, Kamal, Albertkh, Ilich, Manuel, Víctor, Yess, Jose Roberto y tantos otros que no alcanzo a escribir. Parecerá superfluo, pero cada uno de sus nombres son muy importantes para mí...

Gracias novia! Gracias inmensas flakita hermosa por alentarme, apoyarme, ayudarme y no dejar que me rindiera. Soportaste mi estrés, mi falta de tiempo, mis locuras y mis sueños. Me ayudaste a mantener los pies en el suelo sin bajar la cabeza de las nubes y apoyaste tantas ideas. ¡Eres mi todo y no tengo como agradecerte! ¡Te Amo!

Gracias a este hermoso país, sin duda alguna uno de los más bellos de todo el planeta, lo que resalta el cuidado y cariño que debemos tenerle y donde cada aporte positivo cuenta. En tus calles crecí y aprendí lo mejor y ruego porque cada nueva generación tenga la misma oportunidad de hacerlo.

Gracias a ésta, la Universidad Central de Venezuela, la gran casa que vence las sombras, cuna de tantos genios, grandes personas y reflejo del potencial de nuestro país, gracias a ti por haberme permitido cumplir esta meta entre tus aulas, laboratorios, pasillos, jardines, espacios y demás. Gracias por ser mi casa y mi hogar por este tiempo. Espero poder seguir viéndote, visitándote y viviéndote.

Gracias a cada profesor, sin ustedes el conocimiento se perdería y quedaría en el olvido, los avances no se harían y la humanidad se estancaría. Son tantos grandes nombres que vienen a mi mente, donde un “*gracias*” tal vez no sería suficiente. En mi camino siempre resaltarán los nombres de Patricia Lugo, Santiago Marrero, Grony Garbán, Carlos Barrios, Katya Reategui, Karla Quintero, Liliana López, Manuel Martínez y José Vicente Gutiérrez, a ustedes GRACIAS!

No puedo dejar de dedicarle un párrafo a una profesora con un punto de vista único y una forma de ser espectacular. Amorosa y maternal como ninguna y con gran experiencia en este campo. Un apoyo estupendo y una mano amiga para mí en un momento donde me sentí perdido. La más bella tutora que pude haber encontrado para cumplir esta meta. No tengo como agradecerle a Raiza Fernández su guía y su paciencia, pero sobretodo su alegría y buena vibra ante la vida, energía positiva que se transmite y se difunde. Gracias Dios por ella y sigue creando personas así, que el mundo las necesita más que nunca.

Y ¿cómo no agradecer al profe Armando?, quien siempre guardará un lugar especial en mi corazón, mi vida y mis recuerdos. Nos enseñó que todo debe hacerse con amor, cariño y unión, nos ayudó a pensar, a aprender, nos llenó de alegrías y dolores de cabeza, nos dio palabras de apoyo y aliento, palabras certeras, reales y llenas de sabiduría. A usted, donde quiera que esté, GRACIAS. Tal vez nos dejó temprano en ésta vía, y ha sido un solitario sendero en algunos momentos, pero sin duda nos ayudó a encontrar el camino.

Gracias a cada hermano y hermana que me dio la vida, a Adriangi, Luis Daniel, Mariam, Gustavo, Brayan, Yesenia, George Francismar, Karina, Samuel, Kaylene, Melo, Silvia, Eduardo, Levisthon, David, Belvis, Carlitos, Patricia, Gabriel, Alejandro, Diego, Erick William, Valladares, Jessimar, Jesús y tantos otros que han recorrido y recorren éste camino que llamamos vida. Tal vez podemos venir de muchas madres, pero al mirarlos sólo veo a mis hermanos.

Gracias a la música por acompañarme siempre y formar parte de mi banda sonora en este camino. Gracias a la gran e ilustre *Coral de la Facultad de Ciencias*, al grupo *ConCiencia Gaitera*, a la *Voz de Ciencias* y cada evento en el que tuve el honor y el gusto participar, por permitirme formar parte de sus filas y conocer gente tan maravillosa acá en la facultad y la universidad. A las agrupaciones musicales en las que participé y que siguen llenando mi vida de música. Gracias...

Por último, siento que debo agradecer enormemente tantos nombres que no cabrían en estas líneas, puesto que considero que cada individuo, cada persona y cada ser que he encontrado en mi camino algo me ha enseñado y eso me ha ayudado a ser quien soy en alguna medida, lo que a su vez se ve reflejado en éste manuscrito. A todos ustedes que puedan llegar a leer esto, y que en alguno u otro momento tuvieron algún contacto conmigo, algún consejo o alguna palabra (créanme, los recuerdo), a ustedes: GRACIAS!!

...GRACIAS TOTALES...

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue determinar la concentración de los elementos Carbono (C) y Azufre (S) en la especie de planta vascular epífita *Tillandsia recurvata* (L.) L., mediante un biomonitoreo pasivo, en la zona Suroeste de la Ciudad de Caracas, específicamente siguiendo las estaciones recorridas por la línea tres del Metro de Caracas, desde la estación Plaza Venezuela hasta la estación Mercado.

Los especímenes fueron colectados en árboles cercanos a cada una de las estaciones de la línea del Metro mencionada, y en la zona boscosa del Jardín Botánico de Caracas en la Universidad Central de Venezuela.

La determinación de los elementos C y S se realizó mediante equipos analizadores de la casa comercial LECO, modelo C-144 para C y modelo SC-432 para S, basados en el método de combustión, y la validación de los resultados se hizo mediante patrones suministrados por la misma casa comercial.

Las concentraciones promedio de C y S, reportadas como porcentaje (%) de Carbono total (Ct) y Azufre total (St), a lo largo de la transecta fueron de 39 ± 8 y $0,26 \pm 0,11$, respectivamente. Se encontró además que estadísticamente la relación de la distribución de ambos elementos entre sí, a través de las localidades evaluadas, no es directamente proporcional ni muestra una total independencia, evidenciado por el valor del coeficiente de determinación calculado ($r^2 \approx 0,5$).

Finalmente concluimos que la especie *Tillandsia recurvata* (L.) L. es un potencial biomonitor para los elementos Carbono y Azufre, mostrando cambios estadísticamente significativos según el entorno de su crecimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PÁGINA
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1. AMBIENTE	5
2.1.1. Calidad del ambiente	6
2.2. ATMÓSFERA	7
2.3. CONTAMINACIÓN	7
2.3.1. Contaminación atmosférica	10
2.4. CONTAMINANTE	10
2.4.1. Contaminante atmosférico	10
2.4.1.1. Naturaleza de los contaminantes atmosféricos	11
2.4.1.2. Fuentes y causas de los contaminantes atmosféricos	11
2.4.1.3. Dispersión de los contaminantes en la atmósfera	13
2.4.1.4. Principales contaminantes atmosféricos	13
2.4.1.4.1. Contaminantes criterio	14
2.4.1.4.1.1. Monóxido y dióxido de carbono (CO y CO ₂)	15
2.4.1.4.1.2. Óxidos de azufre (SO _x)	15
2.5. CALIDAD DEL AIRE	16
2.5.1. Evaluación de la calidad del aire	16

2.5.1.1.	Métodos instrumentales para la evaluación de la calidad del aire	17
2.5.1.2.	Métodos biológicos para la evaluación de la calidad del aire	18
2.5.1.2.1.	Bioindicador	19
2.5.1.2.2.	Biomonitor y bioacumulador	20
2.5.1.2.3.	Biomonitoreo	21
2.5.1.2.3.1.	Biomonitoreo activo y pasivo	21
2.5.2.	Plantas como biomonitores de contaminación atmosférica	21
2.5.2.1.	Especies epífitas	23
2.5.2.2.	Bromelias o Bromeliaceae	24
2.5.2.2.1.	Bromeliáceas del género <i>Tillandsia</i>	25
2.5.2.2.1.1.	Especie <i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	26
3.	ANTECEDENTES	28
4.	ÁREA DE ESTUDIO	32
4.1.	Ubicación geográfica y datos demográficos	32
4.2.	Fuentes móviles de contaminación	34
4.3.	Fuentes fijas de contaminación	34
4.4.	Condiciones climáticas	36
5.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	37
5.1.1.	Etapas de pre-campo	37
5.1.2.	Etapas de campo	39
5.1.3.	Etapas de laboratorio	40
5.1.3.1.	Tratamiento previo de las muestras	40
5.1.3.2.	Determinación de carbono total (Ct)	41
5.1.3.3.	Determinación de azufre total (St)	43
5.2.	Análisis de los resultados obtenidos	45
5.2.1.	Estadística univariada y descripción de la población	45
5.2.2.	Estadística inferencial y prueba de hipótesis	45
5.2.3.	Estadística multivariada y comparación entre grupos de datos	46
5.2.3.1.	Análisis de varianza (ANOVA)	46
5.2.3.2.	Análisis de clúster	46
5.2.3.3.	Análisis de correlación	47

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	48
6.1. Porcentaje de humedad determinado en las muestras	48
6.2. Validación de los resultados obtenidos	49
6.3. Concentración de los elementos Carbono y Azufre en las muestras analizadas de <i>T. recurvata</i> .	50
6.3.1. Porcentaje de Carbono total (%Ct) en las muestras	52
6.3.2. Porcentaje de Azufre total (%St) en las muestras	54
6.4. Distribución promedio de los elementos Carbono y Azufre en la transecta bajo estudio	59
6.5. Análisis estadísticos de los resultados obtenidos	63
6.5.1. Test para comprobar la homogeneidad de los datos obtenidos	63
6.5.2. Análisis de varianza (ANOVA) de los datos obtenidos	64
6.5.2.1. Carbono total (%Ct)	64
6.5.2.2. Azufre total (%St)	65
6.6. Correlaciones entre los valores obtenidos de %Ct y %St.	67
6.7. Comparación de los resultados obtenidos con trabajos anteriores.	71
6.8. Análisis de agrupamiento (Clúster).	73
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
APÉNDICES	90
Glosario de términos	105

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	PÁGINA
Tabla 1. Taxonomía de <i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	27
Tabla 2. Valores de C y S reportados por Vingiani <i>et al.</i> (2004).....	28
Tabla 3. Promedio de porcentaje de humedad y su desviación estándar para los especímenes colectados en la transecta bajo estudio reportado por Pinto (2013) 48	
Tabla 4. Promedio de porcentaje de humedad y su desviación estándar luego del período de almacenamiento para el presente estudio.....	48
Tabla 5. Concentración de C y S por estación (promedio y su desviación estándar).	50
Tabla 6. Comparación de la concentración de C y S entre la transecta estudiada y el punto tomado como referencia (promedio y su desviación estándar).	51
Tabla 7. Resultados de la prueba estadística de Brown-Forsythe para el análisis de la homogeneidad de varianza de los resultados obtenidos de %Ct y %St.	63
Tabla 8. Resultados del análisis de varianza para %Ct.	64
Tabla 9. Resultados del análisis de varianza para %St.....	66
Tabla 10. Comparación entre el contenido de C y S determinado en el presente estudio y los reportados por Vingiani <i>et al.</i> (2004).	71
Tabla 11. Comparación entre el contenido de S determinado en el presente estudio y aquellos reportados por (Vingiani <i>et al.</i> , 2004).....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PÁGINA
Figura 1. Ejemplo de ambiente a gran escala y reacciones que en él ocurren	6
Figura 2. Contribuciones de la actividad humana a la carga ambiental	8
Figura 3. Naturaleza de los contaminantes y sus fuentes.	11
Figura 4. Clasificación general de sustancias químicas como contaminantes, según la fuente que las produce.	12
Figura 5. Esquema de la clasificación y agrupación de los contaminantes aéreos más importantes.	14
Figura 6. Muestreador de alto volumen	17
Figura 7. Algunas especies epífitas comunes en la Universidad Central de Venezuela, centro de Caracas.	23
Figura 8. Ubicación de la zona de estudio	32
Figura 9. Mapa general de la zona de estudio mostrando las coordenadas geográficas.	33
Figura 10. Leyenda utilizada en los mapas mostrados anteriormente	33
Figura 11. Municipio de interés para el presente estudio	34
Figura 12. Mapa de la ubicación de las fuentes fijas en la transecta de estudio ...	35
Figura 13. Dirección predominante del viento en el valle de Caracas	36
Figura 14. Transecta de interés para el presente estudio	37
Figura 15. <i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	38
Figura 16. Recolección de especímenes en el Jardín Botánico de Caracas, durante la etapa de campo.	39
Figura 17. Secado en estufa y posterior pulverización de los especímenes.	41
Figura 18. Equipo analizador marca LECO, modelo C-144	41
Figura 19. Procedimientos realizados durante la determinación de %Ct.	42
Figura 20. Esquema generalizado para la determinación de Ct.	42

Figura 21. Equipo analizador marca LECO, modelo CS-432	43
Figura 22. Procedimientos realizados durante la determinación de %St.	44
Figura 23. Esquema generalizado para la determinación de St.	44
Figura 24. Método utilizado para mantener el orden de las muestras durante los diferentes análisis realizados.	44
Figura 25. Gráfico de cajas y bigotes para %Ct promedio por estación.	52
Figura 26. Gráfico de cajas y bigotes para %St promedio por estación.	55
Figura 27. %Ct promedio por cada estación de muestreo.	59
Figura 28. %St promedio por cada estación de muestreo.	60
Figura 29. Geomorfología de la zona de interés, señalando además los puntos de muestreo.	61
Figura 30. Mapa representativo de la transecta bajo estudio, mostrando las concentraciones promedio determinadas.	62
Figura 31. Gráfico de análisis de varianza para %Ct.	65
Figura 32. Gráfico de análisis de varianza para %St.	66
Figura 33. Gráfica de correlación entre C y S determinado para las muestras de la estación COC.	67
Figura 34. Gráfica de correlación entre C y S determinado para las muestras de la estación MER.	68
Figura 35. Gráfica de correlación entre C y S determinado para las muestras de la Estación JAR.	69
Figura 36. Gráfica de correlación entre C y S determinados para las muestras de la ubicación JBUCV.	70
Figura 37. Análisis de clúster por punto de muestreo.	73
Figura 38. Análisis de clúster por estación o zona de muestreo	75
Figura 39. Gráfica de correlación entre C y S determinados para las muestras de todas las estaciones.	76



1. INTRODUCCIÓN

El carbono, así como el azufre en menor medida, son elementos de gran importancia para los organismos vivos, siendo en muchos casos esenciales para las funciones y desarrollo de muchas especies, incluyendo procesos como fotosíntesis, respiración y nutrición de plantas, bacterias y animales; por esta razón, tanto ellos como sus ciclos biogeoquímicos, son contribuyentes importantes de la cadena alimenticia (Maier, 2009).

La interacción de los organismos vivos con el medio ambiente que los rodea siempre ha sido de gran importancia, y el ser humano no escapa a este hecho. Desde inicios de la revolución industrial la influencia humana continuamente ha añadido más carbono y azufre a la atmósfera y al medio ambiente en general, perturbando ampliamente el ciclo biogeoquímico de cada uno de estos importantes elementos, donde su actual concentración en el ambiente se encuentra ampliamente influenciada por las actividades antrópicas (Badr y Probert, 1994; Loka Bharathi, 2008; Widdison y Burt, 2008).

En particular, los óxidos de los elementos mencionados – carbono y azufre – son de gran interés, ya que éstos son gases contaminantes importantes, liberados en la actualidad principalmente por las actividades antrópicas, que perjudican de forma significativa al medio ambiente y los seres vivos, formando parte de los llamados *contaminantes criterio* y encontrándose más ampliamente distribuidos en los países industrializados o en vías de desarrollo (Pande y Oates, 1986; Hernández de Pool, 1990; Ibanez *et al.*, 2007).

Es por esto que los temas de índole ambiental, y en particular aquellos relacionados con la atmósfera, hoy en día representan un área de gran desarrollo de estudios, debido a los esfuerzos por conocer hasta donde ha llegado el impacto antrópico, ya que éste es el destino final de las emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles, fundiciones y aerosoles; entre otros productos, que generan una problemática conocida por décadas y que aún se mantiene presente (Unsworth y Wolfe, 1995; Maier, 2009).

1.1. Planteamiento del problema

Existen diferentes métodos y técnicas para determinar los posibles contaminantes que se encuentran en la atmósfera, así como su concentración, permitiendo informar al público general la calidad del aire, conocer los niveles actuales de contaminantes y determinar el impacto en la salud de humanos, animales y plantas, para así desarrollar e implementar estrategias en relación a dichos contaminantes. Estos valores, en un inicio, fueron obtenidos principalmente con el uso de estaciones fijas de monitoreo o costosos sistemas móviles, metodología instrumental que hace poco o nada rentable un muestreo constante y/o de gran alcance; además, estos valores no necesariamente reflejan la *exposición humana*, pudiendo conllevar a conclusiones medioambientales erradas (Ott, 1982; Fugaš, 1986; Bloss, 2011).

En los últimos cuarenta años se han desarrollado nuevas metodologías para conocer la calidad del aire, mediante el uso de especies biológicas, como líquenes, musgos y ciertas plantas o partes de éstas, que muestran una respuesta proporcional y medible frente a cualquier cambio en su medio ambiente; monitores que permiten obtener datos más adecuados de los contaminantes y/o su efecto en organismos vivos, siendo además rentables por su bajo costo y permitiendo la generación de una gran cantidad de datos (Burton, 2003).

Los resultados obtenidos han sido comparados con aquellos conseguidos través de métodos más costosos, mostrando que los biomonitores pueden ser colectores económicos y confiables, pudiendo además estar dentro del presupuesto de muchas ciudades y países, motivando la búsqueda e implementación de políticas al respecto (Moodley *et al.*, 2011).

Las plantas, como biomonitores, han sido utilizadas desde el siglo XIX, cuando Nylander tomó la abundancia de líquenes como una medida de los efectos de la contaminación del aire (Figueiredo *et al.*, 2007), siendo éstos actualmente la especie biológica más utilizada en este tipo de investigaciones por ser indicadores



biológicos altamente efectivos de contaminación atmosférica, respondiendo a sus efectos a nivel celular, individual, poblacional y como comunidad (Purvis *et al.*, 2007). Igualmente, algunas plantas epífitas, especialmente aquellas del género *Tillandsia*, pueden también tomar y acumular elementos en sus tejidos, obteniendo los nutrientes directamente del aire debido a sus características morfológicas y fisiológicas, por lo que diferentes especies de *Tillandsia* de igual forma han sido utilizadas como biomonitores en diferentes países (Figueiredo *et al.*, 2007; Bermudez *et al.*, 2009).

Por su parte, Venezuela ha tenido un crecimiento muy rápido de su población en el último siglo y la ciudad de Caracas manifiesta claramente este hecho. Por ser un país en vías de desarrollo, poca atención se le ha dado en lo concerniente a los problemas de contaminación atmosférica. Su acelerado urbanismo, desarrollo industrial y doméstico, y aumento del parque automotor ha traído consigo el incremento, igualmente progresivo, de contaminación en el aire y su medio ambiente en general. Esto trae consigo una problemática vigente que requiere atención, y la presencia de ciertas especies de líquenes y bromeliáceas en la ciudad de Caracas permiten su uso como biomonitores de contaminación atmosférica, logrando conocer los valores aproximados de la composición de material particulado, gases de interés y metales pesados (Jaffé *et al.*, 1993; Quijada, 2006; Réquíz, 2006; Díaz, 2008; Argüello, 2009; Gómez, 2010).

Es por lo mencionado anteriormente que el presente trabajo propone determinar la concentración de carbono y azufre en la bromelia *Tillandsia recurvata* (L.) L. y evaluar su uso como biomonitor para dichos elementos, evaluando su capacidad como colector pasivo, y generando datos que puedan permitir su comparación con otros métodos y técnicas similares o más costosas e instrumentales.

Palabras clave: *Tillandsia recurvata* (L.) L., C y S; biomonitoreo pasivo; Contaminación atmosférica.



1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Determinar la concentración de los elementos carbono y azufre, en especímenes de la bromelia *Tillandsia recurvata* (L.) L., realizando un biomonitoreo pasivo, en la ciudad de Caracas.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Aportar conocimientos, en relación a la concentración de los elementos carbono y azufre en *Tillandsia recurvata* (L.) L., evaluando su empleo como potencial biomonitor atmosférico para estos elementos.
2. Establecer si existen diferencias significativas, en la concentración de los elementos de interés, entre la zona bajo estudio y aquella establecida como punto de referencia.
3. Evaluar estadísticamente si existe correlación entre los elementos analizados en cada punto de muestreo, para diferenciar si sus concentraciones pueden verse afectadas por factores similares.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La siguiente sección presenta el resumen de una serie de conceptos y fundamentos asociados a la investigación, desarrollados y publicados por diferentes autores, que de forma organizada se consideran importantes para permitir el entendimiento y manejo de los temas abarcados en el presente trabajo y el estudio planteado, siendo además de ayuda y soporte para la interpretación de los resultados obtenidos posteriormente.

2.1. AMBIENTE

La palabra *ambiente* deriva del latín y significa *alrededor*, y de forma general se define como el conjunto de entes circunstanciales que rodean a un organismo o sujeto inanimado. Sí es común a un grupo de organismos u objetos de número apreciable, se habla de *macroambiente*; pero sí se trata de un caso extremo, tan particular que sea el alrededor de un solo sujeto o un número reducido de estos, se habla entonces de un *microambiente*; pero ambos son conceptos relativos. En los estudios de contaminación ambiental se consideran como ambientes los tres grandes conjuntos naturales, que son el aire, el agua y el suelo (Hernández de Pool, 1990).

En Venezuela, desde el punto de vista legal, el *ambiente* es el conjunto o sistema de elementos de naturaleza física, química, biológica o socio cultural, en constante dinámica por la acción humana o natural (figura 1), que rige y condiciona la existencia de los seres humanos y demás organismos vivos, que interactúa permanentemente en un espacio y tiempo determinado. Un ambiente es seguro, sano y ecológicamente equilibrado cuando los elementos que lo integran se encuentran en una relación de interdependencia armónica y dinámica que hace posible la existencia, transformación y desarrollo de la especie humana y demás seres vivos (Ley Orgánica del Ambiente, 2006).

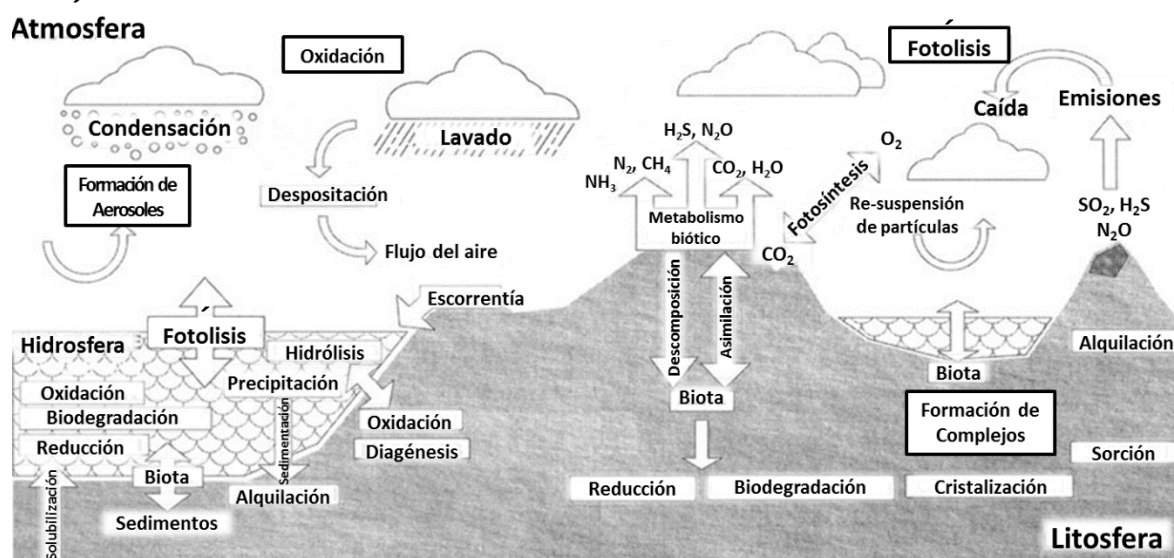


Figura 1. Ejemplo de ambiente a gran escala y reacciones que en él ocurren (tomado de Hernandez-Esparza et al., 2007)

2.1.1. Calidad del ambiente

El concepto de calidad, aplicado al ambiente, implica un conjunto de cualidades o atributos, expresados generalmente en base a una serie de características cuantitativas denominadas *parámetros*, los cuales por su naturaleza pueden ser organolépticos, físicos, químicos, microbiológicos y toxicológicos. En algunos casos no conviene de ninguna manera que la calidad sea invariable, ya que determinada característica puede ser una virtud para una determinada clase de ambiente y al mismo tiempo un defecto o perjuicio para otra clase, lo que se explica según el uso particular al que esté destinado el ambiente bajo observación (Hernández de Pool, 1990).

En Venezuela, entendemos que la calidad del ambiente se encuentra referida a la característica de los elementos y procesos naturales, ecológicos y sociales, que permiten el desarrollo, el bienestar individual y colectivo del ser humano y la conservación de la diversidad biológica (Ley Orgánica del Ambiente, 2006).



2.2. ATMÓSFERA

Es la capa o envoltura gaseosa que rodea La Tierra, compuesta por aire, el cual es una mezcla de varios gases; en un sistema dinámico, absorbiendo constantemente una diversidad de materiales en estado gaseoso, líquido y/o sólido, provenientes tanto de fuentes naturales como de actividades antrópicas; que pueden ser transportados y dispersados, tanto física como químicamente, y eventualmente pueden alcanzar un cuerpo receptor, un organismo, tal como el hombre. Algunas sustancias, como el helio, pueden escapar de ella hacia el espacio; mientras otras, tales como el dióxido de carbono, pueden llegar a acumularse, entrando en la atmósfera a una velocidad mayor a la que pueden ser absorbidos o eliminados. El aire puro, o considerado normal, es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, que constituyen el 99,99% de su volumen, a nivel del mar, encontrándose vestigios de otros gases, donde están incluidos algunos que pueden resultar perjudiciales cuando se encuentran en concentraciones suficientemente elevadas (Hernández de Pool, 1990).

2.3. CONTAMINACIÓN

En el idioma castellano, la palabra *contaminación* se utiliza para definir cualquier deterioro de la calidad ambiental, sea que esté presente o no algún riesgo para la salud pública (Hernández de Pool, 1990), y puede considerarse como la liberación o introducción al ambiente de materia, en cualquiera de sus estados, que ocasione modificación al ambiente en su composición natural o la degrade (figura 2; Ley Orgánica del Ambiente, 2006), por lo que se define operacionalmente en términos de concentraciones por encima de los niveles aceptados por la ley (Hawksworth *et al.*, 2005).

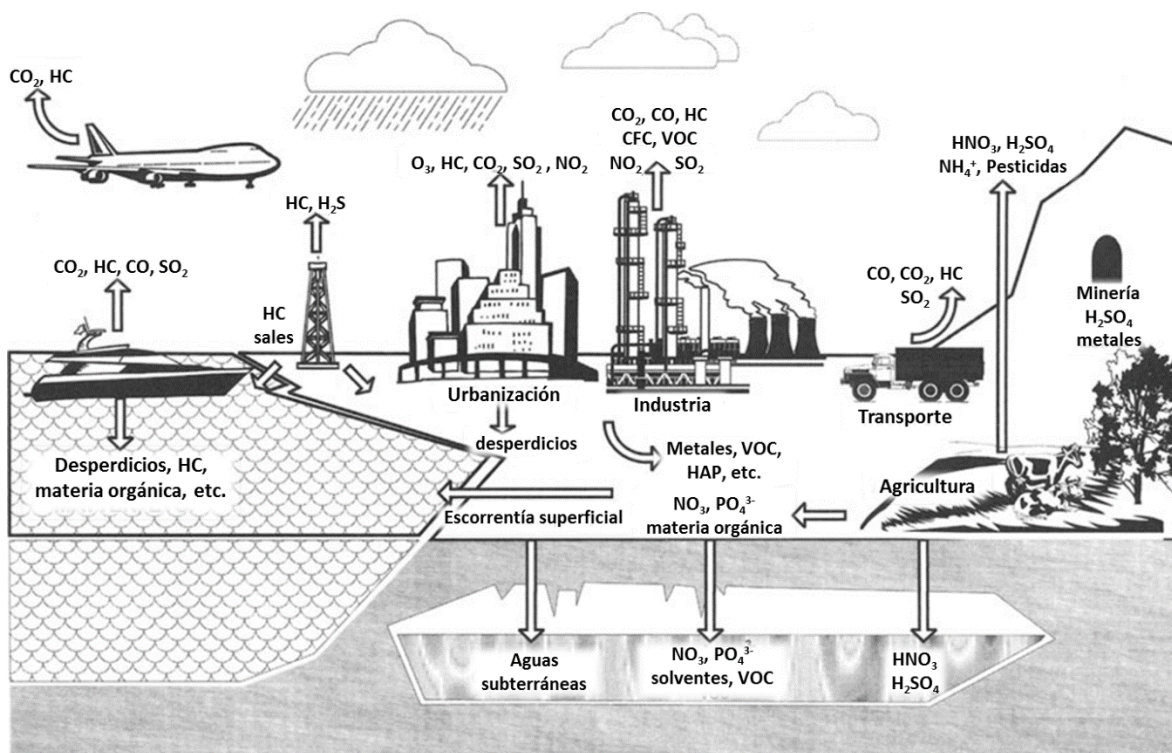


Figura 2. Contribuciones de la actividad humana a la carga ambiental (tomado de Hernandez-Esparza et al., 2007)

La contaminación puede tener su origen en acciones de la naturaleza, conocida como *contaminación natural*, pudiendo considerarse contaminantes naturales los inevitables desechos de los organismos, incluido el hombre, tales como excretas y hojas de los árboles; y a estos pueden agregarse aquellos materiales provenientes o que se originan como consecuencia de algún fenómeno natural, como el caso del aire o aerosol salino y el ozono; conocidos o clasificados como *contaminación de primer orden*, gobernados por las leyes naturales y por lo tanto no puede ser detenida o remediada sin la reducción de la población, aunque si controlada hasta cierto límite. La contaminación también puede ser consecuencia de las actividades del hombre, y esta es conocida como *contaminación artificial*, clasificada también como *contaminación de segundo orden* y, a diferencia de la anterior, los agentes que la causan pueden ser controlados y evitados (Hernández de Pool, 1990).



La contaminación ambiental, además de al hombre, sin duda afecta a animales, plantas, materiales y economía; teniendo un efecto directo en la ecología, es decir, la relación entre los contaminantes y los organismos vivos existentes en la naturaleza. Concerniente a la ecología tenemos los ciclos biogeoquímicos de los elementos, donde resaltan los del oxígeno, carbono, nitrógeno y azufre, debido a que todos los organismos sintetizan sus proteínas a partir de esos cuatro elementos e hidrógeno, y en cualquier ecosistema existe un complejo estado de interacción entre los animales, vegetales y microorganismos, con las fases inanimadas del ambiente. Tal interacción es afectada por el clima y los aportes físicos y químicos al sistema, donde los científicos han comenzado a estudiar los ecosistemas en base a una multidisciplinaridad, impulsados por lo descrito anteriormente, tal como es requerido (Hernández de Pool, 1990).

Desde la revolución industrial el hombre ha hecho cada vez más uso de materia prima para la elaboración de productos sintéticos, perturbando en gran medida el balance natural de muchos elementos y sus ciclos biogeoquímicos en el medio ambiente. Pero el uso de químicos y demás productos sintéticos incrementó aún más dramáticamente después de La Segunda Guerra Mundial. Así mismo, sus posibles efectos adversos en la salud humana y del ambiente también incrementaron. Como una consecuencia, el aire que respiramos, el agua que bebemos, el suelo en el cual nuestras cosechas crecen y el medio ambiente en el cual las poblaciones de animales y plantas prosperan, se encuentran comúnmente contaminadas en diferentes extensiones con una variedad de químicos sintéticos, metales pesados, y/o radionúclidos. Tales contaminantes típicamente incluyen sustancias deliberada o inadvertidamente descargadas, productos secundarios de operaciones de manufactura, desperdicios y derivados de sustancias sintéticas producidos por reacciones en el medio ambiente (Badr y Probert, 1994; Ibanez *et al.*, 2007; Reijnders, 2009).



2.3.1. Contaminación atmosférica

Significa la presencia en la atmósfera de alguna impureza en concentraciones suficientemente elevadas como para producir efectos adversos que afecten la salud, seguridad, bienestar o el disfrute de la propiedad; lo que actualmente es considerado un nuevo acto de violencia perpetrado entre los hombres, en una forma de *guerra química doméstica*, sufrida por los propios ciudadanos de un país o región, ya que el entorno atmosférico es un sistema abierto, siendo afectado por contribuciones tanto locales como regionales. También es denominada, o conocida comúnmente, como contaminación del aire (Hernández de Pool, 1990; Reijnders, 2009; Mallik *et al.*, 2014).

