



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL
Y SU MEDIO AMBIENTE

INFLUENCIAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS Y
GEOGRÁFICAS EN LA CALIDAD DEL AIRE (MP10) DE
CIUDADES DEL MUNDO

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ALVARO PATRICIO ZAMBRANO ROJAS

Profesora Guía: Srta. Pilar Barría Sandoval. Ingeniera Civil Hidráulica,
Doctora en Hidroclimatología

Santiago, Chile
2019

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE GESTIÓN FORESTAL
Y SU MEDIO AMBIENTE

INFLUENCIAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS Y
GEOGRÁFICAS EN LA CALIDAD DEL AIRE (MP10) DE
CIUDADES DEL MUNDO

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ALVARO PATRICIO ZAMBRANO ROJAS

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Srta. Pilar Barría Sandoval	...6,7...
Prof. Consejero Sr. Alejandro García Mora	...6,8...
Prof. Consejero Sr. Eduardo Martínez Herrera	...6,2....

DEDICATORIA

A mis padres, Luisa y Reynaldo, por su apoyo incondicional.

A Pilar Barría, por su amistad, apoyo y consejos que me han hecho una mejor persona y profesional.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a Pilar Barría por todo el apoyo y consejos brindados durante este importante proceso.

Agradezco a Raúl Díaz, Jorge Machuca y Paula González por su colaboración en esta memoria.

Agradezco a mis profesores consejeros Alejandro García y Eduardo Martínez quienes me aconsejaron para poder lograr terminar esta etapa de la mejor forma.

Agradezco a Roxana, Marjorie, Laurita por su apoyo en estos últimos años dentro de la universidad.

También agradezco a todas las personas que conocí en todos estos años: Jenifer Villarroel, Nicole Vasquez, Alejandro Rodriguez, Iván Castillo, Natalia Villanueva, Diego Urrutia, Alexis Sepúlveda, Javiera Vergara, Carolina Montecino, Felipe Sepúlveda, Javiera Vergara y a varios más.....

A mis amigos de siempre, Ernesto, Cristian, Paulina, Bárbara, Gloria....

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Efectos de variables climáticas en la calidad del aire	2
1.2. Emisión de material particulado.....	2
1.2.1. Material particulado proveniente del suelo	2
1.2.2. El fenómeno de la erosión.....	3
1.2.3. Proceso de erosión hídrica	3
1.2.4. Proceso de erosión eólica	5
1.3. Dinámica de las partículas de MP ₁₀	5
1.4. Medidas de prevención de la generación de MP ₁₀	6
1.5. Estudios en Chile	7
1.6. OBJETIVOS	9
1.6.1. Objetivo general	9
1.6.2. Objetivos específicos	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS	10
2.1. Materiales.....	10
2.2. Método	10
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
3.1. Creación de la base de datos	12
3.2. Análisis de datos climáticos, geográficos, vegetacionales y de concentración de material particulado.....	16
3.2.1. Zona ecuatorial.....	16
3.2.2. Zona árida.....	17
3.2.3. Zona templada.....	18
3.2.4. Zona fría.....	20
3.3. Análisis de correlación entre variables	21
4. CONCLUSIONES	24
5. BIBLIOGRAFÍA	25
6. ANEXOS	31
7. APÉNDICES.....	33

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Criterios de clasificación de las zonas climáticas.	12
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tamaño de las partículas según su origen.	1
Figura 2: Influencia de la precipitación en producción de sedimentos.	4
Figura 3: Sedimentos de ríos vertidos al océano en la zona centro sur de Chile.	4
Figura 4: Cambio de la concentración de MP ₁₀ en 279 ciudades, Estados Unidos.	7
Figura 5: Ciudades estudiadas (MP ₁₀) en Chile.	8
Figura 6: Relaciones entre variables climáticas y MP ₁₀ en 15 ciudades en Chile.	9
Figura 7: Localización de las ciudades utilizadas en el estudio.	13
Figura 8: Rangos de material particulado en las ciudades del estudio.	15
Figura 9: Relación del material particulado (MP ₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona ecuatorial (Zona A).	17
Figura 10: Relación del material particulado (MP ₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona árida (Zona B).	18
Figura 11: Relación del material particulado (MP ₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona templada (Zona C).	19
Figura 12: Relación del material particulado (MP ₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona fría (Zona D).	21
Figura 13: Matriz de correlación entre variables del estudio.	23

RESUMEN

La atmósfera es el medio esencial para la supervivencia de la especie humana, sin embargo la contaminación atmosférica que afecta a gran parte de las ciudades del mundo está asociada a una serie de enfermedades como el asma, la bronquitis, pérdidas de funciones pulmonares e incluso la muerte. La contaminación atmosférica es la alteración de la composición natural de la atmósfera debido a la suspensión de material particulado derivado tanto de fuentes humanas como naturales. Estas partículas se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño en: partículas de diámetro menor $2,5 \mu\text{m}$, simbolizado como $\text{MP}_{2,5}$, y partículas cuyo diámetro es menor $10 \mu\text{m}$, simbolizado como MP_{10} . Estudios locales han indicado que la concentración de MP_{10} podría estar influenciada por variables climáticas (como temperatura media anual, velocidad media máxima del viento, precipitación media anual), geográficas (número de habitantes) y vegetacionales (NDVI), sin embargo el análisis de dichas relaciones no se ha desarrollado a una escala global. En este contexto el presente estudio, busca determinar la relación entre variables climáticas, geográficas y vegetacionales con el MP_{10} en ciudades distribuidas en distintas zonas climáticas del mundo. Los resultados indican que las variables con mejores correlaciones con la concentración de material particulado son: Población (valor $p < 0,001$ y $\rho = 0,4$), Precipitación media anual (valor $p < 0,001$ y $\rho = -0,3$), Latitud (valor $p < 0,001$ y $\rho = -0,5$), y NDVI (valor $p < 0,001$ y $\rho = -0,3$). Se concluye que las variables que mejor explican la concentración de MP_{10} en cada ciudad dependen altamente de zona geográfica en que éstas se ubican y consecuentemente del clima y vegetación preponderante. Finalmente, es importante notar que de acuerdo a la relación existente entre cobertura vegetal y MP_{10} , futuros planes para prevenir la contaminación atmosférica debiesen considerar elementos como reforestación y aumento de áreas verdes.

Palabras claves: MP_{10} , variables climáticas, sedimentos, polvos fugitivos, NDVI.

ABSTRACT

The atmosphere is essential for life and human survival. However, the atmospheric pollution that affects the majority of cities of the world is related to several diseases such as asthma, bronchitis, loss of lung function and even death. The atmospheric pollution is defined as the alteration of the natural composition of the atmosphere, related to particulate material arisen from anthropogenic and natural sources. These particles can be classified according to their size in: particles with diameter less than 2.5 μm , symbolized as $\text{PM}_{2.5}$, and particles with diameter less than 10 μm , symbolized as PM_{10} . Local studies have indicated that PM_{10} concentration could be influenced by climatic variables (such as average annual temperature, average maximum wind speed, mean annual average), geographical (number of inhabitants) and vegetational (NDVI). To date, there are not studies that assess the aforementioned relationships at a global scale. In this context, this project seeks to identify the relationship between climatic, geographical and vegetational variables with the PM_{10} concentration in thousands of cities located in different climatic zones of the world. The results indicate that the variables that better explain the amount of particulate material in the analyzed cities are: Population (p value <0.001 and $\rho = 0.4$), Mean annual precipitation (p value <0.001 and $\rho = -0.3$), Latitude (p value <0.001 and $\rho = -0.5$), NDVI (p value <0.001 and $\rho = -0.3$). In conclusion, the variables that better explain the PM_{10} concentration in each city highly depend on the geographical location of the city, and as a consequence on its climate and vegetational characteristics. Finally, it is important to note that considering the important relationship between the NDVI and PM_{10} concentration, future management plans to reduce atmospheric pollution should take into account elements such as reforestation and improving urban green spaces.

Key words: PM_{10} , climatic variables, sediments, fugitive dust, NDVI.

1. INTRODUCCIÓN

La atmósfera de la Tierra provee las condiciones fundamentales para la existencia y sobrevivencia de gran parte de los organismos del planeta (Cuadrat y Pita, 1997). Esta capa está compuesta por una mezcla de gases y partículas en suspensión. Parte de las partículas suspendidas que la integran corresponden a contaminantes atmosféricos, los cuales en altas concentraciones pueden ser peligrosos para la salud humana. Estas partículas o contaminantes provienen de diversos orígenes tanto naturales como humanos, como por ejemplo: industrias, vehículos, erosión del suelo debido al viento, el polvo producido en las faenas de construcción, el polvo en caminos no pavimentados, sedimentos producto de la erosión hídrica, entre otras (Gugamsetty *et al.*, 2012). El material particulado (MP) es un tipo de contaminante atmosférico en suspensión, el cual típicamente se clasifica según su diámetro en: MP₁₀ (material grueso, diámetro menor a 10 µm) y MP_{2.5} (material fino, diámetro inferior a 2,5 µm) (Figura 1) (Viana, 2003). La medición y estudio del material particulado es de suma importancia para evaluar los índices de contaminación atmosférica y para la implementación de planes de descontaminación, como el Plan de Descontaminación 2014 – 2018 de la Región Metropolitana (Ministerio del Medio Ambiente, 2014).

Las grandes ciudades ubicadas en zonas de clima mediterráneo son especialmente propensas a la movilización y acumulación de polvo durante periodos secos (Amato *et al.*, 2012). Según García-Chevesich *et al.* (2014), las partículas que están en suspensión en el aire (MP₁₀) provienen desde el suelo, sitios de construcción, agricultura, entre otras fuentes. En la misma línea, O’Ryan y Larraguibel (2000), indicaron basados en una muestra de MP₁₀ realizada en Santiago de Chile, que más del 50% del material particulado corresponde a partículas que provienen desde el suelo. En zonas de topografía escarpada como es gran parte del territorio Chileno, gracias a la acción de la escorrentía generada durante los procesos de tormentas, se movilizan partículas desde las zonas más altas hasta las más bajas (García-Chevesich *et al.*, En desarrollo). Según Amato *et al.* (2012), la cantidad de polvo que es movilizado durante una tormenta es igual a la cantidad de polvo que es resuspendido en el aire días después de ésta.