2.4. CONTAMINANTE

Un contaminante se define, según la ley Venezolana, como toda materia, energía o combinación de éstas, de origen natural o antrópico, que al liberarse o actuar sobre la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier otro elemento del ambiente, altere o modifique su composición natural o la degrade (Ley Orgánica del Ambiente, 2006).

2.4.1. Contaminante atmosférico

Los contaminantes atmosféricos se encuentran en forma gaseosa, lo que incluye vapores de sustancias que son líquidas o sólidas a temperatura y presión normal. También existen contaminantes sólidos o líquidos bajo la forma de pequeñas partículas (Hernández de Pool, 1990). La preocupación acerca de los contaminantes atmosféricos subyace en los esfuerzos para establecer programas de control en muchos países. En la práctica, el control de los contaminantes antrópicos atmosféricos es un problema complejo: las fuentes y emisiones deben ser identificadas, los métodos analíticos deben ser evaluados, los riesgos deben ser medidos, las emisiones críticas deben ser controladas, y los aspectos económicos deben estar integrados a todo lo anterior (Wolterbeek, 2002).

2.4.1.1. Naturaleza de los contaminantes atmosféricos

En el establecimiento de la naturaleza de los contaminantes atmosféricos, es importante la diferenciación realizada entre contaminantes *primarios*, o aquellos que son descargados directamente a la atmósfera por la fuente (figura 3), conformando la mayoría de los gases emitidos; y los contaminantes *secundarios*, o aquellos que se forman a través de reacciones fotoquímicas y otras reacciones en la atmósfera, a partir de los contaminantes primarios (Hernández de Pool, 1990; Baird, 2001; Ibanez *et al.*, 2007; Reijnders, 2009).

2.4.1.2. Fuentes y causas de los contaminantes atmosféricos

Las fuentes (figura 4), por conveniencia, han sido clasificadas según el *movimiento*, el *área de emisión* y el *tipo de actividad* que la produce (figura 3). En relación al movimiento se dividen en *fijas o estacionarias* y *móviles*. Respecto al área de emisión se dividen en *puntuales* y *múltiples o extendidas*. Derivada a la actividad que la produce está clasificada en edificaciones de áreas urbanas, transporte, procesos industriales, plantas de energía, disposición de residuos sólidos, comercial y agropecuaria (Hernández de Pool, 1990).

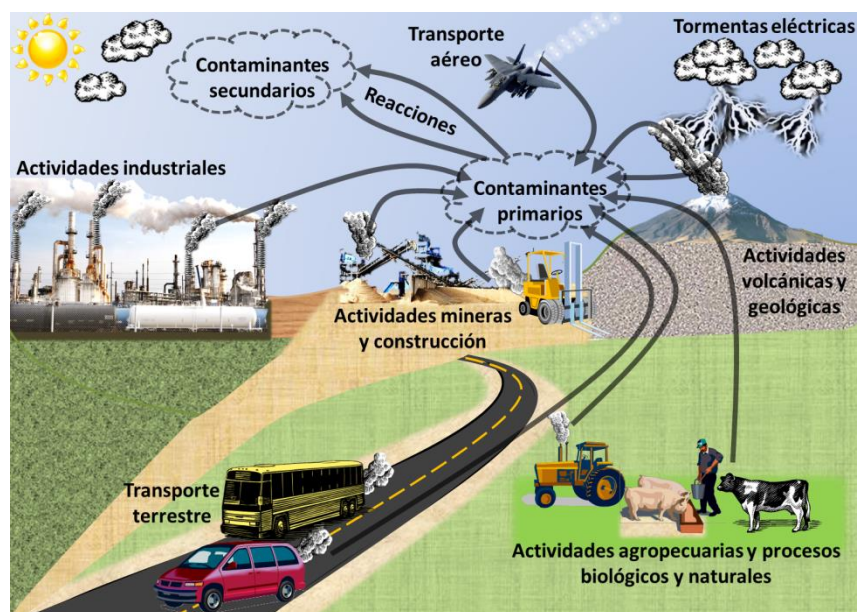


Figura 3. Naturaleza de los contaminantes y sus fuentes.

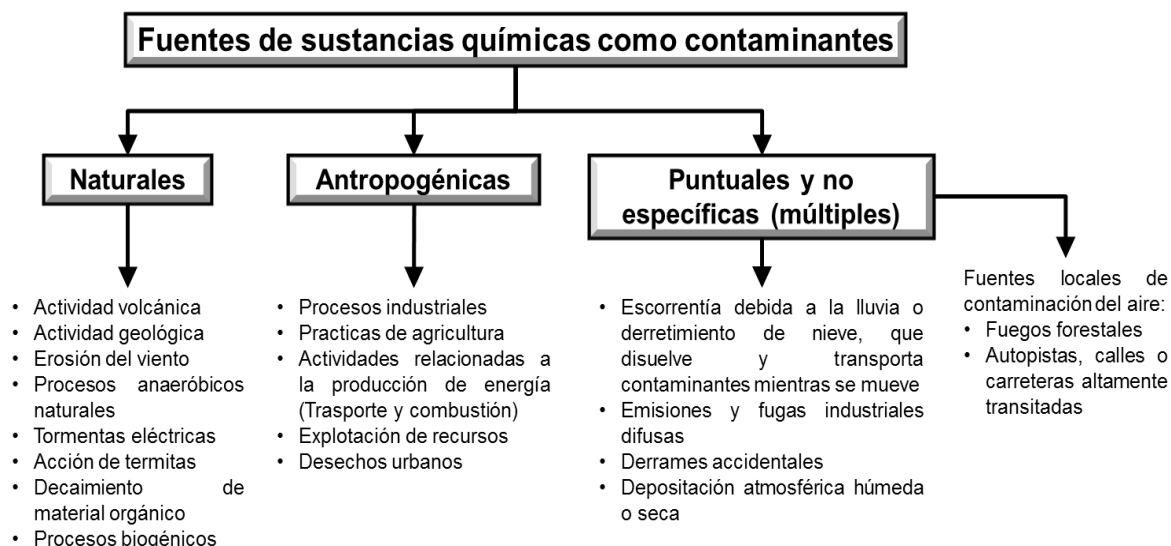


Figura 4. Clasificación general de sustancias químicas como contaminantes, según la fuente que las produce.

En general, la principal causa de contaminación del aire de origen antrópico, deriva de las actividades humanas que incluyen los procesos de combustión y actividades relacionadas con la producción de energía (principalmente el transporte), procesos industriales, prácticas agropecuarias, explotación de recursos naturales y su procesamiento, servicios comerciales y urbanismo (como podemos resumir en las figuras 2 y 3). Sin duda alguna, aquella contaminación originada por el hombre que posee mayor impacto negativo, es la combustión o quema de combustibles fósiles, pues de ella provienen la mayoría de los gases y partículas colocados por el hombre en la atmósfera. Son principalmente contaminantes primarios, aunque en estos procesos también sean generados muchos contaminantes secundarios (Hernández de Pool, 1990; Ibanez *et al.*, 2007; Kováčik *et al.*, 2011; Darçın, 2014; Réquia Jr *et al.*, 2015).

La naturaleza también puede ser responsable por generar contaminantes, cuando una sustancia natural es liberada en cantidades que pueden dañar la salud o causar alteraciones en el ecosistema con procesos biogénicos o no-antrópicos. Este es el caso de las erupciones volcánicas que generan niveles anormales de partículas y gases en la atmósfera (figura 3). Los procesos

anaeróbicos naturales, incluyendo la producción de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), y sulfuro de hidrógeno (H_2S); y la erosión del viento pueden también contribuir a niveles anormales de sustancias naturales en la atmósfera (figura 3). Otros ejemplos incluyen la liberación de volátiles fotoquímicos, producción de óxidos de nitrógeno (NO_x) y ozono (O_3) por los rayos y tormentas eléctricas, liberación de gas Radón (Rn) desde la litósfera y la acción de termitas, decaimiento de materia orgánica, actividad geológica y procesos biogénicos (Ibanez *et al.*, 2007).

2.4.1.3. Dispersión de los contaminantes en la atmósfera

Los contaminantes pueden ser transportados lejos de sus fuentes por medios físicos, químicos, biológicos, o una combinación de estos. Esta puede o no ser intencional, incluyendo rutas que envuelven contaminación biogénica o accidental (Ibanez *et al.*, 2007), y pueden ser transferidos a la vegetación, los suelos y superficies por dos vías: depositación seca y/o húmeda (Cerón *et al.*, 2012).

2.4.1.4. Principales contaminantes atmosféricos

Los contaminantes aéreos más abundantes pueden ser agrupados y clasificados en diez grupos (figura 5), la mayoría incluidos en la lista oficial de Contaminantes Aéreos Peligrosos de la Agencia de Protección Medio Ambiental Estadounidense (U.S. EPA, por sus siglas en inglés). Los principales contaminantes atmosféricos evaluados que afectan la salud son aquellos responsables de una contaminación generalizada. Entre ellos, los gaseosos de mayor importancia son el dióxido de azufre, dióxido y monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, ozono y otros oxidantes fotoquímicos, y el sulfuro de hidrógeno. Bajo la forma de particulados se pueden mencionar el polvo de carbón, cenizas, cemento, polvo de madera, arena, arcilla, óxidos metálicos y trióxido de azufre (Hernández de Pool, 1990; Ibanez *et al.*, 2007; Darçın, 2014).

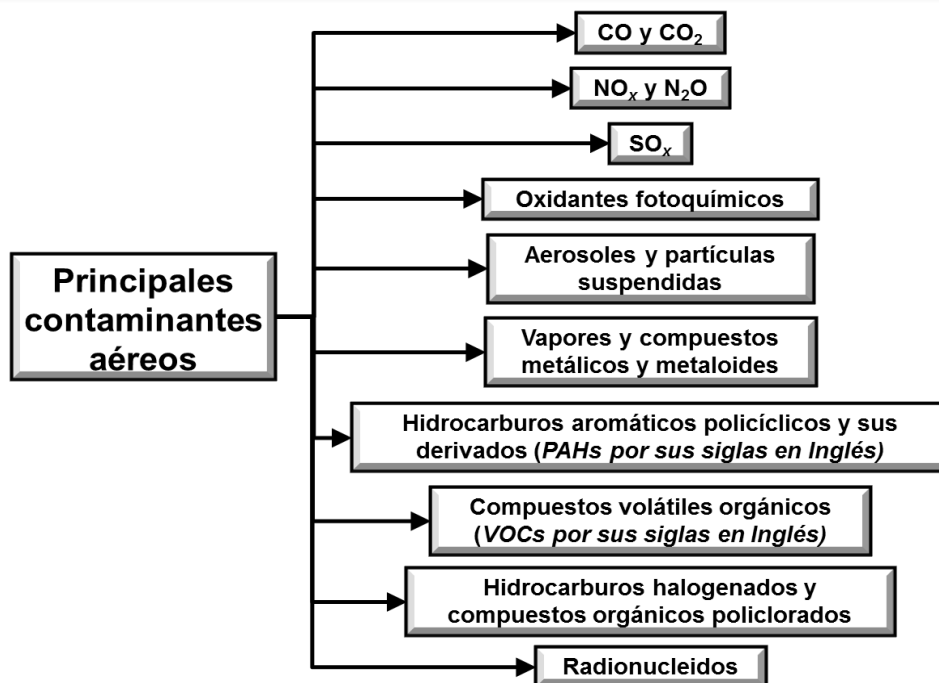


Figura 5. Esquema de la clasificación y agrupación de los contaminantes aéreos más importantes.

2.4.1.4.1. Contaminantes criterio

Del análisis de los contaminantes aéreos y su efecto, fueron desarrollados los Estándares Nacionales de la Calidad del Aire en el Ambiente para los Estados Unidos (NAAQS, por sus siglas en inglés) por la U.S. EPA basándose en los requerimientos del Acta de Aire Limpio (*Clean Air Act*), definiendo así los *contaminantes criterio* o *convencionales* para medir la calidad del aire, determinando luego la concentración aceptable bajo criterios de salud (conocido como *estándar primario*). También fue definido un *estándar secundario* para proteger el bienestar público y prevenir el daño medio ambiental y de propiedad. Los contaminantes criterio seleccionados para evaluar la calidad del aire fueron CO, Pb, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂; todos poseen concentraciones máximas permisibles en cada país, variando los niveles en cada uno de ellos debido a las necesidades particulares, las tecnologías y métodos de medida utilizados (Hernández de Pool, 1990; Ibanez *et al.*, 2007; Perdomo de Ponce, 2009; Hurtado, 2010).

2.4.1.4.1.1. Monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂)

Están directamente relacionados a la combustión de combustibles fósiles y de biomasa, procesos biogénicos y transformaciones fotoquímicas en la atmósfera. El CO₂ es producido como consecuencia de procesos metabólicos en los seres vivos y como producto de la combustión completa, directamente proporcional a la producción de energía y correspondiendo entonces a la gran mayoría de las emisiones antrópicas; su principal importancia está vinculada a los gases de invernadero porque su concentración ha estado incrementando sostenidamente en los últimos 100 años en un valor estimado de 40%, en comparación al año 1750. El CO se deriva de procesos de combustión incompleta y de la transformación fotoquímica de metano, entre otros procesos naturales, donde el principal peligro es su toxicidad debido a que puede sustituir al oxígeno (O₂) de la hemoglobina, produciendo asfixia y muerte (Ibanez *et al.*, 2007; Perdomo de Ponce, 2009; Singh y Agrawal, 2015).

2.4.1.4.1.2. Óxidos de azufre (SO_x)

Representa los gases dióxido y trióxido de azufre (SO₂ y SO₃, respectivamente), así como al ion sulfato (SO₄²⁻), generalmente relacionados a la oxidación de combustibles que contienen azufre y la oxidación de sulfuro de hidrógeno (H₂S), este último gas tóxico producido también por el decaimiento de la materia orgánica, acción geotermal, procesos industriales como fabricación de pulpa de madera, acero y cemento o por la industria del petróleo, mientras es refinado o se limpia el gas natural antes de ser distribuido; incluso, el gas predominante en los pozos de gas natural es, en ocasiones, H₂S en lugar de CH₄ (Baird, 2001; Ibanez *et al.*, 2007; Mallik *et al.*, 2014).



2.5. CALIDAD DEL AIRE

Es de conocimiento general que una atmósfera contaminada contiene compuestos que pueden causar irritación ocular, nasal y tos; así que, de esta forma, se sabe que la calidad del aire está determinada por su composición. Puede decirse que la calidad no es adecuada cuando las concentraciones de los contaminantes son altas, generando así reducción de la visibilidad, corrosión de materiales, daños a cultivos y efectos adversos en los ecosistemas naturales y en la salud del ser humano y animales. Por otra parte, cuando no existen concentraciones elevadas de las sustancias contaminantes, podemos hablar de *buena calidad* del aire. Es además reconocido que los contaminantes atmosféricos constituyen un factor primordial en la aparición de enfermedades crónicas, tales como: asma, bronquitis, enfisema pulmonar y, hasta quizás, cáncer de pulmón e incluso la muerte, es por esto que la calidad del aire es un factor significativo para la salud (Hernández de Pool, 1990; Hurtado, 2010; Darçın, 2014).

2.5.1. Evaluación de la calidad del aire

El entendimiento de las reacciones y procesos son esenciales para los científicos medio-ambientales. Los parámetros que definen el nivel y tipo de contaminación deben ser evaluados y, por lo tanto, se debe encontrar la mejor herramienta instrumental, química y/o analítica, que identifique los potenciales y existentes contaminantes, determinando sus propiedades, aquellas que afecten el destino, transporte, biodisponibilidad, toxicidad y estabilidad/degradación de los constituyentes químicos en una muestra, por lo que el conocimiento de la química ambiental es fundamental para comprender lo que ocurre en la naturaleza con los contaminantes naturales y/o artificiales. Reacciones como disolución, hidrólisis, precipitación, fotólisis, adsorción/desorción, oxidación-reducción, intercambio iónico, formación de complejos, biodegradación, polimerización, y otras, toman lugar en el medio ambiente, pudiendo afectar la solubilidad de los contaminantes y, por lo tanto, su movilidad, distribución y toxicidad (Ibanez *et al.*, 2007; Bungay y Bungay, 2009).

2.5.1.1. Métodos instrumentales para la evaluación de la calidad del aire

Como menciona Hurtado (2010), la evaluación de la calidad del aire incluye todos aquellos procedimientos o metodologías diseñadas para determinar la composición del aire en una zona determinada y por un tiempo establecido, comprendiendo las etapas de muestreo, análisis de contaminantes y notificación de los resultados. El autor también explica que los equipos utilizados en Venezuela para evaluar y monitorear la calidad del aire son del tipo semiautomáticos, conocido como *muestreador de alto volumen* (figura 6), el cual capta una muestra cada 6 días por 24 ± 1 hora, succionando aire que luego pasa a través de un filtro, para capturar las partículas, definidas según el estudio de interés. La concentración es determinada pesando cada filtro antes y después de la exposición.

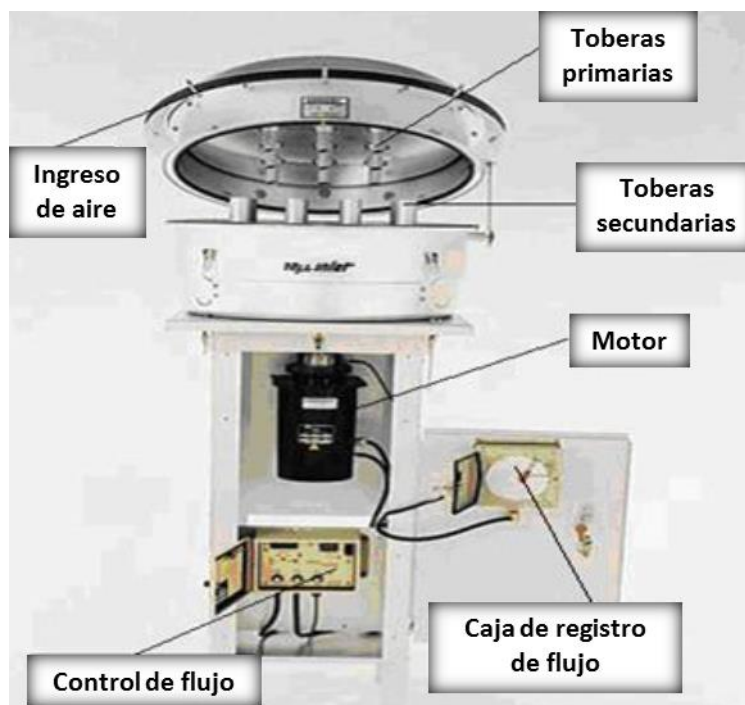


Figura 6. Muestreador de alto volumen
(Tomado de Hurtado, 2010)



Los muestreadores de alto volumen surgen de la necesidad de realizar análisis orgánicos, inorgánicos y radioisotópicos a partir de la misma muestra, ya que en el análisis de material particulado el factor crítico es la cantidad de material recolectado disponible, donde una caracterización multidimensional es difícilmente posible debido a que, sí pocos miligramos son colectados, éstos son consumidos en una sola corrida analítica (Rossbach *et al.*, 1999).

Comúnmente entonces, la contaminación del aire de un lugar es determinada por medio de experimentos de la deposición húmeda o seca, que deben ser llevados a cabo por al menos un año para obtener información representativa de la condiciones contaminantes del sitio y generalmente pueden ser aplicadas sólo a pocos puntos selectos, debido tanto a los altos costos de operación como de análisis (Schrimpff, 1984), lo que ocasiona cierto grado de desventajas, ya que se hace poco o nada rentable un muestreo constante y/o de grandes proporciones, donde además no necesariamente son reflejados de manera apropiada los valores de exposición humana (Ott, 1982; Fugaš, 1986; Bloss, 2011), por lo que un acercamiento puramente instrumental de monitoreo de la contaminación posee muchos puntos débiles. A pesar de la precisión en la medida, este tipo de registro no da información de la biodisponibilidad de los contaminantes o de sus efectos biológicos, y los contaminantes que se encuentran en concentraciones muy bajas, como los elementos traza, son pasados por alto a menudo. Esto puede llevar a subestimaciones gruesas sobre los posibles efectos en la salud, ya que algunos metales poseen una toxicidad sinérgica y el peligro puede existir incluso en condiciones de exposición de dosis bajas (Vingiani *et al.*, 2004).

2.5.1.2. Métodos biológicos para la evaluación de la calidad del aire

Desde los años 60, se ha desarrollado, utilizado y refinado una técnica, mediante el uso de especies biológicas, principalmente líquenes, musgos y plantas o partes de estas; organismos que dependen de la atmósfera como fuente primaria de humedad y nutrientes; como monitores de contaminación atmosférica, permitiendo obtener datos más adecuados de los contaminantes y su efecto en los

seres vivos, mostrando una respuesta medible y proporcional frente a compuestos bioacumulativos. Estos monitores biológicos se han convertido en una herramienta ambiental simple y multipropósito, además de relativamente económica, para investigaciones prolongadas de la calidad del medio ambiente. Permiten explorar la ocurrencia de contaminantes y las tendencias de dispersión a diferentes escalas geográficas y/o temporales, para identificar fuentes de emisión, estimar depósito atmosférico y relacionar cambios biológicos/ecológicos frente a los contaminantes, previendo un efecto integrado de todos los factores medio ambientales y siendo, además, una alternativa a la instrumentación convencional del control de contaminación ambiental, dadas sus ventajas, como permitir el monitoreo de grandes áreas, y los bajos costos de cultivo y mantenimiento de las especies (Chaphekar, 1999; Rossbach *et al.*, 1999; Burton, 2003; Temmerman *et al.*, 2004; Vingiani *et al.*, 2004; Hawksworth *et al.*, 2005; Wannaz y Pignata, 2006; Figueiredo *et al.*, 2007; Bedregal *et al.*, 2009; Zambrano *et al.*, 2009).

Sin embargo, es importante comprender que los biomonitores nunca podrán reemplazar totalmente a los equipos técnicos que miden contaminación ambiental (Hawksworth *et al.*, 2005), debido a que los datos suministrados por ambos son complementarios (Rossbach *et al.*, 1999).

2.5.1.2.1. Bioindicador

Se puede definir un bioindicador, en su sentido amplio, como aquél organismo, una parte de éste o una población o comunidad de ellos, cuyas funciones vitales se relacionan con efectos medio ambientales, tanto naturales como antrópicos, siendo capaces de dar información de la calidad de su entorno, o una parte del mismo, de tal manera que pueden ser utilizados para señalar la presencia de algún factor (Smodiš *et al.*, 2004; Hawksworth *et al.*, 2005; Figueiredo *et al.*, 2007).



2.5.1.2.2. Biomonitor y bioacumulador

Similar a la definición de un bioindicador, un biomonitor o bioacumulador es un organismo, una parte de éste o una población o comunidad de ellos, que contienen información en aspectos cuantitativos de la calidad de su entorno, o una parte del mismo. Así, un biomonitor es siempre un bioindicador, pero un bioindicador no necesariamente posee los requerimientos para ser llamado biomonitor. La concentración elemental, en los tejidos de los bioindicadores epífitos de contaminación aérea, reflejan enormemente la concentración de los contaminantes atmosféricos en los medio ambientes monitoreados, en tanto esos organismos no tengan contacto con el suelo, tomando sus nutrientes y agua de la atmósfera, mostrando así efectos complejos de sustancias dañinas (Rossbach *et al.*, 1999; Smodiš *et al.*, 2004; Hawksworth *et al.*, 2005; Figueiredo *et al.*, 2007).

Un biomonitor debe poseer una serie de características para cumplir con los fines propuestos, como los son: a) Un periodo de vida relativamente largo; b) ser estenoicos, es decir, de requerimientos ecológicos mínimos y precisos; y c) ser sumamente sensibles a los cambios que puedan producirse en su entorno. Otros aspectos importantes incluyen d) tolerancia a los agentes contaminantes; e) abundancia en el área de interés y poca o ninguna movilidad; f) respuesta a las concentraciones que se presumen y serán evaluadas; g) diseño sencillo del muestreo y preparación, siendo de fácil recolección; y h) acumulación de los elementos a estudiar accesibles por las técnicas analíticas rutinarias (Vergara *et al.*, 2005; Díaz, 2008; Hurtado, 2010; Pinto, 2013; Ibedaca, 2014).

Las ventajas de usar biomonitores, frente al uso de monitoreo instrumental, es que este último no puede medir los factores bióticos y abióticos que pueden afectar la vida; ya que, aunque puede determinar los niveles de los contaminantes en el entorno, no siempre puede indicar cuando los seres humanos, animales y plantas se encuentran en riesgo. La principal ventaja de un bioindicador reside en su bajo costo de adquisición y mantenimiento, permitiendo gran densidad de puntos de muestreo y grandes extensiones del mismo por tiempos prolongados (Batič, 2002; Hurtado, 2010; Pinto, 2013).



2.5.1.2.3. Biomonitorreo

El biomonitorreo es una herramienta simple y relativamente económica para investigaciones prolongadas de la calidad medio ambiental, suministrando el efecto integrado de todos los factores medio ambientales, incluyendo contaminación y condiciones. Se define como la observación continua de un área con la ayuda de bioindicadores realizando, por ejemplo, mediciones repetidas de sus respuestas, de forma que éstas revelen cambios a niveles espaciales y temporales. Es más, cuando el biomonitorreo es combinado con un monitoreo fisicoquímico, la relación entre un contaminante y su efecto en la planta puede ser trazado (Chaphekar, 1999; Smodiš *et al.*, 2004; Wannaz y Pignata, 2006).

2.5.1.2.3.1. Biomonitorreo activo y pasivo

Un biomonitorreo, o bioindicación, realizado de forma activa es llevado a cabo cuando, los organismos biológicos a utilizar como monitores durante el estudio, son criados en laboratorios o colectados en puntos selectos, para ser colocados luego de una forma estandarizada en el área de investigación por un periodo de tiempo determinado. Mientras un biomonitorreo pasivo es llevado a cabo cuando organismos, desarrollados en el área de la investigación o *in-situ*, son examinados y evaluados por sus reacciones (Krochmal y Kalina, 1997; Smodiš *et al.*, 2004).

2.5.2. Plantas como biomonitores de contaminación atmosférica

Información detallada de los contaminantes aerotransportados es necesaria para áreas densamente pobladas y, para reducir los esfuerzos analíticos y los costos totales, se debe tomar ventaja de los sistemas de acumulación natural: organismos biomonitores las cuales crecen en las áreas investigadas, están ampliamente distribuidos, y dependen básicamente de elementos aerotransportados y no de los nutrientes del suelo (Tuthill *et al.*, 1982; Schrimppff, 1984).



Como mencionan Hawksworth *et al.* (2005), las plantas como biomonitores han sido usadas desde el siglo XIX, cuando el botánico y liquenólogo Finlandés Nylander (1866) usó la abundancia de líquenes como una medida de los efectos de la contaminación del aire y, teniendo en cuenta que las técnicas para valorar la contaminación suelen ser costosas, la utilización de plantas como monitores se generaliza cada vez más, actuando incluso en muchos casos como señales de alarma frente a la contaminación, que pudiese pasar inadvertida en algunas ocasiones (Hawksworth *et al.*, 2005; Figueiredo *et al.*, 2007).

Vareschi (1953) utilizó por primera vez los líquenes como bioindicadores en un país del trópico, donde realizó un mapa ubicando las zonas habitadas por líquenes en Caracas, Venezuela, distinguiendo diferentes zonas: una desierta, una externa, otra interna de conflicto y una normal. Pero, en esa época, no se conocía la correlación entre la presencia de éstos y los niveles de contaminación. Los líquenes, por ejemplo, no fueron reconocidos de manera adecuada como posibles bioindicadores sino hasta 1960, ocurriendo un crecimiento exponencial de investigaciones al respecto, cuando se identificó al dióxido de azufre como un factor principal de influencia sobre el crecimiento de éstos (Hawksworth *et al.*, 2005).

En el campo de la investigación medio ambiental, se ha intentado encontrar especies capaces de proporcionar su propio contenido en elementos minerales en relación al nivel promedio en la atmósfera circundante. Principalmente han sido estudiadas plantas epífitas, como líquenes y briófitos (Capannesi *et al.*, 1987), y es indudable que, donde el suministro de aparatos e instrumentación es limitado, los datos de monitoreo complementario, derivados de estudios con líquenes, musgos y plantas, son invaluable, siendo aplicados éstos satisfactoriamente como monitores atmosféricos (Purvis *et al.*, 2007; Bedregal *et al.*, 2009).

2.5.2.1. Especies epífitas

Los organismos epífitos son aquellos que crecen sobre plantas (figura 7), sin que exista conexión orgánica entre ambos organismos, recibiendo la mayor parte de sus nutrientes, o todos estos, a partir del aire, siendo más susceptibles o dependiendo en un mayor grado de los factores atmosféricos, constituyendo sustratos ideales para ser utilizados, ya sea como bioindicadores de la calidad del aire o como bioacumuladores de depositación atmosférica (Lucking, 1997; Hawksworth *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2007; Kováčik *et al.*, 2011).

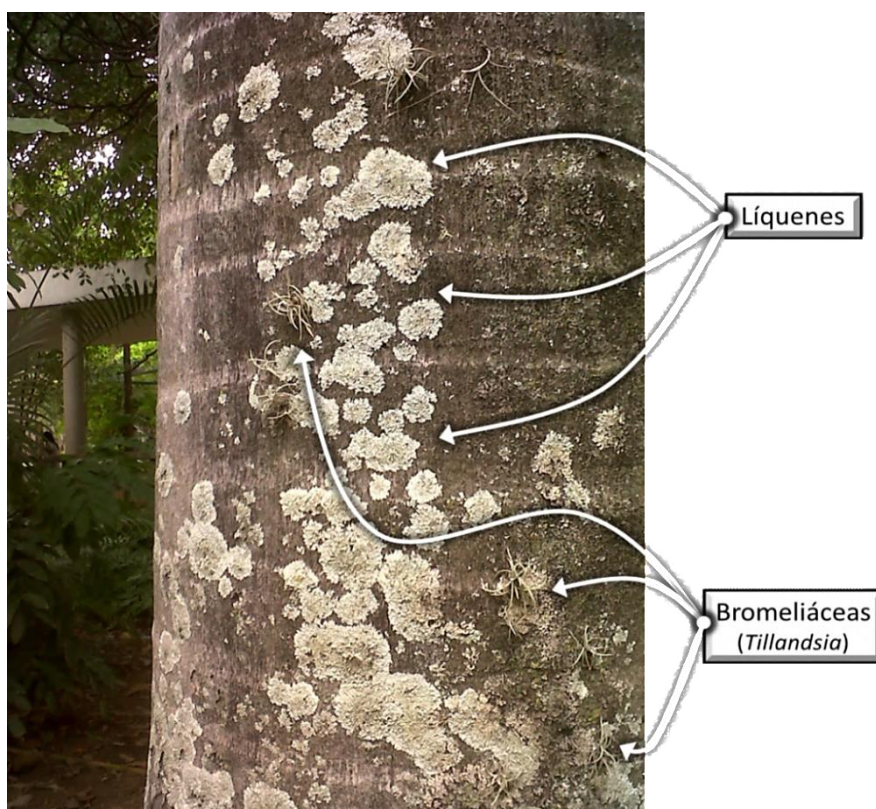


Figura 7. Algunas especies epífitas comunes en la Universidad Central de Venezuela, centro de Caracas.

2.5.2.2. Bromelias o Bromeliaceae

La fase inicial para la implementación de todo proyecto de biomonitoreo es la selección del bioindicador más apropiado. La aproximación a preguntas ambientales, con el uso de plantas no vasculares (líquenes y hongos), ha dado resultados interesantes pero, por otro lado, ha revelado límites metodológicos en cuanto a las especies se refiere, tales como la imposibilidad de tener en cuenta todas las diferentes direcciones en las que los contaminantes pueden dispersarse y la tendencia, bajo ciertas condiciones, de liberar a través de lixiviación cantidades considerables de los elementos acumulados, siendo éstas plantas no altamente evolucionadas (Capannesi *et al.*, 1987). Así, plantas vasculares o de mayor evolución, pueden ser seleccionadas para los fines propuestos (Smodiš *et al.*, 2004), y algunas especies resaltan sobre otras, como la familia de las bromeliáceas. Éstas comprenden 3255 especies de plantas monocotiledóneas, comprendiendo alrededor de 60 géneros, estando casi restringida a la región neotropical, ocupando regiones umbrosas, cálidas y húmedas de América tropical y las Antillas. Su distribución en el neotrópico se extiende desde el sur de Los Estados Unidos hasta el sur de Chile central (*Fascicularia*) y Argentina (*Tillandsia*), con la excepción de la especie *Pitcairnia feliciana*, del oeste de África (Crayn *et al.*, 2004; Hornung, 2011; Ibedaca, 2014).