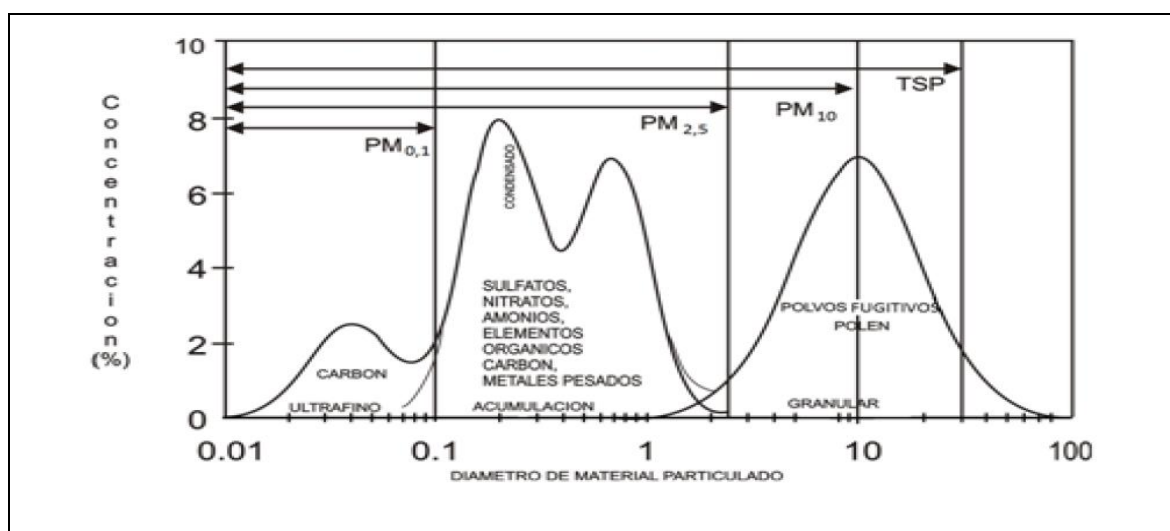


Figura 1: Tamaño de las partículas según su origen.

Fuente: Viana, (2003).

El aumento de partículas de contaminación atmosférica tienen una incidencia directa en la intensificación e incremento de las enfermedades respiratorias (Ware *et al.*, 1986; Schwartz *et al.*, 1993; Neas *et al.*, 1995; Romieu *et al.*, 1996; Sanhueza *et al.*, 2006; García-Chevesich *et al.*, 2014). Sin ir más lejos, el estudio realizado en Santiago de Chile por Ostro *et al.* (1996), estableció una cercana relación entre muertes y concentración de MP₁₀, las cuales eran independientes de las condiciones ambientales y de la estación del año. En dicho estudio, los autores observaron que el grupo de mayor riesgo son los hombres de edad avanzada. Por otra parte, autores como Schwartz *et al.* (1993) concluyeron que las exposiciones a diferentes concentraciones de material particulado estarían relacionadas con la incidencia de enfermedades respiratorias agudas, aumento de hospitalizaciones por enfermedades respiratorias y pérdidas de funciones del pulmón. Diferentes grados de exposición a estos contaminantes pueden estar asociados también a enfermedades como la bronquitis a pérdidas de funciones pulmonares e incluso asma en niños (Holland y Reid, 1965; Dockery *et al.*, 1989; Chestnut *et al.*, 1991).

En el marco de este gran problema, es importante conocer el marco teórico que engloba la generación del MP₁₀ proveniente del suelo y su relación con variables climáticas, el cual se describe a continuación.

1.1. Efectos de variables climáticas en la calidad del aire

La atmósfera tiene un espesor aproximado de 10.000 km, en la cual se encuentra la hidrósfera y la litósfera. Es en esta capa donde se produce el mayor intercambio de energía en el planeta (Cuadrat y Pita, 1997).

El clima de un lugar es el estado medio de la atmósfera en un periodo suficientemente largo, el cual típicamente consiste en unos 30 años o más de datos para su clasificación. La climatología es la ciencia que está encargada de observar la dinámica de la atmósfera; esta lo hace a través del análisis de los valores medios de las características meteorológicas (Alonso, 2000).

El clima influye de manera determinante en la permanencia de los contaminantes atmosféricos, por ejemplo: la temperatura, el viento y la radiación solar modifican la propagación y el tipo de contaminante que puede haber en un determinado momento (Alvarado *et al.*, 2010).

1.2. Emisión de material particulado

1.2.1. Material particulado proveniente del suelo

En cuanto a las fuentes del material particulado en la atmósfera, diferentes autores han concluido que éste proviene desde el suelo (Mitra y Sharma, 2002; Monkkonen *et al.*, 2004; Kupiainen y Pirjola, 2011; García-Chevesich *et al.*, 2014). Debido a la acción de la erosión hídrica, las partículas son desprendidas de sus lugares y viajan a través del flujo hídrico donde finalmente son depositadas en otros sitios, en el cual posteriormente, son suspendidas por la acción del viento natural o movimientos de vehículos. Además, existen otras actividades en las ciudades, como las construcciones, que aumentan la cantidad de polvo liberado a la atmósfera.

1.2.2. El fenómeno de la erosión

La erosión es el fenómeno por el cual las partículas del suelo se desprenden desde su lugar de origen viajando hasta otra posición (Govers *et al.*, 1990). Los tipos de procesos erosivos son los siguientes: erosión hídrica, erosión eólica, erosión por gravedad y erosión por hielo (García-Chevesich, 2015). Este proceso es la principal causa de pérdida del suelo (Wei *et al.*, 2006).

1.2.3. Proceso de erosión hídrica

Los agentes que actúan y propician la erosión hídrica son la masa y la energía que posee el flujo de agua. La erosión hídrica se clasifica en: erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión por flujo de lluvia y erosión de riachuelo (Brian, 1999; Pizarro *et al.*, 2009), además de la erosión costera (García-Chevesich, 2015).

Los sedimentos son partículas de suelo que viajan en suspensión a través del flujo hídrico en movimiento, lo cual puede ocurrir tanto en escurrimientos de ríos como en escorrentías por tormentas. El movimiento de traslado de partículas sólidas desde un lugar a otro es lo que se conoce como proceso de sedimentación (Ffolliott *et al.*, 2013).

Diversos estudios han concluido (Langbein y Schumm, 1958; García-Chevesich *et al.*, 2014) que hay una estrecha relación entre la precipitación y la producción natural de sedimentos. Esta relación establece que en sectores caracterizados por escasa o nula precipitación, como por ejemplo los desiertos, la producción es reducida. En zonas donde aumenta el monto de precipitación, la generación de sedimentos también lo hace de manera exponencial hasta llegar a un máximo de aproximadamente 300 Mg/km²/año, para una precipitación anual de 300 mm (Figura 2). Después, de los 300 mm, la sedimentación disminuye debido a que la cantidad de precipitación contribuye al crecimiento de vegetación. De acuerdo al estudio de García-Chevesich *et al.* (2014), en la zona centro sur de Chile se genera una gran cantidad de sedimentos, debido a su escasa cobertura vegetal (Figura 3).

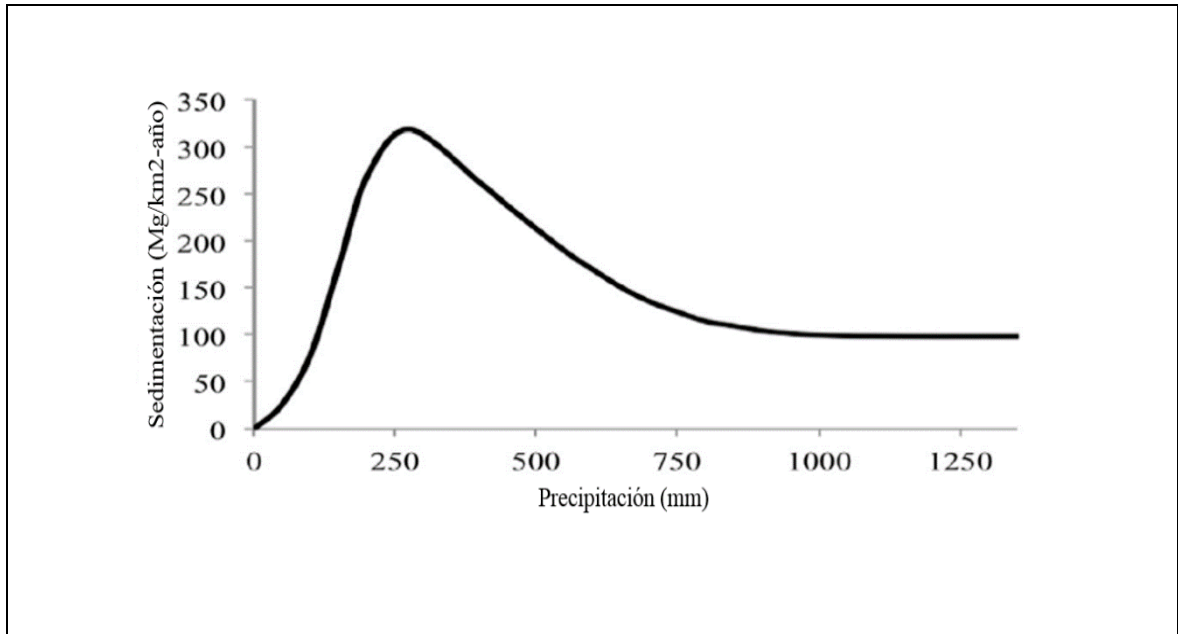


Figura 2: Influencia de la precipitación en producción de sedimentos.
Fuente: Langbein y Schumm, (1958).