Las bromeliáceas son bien conocidas por su rica diversidad morfológica y ecológica, un gran ejemplo de adaptación en plantas vasculares, encontrándose con hábito epífita, terrestre y/o saxícola. Ciertas innovaciones y adaptaciones fisiológicas le han permitido a la familia ocupar exitosamente hábitats xéricos y húmedos, permitiendo la dominancia de la familia sobre las epífitas neotropicales, sólo superada por las Orquidáceas. Sus tamaños varían según la especie, desde 2,5 pulgadas en algunas hasta los 10 metros de longitud en otras. Lo más atractivo es su follaje y algunas tienen varias bandas en sus hojas de distintos colores, pero también destacan sus tallos floridos. Su crecimiento es por lo general lento. (Crayn *et al.*, 2004; Frank *et al.*, 2004; Aguirre-Santoro y Betancur, 2008; Zizka *et al.*, 2009; Hornung, 2011; Ibedaca, 2014).

Una estructura característica de este grupo de plantas son los tricomas, incluso utilizados como carácter diferencial entre géneros. Éstos son estructuras multicelulares, compuestas de un campo de células vacías y sirven como una válvula que conduce el agua y los nutrientes del medio ambiente hacia el interior de la planta; previniendo además su desviación por la esta misma vía de ingreso. De esta manera pueden obtener sus requerimientos de la atmósfera a partir del rocío o la neblina, usando así sus raíces únicamente para fijarse a un soporte (Benzing, 1990; Crayn *et al.*, 2004; Hornung, 2011; Ibedaca, 2014).

2.5.2.2.1. Bromeliáceas del género *Tillandsia*

Es un género de la familia de las bromelias que no parece poseer limitaciones importantes, en comparación a especies de plantas no vasculares, para su uso como biomonitor de contaminación atmosférica, encontrándose ampliamente distribuido en los trópicos y subtrópicos americanos. Éstas ofrecen una buena perspectiva para ser usadas como monitores medio ambientales eficientes. No sólo obtienen su agua y requerimientos minerales de la atmósfera, sino que también poseen una estructura morfológica que les permite recibir contaminantes de diferentes direcciones y el contenido elemental en sus tejidos enormemente refleja los niveles atmosféricos de algunos elementos tóxicos, como ciertos gases y metales pesados, por lo que diferentes especies de *Tillandsia* han sido utilizadas como biomonitores duales de la contaminación atmosférica en gran cantidad de países (Markert, 2001; Wannaz y Pignata, 2006; Figueiredo *et al.*, 2007; Bermudez *et al.*, 2009; Kováčik *et al.*, 2011), permitiendo el análisis de ambos materiales colectados, tanto aquel atrapado por su forma como aquel tomado por sus tejidos (Smodiš *et al.*, 2004). Resultados obtenidos por diversos autores, como Benzing y Davidson (1979) y Capannesi *et al.* (1987), confirman para diversas especies de *Tillandsia* su naturaleza oligotrófica, con alta capacidad de absorber diversos elementos mayoritarios y traza, y por lo tanto justificando su uso como posibles monitores multielementales.

Los trópicos y subtrópicos americanos poseen algunas especies de Bromeliáceas epífitas encontradas frecuentemente en áreas urbanas, siendo aquellas del género *Tillandsia* las de mayor riqueza específica dentro de la familia, presentando mayor diversidad morfológica y ecológica, teniendo como ejemplo al *Musgo Español* (“Spanish Moss” - *Tillandsia usneoides* (L.) L.) y al *Musgo de Bola* o *Clavel del Aire* (“Ball Moss” – *Tillandsia recurvata* (L.) L.; Schrimpff, 1984; Cortés, 2004; Morillo *et al.*, 2009; Ibedaca, 2014).

2.5.2.2.1.1. Especie *Tillandsia recurvata* (L.) L.

Es una especie perenne que se consigue en las ramas y/o troncos de los árboles y arbustos, paredes y cables eléctricos; de morfología arrosetada (similar a la rosa), de unos 10cm de diámetro (figura 15) y por lo general se consiguen muchos especímenes juntos en el mismo árbol (Argüello, 2009; Ibedaca, 2014). Autores indican además que la *T. recurvata*, y su empleo como biomonitor de la contaminación atmosférica, se conoce extensivamente a nivel mundial, destacándose publicaciones que examinaron su comportamiento ante la influencia de emisiones (Argüello, 2009; Pinto, 2013; Ibedaca, 2014). La especie, por ejemplo, ha sido descrita en un estudio realizado en Medellín, Colombia, como buena acumuladora para metales pesados (Schrimpff, 1984). En la tabla 1 podemos observar su clasificación taxonómica.

Tabla 1. Taxonomía de *Tillandsia recurvata* (L.) L.
(tomado de Ibedaca, 2014)

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	<u>Liliopsida</u>
Subclase	Commelinidae
Orden	Bromeliales
Familia	Bromeliaceae
Género	<i>Tillandsia</i>
Especie	<i>T. recurvata</i>

Otras investigaciones muestran que la misma especie es sensible a las modificaciones ambientales de las diversas áreas de la zona urbana, empleando parámetros tales como síntomas externos (coloración, debilidad del tejido, y cambios en la epidermis de la planta), modificaciones en el tejido de la planta y análisis de azufre y metales pesados (Bermudez *et al.*, 2009; Bermudez y Pignata, 2011). Así mismo, en comparación a líquenes y musgos, la *T. recurvata* presenta menores inconvenientes en cuanto a su manipulación, su preparación y limpieza para los análisis es más simple y la muestra analítica es de un mayor tamaño (Cortés, 2004).

3. ANTECEDENTES

Capannesi *et al.* (1987) realizaron la determinación multielemental, de 43 elementos, en tres especies de *Tillandsia* (*T. ionantha*, *T. fasciculata* y *T. latifolia*) en Florencia, Italia, evaluando la efectividad de las especies como monitores ambientales multielementales, confirmando además la naturaleza oligotrófica del género.

Vingiani *et al.* (2004) realizaron un estudio en la bioacumulación de C, y S en el líquen *Pseudevernia furfuracea* (L.) Zopf y el musgo *Sphagnum capillifolium* (Ehrh.) Hedw. en Nápoles, Italia, para obtener información acerca de la capacidad de ambas especies, siendo trasplantadas en bolsas, como indicadoras de contaminación del aire; comparando a su vez el comportamiento de los dos organismos empleados, determinando los cambios y la variabilidad en el contenido de esos elementos durante el tiempo de exposición, concluyendo que los líquenes son más confiables y efectivos, mostrando mayor resistencia a condiciones de estrés y sequía; reportando de esta manera los valores mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de C y S reportados por Vingiani *et al.* (2004).

	Especie	Observación	%Ct (media)	%St (media)
Adamo et al. (2004)	<i>S. capillifolium</i>	(Originales - no expuestas)	43,080	0,261
		(10 semanas de exposición)	40,400	0,368
		(17 semanas de exposición)	38,230	0,305
	<i>P. furfuracea</i>	(Originales - no expuestas)	44,170	0,225
		(10 semanas de exposición)	43,780	0,282
		(17 semanas de exposición)	42,870	0,316



Smodiš *et al.* (2004), en un proyecto de investigación coordinada que incluyó 14 países, estudiaron la validación y aplicación de plantas como biomonitores de contaminación atmosférica por elementos traza, para identificar bioindicadores apropiados con fines regionales y/o locales en monitoreos generales de contaminación. Confirmaron la aplicabilidad de diferentes especies de líquenes y musgos para las determinaciones del grado de contaminación atmosférica, como una herramienta efectiva de monitoreo ambiental. Además, las plantas epífitas del género *Tillandsia*, fueron también identificadas como biomonitores potencialmente eficientes para la América tropical y subtropical.

Quijada (2006) utilizó líquenes de las especies *Ramalina* sp. y *Pyxine* sp. como monitores en la ciudad de Caracas, Venezuela, para determinar la concentración de metales pesados en los líquenes y observar alguna variabilidad de los contaminantes a lo largo de una transecta, encontrando diferencias estadísticamente significativas de la acumulación de metales en las muestras de *Pyxine* sp. de la zona de referencia y aquellas muestras pertenecientes a la transecta bajo estudio, arrojó resultados coherentes en comparación a aquellos obtenidos por otros métodos instrumentales, concluyendo que el seguimiento de contaminantes, mediante un biomonitoreo pasivo, representa una alternativa viable.

Figueiredo *et al.* (2007) evaluaron la contaminación atmosférica por metales en diferentes lugares, fuentes de contaminación aérea, de la región metropolitana de São Paulo, Brasil, llevando a cabo un monitoreo activo utilizando la bromelia *T. usneoides* (L.) L. trasplantada de un área considerada no contaminada, determinando que el incremento de algunos metales podía ser atribuido a fuentes específicas de emisión de contaminantes, pudiendo proponer a la *T. usneoides* como un excelente biomonitor de la calidad del aire en áreas urbanizadas.



Argüello (2009) utilizó dos organismos diferentes, el liquen *Pyxine* sp. y la bromeliácea *T. recurvata*, como biomonitores de contaminación atmosférica, para establecer su concentración en metales pesados, en Caracas, Venezuela, registrando los valores obtenidos y comparando ambas especies, determinando diferencias significativas, donde cada especie fue más eficiente en la acumulación de determinados metales: Pb, V y Ni en *Pyxine* sp. y Cr y Zn en *T. recurvata*.

Bedregal *et al.* (2009) utilizaron al liquen *Usnea* sp. y la Bromeliácea *T. capillaris* como biomonitores para evaluar la contaminación en la ciudad de Lima, Perú, obteniendo resultados que mostraban una contaminación significativa en algunas zonas, especialmente aquellas relacionadas con actividades industriales o emisiones vehiculares. Además, encontraron que la *T. capillaris* mostró mayor grado de acumulación para la mayoría de los elementos cuya fuente se consideraba de origen antrópico.

Bermudez *et al.* (2009) evaluaron la habilidad y respuesta bioacumuladora de tres especies de *Tillandsia*: *T. capillaris*, *T. tricholepis* y *T. recurvata*, trasplantadas de zonas no contaminadas a puntos de control según sus categorías de urbana, industrial y agropecuaria, en Córdoba, Argentina, encontrando la relación de ciertos metales pesados según la categoría del punto de control y determinando que la *T. recurvata* es más sensible a las actividades urbanas e industriales.

Zambrano *et al.* (2009) investigaron patrones de acumulación y fuentes potenciales de 20 elementos contaminantes, entre mayoritarios y traza, y 15 HAP peligrosos con el uso de *T. recurvata*, en el Valle Mezquital, México, produciendo información de los niveles regionales, fuentes y dispersión de los metales y HAP aerotransportados, confirmando que la *T. recurvata* es un buen receptor natural para esos contaminantes, pudiendo aplicarse a toda Latinoamérica y los Estados Unidos, donde se encuentra amplia y naturalmente distribuida.



Bermudez y Pignata (2011) evaluaron la respuesta antioxidante y el daño fisiológico en tres especies de *Tillandsia* (*T. capillaris*, *T. recurvata* y *T. tricholepis*) respecto a diferentes fuentes de contaminación, clasificadas como urbana, industrial y agrícola, en Córdoba, Argentina; determinando que la *T. recurvata* fue más sensible a las fuentes urbanas e industriales.

Pinto (2013) determinó la concentración de los metales pesados Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn; empleando *T. recurvata* como biomonitor de condiciones atmosféricas en Caracas, Venezuela, demostrando que existe una variabilidad en las concentraciones de cada analito a lo largo de la transecta evaluada, abarcando casi en su totalidad la línea tres del Metro de Caracas, desde Plaza Venezuela hasta Mercado, haciendo uso del Jardín Botánico de Caracas como punto de control, reportando los siguientes valores promedio en microgramos/gramos para cada metal evaluado: Zn (83-139), Cu (9- 105), Pb (8- 18), Cr (10,4- 16,0), Ni (4,3- 14,0), V (2,9-4,3) y Cd (<Límite de Detección); demostrando así que la *T. recurvata* representa una alternativa para la evaluación de la calidad del aire, para estos elementos, debido a su abundancia y distribución en la zona de estudio, así como su facilidad de colección y tratamiento.

Ibedaca (2014), en una investigación que tuvo como objetivo principal optimizar metodologías para la extracción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), utilizó *T. recurvata* como biomonitor pasivo en la ciudad de Caracas, Venezuela, permitiendo identificar y cuantificar los 16 HAP de interés por diferentes ensayos experimentales y comprobando la capacidad bioacumuladora de la especie y su posible uso como biomonitor para esos analitos.

4. ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Ubicación geográfica y datos demográficos

La ciudad de Caracas (figura 8) está situada en la zona Centro-Norte del país, a unos 15Km del Mar Caribe; ubicada en una cuenca hidrográfica con un valle angosto, que limita por el Norte por la Cadena Litoral y por el Sur por los Altos de Pipe; localizado geográficamente a los 66° 55' longitud Oeste y 10° 30' latitud Norte (figura 9). El Distrito Capital sólo está constituido por el Municipio Libertador, y junto con los Municipios Baruta, Chacao, El Hatillo y Sucre, pertenecientes al estado Miranda, se conforma el Distrito Metropolitano. La ciudad tiene una extensión territorial de 650Km², y una población de 3.220.540 habitantes (sin incluir ciudades periféricas), poseyendo además 1.246.910 vehículos, conformando aproximadamente el 24% del parque automotor en circulación de Venezuela (MARN-PDVSA, 2005; Quijada, 2006; Argüello, 2009; Perdomo de Ponce, 2009; Gómez, 2010; Pinto, 2013).

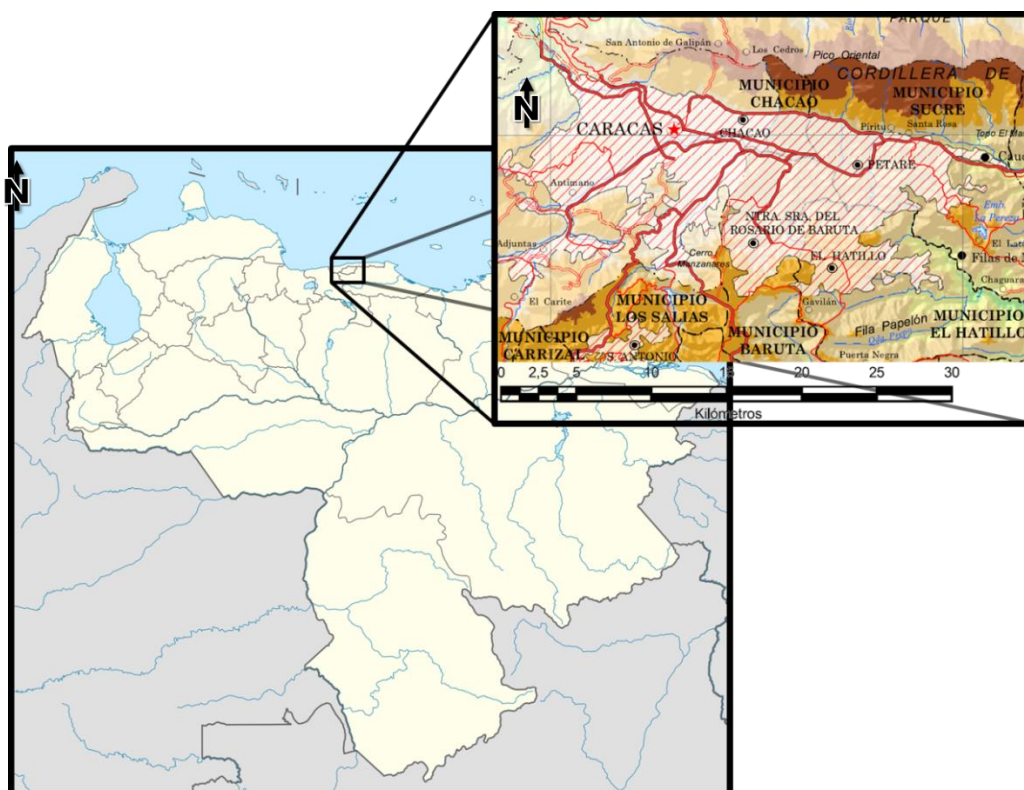


Figura 8. Ubicación de la zona de estudio
(tomado del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar)

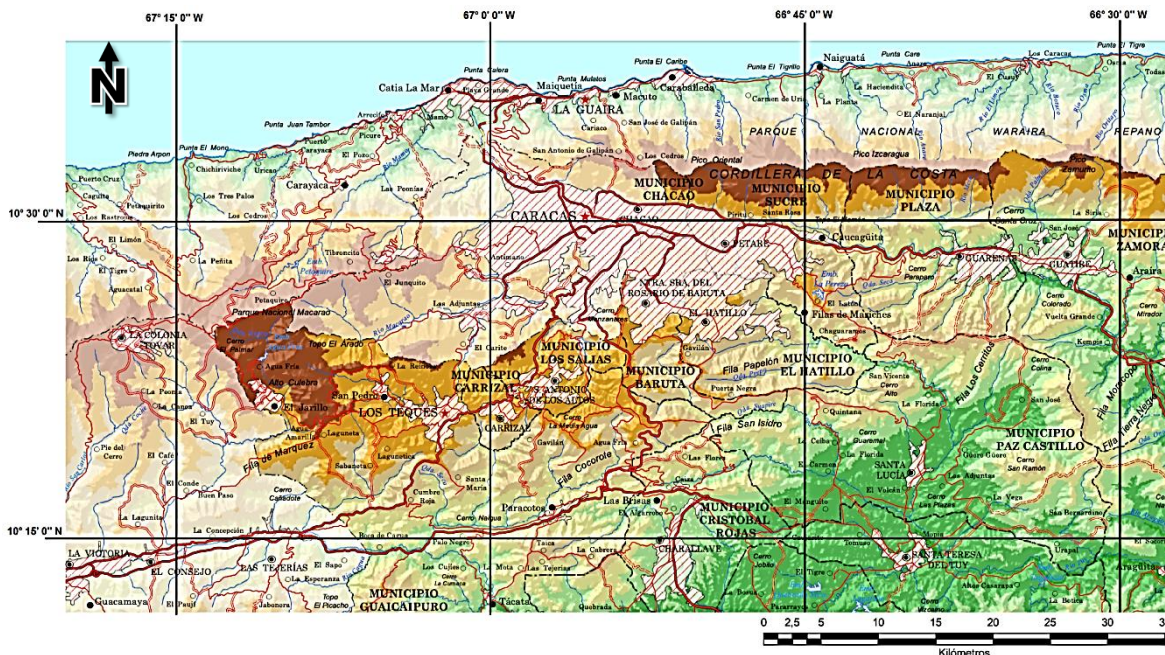


Figura 9. Mapa general de la zona de estudio mostrando las coordenadas geográficas (tomado del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar)

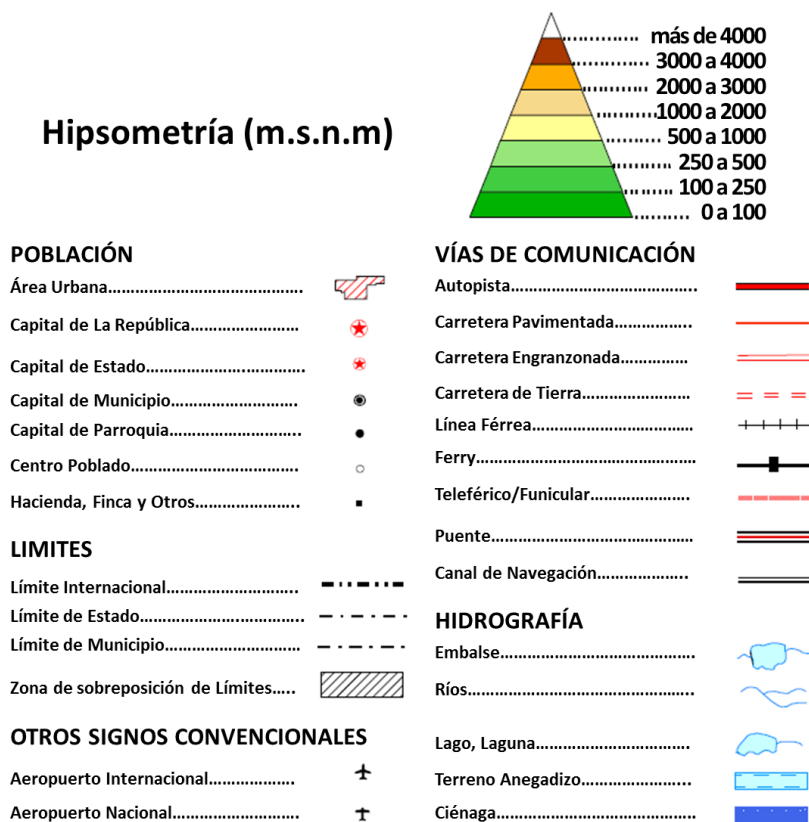


Figura 10. Leyenda utilizada en los mapas mostrados anteriormente (tomado del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar)

4.2. Fuentes móviles de contaminación

Las rutas más importantes de Caracas incluyen grandes vías de circulación, como las autopistas: del Este, Valle-Coche, Francisco Fajardo, Francisco de Miranda, Boyacá (Cota Mil), Caracas-Baruta y Caracas-La Guaira. Pinto (2013) menciona que actualmente no se cuenta con datos de mediciones de flujo vehicular en todas estas vías, sin embargo, los volúmenes de tráfico más grandes están ubicados en la autopista del Este. Otras vías de mediano tráfico, incluyen las avenidas Libertador, Sucre y Bolívar (MARN-PDVSA, 2005; Argüello, 2009).

4.3. Fuentes fijas de contaminación

Las mayores zonas industriales se localizan al Este y Suroeste del área metropolitana, en los municipios Sucre y Libertador respectivamente (MARN-PDVSA, 2005; Argüello, 2009). Para el área del Municipio Libertador (Figura 11), como indica Pinto (2013), en la transecta de estudio se encuentran grandes cantidades de estaciones de servicio de gasolina, así como talleres mecánicos automotrices (figura 12).

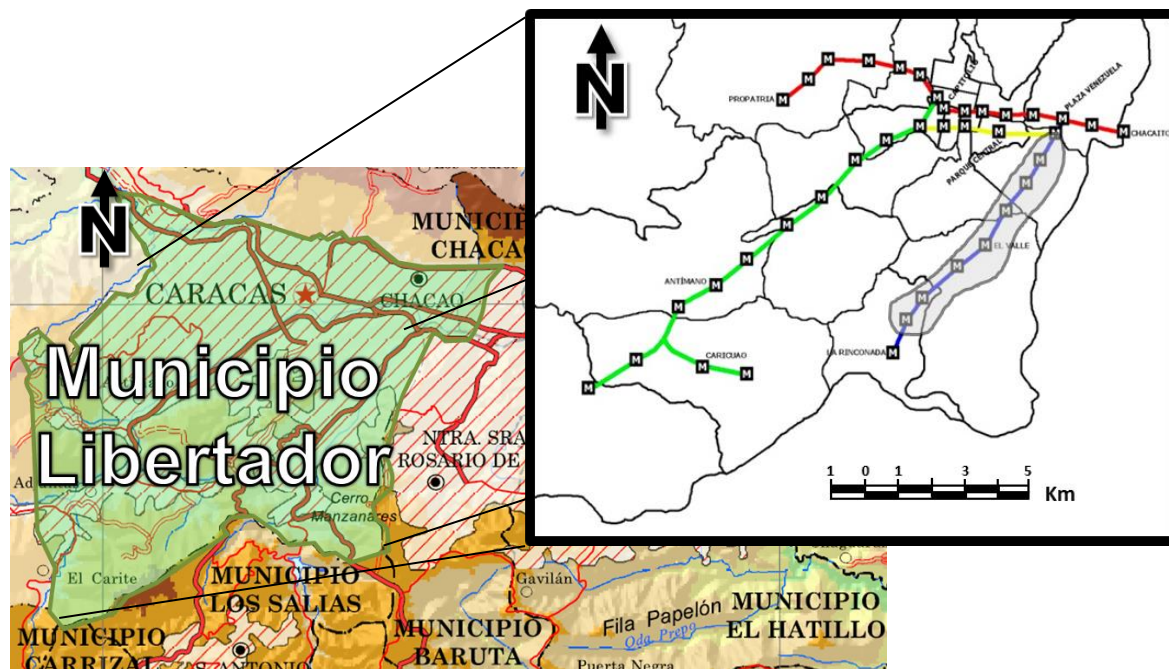


Figura 11. Municipio de interés para el presente estudio

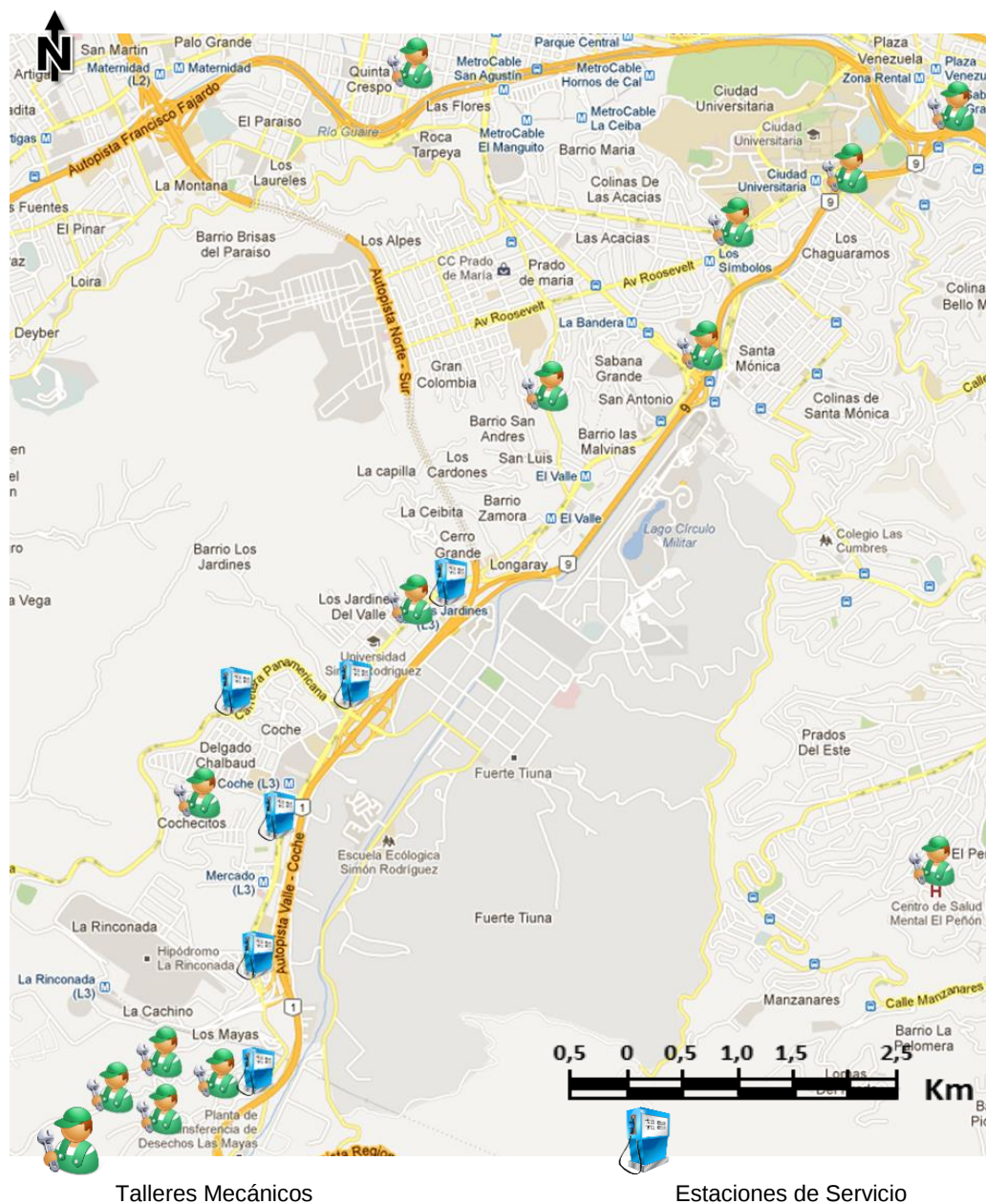


Figura 12. Mapa de la ubicación de las fuentes fijas en la transecta de estudio (modificado a partir de Pinto, 2013)

4.4. Condiciones climáticas

El clima de la ciudad es del tipo intertropical de montaña, con precipitaciones que varían entre los 900 y 1300mm anuales en la ciudad y hasta los 2000mm en algunas partes de la Cordillera. Entre los meses de mayo a diciembre incrementan las precipitaciones, denominada época de lluvia, esta condición se ve reducida entre los meses de enero a abril, denominada época de sequía (Perdomo de Ponce, 2009).

Las características del terreno hacen que el viento sea canalizado de la dirección Este; así mismo, mayor parte del tiempo las masas de aire están calmadas, notándose que en las tardes y temprano en la mañana el aire queda atrapado en la cuenca (MARN-PDVSA, 2005; Perdomo de Ponce, 2009).

Los vientos predominantes en el Parque Nacional Waraira Repano (El Ávila) y la Cordillera Central son los alisios del N-E, los cuales soplan todo el año (figura 13). Sin embargo, Pinto (2013) menciona que durante los meses marzo, abril y mayo los vientos alisios confluyen con los vientos que vienen del sur hacia el norte y N-O. La temperatura media anual varía conforme a la ubicación y altitud de la cordillera, teniendo que la temperatura media anual en el valle de Caracas, ronda los 21°C (MARN-PDVSA, 2005; Díaz, 2008; Argüello, 2009; Perdomo de Ponce, 2009).

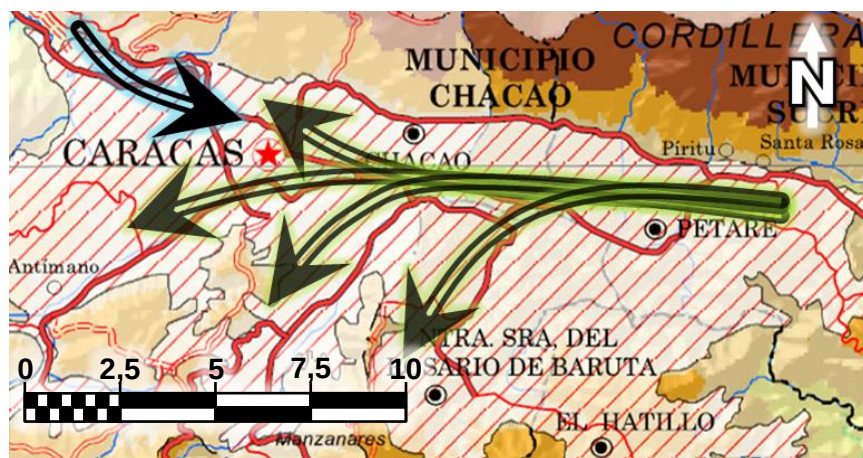


Figura 13. Dirección predominante del viento en el valle de Caracas (modificado a partir de Perdomo de Ponce, 2009)

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para poder llevar a cabo los objetivos propuestos, fue necesario un diseño experimental que cumpliera con determinadas etapas, como son: etapa de pre-campo, etapa de campo y etapa de laboratorio.

5.1.1. Etapa de pre-campo

Comprendió la evaluación preliminar de la transecta que se encontraría bajo estudio, abarcando la línea tres del Metro de Caracas casi en su totalidad, desde la Estación Plaza Venezuela hasta Mercado, constando así de ocho puntos de muestreo, además de un punto de control, para un total de nueve lugares seleccionados (figura 14).

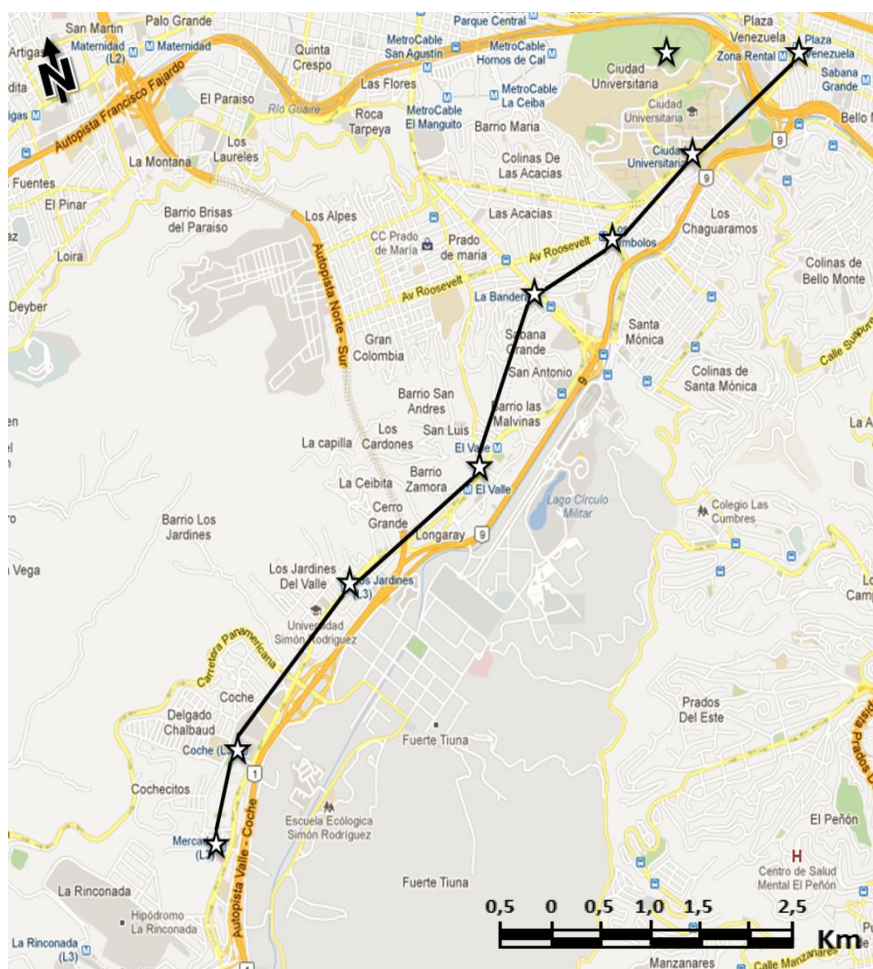


Figura 14. Transecta de interés para el presente estudio

Como menciona Pinto (2013) basado en trabajos previos, los puntos de referencia fueron recorridos en búsqueda especímenes representativos de *T. recurvata* en los árboles cercanos (figura 15), tomando nota en una hoja de registro, que incluyó: nombre del punto de referencia, número de muestra, ubicación en coordenadas geográficas con la ayuda de un GPS, altura a la que se encontró el espécimen, el número de foto asociado a la muestra y cualquier otro dato de relevancia que se consideró para utilidad posterior, por tratarse de un monitoreo pasivo (Batič, 2002).