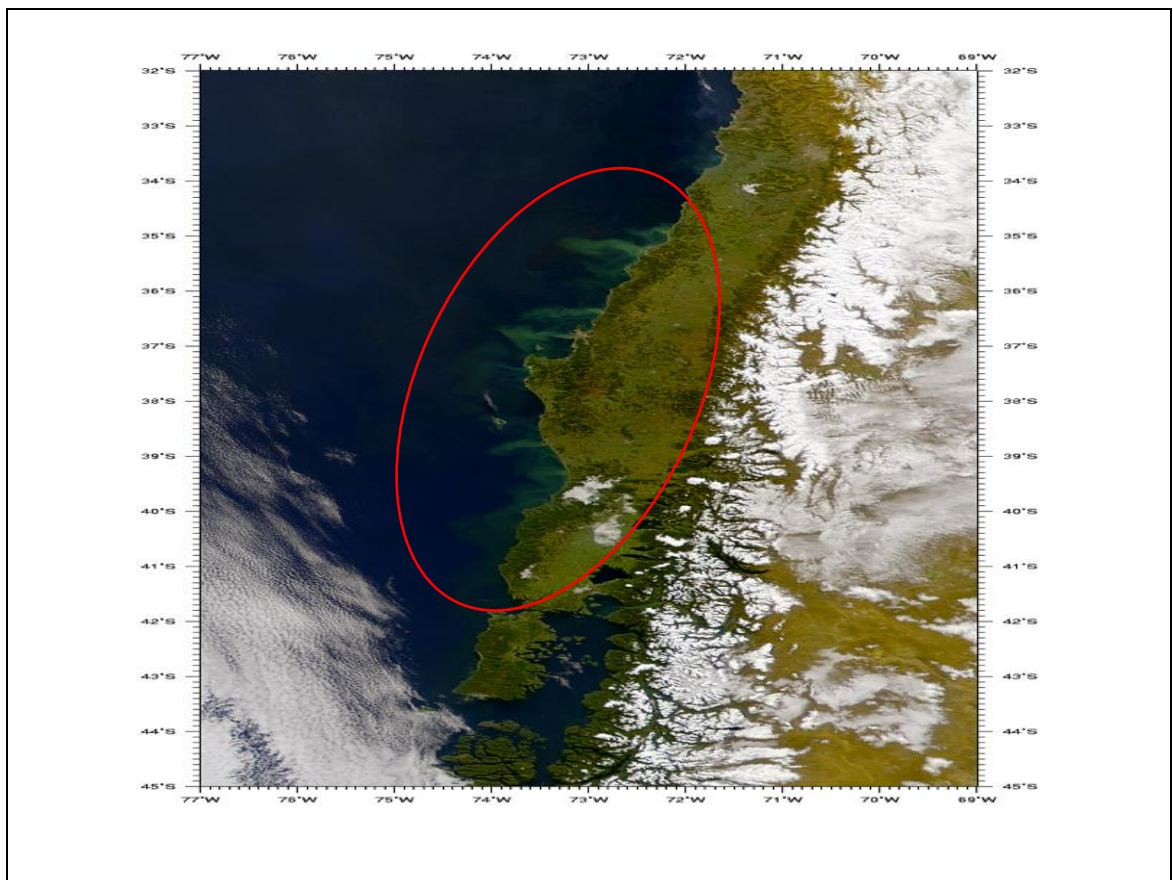


Figura 3: Sedimentos de desembocadura de ríos vertidos al océano en la zona centro sur de Chile.
Fuente: García-Chevesich, (2015).

1.2.4. Proceso de erosión eólica

Se distinguen tres tipos de mecanismos de erosión eólica debido a la acción del viento: rodamiento, saltación y suspensión. El rodamiento es el transporte de partículas grandes, la saltación es el transporte de las partículas medianas y la suspensión es el transporte de partículas pequeñas (Chepil, 1945).

Este tipo de erosión se da por dos tipos de procesos: el primero es la deflación, el cual es un desprendimiento de partículas sueltas en el suelo y su posterior transporte por la fuerza del viento. El segundo proceso corresponde a la abrasión, el cual corresponde al desprendimiento de partículas producto del impacto de sólidos en movimiento (Goudie, 2009; Laity y Bridges, 2009).

A pesar de que la deflación actúa sobre material predominantemente suelto y la abrasión actúa sobre material sólido, estos procesos pueden ocurrir de manera simultánea (Laity, 2011).

Una variable importante en la erosión eólica es la velocidad del viento. Dependiendo de la velocidad, el viento podrá desprender más partículas desde los diversos tipos de materiales presentes en el paisaje. El efecto de la velocidad del viento en la erosión depende de los obstáculos que se presenten en la superficie del suelo, como lo son las rocas o la vegetación. Estos materiales en general hacen disminuir la velocidad del viento dificultando el desprendimiento de partículas (García-Chevesich, 2015).

Finalmente, el proceso de sedimentación que define como el depósito de partículas sólidas en suspensión en un medio fluido, debido al efecto del transporte del viento (Goossens y Buck, 2010).

1.3. Dinámica de las partículas de MP₁₀

La fracción de MP₁₀ que proviene desde el suelo se genera en dos etapas: la primera comienza con el lavado de las partículas presentes en la atmósfera debido a la precipitación. Simultáneamente, la acción erosiva de las gotas de lluvia sobre el suelo desprenden partículas que al ser transportadas en el flujo hídrico forman agregados de mayor tamaño (García-Chevesich *et al.*, 2014).

La segunda etapa comienza con un aumento de la temperatura generando que este material depositado se seque y sea resuspendido por el efecto del viento. Al ocurrir eventos de precipitaciones, nuevamente se repite el ciclo generándose agregados de polvo de mayor tamaño que se depositan en el suelo, momento desde el cual la concentración del material particulado en el aire es cercano a cero (Amato *et al.*, 2012).

Si bien, diversos estudios han abordado la relación entre variables meteorológicas y la generación de MP₁₀ en distintos lugares del mundo, estos no evalúan el grado de asociación de variables climáticas, geográficas y vegetacionales con la generación de MP₁₀ a nivel global, por lo que sería interesante conocer el tipo de relación que poseen para poder generar medidas que mitiguen el aumento de material particulado en la atmósfera, (García-Chevesich *et al.*, En desarrollo).

1.4. Medidas de prevención de la generación de MP₁₀

Muchos países han establecido normas para controlar la cantidad de MP₁₀. Por ejemplo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció que las concentraciones diarias de MP₁₀ no debiesen exceder $50 \left(\mu\text{g}/\text{m}^3\right)$ (OMS, 2005). Sin embargo, cada país tiene sus diversas consideraciones, dependiendo de la política nacional y la información científica disponible en relación con la salud de la población (Sharratt y Edgar, 2011). En el caso de la Unión Europea (UE) se fijó que el valor de $150 \left(\mu\text{g}/\text{m}^3\right)$ no puede permanecer por más de un día, valor que se calculó tomando en cuenta el promedio diario de 3 años (Sharratt y Edgar, 2011). En el caso de Chile, en el año 2010, se formuló el Plan de Prevención y Descontaminación del Aire (PPDA), el cual estableció en $150 \left(\mu\text{g}/\text{m}^3\right)$ como norma diaria de calidad de aire. Similarmente, otros países han tomado medidas equivalentes para prevenir la generación de MP₁₀ a las que se suman la generación de áreas verdes, lavado y aspirado de calles.

En los Estados Unidos, el enfoque se ha centrado en la importancia de la generación de sedimentos como contaminante. Se han tomado medidas que tienden a minimizar la generación de sedimentos, lo que a su vez controla la cantidad de polvos fugitivos que son vertidos a la atmósfera en las ciudades. Entre las medidas de control de la generación de sedimentos, destacan la cubierta *mulching*, mallas de limo, biosólidos, hidrosiembra, biomantas, árboles protectores en zonas urbanas, entre otras (García-Chevesich, 2015).