Figura 15. *Tillandsia recurvata* (L.) L.

5.1.2. Etapa de campo

En cada fecha escogida, se realizó la recolección de los especímenes, tanto en la zona de referencia (zona boscosa del Jardín Botánico de Caracas – 26 de Julio de 2012), como en cada punto de muestreo (transecta de interés – 25 de Octubre de 2012). Los especímenes de *T. recurvata* fueron escogidos según su tamaño, etapa de desarrollo (maduras, con frutos de 5 a 8 centímetros de diámetro) y la altura a la que se encontraba respecto al suelo (de 3 a 5 metros) como aspectos principales (figuras 16 a y b). También se tuvo en cuenta otros detalles, como su distancia al punto de referencia y su ubicación geográfica con el apoyo de un equipo GPS; además del uso de material adecuado durante el proceso, utilizando guantes de látex, lentes de seguridad, una vara apropiada para facilitar su toma, y cualquier otro complemento que se consideró útil y necesario (Batič, 2002; Díaz, 2008; Fernández, 2012; Pinto, 2013). De esta manera fueron tomados cuatro especímenes por ubicación, abarcando un total de treinta y seis para el presente estudio.



Figura 16. Recolección de especímenes en el Jardín Botánico de Caracas, durante la etapa de campo.
(tomadas por Pinto, 2013.)

5.1.3. Etapa de laboratorio

Para alcanzar los fines propuestos, ciertas herramientas analíticas debieron ser utilizadas para determinar la concentración de los elementos de interés. Estas técnicas se describen a continuación, donde se realizaron dos análisis, ambos instrumentales, para las determinaciones de carbono total (Ct) y azufre total (St). Cada uno se realizó por triplicado para asegurar el tratamiento estadístico posterior de los resultados que fueron obtenidos.

5.1.3.1. Tratamiento previo de las muestras

El procedimiento incluyó en primer lugar el pesado de las muestras, colocando éstas en vidrio de reloj previamente identificados; luego fueron secadas en estufa a una temperatura entre 50-60°C, hasta llevar a peso constante; seguido, cada muestra fue colocada en un desecador por al menos 30 minutos, para ser pesada nuevamente, determinando así el porcentaje de humedad por diferencia. Posteriormente, fueron lavadas con agua destilada durante 5 segundos, siguiendo el procedimiento estándar para este tipo de muestras a fin de minimizar interferencias en análisis posteriores debido a la presencia de insectos, restos de vegetación, entre otros; luego secadas al aire y sumergidas en nitrógeno líquido para así congelar y pulverizar cada muestra, utilizando un mortero de ágata (figura 17). El polvo obtenido fue homogeneizado, secado en una estufa nuevamente por dos horas entre 50-60°C, pesado y almacenado en envases plásticos debidamente identificados, donde cada espécimen tratado es considerado ahora una muestra (Díaz, 2008; Argüello, 2009; Hurtado, 2010; Pinto, 2013).



Figura 17. Secado en estufa y posterior pulverización de los especímenes.

5.1.3.2. Determinación de carbono total (Ct)

Como describen Henríquez (2011) y Nasser (2012), el porcentaje de Ct en las muestras se determinó con un equipo analizador marca LECO, modelo C-144 (figura 18), cuyo fundamento principal es el método de combustión seca.

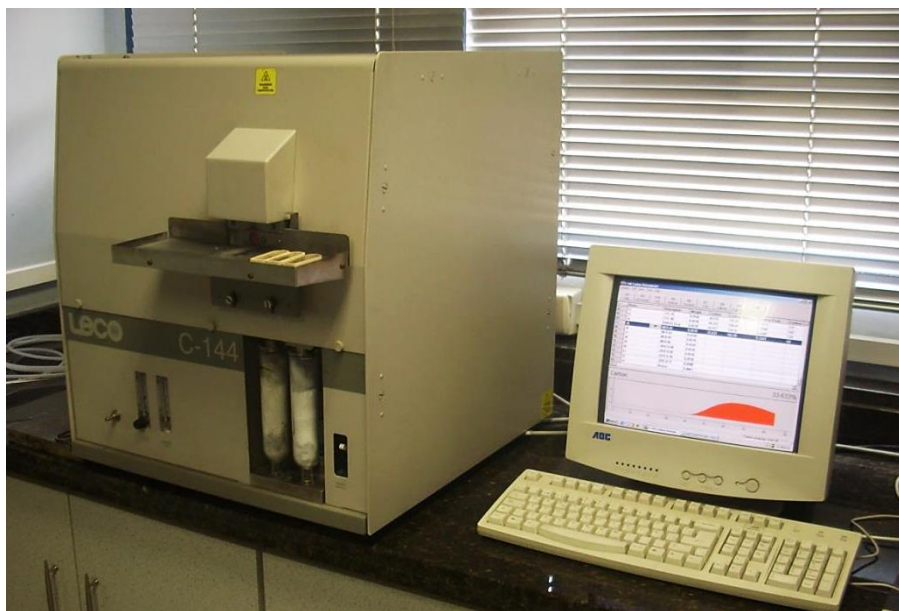


Figura 18. Equipo analizador marca LECO, modelo C-144 utilizado en el presente estudio.

Para ello se colocaron aproximadamente 50mg de muestra pulverizada en una navecilla de porcelana, agregando una pequeña cantidad (alrededor de 50mg) de un retardante suministrado por la casa LECO, y la mezcla se introdujo luego en el horno a una temperatura de 1350°C (figura 19). Esto provocó la oxidación de carbono a dióxido de carbono (CO₂), que es detectado mediante una celda infrarroja (figura 20). Un detector mide la absorción correspondiente a la vibración de “stretching”, estiramiento del doble enlace C=O, y el sistema computarizado convierte el resultado de la absorción en %Ct presente en la muestra (Burbano, 2011; Henríquez, 2011; Nasser, 2012).



Figura 19. Procedimientos realizados durante la determinación de %Ct.

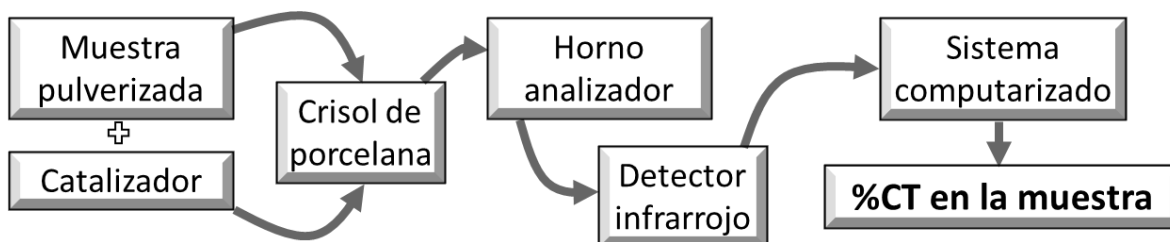


Figura 20. Esquema generalizado para la determinación de Ct.

5.1.3.3. Determinación de azufre total (St)

La determinación de la concentración de St se efectuó en un analizador marca LECO, modelo SC-432 (figura 21) como indica Nasser (2012). Para ello, alrededor de 100mg de la muestra se agregaron en una navecilla de porcelana, la cual se introdujo en el horno del analizador, a una temperatura de 1350°C y como retardante de la reacción se agregó COM-AID (figura 22), aproximadamente en la misma cantidad que la muestra (100mg).



Figura 21. Equipo analizador marca LECO, modelo CS-432 utilizado en el presente estudio.

Mediante una corriente de oxígeno se dio lugar a la combustión total de la muestra y el dióxido de azufre (SO_2) generado pasó por una serie de etapas, en los que se produce la absorción de agua y de sólidos suspendidos, llegando finalmente a un detector de infrarrojo que mide la absorción correspondiente a la vibración de “stretching”, estiramiento del doble enlace $\text{S}=\text{O}$.



Figura 22. Procedimientos realizados durante la determinación de %St.

Un procesador convierte la señal en forma digital y el resultado directo es el porcentaje de azufre total (%St, figura 23). Ambos análisis fueron llevados a cabo teniendo el debido cuidado y orden de las muestras (figura 24), asegurando así calidad en los resultados obtenidos.

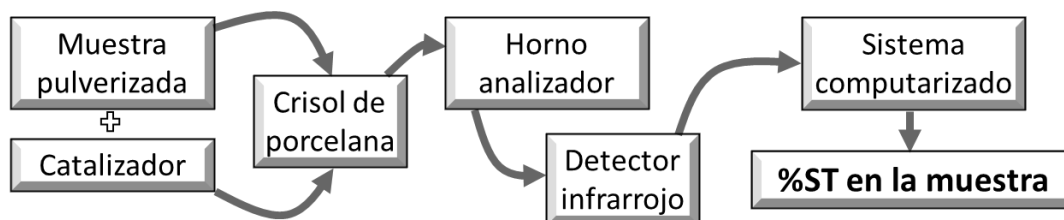


Figura 23. Esquema generalizado para la determinación de St.



Figura 24. Método utilizado para mantener el orden de las muestras durante los diferentes análisis realizados.

5.2. Análisis de los resultados obtenidos

Cualquier dato obtenido en investigaciones geocientíficas necesita algún tipo de tratamiento estadístico para su interpretación, así como para las mediciones de confiabilidad y de errores (Jenn *et al.*, 2007), es por esto que se condujeron una serie de evaluaciones estadísticas para reportar de forma adecuada los resultados obtenidos. Los mismos se describen a continuación.

5.2.1. Estadística univariada y descripción de la población

El primer paso en el tratamiento estadístico de los datos que fueron recolectados durante el presente trabajo fue el análisis univariado de los datos, o análisis de cada parámetro individual o separadamente. El propósito de éste análisis es describir las propiedades de la población, analizando los datos de la muestra (Jenn *et al.*, 2007), realizando posteriormente gráficos de barra (apéndice H) y de cajas y bigotes, usados para visualizar la distribución de frecuencia de cada valor X_i dado. Así mismo, se llevaron a cabo los cálculos de estadística sumarial para reconocer las propiedades de la población de datos (Jenn *et al.*, 2007), como son el promedio muestral, la mediana, la moda, cuartiles y/o percentiles, la varianza muestral y la desviación estándar (apéndice G).

5.2.2. Estadística inferencial y prueba de hipótesis

Luego se llevó a cabo la estadística inferencial, usada para trazar conclusiones acerca de la población por medio de los datos colectados a partir de las muestras (Jenn *et al.*, 2007).

Un resultado es llamado significativo si es improbable que ocurra por azar, y en una prueba de hipótesis, el nivel de significancia es el criterio usado para rechazar una hipótesis, conocida como “nula”, acerca de un parámetro de la población. Así, el propósito de la prueba de hipótesis fue comprobar si la hipótesis nula es correcta frente a los datos experimentales donde, dependiendo de estos, la misma puede o no ser rechazada como una posibilidad que puede utilizarse (Jenn *et al.*, 2007).

La hipótesis nula comúnmente es lo opuesto a lo que el experimentador de hecho cree o espera, asumida para permitir a los datos contradecirla (Jenn *et al.*, 2007).

Por convención, la probabilidad del valor observado t de una prueba estadística es llamada el valor p , y si este es menor o igual al nivel de significancia, la hipótesis nula será rechazada (Jenn *et al.*, 2007).

5.2.3. Estadística multivariada y comparación entre grupos de datos

Usualmente, más de un parámetro es determinado en una investigación, y esto da lugar a la interrogante *si* y *cómo* esos parámetros están relacionados, y como esos juegos de datos pueden ser caracterizados e interpretados (Jenn *et al.*, 2007), por lo que posteriormente se realizó el análisis multivariado de los datos, o análisis de diversos parámetros juntos, para determinar, si existe o no, relación entre los datos obtenidos.

5.2.3.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Fue el método estadístico utilizado para comparar dos o más conjuntos de datos mediante la asociación a una probabilidad. Además, puede ser empleado para contrastar la hipótesis de interés mediante un valor ya mencionado y conocido como nivel de significancia.

Así mismo, Hurtado (2010) menciona que un nivel de significancia mayor a 0,05 nos dice que debemos aceptar la hipótesis nula de independencia entre las variables. Por el contrario, si el valor es menor a 0,05 rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa, es decir, debe existir una relación de dependencia entre las variables.

5.2.3.2. Análisis de clúster

Este método permitió que fuesen encontrados grupos (“clústeres”) de observaciones similares en los sets de datos multivariados, en los casos donde alguno existiese.

El método más común de agrupamiento une los pares de observaciones más similares, paso por paso, hasta que todos los puntos están agrupados en una jerarquía de similitudes. Esto fue visualizado por un dendograma, el cual es parecido estructuralmente a un árbol, con grupos cada vez más pequeños a medida que avanza a lo largo de las ramas (Jenn *et al.*, 2007), formando grupos homogéneos internamente y diferentes entre sí, es decir, midiendo la similitud entre ellos (Hurtado, 2010).

5.2.3.3. Análisis de correlación

Este análisis permitió determinar si existe una relación lineal entre las variables cuantitativas determinadas en la investigación, realizándose con el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) y con el coeficiente de determinación (r^2), según señala Hurtado (2010).

Hurtado (2010) también indica que el coeficiente de correlación lineal de Pearson puede variar entre -1 y +1, donde si $r = \pm 1$, existe una correlación perfecta que indica dependencia total entre las dos variables; por el contrario si $r = 0$ no existe relación lineal, por lo que las variables serían independientes entre sí. Valores entre 0 y ± 1 indican la existencia de correlación en diferentes magnitudes, según este valor se acerque o no a ± 1 , y su valor positivo o negativo indica si la relación entre las variables es directa o inversamente proporcional, respectivamente.

El coeficiente de determinación (r^2) es el cuadrado del coeficiente de Pearson e indica, como señala Hurtado (2010), el porcentaje de variación de una variable debido a la variación de otra. Su valor varía entre 0 y 1 donde un valor de 0 indicará independencia, mientras un valor de 1 indicará lo contrario.

Estos análisis fueron realizados empleando el programa estadístico *STATISTICA 8.0*.

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1. Porcentaje de humedad determinado en las muestras

La tabla 3 señala el promedio por pérdida de masa obtenido en un estudio previo (Pinto, 2013), asociada a humedad (%Humedad) de los especímenes de *T. recurvata* evaluados durante el presente estudio. El valor reportado por el autor es significativamente alto y éste lo atribuye al mecanismo que posee este tipo de plantas para tomar sus nutrientes de la atmósfera, absorbiendo la humedad presente en su entorno y depositándola en las células denominadas “tricomas” (apéndice L), ubicadas en su epidermis (Hornung, 2011).

Tabla 3. Promedio de porcentaje de humedad y su desviación estándar para los especímenes colectados en la transecta bajo estudio reportado por Pinto (2013)

Espécimen	Humedad (%)	Desv. Est. (%)
<i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	70	6

Con la finalidad principal de asegurar que los análisis durante el presente estudio sean realizados referidos al peso en base seca de las muestras, reportando de forma adecuada los valores obtenidos para los elementos analizados, se realizó la evaluación de la humedad contenida en las muestras pulverizadas y almacenadas, ya que las mismas pueden tener tendencia a captar nuevamente la humedad de su entorno (Batič, 2002), mostrando de esta forma el resultado promedio en tabla 4.

Tabla 4. Promedio de porcentaje de humedad y su desviación estándar luego del período de almacenamiento para el presente estudio.

Espécimen	Humedad (%)	Desv. Est. (%)
<i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	14	7

Este valor (aprox. 14%) es mucho menor al obtenido por Pinto (2013) y, por tratarse de muestras pulverizadas, refrigeradas y almacenadas por el anterior autor, podemos atribuir el valor que hemos obtenido principalmente a la condensación de la humedad contenida en los envases durante el periodo que estuvieron guardadas.

6.2. Validación de los resultados obtenidos

Para realizar la validación de los resultados obtenidos se utilizaron patrones certificados por la compañía LECO. A partir de éstos fueron realizadas las curvas de calibración que permitieron determinar el porcentaje de los elementos analizados mediante las técnicas analíticas usadas.

Es importante destacar que el material certificado empleado no fue de la misma naturaleza biológica que aquel utilizado para la determinación de los analitos de interés, ya que éste no existe comercialmente, pero aun así los patrones utilizados permitieron una validación efectiva de los elementos de interés, como puede observarse más adelante en las tablas 5 y 6.

Para la determinación del elemento azufre se utilizó un patrón de suelos, bajo el número 502-039, con un contenido de azufre certificado de 0,114%, lo que permitió elaborar la curva de calibración correspondiente (ver apéndice A).

Para la determinación del elemento carbono se utilizó un patrón de carbón, bajo el número 502-682, con un contenido de carbono certificado de 75% que, como el caso anterior, permitió elaborar el gráfico correspondiente para la calibración (ver apéndice A).

6.3. Concentración de los elementos Carbono y Azufre en las muestras analizadas de *T. recurvata*.

Ocho puntos de muestreo, además de un punto de referencia, fueron estudiados para determinar los porcentajes de los elementos C y S en especímenes de *Tillandsia recurvata* (L.) L, recolectados en puntos seleccionados (ver figura 14), donde los valores expresados en porcentaje son mostrados en la tabla 5 con su respectiva desviación estándar.

Tabla 5. Concentración de C y S por estación (promedio y su desviación estándar).

Estación	%Ct		%St	
	Promedio $\pm$ de	CV	Promedio $\pm$ de	CV
PVZ	35 $\pm$ 1	4	0,14 $\pm$ 0,04	31
UNI	35 $\pm$ 1	2	0,28 $\pm$ 0,03	10
SIM	31 $\pm$ 18	59	0,18 $\pm$ 0,14	75
BAN	37 $\pm$ 2	5	0,23 $\pm$ 0,17	72
VAL	42 $\pm$ 1	2	0,26 $\pm$ 0,05	18
JAR	45 $\pm$ 2	4	0,27 $\pm$ 0,06	22
COC	45 $\pm$ 3	6	0,33 $\pm$ 0,17	51
MER	42 $\pm$ 2	5	0,35 $\pm$ 0,07	19
JBUCV	50 $\pm$ 1	2	0,20 $\pm$ 0,09	46
Min determinado	3,666		0,015	
Max determinado	50,650		0,580	
Promedio para todas las muestras	40 $\pm$ 8		0,25 $\pm$ 0,11	

de: DESVIACIÓN ESTÁNDAR

CV: COEFICIENTE DE VARIACIÓN

Los coeficientes de variación calculados igualmente son mostrados en la tabla 5, y se encuentran en un rango entre 2-59% para C y 10-75% para S, asociados a la dispersión de los resultados encontrados para cada localidad. Podemos destacar que éstos son similares en magnitud a aquellos reportados por otros autores, como Zambrano *et al.* (2009) y Pinto (2013), quienes trabajaron con la misma especie determinando metales pesados. Estos autores resaltan que los altos porcentajes de variación se deben a que no todos los especímenes colectados pueden tener una misma concentración, ya que estos se encuentran expuestos a diferentes acontecimientos al azar durante su período de vida y exposición que el investigador no puede controlar por tratarse, en este caso, de un biomonitoreo pasivo, siendo aspectos importantes la madurez del espécimen y la altura a la cual es colectado. Podemos resaltar que siempre se presentará algún grado de variabilidad en los datos, como es de esperarse para muestras de origen natural (Wiseman y Wadleigh, 2002).

En la tabla 6 podemos observar que existen diferencias entre el contenido promedio de C y S determinado en la transecta bajo estudio y aquellos del punto usado como referencia. Estos valores y sus posibles explicaciones serán tratados y discutidos a detalle más adelante en los puntos siguientes.

Tabla 6. Comparación del concentración de C y S entre la transecta estudiada y el punto tomado como referencia (promedio y su desviación estándar).

Ubicación:	%Ct (promedio $\pm$ de)	%St (promedio $\pm$ de)
Punto de Referencia - JBUCV	50 $\pm$ 1	0,20 $\pm$ 0,09
Transecta bajo estudio	39 $\pm$ 8	0,26 $\pm$ 0,11

de: DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Con la finalidad de comparar de forma rápida y visual las diferentes concentraciones promedio por punto de muestreo, gráficos de cajas y bigotes fueron realizados para todas las estaciones, los cuales son mostrados a continuación junto a su descripción.

6.3.1. Porcentaje de Carbono total (%Ct) en las muestras

En la figura 25 se presenta un gráfico de cajas y bigotes, en el cual se expresa el %Ct promedio obtenido por cada estación estudiada con su desviación estándar.

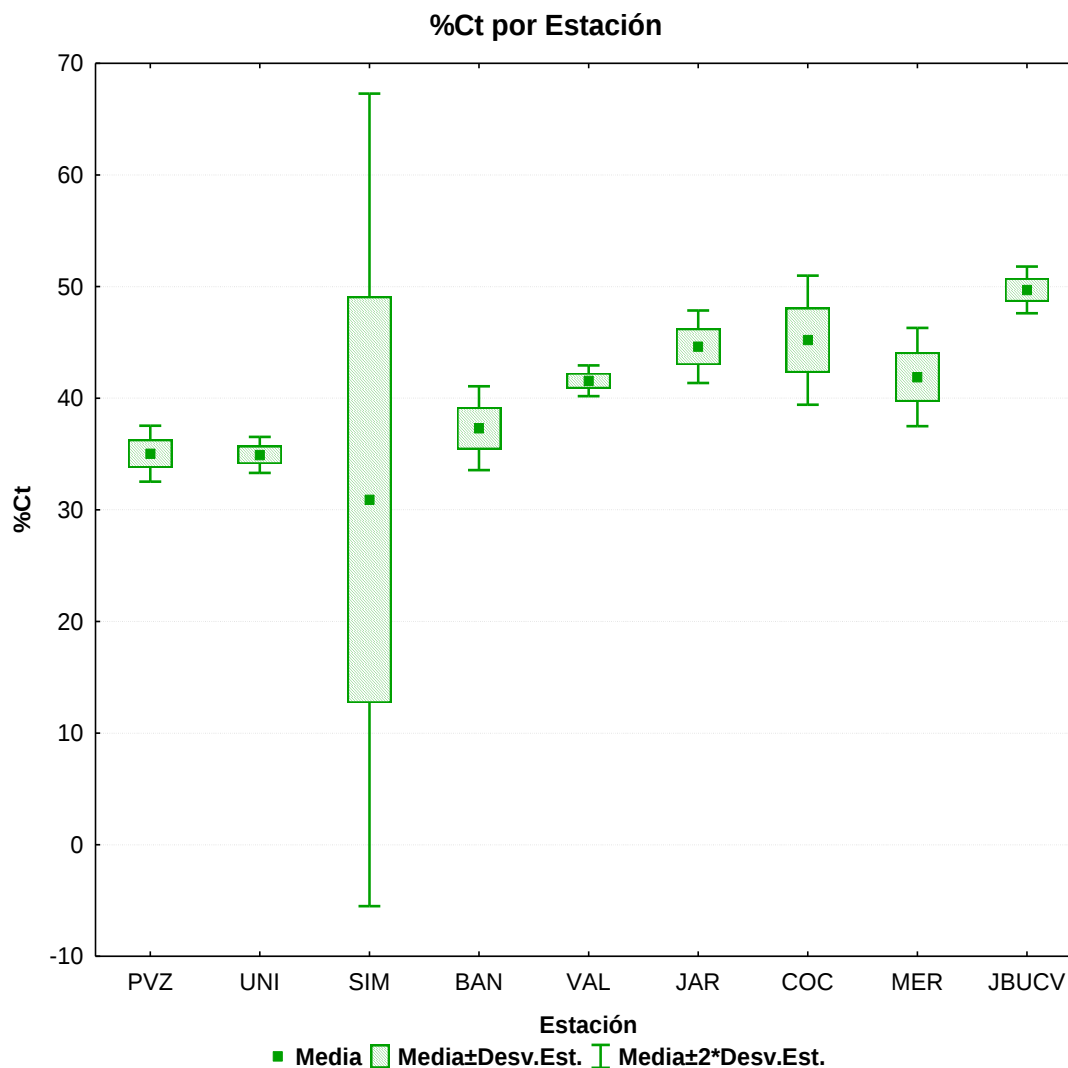


Figura 25. Gráfico de cajas y bigotes para %Ct promedio por estación.

Al observar la figura 25 podemos apreciar las concentraciones promedio para cada localidad bajo estudio, donde resalta de manera significativa el punto de referencia (JBUCV) como la localidad con la mayor concentración promedio de %Ct, a diferencia de los puntos de muestreo ubicados a lo largo de la transecta. Este comportamiento puede considerarse como el esperado (Vingiani *et al.*, 2004), debido a que el decrecimiento en el contenido del elemento carbono en las muestras pertenecientes a la transecta puede sugerir una menor acumulación de este elemento a través de procesos de absorción, junto con fenómenos oxidativos de los tejidos con liberación de CO₂, asociados a zonas urbanas o afectadas por el tráfico de vehículos de combustión interna, lo que podría verse sustentado por estudios previos para metales pesados en la misma transecta (Pinto, 2013).

A su vez, en la figura 25, apreciamos la variabilidad de los datos, por medio de los *bigotes*, para los valores obtenidos en todos los puntos de muestreo, notando que la mayoría de éstos se encuentran en un pequeño rango de dispersión, corroborando visualmente lo expuesto en la tabla 5. Resalta la estación Los Símbolos como aquella con mayor variabilidad; esto puede deberse a la muestra SIM03, que arrojó un valor de %Ct que podemos considerar anómalo (3,666), estando muy alejado del promedio obtenido para todas las muestras analizadas (40 ± 8), observado en la tabla 5.

La depositación seca de contaminantes orgánicos en ambientes urbanos, así como alto contenido de CO y CO₂ en el aire, han demostrado ser responsables de un incremento en el contenido de C en ciertas plantas y sus hojas; esto puede servir de explicación del por qué la diferencia entre los valores del punto de referencia y algunos puntos de la transecta como JAR y COC no es tan marcada, como también mencionan Vingiani *et al.* (2004), ya que elevados niveles de CO₂ tienen un efecto significativamente positivo en el crecimiento de las plantas, pero esto se ve disminuido si las mismas crecen bajo insuficiencia de Nitrógeno (Singh y Agrawal, 2015) o en condiciones de elevado pH (Kováčik *et al.*, 2011), lo que también ocurre en el caso de otras especies epífitas, como líquenes (Türk y Wirth, 1975).

La *T. recurvata* también es capaz de retener gran cantidad de partículas aerotransportadas en su estructura (por su forma), permitiendo el análisis de los materiales, tanto retenidos como captados, colectados a partir de la misma zona de muestreo (Smodiš *et al.*, 2004), factor que igualmente podría verse reflejado en los valores obtenidos, por lo que determinaciones de C orgánico e inorgánico deben ser llevadas a cabo para realizar distinciones claras, siempre teniendo en cuenta que el C es uno de los constituyentes principales de las plantas y su concentración no está relacionada directamente con la contaminación, sino indirectamente, asociada a su disponibilidad en el ambiente circundante, y es por esto que resaltamos que muy pocos estudios han sido realizados al respecto, referidos al contenido de C en los biomonitores (Vingiani *et al.*, 2004).

6.3.2. Porcentaje de Azufre total (%St) en las muestras

La figura 26 permite apreciar la concentración promedio de S en los diferentes puntos bajo estudio (expresada en porcentaje), donde observamos que el punto de referencia (JBUCV) es el tercero con la menor concentración, después de Plaza Venezuela (PVZ) y Los Símbolos (SIM), respectivamente. Así mismo muestra la variabilidad de los datos de %St obtenidos que, a diferencia de aquellos determinados para %Ct, presentan una mayor dispersión por punto de muestreo. Lo anterior puede explicarse si se tiene en cuenta la dispersión de compuestos de S en el entorno de cada muestra, variando significativamente en cortas distancias y siendo reflejado por la concentración del elemento en el espécimen muestreado (Wadleigh y Blake, 1999; Wiseman y Wadleigh, 2002), pudiendo ser éste el caso para la *T. recurvata*.

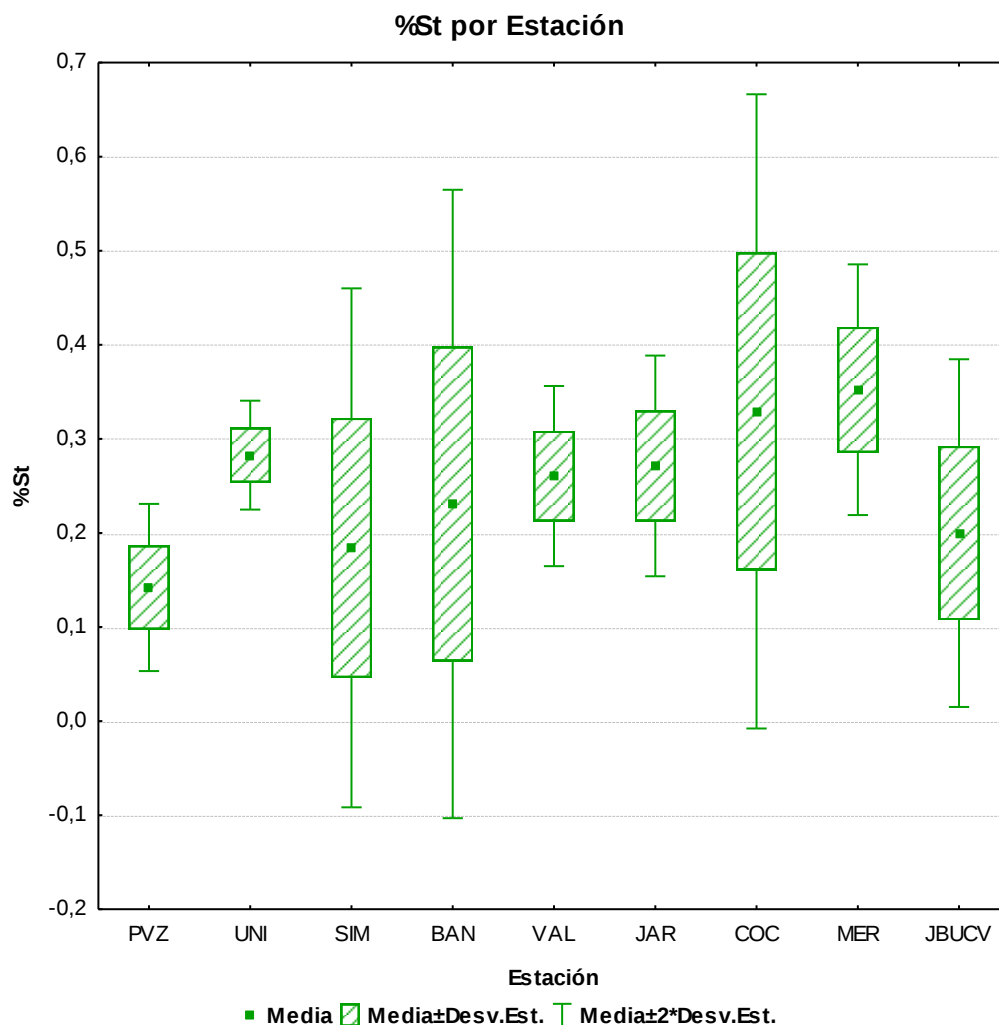


Figura 26. Gráfico de cajas y bigotes para %St promedio por estación.

Esto puede deberse a que, en general, la especie *Tillandsia* spp. es una efectiva acumuladora de S, demostrando cierto grado de tolerancia en ambientes con altas concentraciones de este elemento, en comparación a otros biomonitores comúnmente utilizados, como musgos y líquenes, en concordancia con lo concluido por Benzing *et al.* (1992), lo que le permite mostrar efectivamente variaciones de S, desde lugares considerados poco contaminados, pudiendo ser el caso de JBUCV, hasta lugares con concentraciones muy elevadas y resaltantes, como puede ser el caso de la estación Mercado (MER).

Vingiani *et al.* (2004) señalan que la quema de combustibles fósiles con contenido de S, así como ciertos procesos industriales que incluyen este elemento, ya sea en compuestos o como impurezas, representan las principales fuentes antrópicas del SO₂ presente en la atmósfera en forma gaseosa, permitiendo de esta forma su disponibilidad para plantas epífitas como la *T. recurvata*. De igual forma Mallik *et al.* (2014) resaltan que el contenido de SO₂ en la atmósfera es más propenso a ser impactado por fuentes antropogénicas regionales (industrias, refinerías) que por emisiones locales (transporte, vivienda). Bajo el mismo orden de ideas, para la fecha de recolección de los especímenes usados en el presente estudio se encontraban en construcción una serie de edificaciones en toda la región capital, donde las industrias del acero y el cemento proporcionan un importante aporte de compuestos de S a la atmósfera, relacionadas directamente a dicha manufactura (Cerón *et al.*, 2012; Mallik *et al.*, 2014), como el mineral yeso (sulfato de calcio hidratado – CaSO₄•2H₂O).

Wiseman y Wadleigh (2002) resaltan que, aunque el contenido de S es uno de los principales indicadores de contaminación atmosférica, existen las fuentes tanto naturales como antrópicas, y no es posible distinguir una de la otra basándose simplemente en medidas de concentración total y, ya que en áreas costeras el agua de mar representa una importante fuente de S, para toda la región norte de Venezuela, y en particular para la región capital, una posible fuente natural de S se encuentra en el aerosol marino, proveniente del Mar Caribe, el cual se encuentra situado a tan sólo 15Km de la ciudad de Caracas (MARN-PDVSA, 2005). A su vez, Wadleigh y Blake (1999), señalan la necesidad de distinguir entre las fuentes locales y antrópicas de aquellas naturales usando el contenido de isotópico S en biomonitores.

Sin embargo, las mayores concentraciones de S encontradas en algunas localidades, como Ciudad Universitaria (UNI), Coche (COC) y Mercado (MER), pueden estar relacionadas a altas concentraciones de compuestos con éste elemento en el entorno inmediato del biomonitor, en comparación al resto de las estaciones. Esto ha sido demostrado por otros autores que, por medio de estudios de biomonitoreo activo y/o ensayos de laboratorio, han comprobado que existe una relación entre el contenido de azufre en el biomonitor y: (a) la concentración de compuestos de S en el entorno, (b) la cercanía a las fuentes de emisión de combustibles fósiles, y (c) el tiempo de exposición del biomonitor (Wannaz y Pignata, 2006).

Las dos estaciones con los valores determinados más altos (COC y MER) se encuentran además en la zona de la transecta con la mayor cantidad de talleres y estaciones de servicio, como se puede apreciar en la figura 12, lo que en concordancia con lo anteriormente expuesto puede verse reflejado en los valores obtenidos en esas localidades.

En general, las concentraciones elevadas de S obtenidas en algunas estaciones pueden explicarse teniendo en cuenta que éste elemento es, en cierta medida, un micronutriente para toda vegetación, y alrededor del 90% del mismo en las plantas se encuentra asociado a los aminoácidos de S (cisteína y metionina), mostrando incremento en su concentración ante condiciones ácidas. Esto se debe a que las plantas epífitas toman y transforman el S inorgánico de su atmósfera circundante a S orgánico, llevando a cabo un proceso llamado sulfato reducción asimiladora, acumulando este elemento principalmente en sus tejidos, y no sólo en su superficie, lo cual es particularmente de importancia durante un biomonitoreo pasivo, donde se debe destacar que la concentración elemental puede depender de la edad del biomonitor y el tiempo de exposición (Tuthill *et al.*, 1982; Pyatt *et al.*, 1999; Wadleigh y Blake, 1999; Wiseman y Wadleigh, 2002; Wannaz y Pignata, 2006; Kováčik *et al.*, 2011).



Los valores de concentración de C y S, observados en estaciones como UNI y MER, pueden ser explicadas si tenemos en cuenta que los efectos dañinos asociados a los compuestos de S están relacionados a la generación de protones, la generación de sulfitos a sulfatos y la formación de radicales libres; lo que ocurre particularmente en interacción con el agua debido a los productos resultantes (H_2SO_3 , HSO_3^- , SO_3^{2-} y $\text{S}_2\text{O}_5^{2-}$, entre otros), que tienen la capacidad de disminuir el pH restringiendo notablemente la fotosíntesis, en conjunto con la reducción y destrucción de la clorofila, mostrando así bajas concentraciones de C y altas de S (Türk y Wirth, 1975; Batič, 2002; Kováčik *et al.*, 2011). Canepari *et al.* (2014) reportan que la fracción fina del material particulado en la atmósfera urbana está principalmente asociado a procesos de combustión antrópicos, conteniendo especies más solubles y por lo tanto más accesibles a los sistemas biológicos. Los autores también concluyeron que el S se encuentra casi en su totalidad en esta fracción, formando sulfatos solubles.

Sin embargo, es importante resaltar que los compuestos de S no son necesariamente la única causa en el daño y deterioro de los especímenes biológicos estudiados, y es difícil distinguir sus efectos de aquellos causados por otros compuestos contaminantes o dañinos en ambientes naturales, como los compuestos de Nitrógeno, el Ozono (O_3), u otros contaminantes atmosféricos (Türk y Wirth, 1975; Batič, 2002; Kováčik *et al.*, 2011).

6.4. Distribución promedio de los elementos Carbono y Azufre en la transecta bajo estudio

En la figura 27 se distingue, en general, un aumento progresivo en la concentración promedio del %Ct determinado para cada estación, siguiendo la dirección de la línea tres del Metro de Caracas, desde la estación Plaza Venezuela (PVZ) hasta la estación Mercado (MER), lo que podría indicar una correlación entre la dirección que sigue la transecta en ese sentido y la distribución del elemento. Así mismo, en la figura 28 podemos observar que, de forma similar a %Ct, la concentración de %St en general aumenta a través de la transecta, desde la estación PVZ, con el promedio más bajo, hasta la estación MER, con el promedio más elevado, indicando una buena correlación de %St por estación.

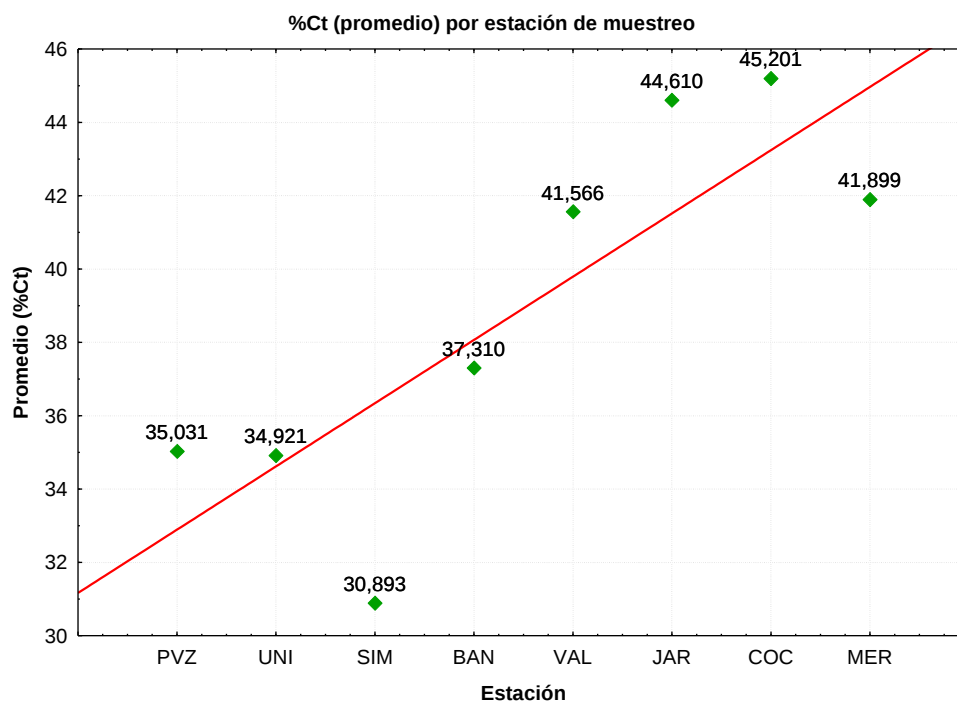


Figura 27. %Ct promedio por cada estación de muestreo.

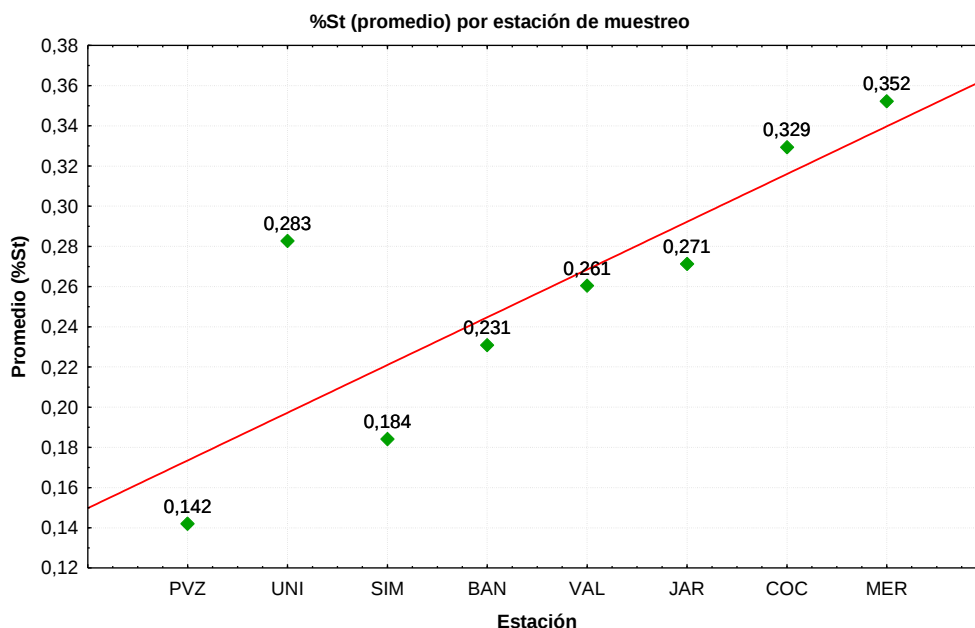


Figura 28. %St promedio por cada estación de muestreo.

La distribución de ambos elementos y su correlación positiva con la dirección PVZ-MER puede deberse a las condiciones meteorológicas (dirección del viento, figura 13) y el efecto de los edificios y construcciones sobre el movimiento de las masas de aire a lo largo de las calles, lo que afecta la distribución y concentración de los contaminantes, como señala Perdomo de Ponce (2009). De igual forma, podemos destacar la geomorfología del lugar y su relieve (figura 29) que, junto a la distribución de edificaciones (empaquetamiento), puede condicionar la “respirabilidad” de la zona bajo estudio, como señalan recientes investigaciones al respecto, lo que a su vez determina la forma como los contaminantes son dispersados, removidos, diluidos y/o recirculados (Buccolieri *et al.*, 2010; Pesic *et al.*, 2014).

En particular, el alto valor observado en UNI para %St (figura 28) podemos atribuirlo, como ya se mencionó, a las diferentes construcciones y edificaciones que se desarrollaban en la zona y pueden relacionarse a la emisión de algunos compuestos de S, como el mineral yeso, lo que puede verse reflejado en el contenido de este elemento en el biomonitor.

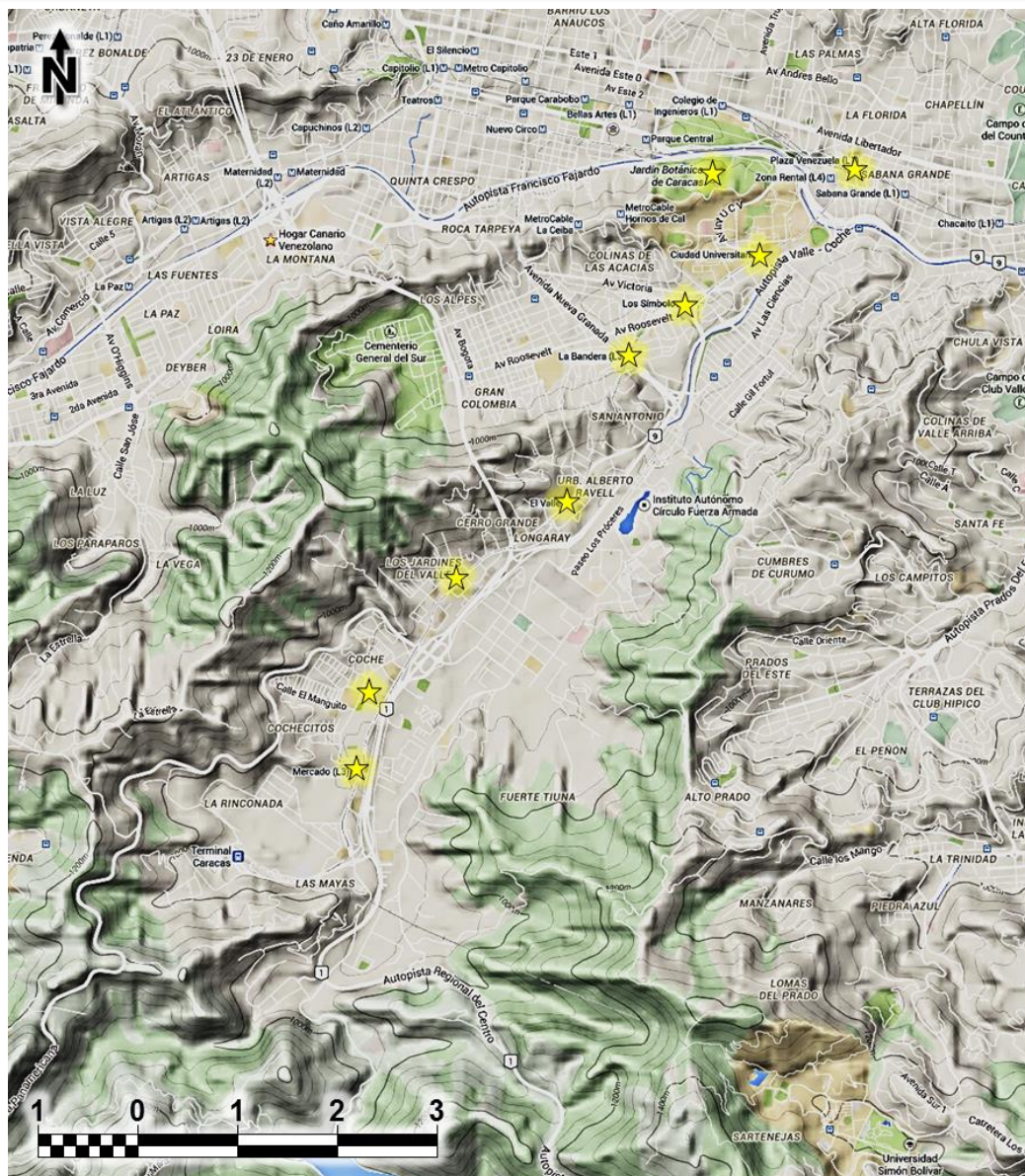


Figura 29. Geomorfología de la zona de interés, señalando además los puntos de muestreo.

Como se mencionó con anterioridad, la distribución de las fuentes contaminantes, fijas y móviles a lo largo de la zona estudiada (ver figura 12) puede condicionar la concentración de los compuestos considerados nocivos, como señala Pinto (2013), en un estudio previo sobre metales pesados, mediante el uso de *T. recurvata* como biomonitor pasivo, realizado en la transecta de interés.

La figura 30 muestra, de forma ilustrativa, la distribución de las concentraciones promedio determinadas para C y S con su ubicación en cada punto de la transecta bajo estudio, representando con círculos de diferentes colores y tamaños los elementos analizados y su concentración, respectivamente.

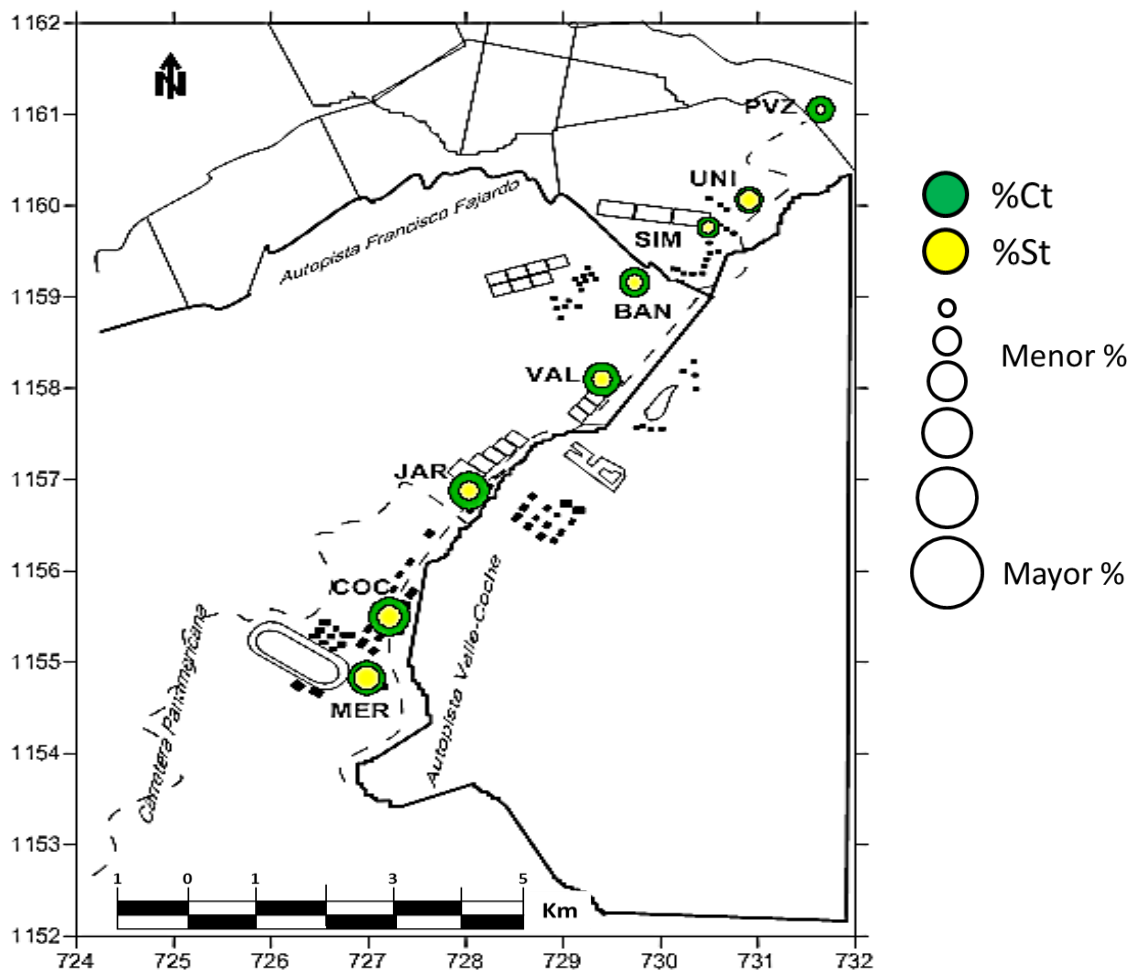


Figura 30. Mapa representativo de la transecta bajo estudio, mostrando las concentraciones promedio determinadas (modificado a partir de Pinto, 2013).

6.5. Análisis estadísticos de los resultados obtenidos

Para un adecuado manejo de los resultados obtenidos, se requiere el uso de ciertas herramientas estadísticas. Éstas, con sus resultados e interpretaciones, se describen a continuación.

6.5.1. Test para comprobar la homogeneidad de los datos obtenidos

La prueba a priori de Brown-Forsythe fue empleada para verificar la homogeneidad de los datos obtenidos. El nivel de significancia (p) establecido para tal fin fue 0,05, planteando las siguientes hipótesis:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_n$	$\alpha = 0,05$	Acepto sí la $p > 0,05$
H_1 : Al menos uno es diferente		Acepto sí la $p < 0,05$

Basados en lo anterior, un nivel de significancia mayor a 0,05 ($p > 0,05$) indica que debemos aceptar la hipótesis nula (H_0), y por lo tanto los datos no presentan dispersión de homogeneidad y análisis de varianza (ANOVA) paramétricos pueden ser utilizados posteriormente. Por el contrario, un valor de $p < 0,05$ indica que debemos aceptar la hipótesis alternativa (H_1), rechazando la H_0 , indicando que los datos no son homogéneos y deben emplearse análisis de varianza no paramétricos.

En la tabla 7 son presentados los resultados de la prueba estadística realizada. Para ambos elementos analizados, tenemos un resultado de $p > 0,05$, lo que significa que podemos aceptar la H_0 y aplicar ANOVA de una vía a los valores de concentración obtenidos, argumentando que los datos presentan una distribución normal respecto a la tendencia lineal determinada por la prueba (ver apéndice I).

Tabla 7. Resultados de la prueba estadística de Brown-Forsythe para el análisis de la homogeneidad de varianza de los resultados obtenidos de %Ct y %St.

	F	p
%Ct	1,0450	0,4284
%St	1,4180	0,2340

6.5.2. Análisis de varianza (ANOVA) de los datos obtenidos

La prueba estadística ANOVA de un factor fue realizada con el propósito de establecer relaciones entre los promedios de las concentraciones de los elementos analizados respecto a cada punto de muestreo. El nivel de significancia (p) establecido para esto fue de 0,05, planteando así las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_n \quad \alpha = 0,05 \quad \text{Acepto si la } p > 0,05$$

$$H_1: \text{Al menos una es diferente} \quad \text{Acepto si la } p < 0,05$$

Según lo establecido, y de manera similar a la prueba estadística anterior, un resultado de $p > 0,05$ indica que debemos aceptar H_0 , argumentando que no existe diferencia significativa entre los valores promedio; de forma contraria, un valor menor a 0,05 indica que debemos aceptar H_1 e indicando de esa manera que si existen diferencias significativas entre los valores promedio.

A continuación son presentados los resultados de esta prueba estadística para los elementos analizados:

6.5.2.1. Carbono total (%Ct)

Como podemos observar en la tabla 8, el valor de p es menor a 0,05 ($p < 0,05$), lo que indica que al menos uno de los puntos de muestreo posee una concentración significativamente diferente al resto. Así mismo, observando los resultados obtenidos a través de la prueba de Duncan (apéndice J) podemos establecer que existe al menos dos grupos diferenciados entre sí; un primer grupo abarcando las estaciones de la línea tres del metro de Caracas, desde PVZ hasta BAN, y un segundo grupo a partir de la estación El Valle (VAL) hasta MER, siendo este último estadísticamente similar a los valores de %Ct encontrados en JBUCV.

Tabla 8. Resultados del análisis de varianza para %Ct.

	Grados de Libertad	Sumatoria de Cuadrados	Cuadrado medio	F	p
Intercepto	1	57963,84	57963,84	1471,889	0,000000
Muestra	8	1156,23	144,53	3,67	0,005139
Total	35	2219,51			

Igualmente, al observar la figura 31, vemos un aumento general progresivo de la concentración de este elemento desde PVZ hasta MER, siguiendo de esta forma la trayectoria de la línea tres del Metro de Caracas, siguiendo en concordancia con lo propuesto anteriormente para la figura 27.

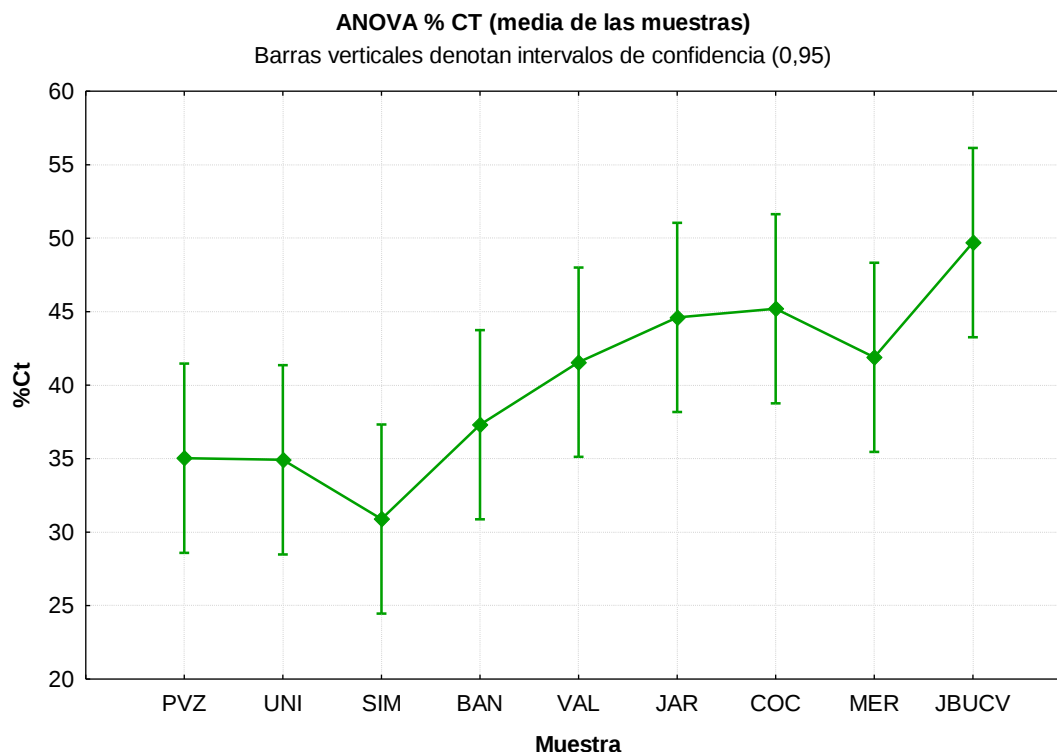


Figura 31. Gráfico de análisis de varianza para %Ct.

6.5.2.2. Azufre total (%St)

La tabla 9 muestra que el valor de $p < 0.05$, por lo que se rechaza la H_0 y existen medidas estadísticamente distintas para %St, al igual que para %Ct. Al detallar la prueba de Duncan (ver apéndice J) observamos que los puntos de las estaciones desde PVZ a JAR son estadísticamente similares a las concentraciones de Azufre en las muestras de Jardín Botánico, por lo que podemos argumentar que la concentración de este elemento puede ser no significativa en estos lugares. Por otro lado, las estaciones de COC y MER poseen las mayores concentraciones de este elemento, siendo estadísticamente diferentes al resto.

Como podemos observar en la figura 32, en relación a lo expuesto para tabla 9, las concentraciones de este elemento aumentan de forma general desde PVZ hacia MER, siguiendo de esta forma el trayecto de la línea tres del Metro de Caracas, al igual que para el caso del %Ct y en concordancia a lo explicado anteriormente para figura 28.

Tabla 9 Resultados del análisis de varianza para %St.

	Grados de Libertad	Sumatoria de Cuadrados	Cuadrado medio	F	p
Intercepto	1	2,255754	2,255754	209,6074	0,000000
Muestra	8	0,148956	0,018619	1,7301	0,136737
Total	35	0,439524			

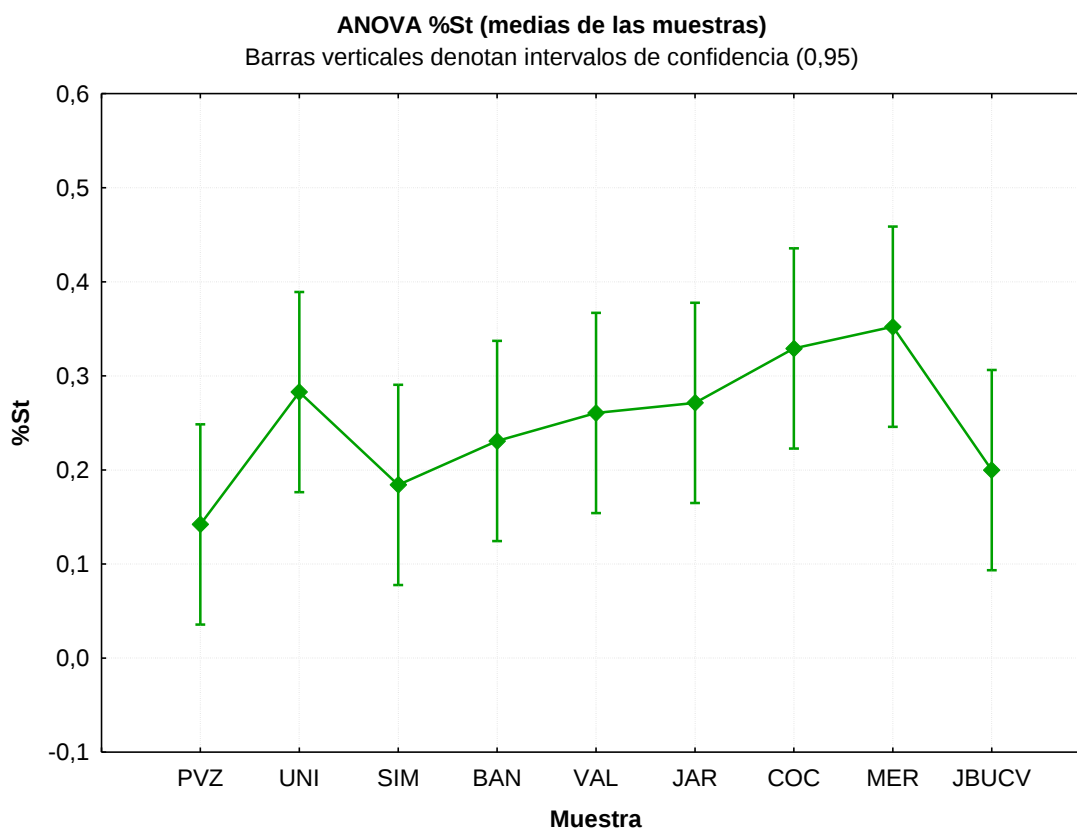


Figura 32. Gráfico de análisis de varianza para %St.

A continuación se hará una breve descripción del comportamiento y relación entre las concentraciones de C y S por punto de muestreo.

6.6. Correlaciones entre los valores obtenidos de %Ct y %St.

En general, existe una tendencia negativa entre la concentración de C y S, mientras aumenta la concentración de C disminuye la concentración de S (apéndice K). Sin embargo, la relación entre el contenido de ambos elementos no es directa o proporcional para todos los casos, como indica el cálculo de r^2 , donde la mayoría presenta valores entre 0 y 0,5 (apéndice K).

Para la transecta bajo estudio, sólo COC, MER y JAR muestran una buena correlación entre ambos elementos, presentando valores de r^2 de 0,999; 0,824 y 0,704 respectivamente (ver figuras 33, 34 y 35), indicando una posible interdependencia directa entre el par de variables.

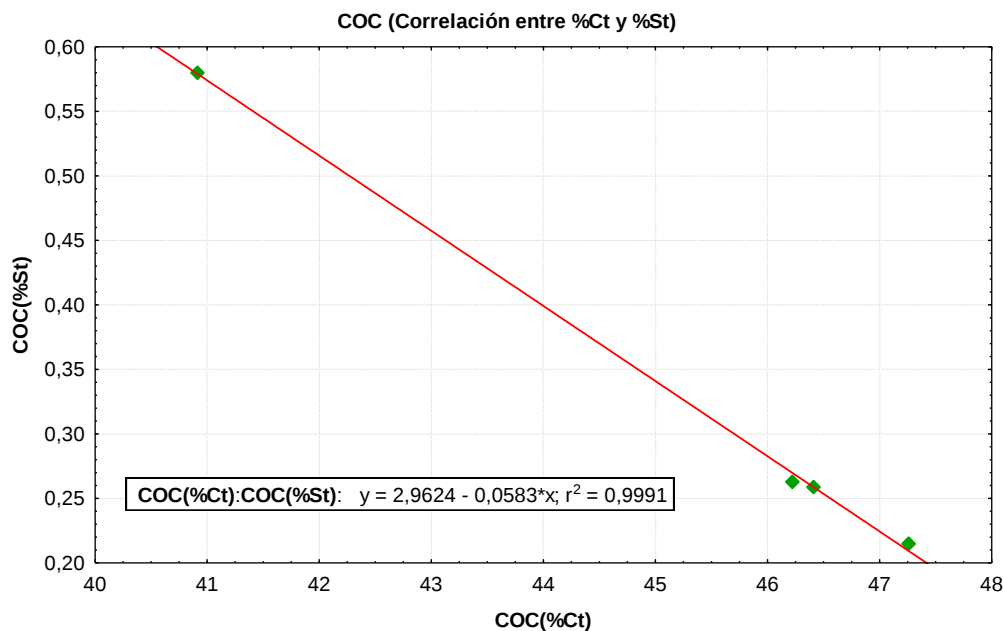


Figura 33. Gráfica de correlación entre C y S determinado para las muestras de la estación COC.