Además, en los Estados Unidos, a través de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA), se creó en 1972 la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act). Esta ley establece las directrices de calidad de las aguas en todos los estados. Esta norma se enfoca en controlar diversos parámetros como por ejemplo: bacterias, pH, sustancias que requieren oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos, coliformes fecales, entre otras. Por otro lado, esta ley tiene como principio que todas las actividades antrópicas cercanas a los cuerpos de agua deben estar sujeta a pedir permisos a las autoridades correspondientes. Desde el año 1998, fecha en la cual se declaró al sedimento como contaminante, los cuerpos de agua han mejorado notablemente como también la calidad del aire (Figura 4) por la disminución de los polvos fugitivos que provenían desde los sedimentos (ya sea desde partículas del suelo como también desde los sitios de construcción). Un alcance importante de esta ley es que las medidas que se toman en lugares con una alta precipitación no funcionan en los lugares áridos o semiáridos y viceversa. Cada estado ha generado sus propias medidas de control de sedimentos. Un punto importante es que también fomenta la participación de todos los actores en las políticas de agua. También, fija montos de dinero para la creación de programas que ayuden a la prevención, reducción y eliminación de contaminantes del agua e investigación de la dinámica de los ecosistemas involucrados. La norma establece penas a quienes las infrinjan, las que pueden ir desde el pago de una multa de US\$250.000 a 15 años de cárcel (García-Chevesich *et al.*, 2018).

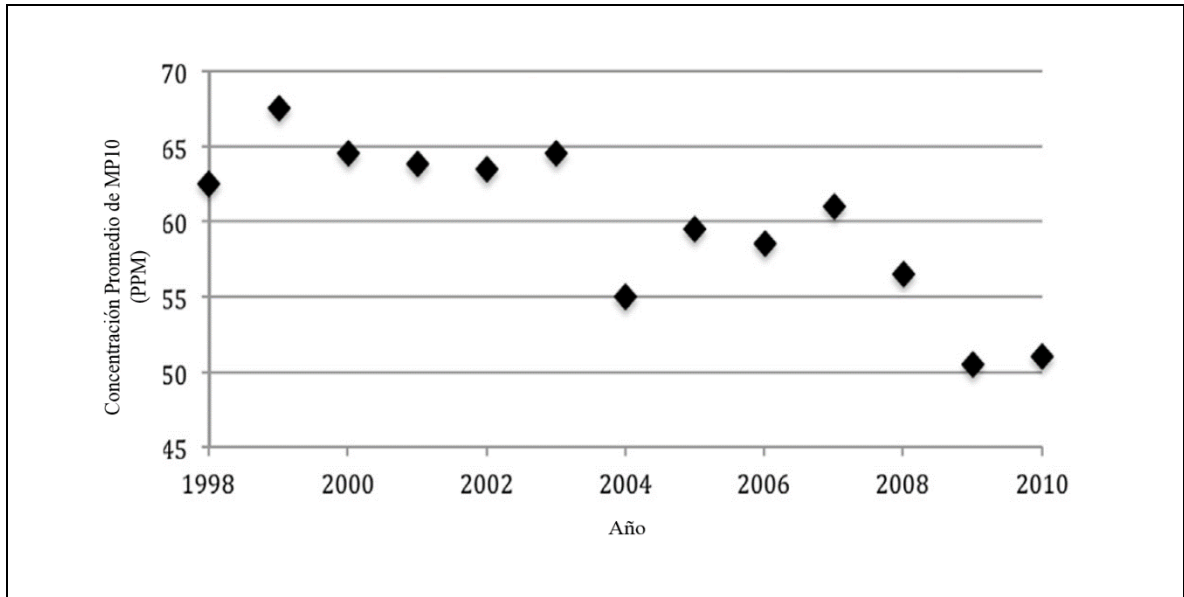


Figura 4: Cambio de la concentración de MP₁₀ en 279 ciudades, Estados Unidos.
Fuente: García-Chevesich *et al.*, (2014).

En Chile, se han tomado medidas, como la creación de áreas verdes en lugares donde hay un déficit vegetacional a través de instrumentos de fomento para atraer la inversión pública y privada. Además, el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica estableció el lavado, aspirado de calles, estabilización de bermas y bandejones como medidas de mitigación de generación de polvos fugitivos (Secretaría General de la República, 2010).

1.5. Estudios en Chile

En el caso chileno, García-Chevesich *et al.* (En desarrollo) estableció que hay una clara relación entre las variables climáticas (temperatura promedio anual, latitud y la precipitación) y la concentración de MP₁₀ en un estudio que evaluó 15 ciudades que pertenecen a un amplio rango de latitud (Figura 5). Según este estudio, para evitar los procesos de sedimentación (el desprendimiento de las partículas, transporte, depósito con su posterior erosión por el viento) hay que enfocar las medidas en lugares concretos.