Particularmente, dos de los puntos anteriores, COC y MER (ver figuras 33 y 34, respectivamente) muestran la tendencia general observada en la transecta entre C y S, con un valor elevado y muy cercano a 1 para r^2 , apoyando de esta forma lo antes expuesto, donde un incremento en el contenido de S puede condicionar el proceso de fotosíntesis del biomonitor, provocando una menor producción de clorofila, y una disminución en su contenido de C (Türk y Wirth, 1975). Esto podría aplicar en menor medida al resto de los puntos estudiados.

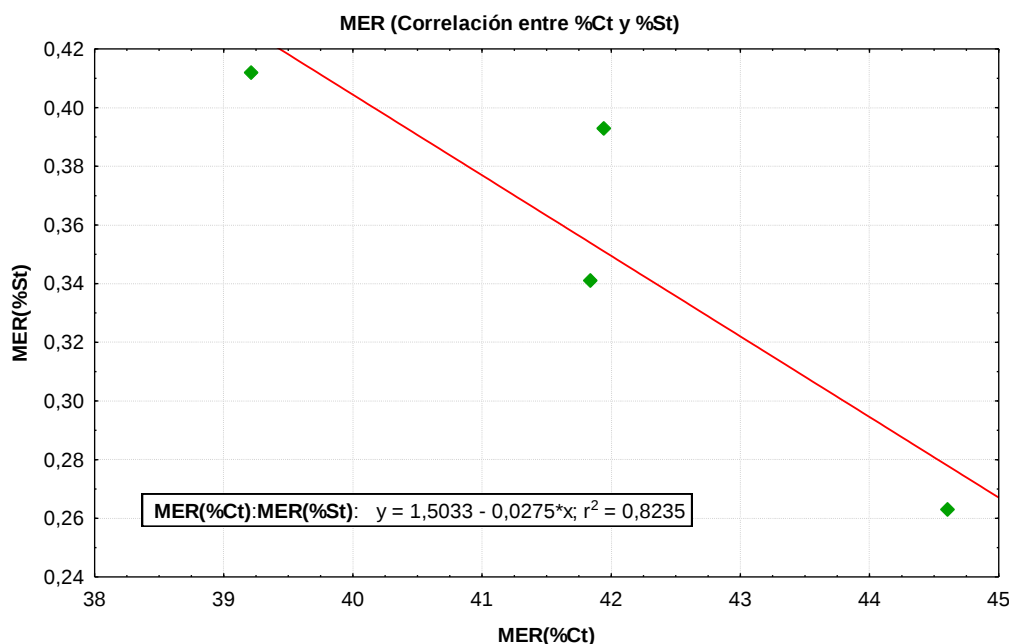


Figura 34. Gráfica de correlación entre C y S determinado para las muestras de la estación MER.

En contraste, la estación de JAR muestra una tendencia opuesta al resto de las estaciones, con una correlación positiva, donde al aumentar el porcentaje de C también aumenta el porcentaje de S (figura 35). Como ya se mencionó con anterioridad, diversos autores señalan la capacidad de la *T. recurvata* de recolectar material atrapado en su superficie, debido a su forma (Smodiš *et al.*, 2004; Vingiani *et al.*, 2004), pudiendo de esta forma explicar el comportamiento observado en la gráfica, ya que, como señala Pinto (2013), parte del material removido por el tráfico vehicular en las cercanías a los especímenes, es captado por éstos, arrojando resultados que reflejan ambos materiales colectados por el biomonitor por lo que determinaciones entre C_{org} y C_{inorg} son necesarias.

También resaltamos estudios que demuestran que bajo condiciones de exceso de CO₂, la cantidad de N bio-disponible es importante para maximizar la asimilación de C y el crecimiento de las plantas (Singh y Agrawal, 2015) y, como algunos estudios sugieren una fuerte correlación entre S y N provenientes de emisiones antrópicas por la quema de combustibles fósiles, es posible que las concentraciones de C y S en los especímenes colectados en este punto se encuentren influenciadas enormemente por dichas emisiones, ya que en las cercanías inmediatas a esta estación se encuentran estaciones de servicio y talleres, como podemos ver de forma ilustrativa en la figura 12, por lo que determinaciones y correlaciones de N deben llevarse a cabo.

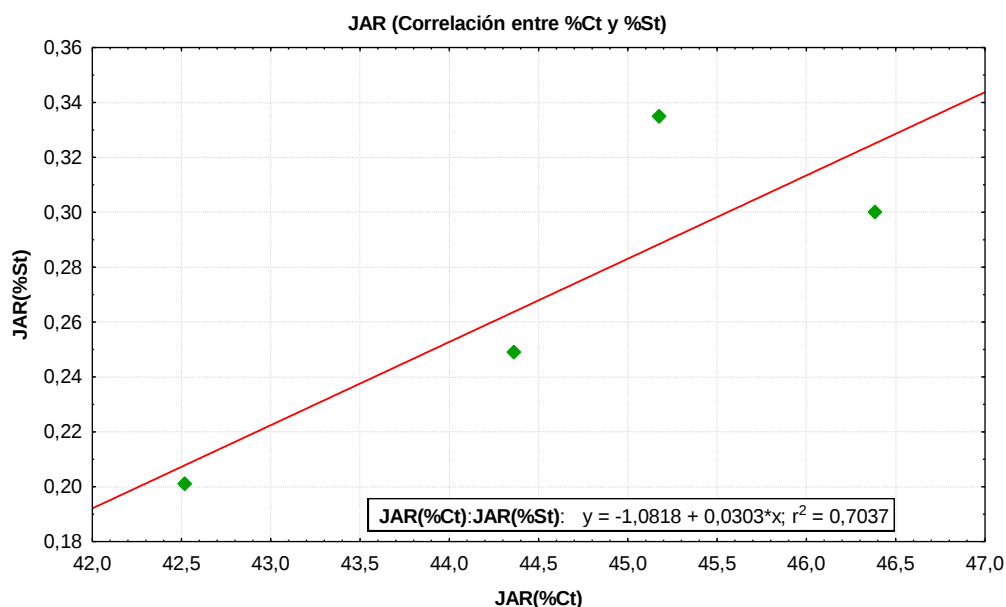


Figura 35. Gráfica de correlación entre C y S determinado para las muestras de la Estación JAR.

Diversos estudios apoyan lo anterior. LeGalley y Krekeler (2013), determinaron la concentración de diferentes elementos, principalmente metales pesados, en material y polvo colectado en lugares cercanos a las calles (aceras). Los autores determinaron el contenido de Ct por métodos estándar de combustión, encontrando además correlaciones positivas entre éste valor y el encontrado para metales, como Cu y Ni, y corroborando la asociación de metales pesados con partículas de grano fino y a materia orgánica total, proponiendo como fuentes actividades antrópicas derivadas de la quema de combustibles.

Pinto (2013) relacionó las altas concentraciones encontradas de Zn, Cu, Ni y Cr, en los mismos puntos de la transecta actual bajo estudio, con emisiones en condiciones de altas temperaturas, referidas a actividades antrópicas, siendo característicos de emisiones vehiculares por procesos de combustión de aceites de motor, que además contienen diferentes compuestos orgánicos provenientes del petróleo; entre ellos hidrocarburos alifáticos, aditivos anticorrosivos (sulfonatos de metales pesados) y alquilo-ditiofosfatos de Zn, lo que permite explicar a su vez las altas concentraciones de S en el presente estudio.

Por su parte, en la estación JBUCV pudo observarse una buena correlación entre ambos analitos ($r^2 \approx 0.7$), siguiendo la tendencia general negativa de la transecta (figura 36), en concordancia con lo descrito para el resto de los puntos, exceptuando JAR.

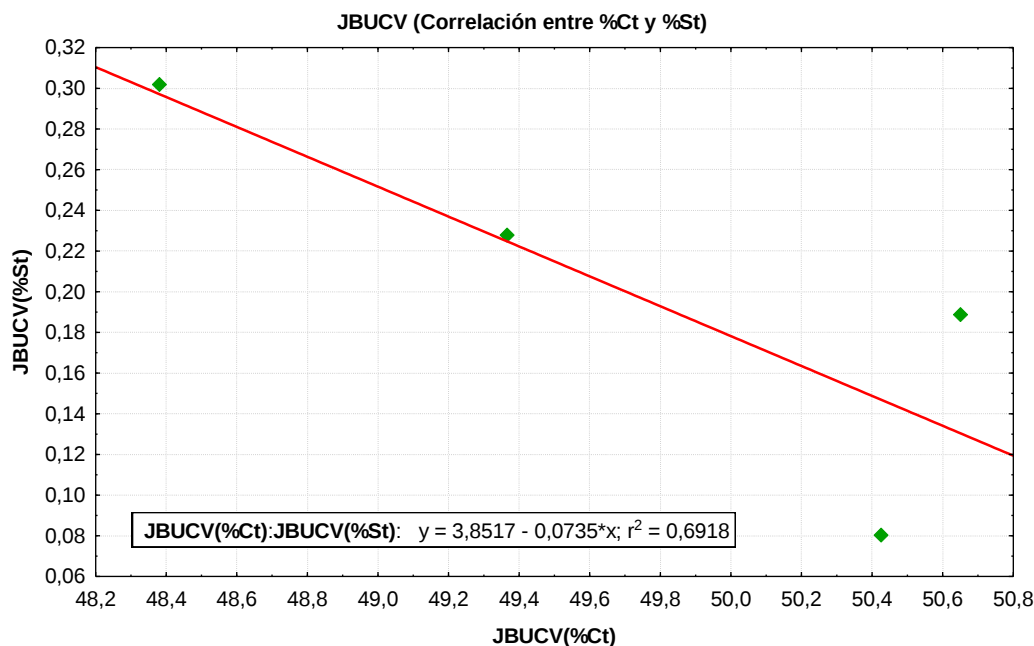


Figura 36. Gráfica de correlación entre C y S determinados para las muestras de la ubicación JBUCV.

6.7. Comparación de los resultados obtenidos con trabajos anteriores.

Al realizar la comparación de los valores obtenidos con aquellos reportados por Vingiani *et al.* (2004) para musgos y líquenes durante un biomonitoreo activo en una zona urbana, observamos que los mismos se encuentran dentro del rango esperado para muestras biológicas de este tipo, a pesar de tratarse de especies diferentes, como puede apreciarse en la tabla 10.

Tabla 10. Comparación entre el contenido de C y S determinado en el presente estudio y los reportados por Vingiani *et al.* (2004).

	Especie	Observación	%Ct (promedio)	%St (promedio)
Adamo et al. (2004)	<i>S. capillifolium</i>	(Originales - no expuestas)	43,080	0,261
		(10 semanas de exposición)	40,400	0,368
		(17 semanas de exposición)	38,230	0,305
	<i>P. furfuracea</i>	(Originales - no expuestas)	44,170	0,225
		(10 semanas de exposición)	43,780	0,282
		(17 semanas de exposición)	42,870	0,316
Presente estudio	<i>T. recurvata</i>	(Punto de Control - JBUCV)	49,705	0,200
		(Transecta bajo estudio)	38,929	0,257

De los datos mostrados en la tabla 10, podemos resaltar que los valores de C considerados como referencia son superiores a aquellos referentes a la zona bajo estudio, mientras que para S, la zona de referencia posee los menores valores. Ambos valores evidencian diferencias claras entre el punto tomado como referencia y aquellos referentes a la transecta o zona bajo estudio, sirviendo como valores base para los elementos estudiados y permitiendo su uso como punto de comparación. Esto evidencia que, a pesar de tratarse de un biomonitoreo pasivo, los valores arrojados por JBUCV pueden ser aceptados como una referencia, comparable a los valores obtenidos a partir de muestras desarrolladas fuera de la zona de estudio y bajo ciertos estándares, como ocurre en el caso del biomonitoreo activo, llevado a cabo por Vingiani *et al.* (2004).

Podemos resaltar que los valores promedio de %St determinados en el presente estudio para *T. recurvata*, tanto para la transecta como para JBUCV, son menores que aquellos reportados por Vingiani *et al.* (2004), como logramos detallar en la tabla 11, donde se presentan los valores de las muestras tomadas como referencia con su desviación estándar, lo que refleja que el contenido mineral es función de la naturaleza del sustrato, el ecosistema en el cual el organismo existe y se desarrolla, el mecanismo de captación y liberación de elementos, y el tipo de biomonitoreo implementado que, entre otros factores, condicionan el resultado obtenido (Tuthill *et al.*, 1982; Smodiš *et al.*, 2004).

Tabla 11. Comparación entre el contenido de S determinado en el presente estudio y aquellos reportados por (Vingiani *et al.*, 2004).

	Especie	%St Promedio $\pm$ de
Adamo et al. (2004)	<i>S. capillifolium</i>	0,261 $\pm$ 0,001
	<i>P. furfuracea</i>	0,225 $\pm$ 0,003
Presente estudio	<i>T. recurvata</i>	0,200 $\pm$ 0,092

de: desviación estándar

Por su parte Pinto (2013), en un estudio no publicado, determinó el %Ct en una muestra de *T. recurvata* proveniente del Parque Nacional Waraira Repano (El Ávila), en una zona que pudiera considerarse poco afectada por la actividad antrópica (cercanías de la Quebrada Quintero), obteniendo un valor de 49,236%, valor muy similar al reportado para nuestro punto de referencia en el presente trabajo, lo que una vez más justifica el uso de la zona boscosa del Jardín Botánico de Caracas como referencia para este y futuros estudios.

Por último se presentan los resultados de los análisis de agrupamientos realizados para observar de forma visual e ilustrativa, el comportamiento de las muestras y posibles asociaciones entre ellas.

6.8. Análisis de agrupamiento (Clúster).

El análisis de clúster de los puntos de muestreo (figura 37), permite observar de forma individual como se agrupan las estaciones de acuerdo a los resultados de %Ct y %St obtenidos. Lo primero que resalta es un importante agrupamiento entre las muestras pertenecientes a JBUCV, lo que puede consolidar su uso como un lugar de referencia frente al resto de los datos de una manera visible, al mostrar poca variabilidad estadística. También tenemos un buen agrupamiento dentro de los puntos de las estaciones Plaza Venezuela, Ciudad Universitaria y Coche, reafirmando la baja variabilidad de los datos obtenidos a partir de estas muestras, en comparación al resto de las estaciones, demostrando que las afirmaciones acerca de estas estaciones pueden explicar de forma adecuada el comportamiento de la población en esas localidades.

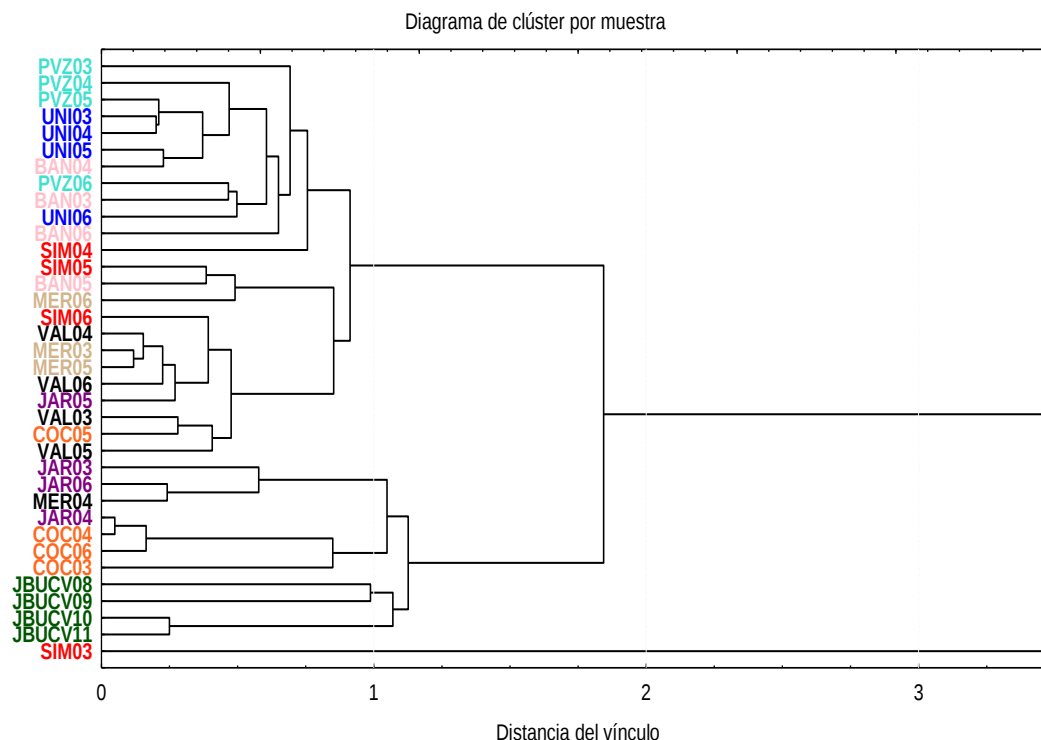


Figura 37. Análisis de clúster por punto de muestreo.

Así mismo, la estación Los Símbolos refleja claramente en la figura 37 la alta variabilidad de sus datos, demostrando visualmente a través de este análisis que el punto identificado como SIM03 arrojó un dato de %Ct que podemos considerar anómalo o fuera de lo esperado, como demuestran el resto de las muestras y los valores obtenidos a partir de éstas, en concordancia a los explicado con anterioridad para esta muestra, encontrándose completamente desligada al resto de los valores obtenidos.

Por su parte, la figura 38 muestra el análisis de clúster en promedio por estación de muestreo, ayudando a visualizar aún mejor los diferentes grupos formados, identificando así cuatro principales. El primero conformado por las estaciones Plaza Venezuela, Ciudad Universitaria y La Bandera, apoyando lo propuesto a través de la prueba de Duncan y ANOVA con anterioridad. Luego tenemos dos sub-grupos, El Valle-Mercado y Jardines-Coche, ambos conformando el segundo agrupamiento, e igualmente apoyando lo propuesto por medio de las pruebas estadísticas anteriores.

De igual forma, El Jardín Botánico y la estación Los Símbolos finalmente pertenecen a los grupos 3 y 4 respectivamente. Éste tercer grupo observado en la figura 38, conformado únicamente por el Jardín Botánico de Caracas, nuevamente hace hincapié en su posible uso como un lugar apropiado para ser utilizado como un punto de referencia, con niveles de C y S que podemos considerar naturales o poco afectados, estadísticamente diferente a los puntos de la transecta. Por último, la estación Los Símbolos igualmente evidencia que es estadística y significativamente diferente al resto de los puntos de muestreo, al conformar el grupo 4, mostrando un posible mayor grado de afectación, o una perturbación diferente, en relación al resto de las estaciones, como lo podría demostrar el valor determinado en la muestra SIM03.

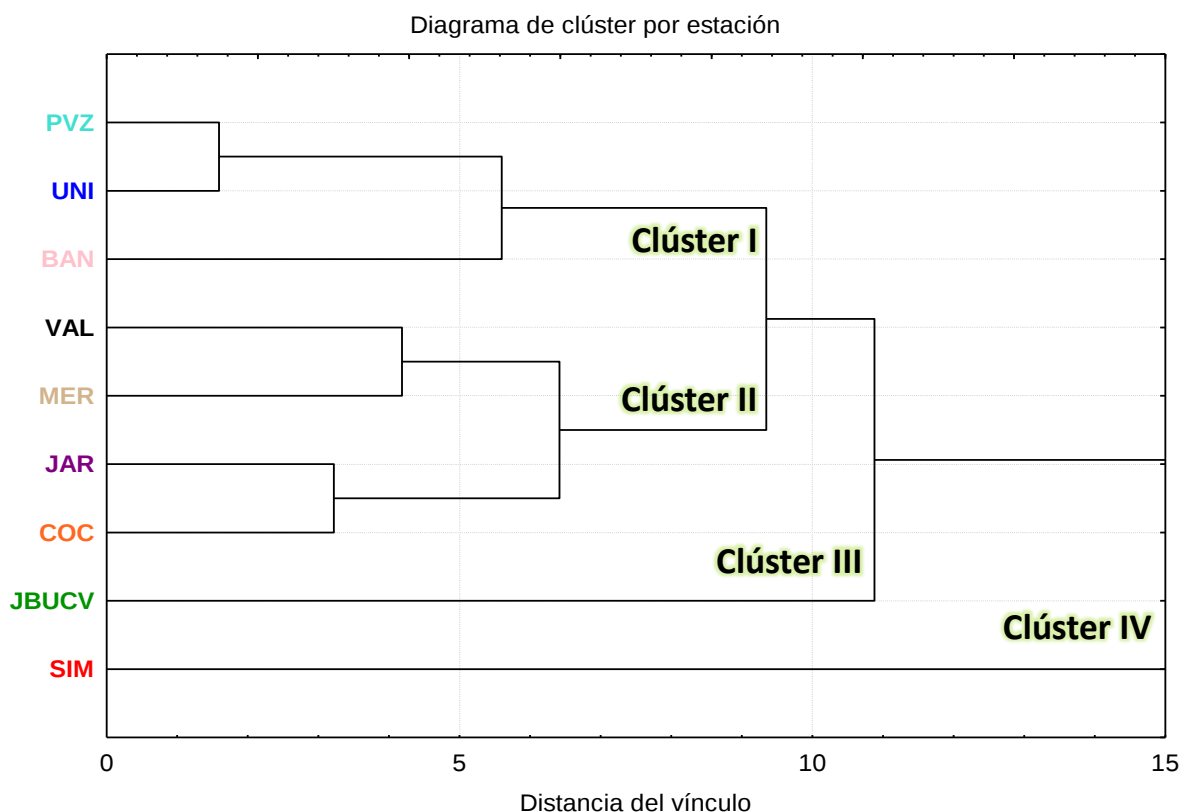


Figura 38. Análisis de clúster por estación o zona de muestreo

Finalmente, en la figura 39 podemos apreciar la correlación existente entre todos los valores de C y S reportados por estación, mostrando la tendencia observada mediante el análisis de clúster, donde visualizamos los diferentes grupos y subgrupos formados. De esto podemos destacar que existe una influencia similar, aunque no directa, sobre ambos elementos y sus concentraciones en las diferentes estaciones agrupadas, que puede corroborar lo antes expuesto acerca de las actividades y emisiones antrópicas, principalmente vehiculares, así como la dirección de los vientos y su predominio sobre la distribución de los gases y/o contaminantes.

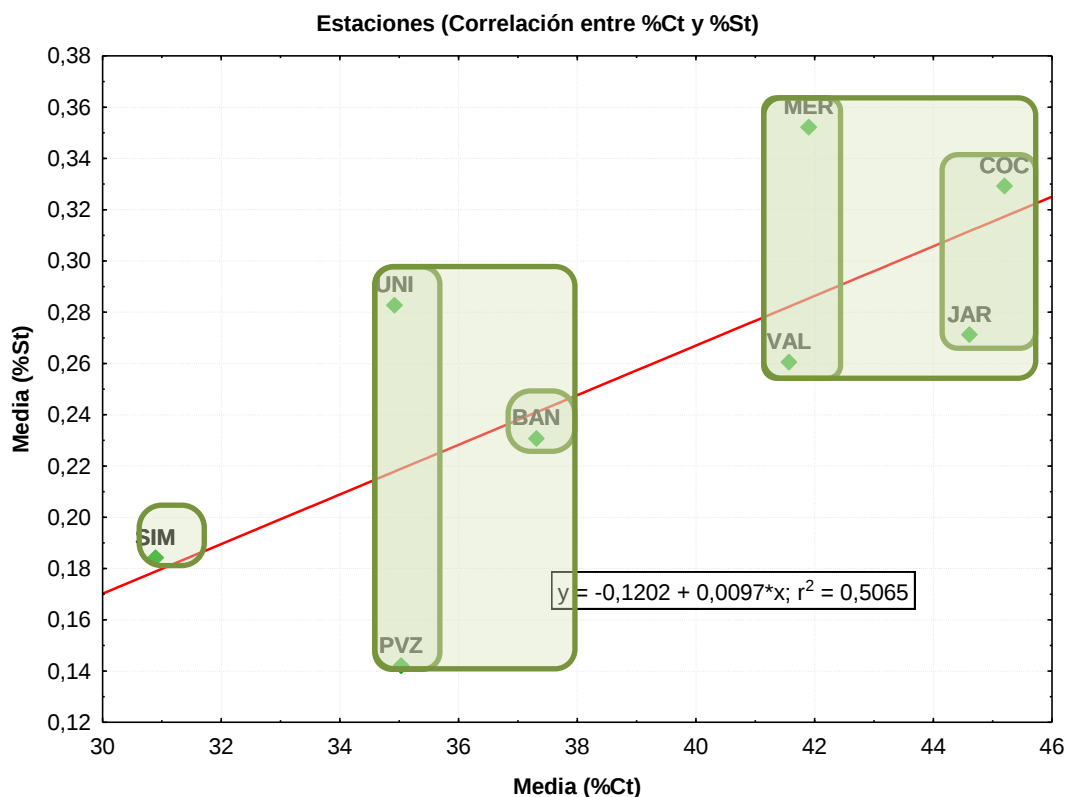


Figura 39. Gráfica de correlación entre C y S determinados para las muestras de todas las estaciones.

En resumen, la *T. recurvata* evidenció diferencias significativas en las concentraciones de los elementos Carbono y Azufre, entre el punto considerado como referencia y aquellos dentro de la transecta estudiada. Su empleo aportó conocimientos con base en la concentración de dichos elementos y demostrando su posible uso como biomonitor potencial de los mismos en la ciudad de Caracas, Venezuela, a través de los puntos considerados en el presente estudio.



CONCLUSIONES

1. Los porcentajes determinados en *Tillandsia recurvata* (L.) L., para las muestras evaluadas en la transecta estudiada, fueron 39 ± 8 % para Carbono total y $0,26 \pm 0,11$ % Azufre total.
2. Las muestras colectadas en el Jardín Botánico de la Universidad Central de Venezuela (JBUCV) mostraron diferencias significativas en la concentración de cada elemento analizado frente a los valores promedio de la transecta estudiada.
3. Existe una correlación positiva entre cada punto de muestreo en la transecta y los valores de %Ct y %St determinados, observándose un aumento generalizado para cada elemento desde la estación Plaza Venezuela hasta la estación Mercado.
4. En general los diferentes puntos de muestreo manifiestan una tendencia negativa de relación entre las variables de interés, donde al aumentar la concentración de una de ellas disminuye la concentración de la otra.
5. Las pruebas estadísticas de análisis de varianza (ANOVA) realizadas para los valores de concentración de ambos elementos demuestran que existen al menos dos grupos significativamente diferentes para las localidades evaluadas.
6. Los análisis tipo clúster demuestran que pueden existir al menos cuatro grupos diferenciados donde las muestras pertenecientes al Jardín Botánico de la Universidad Central de Venezuela (JBUCV) evidencian un fuerte agrupamiento entre sí.



RECOMENDACIONES

1. Realizar la caracterización del contenido total, orgánico e inorgánico de los elementos Carbono, Azufre y Nitrógeno en muestras de *Tillandsia recurvata* (L.) L., con el propósito de realizar correlaciones e identificar posibles fuentes para estos elementos.
2. Emplear *T. recurvata* mediante un biomonitoreo activo, controlando así variables como la edad y el tiempo de exposición de la especie y los niveles base de los elementos a estudiar.
3. Evaluar y comparar el desempeño como biomonitor de la *T. recurvata*, para los elementos Carbono, Azufre y Nitrógeno, frente a otras especies epífitas de gran distribución y reconocidas ampliamente como biomonitores, como son los líquenes y musgos.
4. Llevar a cabo correlaciones de los valores determinados con el uso de la *T. recurvata* con aquellos obtenidos por muestreadores de alto volumen, para reportar valores de los posibles contaminantes y su biodisponibilidad.
5. Correlacionar los valores obtenidos de Carbono y Azufre en *T. recurvata* en el presente trabajo con aquellos obtenidos sobre metales pesados en la misma especie y transecta, para identificar posibles fuentes que afecten el contenido de estos elementos en el entorno del biomonitor.
6. Realizar determinaciones de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) con el uso de *T. recurvata* en la transecta bajo estudio, para correlacionar los valores obtenidos con aquellos reportados en el presente trabajo, identificando de esta forma posibles fuentes del elemento Carbono en el biomonitor.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Santoro, J., y Betancur, J. (2008). Sinopsis del género *Aechmea* (Bromeliaceae) para Colombia. *Caldasia*, 30 (2), 265-288pp.
- Argüello, E. (2009). *Distribución de metales pesados entre Quebrada Quintero y Altamira-Caracas empleando líquenes y bromeliáceas como biomonitores de contaminación atmosférica*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 114pp.
- Badr, O., y Probert, S. D. (1994). Atmospheric sulphur: Trends, sources, sinks and environmental impacts. *Applied Energy*, 47 (1), 1-67pp.
- Baird, C. (2001). *Química ambiental*. España: Editorial Reverté, S.A.
- Batič, F. (2002). Bioindication of Sulphur Dioxide Pollution with Lichens. In I. Kranner, R. Beckett y A. Varma (Eds.), *Protocols in Lichenology* (483-503pp): Springer Berlin Heidelberg.
- Bedregal, P., Mendoza, P., Ubillús, M., Torres, B., Hurtado, J., Maza, I., y Espinoza, R. (2009). El uso de *Usnea* sp. y *Tillandsia capillaris*, como biomonitores de la contaminación ambiental en la ciudad de Lima, Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 75 (4), 479-487pp.
- Benzing, D. (1990). *Vascular epiphytes: general biology and related biota*. Cambridge, MA. USA: Cambridge University Press.
- Benzing, D., y Davidson, E. (1979). Oligotrophic *Tillandsia circinnata* Schlecht (Bromeliaceae): An assessment of its patterns of mineral allocation and reproduction. *American Journal of Botany*, 66 (4), 386-397pp.



- Benzing, D. H., Arditti, J., Nyman, L. P., Temple, P. J., y Bennett, J. P. (1992). Effects of ozone and sulfur dioxide on four epiphytic bromeliads. *Environmental and Experimental Botany*, 32 (1), 25-32pp.
- Bermudez, G. A., y Pignata, M. (2011). Antioxidant Response of Three *Tillandsia* Species Transplanted to Urban, Agricultural, and Industrial Areas. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 61 (3), 401-413pp.
- Bermudez, G. M. A., Rodriguez, J. H., y Pignata, M. L. (2009). Comparison of the air pollution biomonitoring ability of three *Tillandsia* species and the lichen *Ramalina celastri* in Argentina. *Environmental Research*, 109 (1), 6-14pp.
- Bloss, W. (2011). Measurement of Air Pollutants. In J. O. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health* (635-645pp). Burlington: Elsevier.
- Buccolieri, R., Sandberg, M., y Di Sabatino, S. (2010). City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. *Atmospheric Environment*, 44 (15), 1894-1903pp.
- Bungay, M., y Bungay, H. (2009). Fundamental Concepts for Environmental Processes. In L. Wang, N. Pereira y Y.-T. Hung (Eds.), *Biological Treatment Processes* (Vol. 8, 1-27pp): Humana Press.
- Burbano, A. (2011). *Distribución espacial de Carbono y Nitrógeno en los sedimentos superficiales del Lago de Valencia, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 71pp.
- Burton, M. A. S. (2003). PLANTS AND THE ENVIRONMENT | Plants as Pollution Monitors. In B. Thomas (Ed.), *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (765-772pp). Oxford: Elsevier.



- Canepari, S., Astolfi, M. L., Farao, C., Maretto, M., Frasca, D., Marcoccia, M., y Perrino, C. (2014). Seasonal variations in the chemical composition of particulate matter: a case study in the Po Valley. Part II: concentration and solubility of micro- and trace-elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (6), 4010-4022pp.
- Capannesi, G., Cecchi, A., y Cecchi-Fiordi, A. (1987). Multielement determination in *Tillandsia* by INAA. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 110 (2), 379-383pp.
- Cerón, R. M., Cerón, J. G., Carballo, C. G., Aguilar, C., Montalvo, C., Vargas, C., Ortinez, J. A., Cárdenas, B., Córdova, A. V., y Rodríguez, M. A. (2012). Chemical characterization of dry deposition of pollutants in one industrial site in Guanajuato, Mexico. *INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT*, 6 (5), 532-539pp.
- Cortés, E. (2004). Investigation of air pollution in Chile using biomonitors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 262 (1), 169-276pp.
- Crayn, D., Winter, K., y Smith, A. (2004). Multiple origins of crassulacean acid metabolism and the epiphytic habit in the Neotropical family Bromeliaceae. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101 (10), 3703-3708pp.
- Chaphekar, S. (1999). *Phytomonitoring in industrial areas*. New York: Lewis Publishers.
- Darçın, M. (2014). Association between air quality and quality of life. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (3), 1954-1959pp.



- Díaz, J. (2008). *Aplicación de los líquenes Parmotrema sp. y Physcia sp. como biomonitores de contaminación por metales pesados, en algunas localidades de la Ciudad de Caracas*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 152pp.
- Fernández, R. (2012). *Los líquenes como biomonitores de la contaminación del aire por metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos en la ciudad de Caracas*. Trabajo Especial de Ascenso Facultad de Ingeniería, Coordinación de Postgrado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 135pp.
- Figueiredo, A. M. G., Nogueira, C. A., Saiki, M., Milian, F. M., y Domingos, M. (2007). Assessment of atmospheric metallic pollution in the metropolitan region of São Paulo, Brazil, employing *Tillandsia usneoides* L. as biomonitor. *Environmental Pollution*, 145 (1), 279-292pp.
- Frank, J., Sreenivasan, S., Benshoff, P., Deyrup, M., Edwards, G., Halbert, S., Hamon, A., Lowman, M., Mockford, E., Scheffrahn, R., Steck, G., Thomas, M., Walker, T., y W., W. (2004). Invertebrate animals extracted from native *Tillandsia* (Bromeliales: Bromeliaceae) in Sarasota County, Florida. *Florida Entomologist*, 87 (2), 176-185pp.
- Fugaš, M. (1986). Assessment of true human exposure to air pollution. *Environment International*, 12 (1–4), 363-367pp.
- Gómez, H. (2010). *Evaluación de la contaminación atmosférica por hidrocarburos aromáticos policíclicos, empleando el liquen Parmotrema sancti-angelii y aplicando un muestreo de tipo activo en la ciudad de Caracas*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 174pp.



Hawksworth, D. L., Iturriaga, T., y Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22 (2), 71-82pp.

Henríquez, R. (2011). *Caracterización geoquímica de metales pesados en los sedimentos de fondo de la cuenca del Río Tuy, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 103pp.

Hernández de Pool, D. (1990). *Contaminación Ambiental: Causas, efectos y control*. Maracaibo, Venezuela: Editorial Universo de Venezuela C.A.

Hornung, C. (2011). Anatomía foliar de *Tillandsia complanata* Benth. *Pittieria*, 35, 133-142pp.

Hurtado, W. (2010). *Evaluación de la calidad del aire en los alrededores de la población minera de Tiara empleando líquenes como biomonitores de metales*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, , Caracas, Venezuela. 145pp.

Ibanez, J. G., Hernandez-Esparza, M., Doria-Serrano, C., Fregoso-Infante, A., y Singh, M. M. (2007). *Environmental Chemistry*

Fundamentals. New York: Springer-Verlag New York.

Ibedaca, J. (2014). *Optimización de las metodologías de extracción asistida por microondas y ultrasonido para la determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en muestras de Tillandsia Recurvata (L.) L Biomonitor de la contaminación atmosférica*. Trabajo Especial de Grado en Química Escuela de Química, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 204pp.



- Jaffé, R., Carrero, H., Cabrera, A., y Alvarado, J. (1993). Organic compounds and heavy metals in the atmosphere of the city of Caracas, Venezuela — I: Atmospheric particles. *Water, Air, and Soil Pollution*, 71 (3-4), 293-313pp.
- Jenn, F., Kofahl, C., Müller, M., Radschinski, J., y Voigt, H.-J. (2007). Interpretation of Geological, Hydrogeological, and Geochemical Results *Environmental Geology* (941-1051pp): Springer Berlin Heidelberg.
- Kováčik, J., Klejdus, B., Bačkor, M., Štork, F., y Hedbavny, J. (2011). Physiological responses of root-less epiphytic plants to acid rain. *Ecotoxicology*, 20 (2), 348-357pp.
- Krochmal, D., y Kalina, A. (1997). A method of nitrogen dioxide and sulphur dioxide determination in ambient air by use of passive samplers and ion chromatography. *Atmospheric Environment*, 31 (20), 3473-3479pp.
- LeGalley, E., y Krekeler, M. P. S. (2013). A mineralogical and geochemical investigation of street sediment near a coal-fired power plant in Hamilton, Ohio: An example of complex pollution and cause for community health concerns. *Environmental Pollution*, 176 (0), 26-35pp.
- Ley Orgánica del Ambiente (2006) Asamblea Nacional de la República Bolivariana de Venezuela Gaceta Oficial N° 5.833 Extraordinario.
- Loka Bharathi, P. A. (2008). Sulfur Cycle. In S. E. J. D. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology* (3424-3431pp). Oxford: Academic Press.
- Lucking, R. (1997). The use of foliicolous lichens as bioindicators in the tropics with special reference to the microclimate. *Abstracta Botanica*, 21, 99-116pp.
- Maier, R. M. (2009). Chapter 14 - Biogeochemical Cycling. In R. M. M. L. P. P. Gerba (Ed.), *Environmental Microbiology (Second Edition)* (287-318pp). San Diego: Academic Press.



- Mallik, C., Ghosh, D., Ghosh, D., Sarkar, U., Lal, S., y Venkataramani, S. (2014). Variability of SO₂, CO, and light hydrocarbons over a megacity in Eastern India: effects of emissions and transport. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (14), 8692-8706pp.
- Markert, B. (2001). Determination of trace elements in *Tillandsia usneoides* by neutron activation analysis for environmental biomonitoring. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 249 (2), 391-395pp.
- MARN-PDVSA. (2005). Informe de la calidad del aire en las principales ciudades de Venezuela (período enero-agosto). Caracas, Venezuela: Dirección general de calidad ambiental.
- Moodley, K. G., Singh, S., y Govender, S. (2011). Passive monitoring of nitrogen dioxide in urban air: A case study of Durban metropolis, South Africa. *Journal of Environmental Management*, 92 (9), 2145-2150pp.
- Moreno, E., Sánchez, A., y Hernández, J. (2007). *Guía ilustrada de hongos liquenizados de Venezuela*. Caracas, Venezuela: Ediciones del Departamento de Publicaciones de la Fundación Instituto Botánico de Venezuela.
- Morillo, G., Briceño, B., y Oliva-Esteva, F. (2009). Bromeliaceae de los páramos y subpáramos andinos venezolanos. *Acta Botánica de Venezuela*, 32 (1), 179-224pp.
- Nasser, K. (2012). *Estudio de la distribución de Carbono, Nitrógeno, Fósforo y Azufre en los sedimentos de fondo de la cuenca del Río Tuy, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado en Química Escuela de Química, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 121pp.



- Nylander, W. (1866). Les lichens du Jardin du Luxembourg. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 13, 364-372pp.
- Ott, W. R. (1982). Concepts of human exposure to air pollution. *Environment International*, 7 (3), 179-196pp.
- Pande, P. C., y Oates, K. (1986). SEM analysis of *Commelina communis* L. leaves after exposure to SO₂ and NO₂ pollution. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, 42 (4), 353-360pp.
- Perdomo de Ponce, D. (2009). Contaminantes aéreos y sus efectos en pacientes alérgicos del Valle de Caracas. *Gaceta Médica de Caracas*, 117 (4), 274-313pp.
- Pesic, D., Blagojevic, M., y Zivkovic, N. (2014). Simulation of wind-driven dispersion of fire pollutants in a street canyon using FDS. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (2), 1270-1284pp.
- Pinto, J. (2013). *Estudio de metales pesados al suroeste del área metropolitana de Caracas empleando Tillandsia recurvata (L.) L. como biomonitor de contaminación atmosférica*. Trabajo Especial de Grado en Química Escuela de Química, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 110pp.
- Purvis, O. W., Seaward, M. R. D., y Loppi, S. (2007). Lichens in a changing pollution environment: An introduction. *Environmental Pollution*, 146 (2), 291-292pp.
- Pyatt, F. B., Grattan, J. P., Lacy, D., Pyatt, A. J., y Seaward, M. R. D. (1999). Comparative Effectiveness of *Tillandsia Usneoides* L. and *Parmotrema Praesorediosum* (Nyl.) Hale as Bio-Indicators of Atmospheric Pollution in Louisiana (U.S.A.). *Water, Air, and Soil Pollution*, 111 (1-4), 317-326pp.



- Quijada, M. (2006). *Líquenes como biomonitores de contaminación por metales pesados (Pb, Cu, Zn, Cd, Ni, V y Cr) en la ciudad de Caracas-Venezuela*. Trabajo Especial de Grado en Geoquímica Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 79pp.
- Reijnders, L. (2009). Biogeochemical Cycles. In J. Boersema y L. Reijnders (Eds.), *Principles of Environmental Sciences* (15-17pp): Springer Netherlands.
- Réquia Jr, W. J., Koutrakis, P., y Roig, H. L. (2015). Spatial distribution of vehicle emission inventories in the Federal District, Brazil. *Atmospheric Environment*, 112, 32-39pp.
- Réquiz, M. (2006). *Determinación de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos utilizando líquenes como bioacumuladores en estudios de contaminación atmosférica en el área de la ciudad de Caracas*. Trabajo Especial de Grado en Química Escuela de Química, Departamento de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 84pp.
- Roszbach, M., Jayasekera, R., Kniewald, G., y Thang, N. H. (1999). Large scale air monitoring: lichen vs. air particulate matter analysis. *Science of The Total Environment*, 232 (1-2), 59-66pp.
- Schrimpff, E. (1984). Air pollution patterns in two cities of Colombia, S. A. According to trace substances content of an epiphyte (*Tillandsia recurvata* L.). *Water, Air, and Soil Pollution*, 21 (1-4), 279-315pp.
- Singh, A., y Agrawal, M. (2015). Effects of ambient and elevated CO₂ on growth, chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, antioxidants, and secondary metabolites of *Catharanthus roseus* (L.) G Don. grown under three different soil N levels. *Environmental Science and Pollution Research*, 22 (5), 3936-3946pp.



- Smodiš, B., Pignata, M. L., Saiki, M., Cortés, E., Bangfa, N., Markert, B., Nyarko, B., Arunachalam, J., Garty, J., Vutchkov, M., Wolterbeek, H. T., Steinnes, E., Freitas, M. C., Lucaciu, A., y Frontasyeva, M. (2004). Validation and Application of Plants as Biomonitors of Trace Element Atmospheric Pollution – A Co-Ordinated Effort in 14 Countries. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 49 (1-3), 3-13pp.
- Temmerman, N. D., Sermon, K., Seneca, S., De Rycke, M., Hilven, P., Lissens, W., Van Steirteghem, A., y Liebaers, I. (2004). Intergenerational Instability of the Expanded CTG Repeat in the DMPK Gene: Studies in Human Gametes and Preimplantation Embryos. *The American Journal of Human Genetics*, 75 (2), 325-329pp.
- Türk, R., y Wirth, V. (1975). The pH dependence of SO₂ damage to lichens. *Oecologia*, 19 (4), 285-291pp.
- Tuthill, C., Schutte, W., Frank, C. W., Santolucito, J., y Potter, G. (1982). Retrospective monitoring: A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1 (3), 189-211pp.
- Unsworth, M. H., y Wolfe, G. (1995). Current progress in the study of global biogeochemical cycles. *Studies in Environmental Science*, Volume 65, 9-25pp.
- Vareschi, V. (1953). La influencia de los bosques y parques sobre el aire de la ciudad de Caracas. *Acta Científica Venezolana*, 4 (3), 89-95pp.
- Vareschi, V. M., E. (1973). La contaminación en Caracas en los años 1953 y 1973. *Sociedad Venezolana de Ciencias Naturales*, 30, 387-444pp.
- Vergara, D., Paredes, T., y Simbaña, W. (2005). Líquenes como bioindicadores de contaminación en el sitio de disposición final desechos sólidos, Isla Santa Cruz, Galápagos. [en línea]. Disponible en: www.centrourbal.com, Consulta: 27 de Noviembre de 2012.

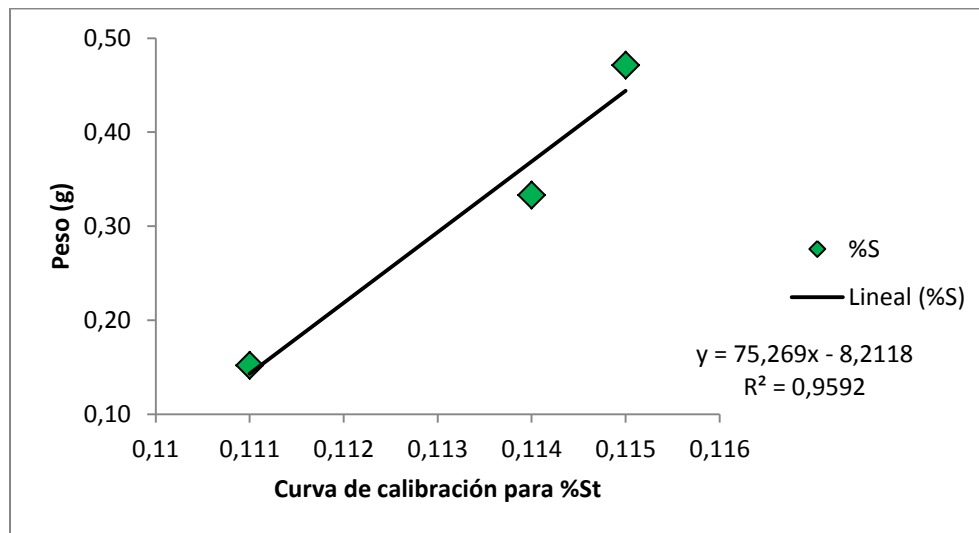


- Vingiani, S., Adamo, P., y Giordano, S. (2004). Sulphur, nitrogen and carbon content of *Sphagnum capillifolium* and *Pseudevernia furfuracea* exposed in bags in the Naples urban area. *Environmental Pollution*, 129 (1), 145-158pp.
- Wadleigh, M. A., y Blake, D. M. (1999). Tracing sources of atmospheric sulphur using epiphytic lichens. *Environmental Pollution*, 106 (3), 265-271pp.
- Wannaz, E., y Pignata, M. (2006). Calibration of Four Species of *Tillandsia* as Air Pollution Biomonitors. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 53 (3), 185-209pp.
- Widdison, P. E., y Burt, T. P. (2008). Nitrogen Cycle. In S. E. J. D. Fath (Ed.), *Encyclopedia of Ecology* (2526-2533pp). Oxford: Academic Press.
- Wiseman, R. D., y Wadleigh, M. A. (2002). Lichen response to changes in atmospheric sulphur: isotopic evidence. *Environmental Pollution*, 116 (2), 235-241pp.
- Wolterbeek, B. (2002). Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives. *Environmental Pollution*, 120 (1), 11-21pp.
- Zambrano, A., Medina, C., Rojas, A., López, D., Chang, L., y Sosa, G. (2009). Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant *Tillandsia recurvata* L. . *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 6479-6494pp.
- Zizka, G., Schmidt, M., Schulte, K., Novoa, P., Pinto, R., y König, K. (2009). Chilean Bromeliaceae: diversity, distribution and evaluation of conservation status. *Biodiversity and Conservation*, 18 (9), 2449-2471pp.

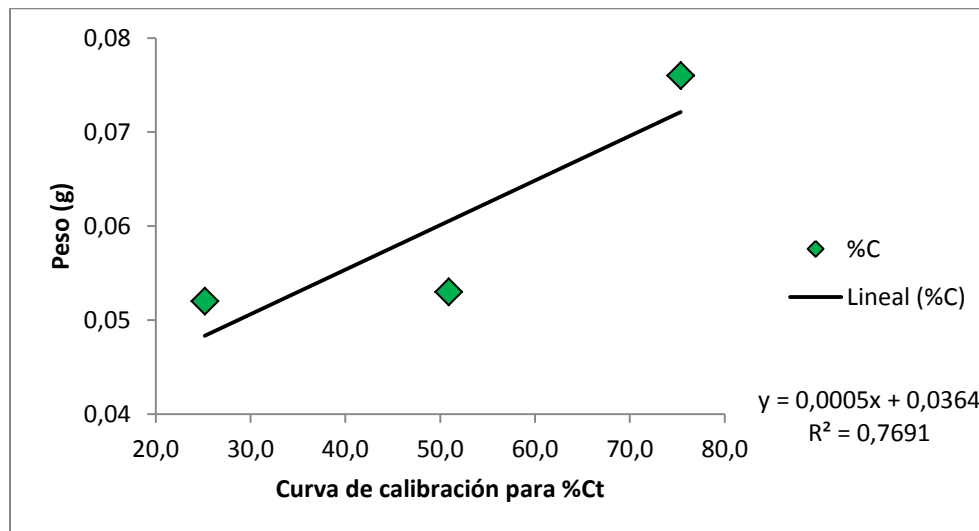
APÉNDICES

Apéndice A - Curvas de calibración para %St y %Ct

%St



%Ct





Apéndice B - %Ct determinado para cada muestra

Muestra		Peso (g) ± 0,0001	%Ct	Muestra		Peso (g) ± 0,0001	%Ct	
PVZ	03	0,0560	33,582	VAL	03	0,0540	40,796	
	04	0,0540	35,450		04	0,0510	42,028	
	05	0,0540	34,570		05	0,0560	41,188	
	06	0,0490	36,521		06	0,0520	42,251	
UNI	03	0,0520	34,454	JAR	03	0,0520	45,176	
	04	0,0580	34,253		04	0,0510	46,382	
	05	0,0500	34,923		05	0,0510	42,519	
	06	0,0510	36,053		06	0,0540	44,362	
SIM	03	0,0520	3,666	COC	03	0,0500	47,257	
	04	0,0520	38,344		04	0,0500	46,409	
	05	0,0510	39,944		05	0,0560	40,915	
	06	0,0500	41,620		06	0,0510	46,222	
BAN	03	0,0580	36,987	MER	03	0,0510	41,838	
	04	0,0560	35,046		04	0,0540	44,603	
	05	0,0560	39,602		05	0,0510	41,944	
	06	0,0520	37,604		06	0,5200	39,212	
				JBUCV	08	0,0520	49,365	
					09	0,0510	48,380	
					10	0,0550	50,425	
					11	0,0500	50,650	



Apéndice C - %St determinado para cada muestra

Muestra		Peso (g) ± 0,0001	%St	Muestr a		Peso (g) ± 0,0001	%St
PVZ	03	0,0960	0,132	VAL	03	0,1110	0,326
	04	0,0950	0,204		04	0,0810	0,264
	05	0,1020	0,134		05	0,1080	0,216
	06	0,0720	0,098		06	0,1090	0,236
UNI	03	0,1090	0,310	JAR	03	0,0960	0,335
	04	0,1060	0,304		04	0,0940	0,300
	05	0,1010	0,250		05	0,1030	0,201
	06	0,1080	0,267		06	0,1140	0,249
SIM	03	0,1030	0,302	COC	03	0,0770	0,215
	04	0,1050	0,129		04	0,0960	0,259
	05	0,1080	0,291		05	0,1100	0,580
	06	0,1090	0,015		06	0,1020	0,263
BAN	03	0,1030	0,081	MER	03	0,1130	0,341
	04	0,1130	0,442		04	0,1100	0,263
	05	0,1090	0,114		05	0,1010	0,393
	06	0,1070	0,286		06	0,1030	0,412
				JBUCV	08	0,1020	0,228
					09	0,0600	0,302
					10	0,0890	0,080
					11	0,0880	0,189



Apéndice D - Porcentaje de humedad para cada muestra analizada, determinado por Pinto (2013)

Muestra		Peso (g) ± 0,0001		% Humedad	Muestra		Peso (g) ± 0,0001		% Humedad
		Inicial	Final				Inicial	Final	
PVZ	03	1,075	0,301	72,01%	VAL	03	1,013	0,412	59,36%
	04	1,011	0,255	74,76%		04	1,000	0,402	59,79%
	05	1,070	0,301	71,85%		05	1,031	0,349	66,09%
	06	1,003	0,297	70,41%		06	1,040	0,350	66,38%
UNI	03	1,007	0,433	57,01%	JAR	03	1,014	0,295	70,97%
	04	1,030	0,316	69,33%		04	1,004	0,299	70,19%
	05	1,088	0,229	78,93%		05	1,011	0,348	65,59%
	06	0,998	0,222	77,79%		06	1,001	0,357	64,38%
SIM	03	1,012	0,218	78,45%	COC	03	1,040	0,339	67,39%
	04	1,007	0,240	76,17%		04	1,030	0,463	55,05%
	05	1,021	0,267	73,89%		05	1,022	0,388	62,05%
	06	1,013	0,280	72,39%		06	1,029	0,284	72,40%
BAN	03	1,023	0,233	77,24%	MER	03	1,030	0,233	77,40%
	04	1,074	0,340	68,37%		04	1,083	0,246	77,30%
	05	1,062	0,410	61,42%		05	1,004	0,240	76,08%
	06	1,041	0,349	66,51%		06	1,042	0,236	77,31%
					JBUCV	08	1,011	0,308	69,55%
						09	1,109	0,294	73,51%
						10	1,037	0,271	73,86%
						11	1,007	0,319	68,28%



Apéndice E - Porcentaje de humedad determinado en las muestras, posterior a su periodo de almacenamiento, para trabajar en base a muestras secas

Muestra		Peso (g) ± 0,0001		% Humedad	Muestra		Peso (g) ± 0,0001		% Humedad	
		Inicial	Final				Inicial	Final		
PVZ	03	12,616	11,192	11,29%	VAL	03	14,855	12,665	14,74%	
	04	14,063	11,821	15,94%		04	12,471	11,852	4,96%	
	05	12,842	12,082	5,92%		05	16,259	12,623	22,36%	
	06	12,054	11,824	1,91%		06	16,199	12,611	22,15%	
UNI	03	15,289	12,302	19,54%	JAR	03	13,501	11,779	12,75%	
	04	14,304	12,644	11,61%		04	13,783	11,933	13,42%	
	05	15,566	12,280	21,11%		05	13,253	11,900	10,21%	
	06	14,508	12,164	16,16%		06	14,821	12,214	17,59%	
SIM	03	13,226	11,780	10,93%	COC	03	12,310	11,678	5,13%	
	04	15,507	12,235	21,10%		04	12,525	11,951	4,58%	
	05	14,114	12,460	11,72%		05	13,412	12,019	10,39%	
	06	13,636	12,296	9,83%		06	16,593	12,358	25,52%	
BAN	03	19,197	12,979	32,39%	MER	03	14,892	12,335	17,17%	
	04	14,979	12,688	15,29%		04	17,485	12,726	27,22%	
	05	13,677	12,506	8,56%		05	13,686	12,099	11,60%	
	06	13,618	12,267	9,92%		06	15,791	12,724	19,42%	
					JBUCV	08	13,229	11,766	11,06%	
						09	11,647	11,346	2,58%	
						10	13,425	11,803	12,08%	
						11	12,794	11,480	10,27%	



Apéndice F - Coordenadas Geográficas en unidades UTM para cada muestra analizada, por punto de recolección

Muestra		Coordenadas		Muestra		Coordenadas	
		Latitud	Longitud			Latitud	Longitud
PVZ	03	731,834	1161,021	VAL	03	729,440	1158,122
	04	731,547	1161,090		04	729,408	1158,109
	05	731,549	1161,073		05	729,401	1158,085
	06	731,628	1161,057		06	729,381	1158,053
UNI	03	730,944	1160,101	JAR	03	728,004	1156,860
	04	730,925	1160,059		04	727,940	1156,776
	05	730,904	1160,040		05	728,079	1156,910
	06	730,877	1160,052		06	728,119	1156,957
SIM	03	730,529	1159,798	COC	03	727,220	1155,557
	04	730,493	1159,768		04	727,163	1155,441
	05	730,484	1159,747		05	727,210	1155,474
	06	730,424	1159,703		06	727,248	1155,546
BAN	03	729,735	1159,159	MER	03	727,027	1154,905
	04	729,723	1159,156		04	726,933	1154,905
	05	729,713	1159,176		05	726,978	1154,697
	06	729,733	1159,150		06	727,011	1154,798

Apéndice G - Estadística descriptiva para los valores determinados de %Ct y %St para cada estación de muestreo

%Ct

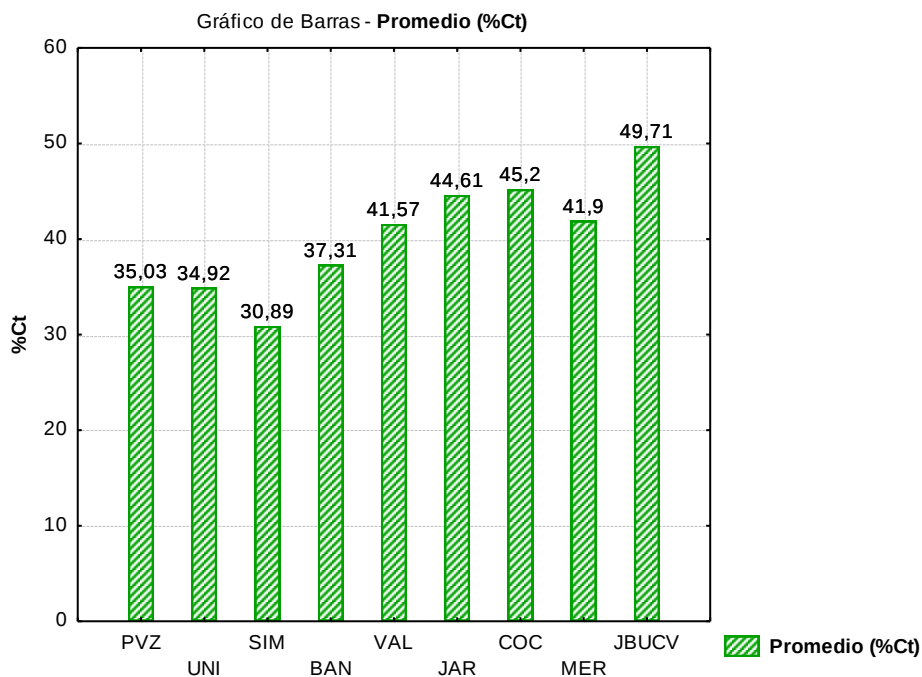
Estadística Descriptiva para %Ct determinado									
	Promedio	Mediana	Moda	Frecuencia de la Moda	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
PVZ	35,031	35,010	Múltiple	1	34,076	35,986	1,57	1,253	4
UNI	34,921	34,689	Múltiple	1	34,353	35,488	0,65	0,805	2
SIM	30,893	39,144	Múltiple	1	21,005	40,782	331,27	18,201	59
BAN	37,310	37,296	Múltiple	1	36,017	38,603	3,52	1,877	5
VAL	41,566	41,608	Múltiple	1	40,992	42,139	0,47	0,688	2
JAR	44,610	44,769	Múltiple	1	43,441	45,779	2,63	1,622	4
COC	45,201	46,316	Múltiple	1	43,569	46,833	8,37	2,892	6
MER	41,899	41,891	Múltiple	1	40,525	43,273	4,85	2,201	5
JBUCV	49,705	49,895	Múltiple	1	48,873	50,538	1,09	1,046	2

%St

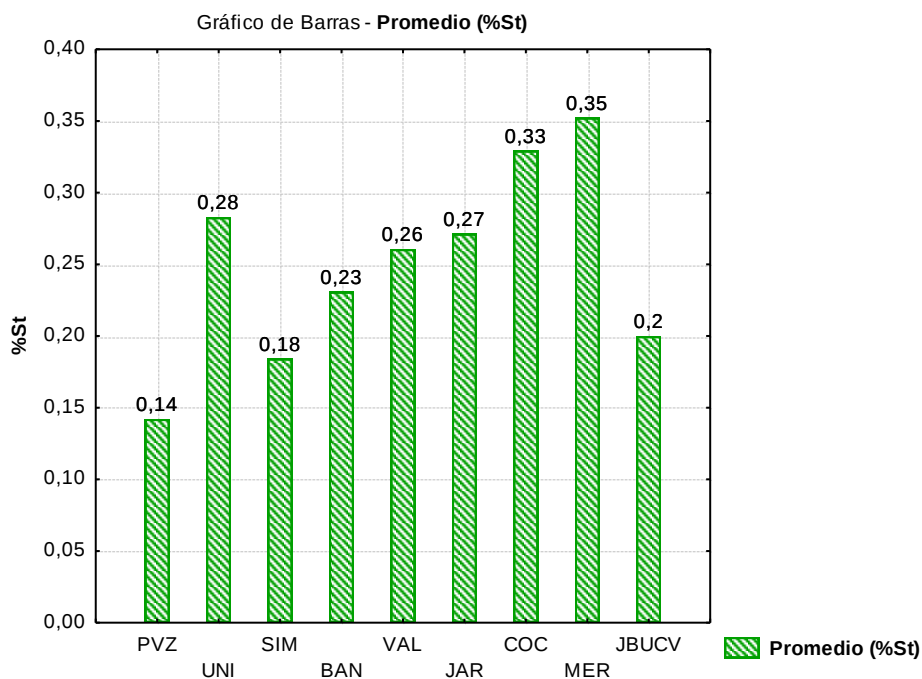
Estadística Descriptiva para %St determinado									
Punto	Promedio	Mediana	Moda	Frecuencia de la Moda	Cuartil Inferior	Cuartil Superior	Varianza	Desv. Est.	Coef. Var.
PVZ	0,142	0,133	Múltiple	1	0,115	0,169	0,00	0,044	31
UNI	0,283	0,285	Múltiple	1	0,259	0,307	0,00	0,029	10
SIM	0,184	0,210	Múltiple	1	0,072	0,296	0,02	0,138	75
BAN	0,231	0,200	Múltiple	1	0,098	0,364	0,03	0,167	72
VAL	0,261	0,250	Múltiple	1	0,226	0,295	0,00	0,048	18
JAR	0,271	0,274	Múltiple	1	0,225	0,318	0,00	0,059	22
COC	0,329	0,261	Múltiple	1	0,237	0,421	0,03	0,169	51
MER	0,352	0,367	Múltiple	1	0,302	0,402	0,00	0,067	19
JBUCV	0,200	0,209	Múltiple	1	0,135	0,265	0,01	0,092	46

Apéndice H - Gráficos de barra para %Ct y %St con el promedio determinado para cada estación de muestreo

%Ct

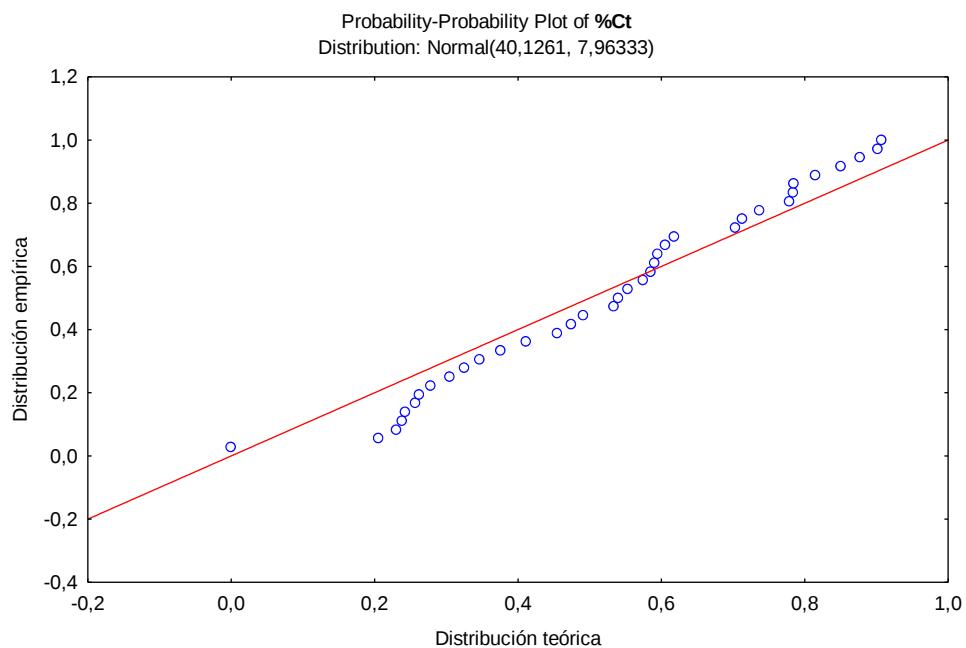


%St

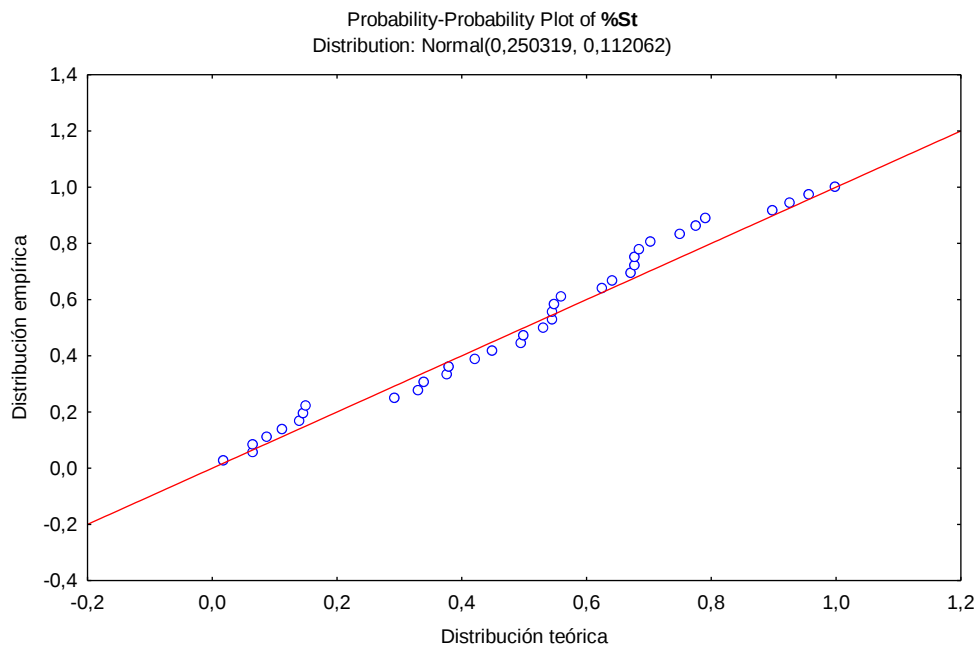


Apéndice I – Test de homogeneidad de varianza, obtenidos mediante la prueba de Brown-Forsythe