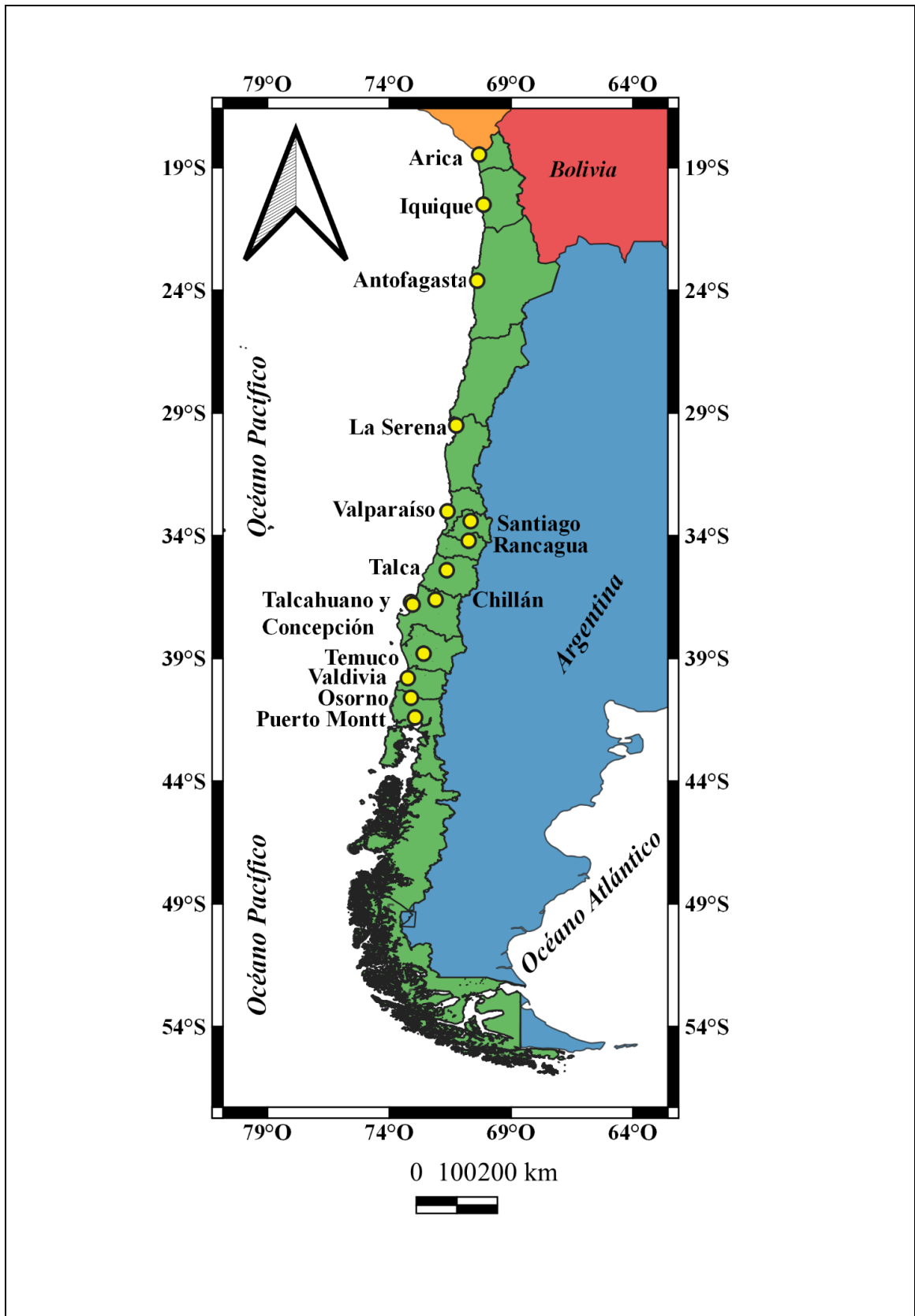


Figura 5: Ciudades estudiadas (MP₁₀) en Chile.

A la luz de toda la información expuesta anteriormente, la generación de MP_{10} en ciudades podría estar influenciada por las variables climáticas y geográficas (latitud, precipitaciones, la temperatura, entre otras) (Figura 6) lo que es apoyado por numerosos autores (Davis y Gay, 1993; Baumbach y Vogh, 1999; Pérez y Reyes, 2002; Termonia y Quinet, 2004; Alvarado *et al.*, 2010).