%Ct



%St



Apéndice J - Pruebas de Duncan para %Ct y %St por estación

%Ct

Muestra	{1} - 35,031	{2} - 34,921	{3} - 30,893	{4} - 37,310	{5} - 41,566	{6} - 44,610	{7} - 45,201	{8} - 41,899	{9} - 49,705
1 PVZ		0,980509	0,387641	0,611837	0,175146	0,06198	0,051421	0,168121	0,006389
2 UNI	0,980509		0,372307	0,616942	0,182135	0,063045	0,051698	0,170594	0,006492
3 SIM	0,387641	0,372307		0,197381	0,038327	0,010436	0,008288	0,035563	0,000785
4 BAN	0,611837	0,616942	0,197381		0,346153	0,143441	0,122203	0,338362	0,018567
5 VAL	0,175146	0,182135	0,038327	0,346153		0,524272	0,462781	0,940735	0,111149
6 JAR	0,06198	0,063045	0,010436	0,143441	0,524272		0,895148	0,546552	0,288414
7 COC	0,051421	0,051698	0,008288	0,122203	0,462781	0,895148		0,489947	0,319208
8 MER	0,168121	0,170594	0,035563	0,338362	0,940735	0,546552	0,489947		0,118247
9 JBUCV	0,006389	0,006492	0,000785	0,018567	0,111149	0,288414	0,319208	0,118247	

Duncan test; variable %Ct

Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 39,381, df = 27,000

%St

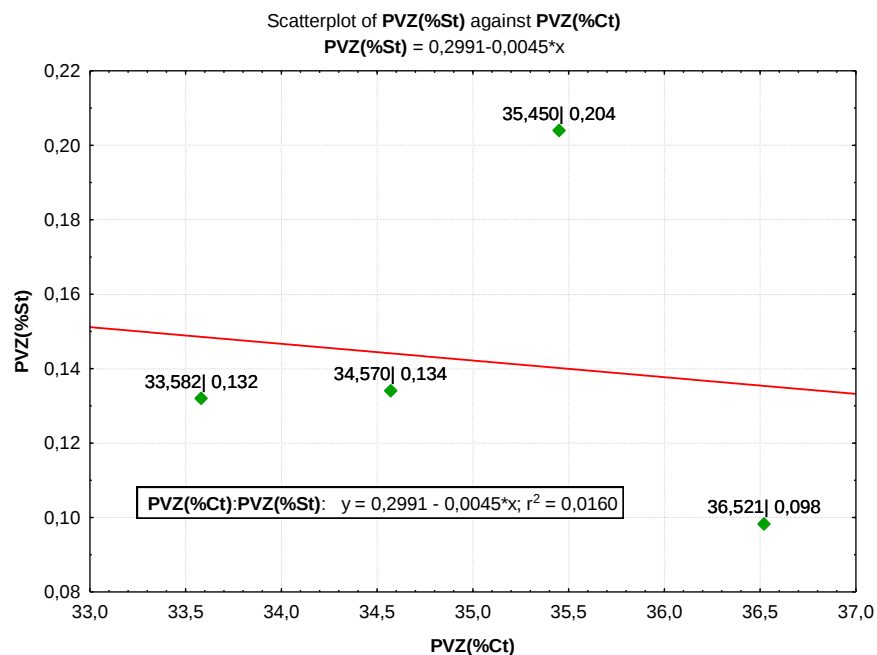
Muestra	{1} - ,14205	{2} - ,28275	{3} - ,18418	{4} - ,23080	{5} - ,26050	{6} - ,27125	{7} - ,32925	{8} - ,35225	{9} - ,19985
1 PVZ		0,105118	0,570669	0,279614	0,159638	0,131511	0,034371	0,019046	0,464805
2 UNI	0,105118		0,247436	0,525312	0,778031	0,876697	0,531608	0,380071	0,322582
3 SIM	0,570669	0,247436		0,55506	0,351761	0,299056	0,095031	0,056434	0,832519
4 BAN	0,279614	0,525312	0,55506		0,688884	0,608457	0,241064	0,155714	0,676548
5 VAL	0,159638	0,778031	0,351761	0,688884		0,884677	0,401229	0,274149	0,443218
6 JAR	0,131511	0,876697	0,299056	0,608457	0,884677		0,463271	0,323311	0,383449
7 COC	0,034371	0,531608	0,095031	0,241064	0,401229	0,463271		0,756405	0,130929
8 MER	0,019046	0,380071	0,056434	0,155714	0,274149	0,323311	0,756405		0,079905
9 JBUCV	0,464805	0,322582	0,832519	0,676548	0,443218	0,383449	0,130929	0,079905	

Duncan test; variable %St

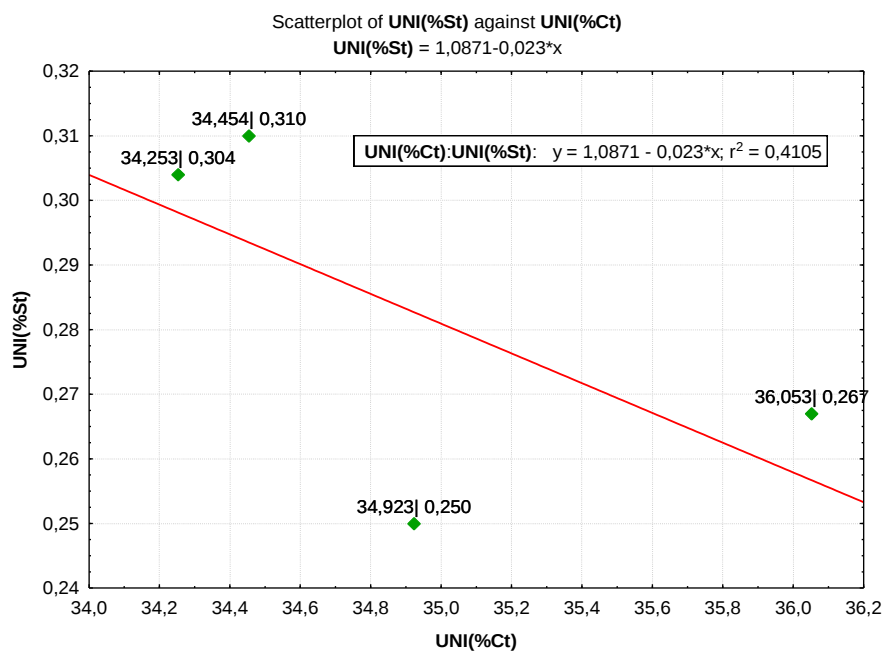
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests Error: Between MS = 0,01076; df = 27,000

Apéndice K - Gráficas de correlación entre %Ct y %St para cada estación

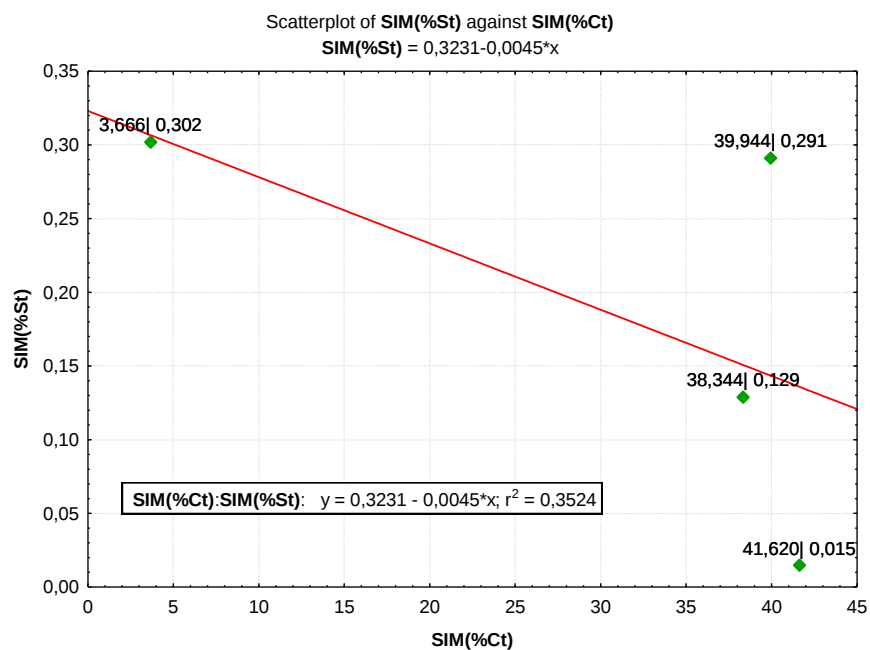
Estación Plaza Venezuela



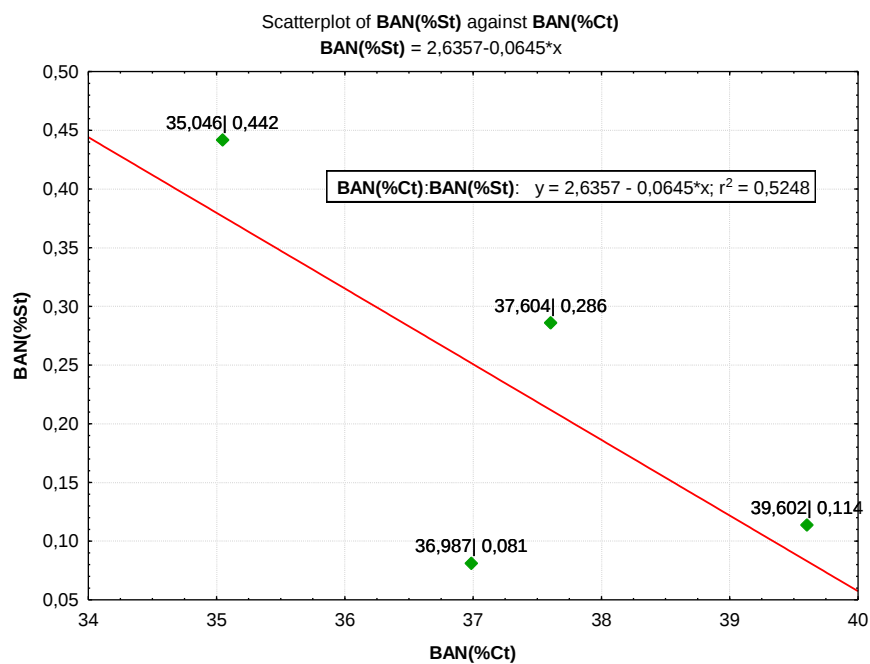
Estación Ciudad Universitaria



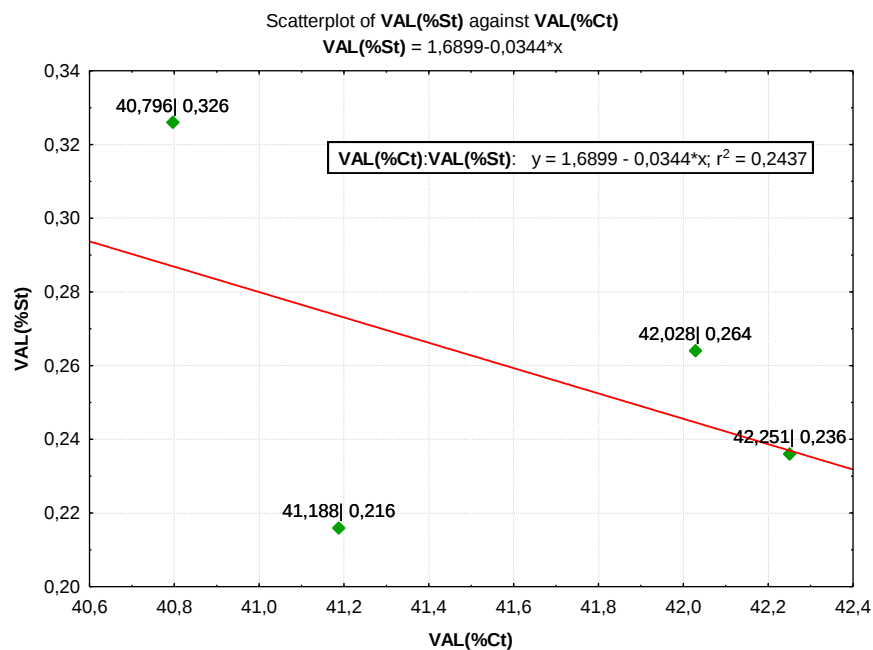
Estación Los Símbolos



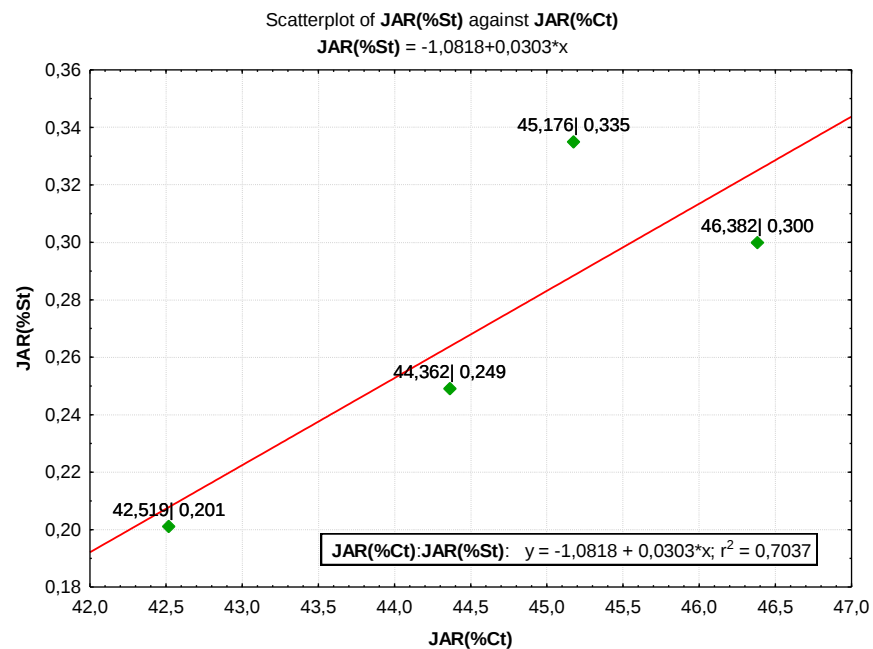
Estación La Bandera



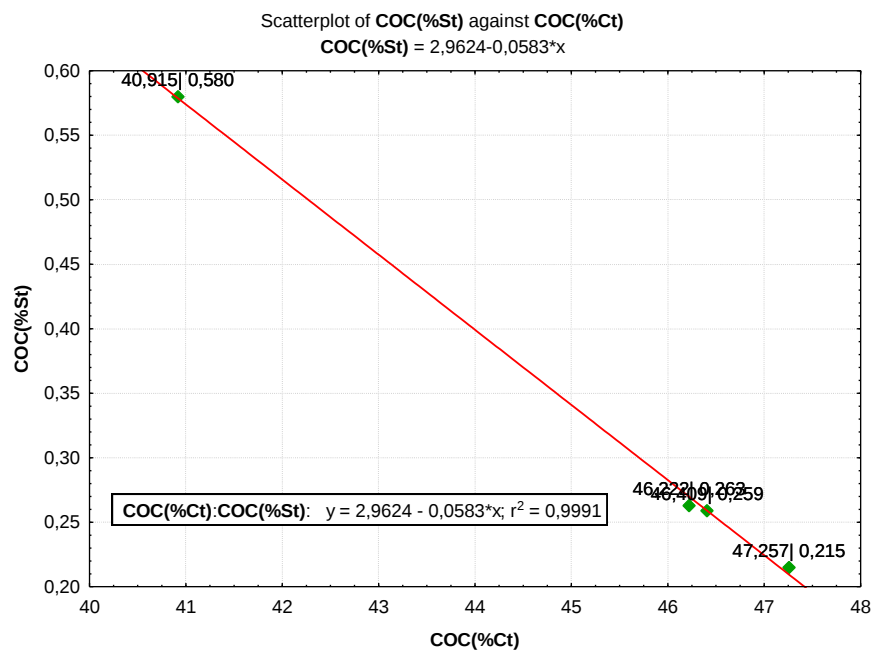
Estación El Valle



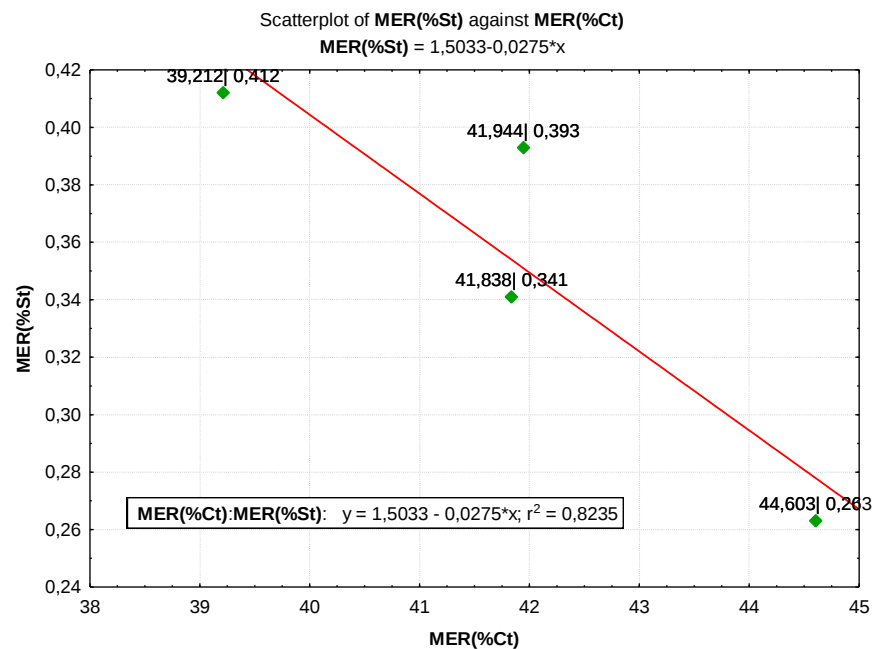
Estación Jardines



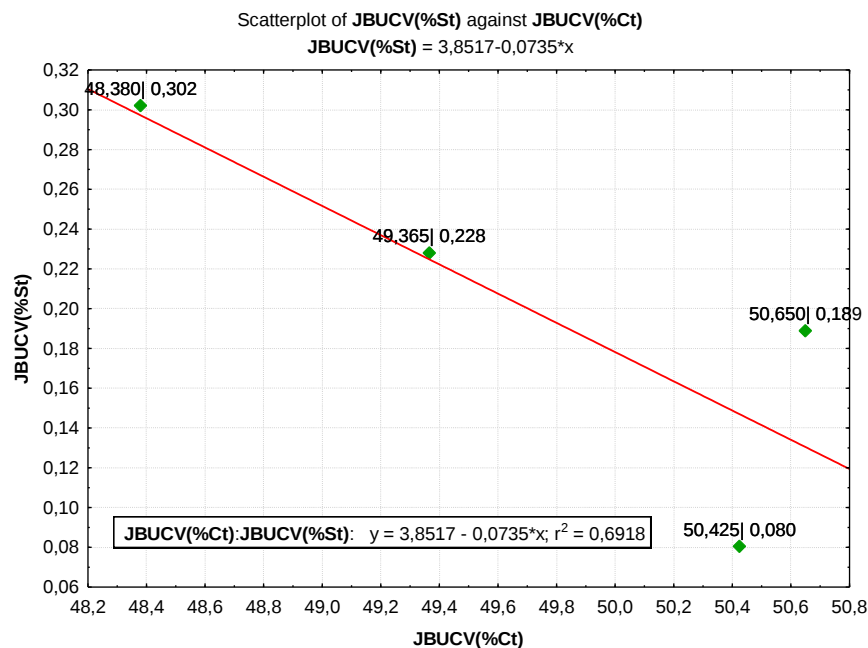
Estación Coche



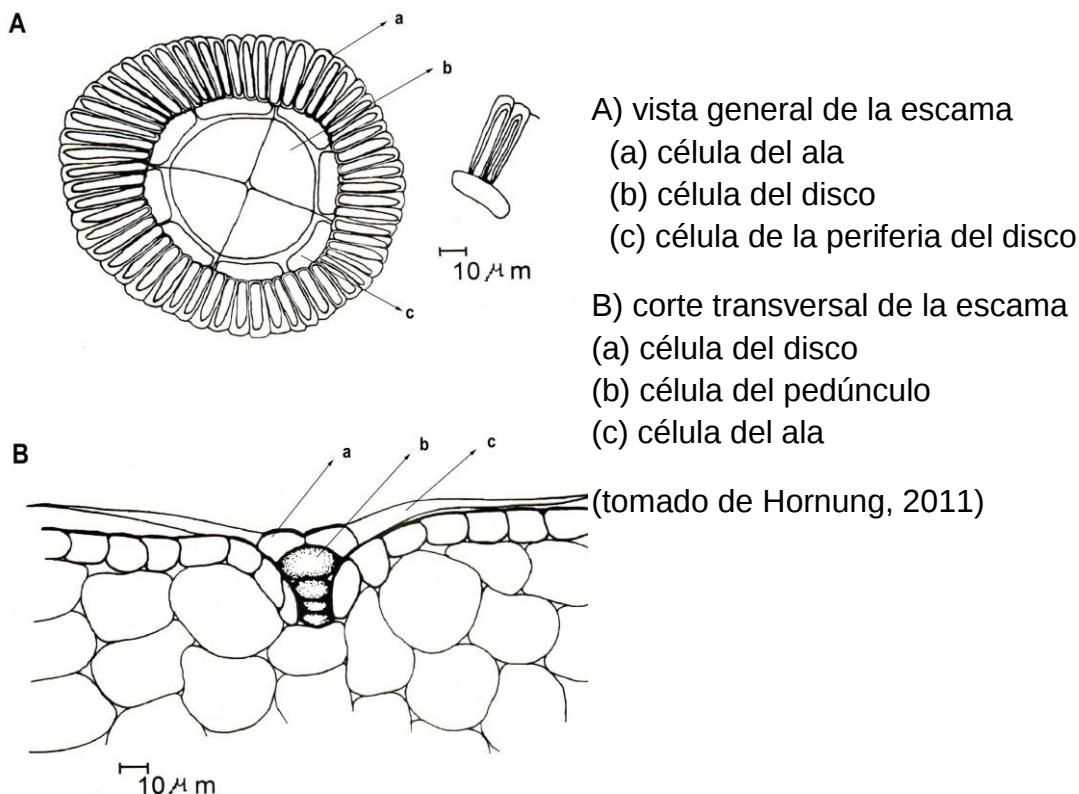
Estación Mercado



Jardín Botánico de la Universidad Central de Venezuela



Apéndice L - Detalles de los tricomas peltados





Glosario de términos

A continuación se presentan algunos términos importantes, con su connotación principal, que han sido utilizados y/o sirven de soporte para el presente trabajo.

Actividad antrópica: Acción resultante de, o influenciada por, la actividad o intervención humana.

Aerosol atmosférico: Conjunto de partículas, ya sean sólidas o líquidas, dispersas en el aire, de tamaño muy pequeño, menores a 100µm, pudiendo estar en la forma de polvo, vapores o niebla. Son la forma como algunos contaminantes son dispersados.

Algas: Plantas acuáticas, simples, verdes y carentes de tallo, raíces u hojas. Organismos microscópicos que forman parte del inicio de la cadena alimenticia. Pueden crecer en la superficie de paredes húmedas, rocas, ramas de árboles y suelo. Contienen clorofila y otros pigmentos que les permiten crecer por fotosíntesis.

Amensalismo: Interacción donde una especie daña de forma negativa el medio ambiente para la otra.

Antrópico: De origen humano, humanizado, opuesto a lo natural. Antropogénico.

Área contaminada: Cualquier lugar que está dañado, alterado o se encuentra debilitado por la introducción de sustancias no deseadas, particularmente microorganismos, químicos, y materiales y desperdicios tóxicos y radioactivos.

Arrosetado: Formando rosetas; en forma de rosa.

Biota: Comprende la fauna y flora de una región determinada.

Ciclo biogeoquímico: Movimiento de los elementos químicos en un camino circular, desde los organismos al medio ambiente físico, y viceversa.



Cifelas: Depresiones circulares, alargadas hasta angulosas, blanquecinas o amarillentas; situadas en la corteza inferior del talo.

Comensalismo: Interacción entre dos especies donde una se beneficia mientras la otra no es afectada, ni positiva ni negativamente.

Competencia (competición): Carrera entre especies de un determinado ecosistema por los nutrientes y el espacio disponible. Puede ser de tipo amensalismo, parasitismo o depredación.

Cooperación: Interacción llevada a cabo entre diferentes especies, donde al menos una de ellas se beneficia y la otra no resulta afectada negativamente.

Corteza: Región bien definida de algunas algas, hongos, musgos y líquenes cuyo origen y composición es diferente a la corteza que presentan las plantas vasculares. En los líquenes la corteza se presenta como una capa compacta del talo, formada por hifas del hongo. Los líquenes generalmente presentan una corteza superior y una corteza inferior, cada una con sus propias características.

Cotiledón: Se encarga (a menudo) de la reserva nutritiva de la semilla, y se encuentra en el germen. Sirve para reservar y absorber nutrientes ubicados en la semilla, durante las primeras etapas de desarrollo, hasta que la planta puede producir sus hojas verdaderas.

Cutícula: Capa delgada y elástica que protege el tallo y las hojas de las plantas.

Depredación: Interacción donde una especie realiza la ingesta, se alimenta, de otra.

Ecología: Estudia las relaciones existentes entre los organismos y el medio en que viven.

Endémico: Presente en una única área geográfica.



Epífita/a: Organismo vegetal que vive sobre otra planta, sin que exista conexión orgánica alguna entre ambos organismos, por lo que no se le considera parásito de ésta, como líquenes y hongos.

Esporas: Corpúsculo reproductivo de algunos organismos (hongos, bacterias y criptógamas), unicelular o pluricelular, asexual o sexual, móvil o inmóvil, que funciona como una semilla, aunque difiere de ésta porque la espora no contiene un embrión preformado.

Ficobionte: Unidad constituyente de la simbiosis liquenácea, siendo el más frecuente el alga verde unicelular perteneciente al género *Trebouxia*.

Foliáceo: Líquenes cuyos talos se componen de láminas semejantes a hojas, lobuladas o no, y que se extienden paralelamente al sustrato.

Hábitat: Ambiente en el cual se establece el intercambio inmediato entre los seres vivientes y los recursos que les son esenciales para cumplir con sus funciones vitales.

Hongos: Organismos nucleados, generalmente filamentosos, portadores de esporas y desprovistos de clorofila.

Humo (*smoke*): Aerosol, compuesto por partículas visibles y gases, producido por la combustión incompleta de materiales basados en carbono, como la madera y los combustibles fósiles.

Impacto ambiental: Alteración, cambio o modificación del medio ambiente, provocado por las actividades humanas, que puede tener connotación positiva o negativa para el medio ambiente físico y/o social.

Líquenes: Organismo compuesto formado por la simbiosis entre dos especies: un hongo y un alga. Pueden ser, o bien parches como costras, o parecidos a arbustos frondosos; creciendo en troncos de árboles, paredes de piedra, techos y tejados o caminos de jardín. Ya que no poseen una raíz, obtienen su sustento de la atmósfera y agua de lluvia. Los líquenes juegan un papel



importante en la detección y monitoreo de la contaminación, especialmente del dióxido de azufre, ya que son altamente sensitivos a la contaminación y especies diferentes desaparecen sí la contaminación alcanza niveles específicos.

Lluvia ácida: Este término genérico cubre una variedad de fenómenos que incluyen también la niebla y la nieve ácida, y que corresponde a la precipitación atmosférica de ácido. Presenta una variedad de consecuencias ecológicamente dañinas, además la presencia de partículas ácidas en el aire, probablemente, también de lugar a efectos directos sobre la salud humana. Es la precipitación significativamente más ácida que la lluvia “natural” (es decir, no contaminada). Los ácidos predominantes son el sulfúrico y el nítrico.

Monitoreo: procedimientos y técnicas utilizadas para analizar sistemáticamente, inspeccionar y recolectar datos en base a parámetros operacionales sobre el medio ambiente.

Monocotiledónea: Son plantas que presentan un solo cotiledón (ver cotiledón).

Musgos: Cualquier planta de clase briófitas, que se desarrolla en casi cualquier habi-tad húmeda

Mutualismo: Interacción entre dos especies donde cada miembro se beneficia del otro, siendo esta una relación obligatoria, por requerir proximidad física cercana.

Neotrópico: Países tropicales y subtropicales de América. América del sur, Centroamérica, Las Antillas, parte de México y los Estados Unidos.

Neutralismo: Carencia de interacción entre las especies de un ecosistema.

Oligotrófico/a: Que posee la habilidad de nutrirse y retener una gran diversidad de elementos, ya sean mayoritarios, minoritarios y/o traza.



Oxidantes (agentes oxidantes): Compuestos de transferencia de átomos de oxígeno o ganancia de electrones en una reacción química. La exposición a éstos puede dar lugar a deterioro de las defensas hacia gérmenes microbianos y alterar funciones pulmonares.

Parasitismo: Interacción donde una especie depende y causa daño a la otra.

Partículas (particulado atmosférico): Pequeñas unidades, sólidas o líquidas, que están suspendidas en el aire y que, usualmente de forma individual, son poco o nada perceptibles a simple vista. Sin embargo, colectivamente, las pequeñas partículas en conjunto a menudo forman una neblina que disminuye la visibilidad, como polvo, humo, neblina, vapores o smog.

Perenne: Plantas que viven por más de dos años, que crecen continuamente.

***Physcia* sp.:** Líquenes foliáceos, cortícolas, de color gris pálido, con lóbulos estrechos, muy unidos e incluso imbricados. Talo adherido al sustrato por medio de rizinas que generalmente se ramifican dicotómicamente. Apotecios con margen talino. Isidios presentes. Talo K+, amarillo. Esporas marrones. Ficobionte *Protococcus*. Género representado en Venezuela por 15 especies.

Planta briófito: Cualquier planta de la división de los Briófitos, poseyendo tallos y hojas pero carentes de un verdadero tejido vascular o raíces y reproduciéndose por esporas: incluidos los musgos y las hepáticas.

Pseudocifelas: Representan interrupciones, pequeñas cavidades redondeadas hasta angulosas, en la corteza del liquen, a través de las cuales quedan al descubierto las hifas de la médula y no poseen capa cortical como las cifelas (*Pseudocyphellaria*).

***Pyxine* sp.:** Talo foliáceo pero generalmente muy adherido al sustrato; lóbulos angostos e irregulares; talo de color grisáceo claro; cara ventral lisa, pseudocifelas presentes o ausentes; rizinas ausentes o cortas y esparcidas;



de amplia distribución. Muy común sobre troncos de árboles. Morfológicamente parecida a *Physcia* sp.

Rizinas: Filamentos formados por las hifas bien compactas, simples o ramificadas, que surgen de la corteza inferior del talo con el objeto de fijar el liquen al sustrato.

Saxícola: Organismo vegetal que vive y se desarrolla utilizando las rocas como sustrato.

Simbionte: Organismo que representa una de las partes en la asociación simbiótica.

Simbiosis: Relación ecológica, prolongada e íntima entre miembros de diferentes especies, pudiendo ser para mutuo beneficio o perjudicial para alguna de las partes, lo que incluye mutualismo, comensalismo o parasitismo.

Sinergismo: Interacción entre especies en la cual ambas especies se benefician, pero esta interacción no es obligatoria, por lo que ambas poblaciones son capaces de vivir por sí mismas.

Smog fotoquímico: Combinación de niebla y químicos, provenientes de emisiones de automóviles y fábricas, e iniciado por la acción del Sol. El NO_2 , en presencia de la luz solar y algunos hidrocarburos, es transformado en NO y O_2 . Éste último reacciona con otras moléculas de O_2 y algunos constituyentes exhalados por los automóviles, formando una variedad de subproductos, incluido el O_3 , dañino por sí mismo e implicado en una gran cantidad de series de reacciones complejas y continuas. Mientras estén presentes el O_3 o NO_2 y la luz solar, otras reacciones ocurrirán.

Sustrato: Base que sirve de soporte al liquen.

Talo: Cuerpo o estructura vegetativa del liquen.

Ubicuo: Que puede encontrarse en cualquier ubicación.