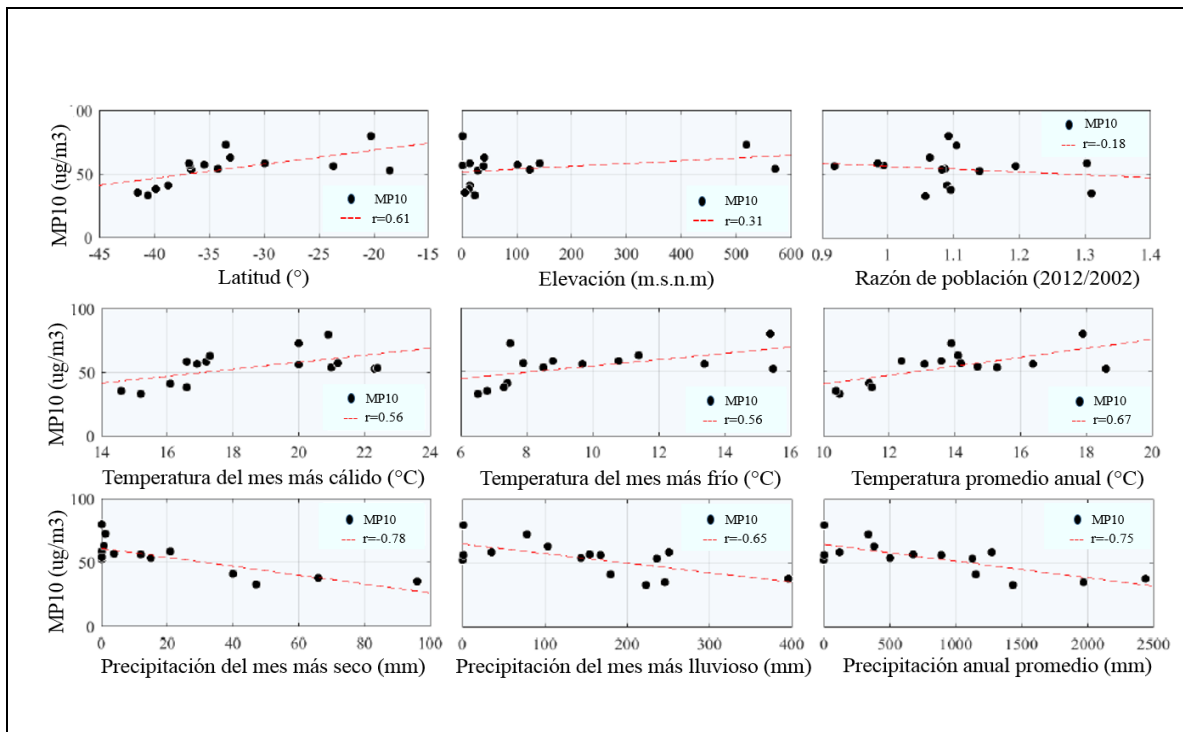


Figura 6: Relaciones entre variables climáticas y MP_{10} en 15 ciudades en Chile.

Fuente: García-Chevesich *et al.*, (En desarrollo).

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

Determinar la relación existente entre variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la concentración de MP_{10} en distintas ciudades del mundo.

1.6.2. Objetivos específicos

- Crear una base de datos de caracterización climática, geográfica, vegetacional y de MP_{10} en distintas ciudades del mundo.
- Identificar la relación entre variables climáticas y de concentración de MP_{10} , para las clasificaciones realizadas.
- Identificar la relación entre variables vegetacionales y geográficas con la concentración de MP_{10} .

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

Para realizar este estudio se utilizó información de concentración de material particulado (MP_{10}) recopilada por el Banco Mundial (Banco Mundial, 2011) en 3.226 ciudades del mundo para el año 1999. Dicha base de datos fue levantada por el Banco Mundial en el contexto del desarrollo de un modelo global de partículas ambientales para ser utilizada por países en desarrollo para el control de la contaminación atmosférica. De entre las 3.226 ciudades levantadas, el presente estudio consideró los datos de aquellas ciudades que tuvieran toda la información tanto climática como geográfica disponible, resultando 2.568 ciudades con poblaciones mayores a 100.000 habitantes (Figura 7).

Asimismo, se recopiló información de variables climáticas que caracterizan las distintas zonas de acuerdo a la clasificación Köppen (Kottek *et al.*, 2006). Estas variables son: temperatura promedio anual, velocidad máxima del viento y precipitación media anual, todas del año 1999. Estos datos se obtuvieron desde la base de datos del producto de reanálisis ERA Interim (Dee *et al.*, 2011). Por otra parte, se obtuvo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) del año 1999, a partir de imágenes Gimms, de tamaño de pixel 4 km² aproximadamente, provenientes de la NASA (2019) y clasificación climática de ciudades obtenida desde Kottek *et al.* (2006). La información de latitud y longitud se obtuvo desde Google Earth Pro.

2.2. Método

Se utilizó el programa Microsoft Excel 2013 con el objetivo de completar una base de datos con la información climática, geográfica y vegetacional. Esta se estructura por medio de las variables concentración de material particulado (MP_{10}), número de habitantes, temperatura promedio anual, velocidad máxima del viento, precipitación media anual, NDVI, latitud y clasificación climática según Köppen-Geiger (1954).

Una vez creada la base de datos se procedió a agrupar las ciudades por clasificación climática, para lo cual se definieron cuatro grandes zonas climáticas: ecuatoriales, secos, templados y fríos. Lo anterior se realizó a través del software estadístico R mediante los paquetes XLconnectsJars, XLconnects, Ggplot2 y Corplot.

Finalmente, se procedió a la determinación de regresiones lineales simples entre todas las variables climáticas, geográficas y vegetacionales con la concentración de material particulado (MP_{10}) en el software estadístico R. Posteriormente, se realizaron gráficos donde el eje de las abscisas corresponde a las variables climáticas, geográficas y vegetacionales, en tanto, en el eje de las ordenadas, se presenta la variable dependiente, es decir, la concentración de material particulado.

Para evaluar la relación entre cada variable y la concentración de material particulado, se observó el valor p de cada regresión (Canavos, 1988; Devore, 2008), además, se consideró el coeficiente de correlación de Pearson para comprobar el tipo y grado de correlación.

Con esta información, se seleccionaron las variables que tienen relación con la concentración (valor $p < 10\%$) de material particulado en las diversas zonas. Igualmente, se correlacionaron las variables climáticas, geográficas y vegetacionales con el material particulado a través de zonas climáticas donde se determinó su significancia estadística junto con el coeficiente de correlación de Pearson (ρ).

Finalmente, se calculó una matriz de correlación con todas las variables (exceptuando concentración de MP_{10} y población pues la población no influye de gran manera en el clima), para conocer si están relacionadas entre ellas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Creación de la base de datos

Se recolectó información de concentración de material particulado, población, temperatura media anual, precipitación media anual, velocidad máxima anual del viento, latitud, NDVI y clasificación climática en 2.568 ciudades del mundo (Figura 7).

Los criterios de clasificación de cada zona climática se muestran a continuación (Cuadro 1).

Cuadro 1: Criterios de clasificación de las zonas climáticas.

Tipo climático	Característica
Zona A (Climas ecuatoriales)	Temperatura mínima del mes más frío mayor a + 18 °C
Zona B (Climas secos)	Precipitación anual es menor que $10 \cdot P_{th}$ (mm) ¹
Zona C (Climas templados)	Temperatura mínima del mes más frío es mayor a -3°C y menor a 18°C
Zona D (Climas fríos)	Temperatura mínima del mes más frío es menor o igual a -3°C

Fuente: Kottek *et al.*, (2006).

En la Figura 7 se expone la localización geográfica de las ciudades examinadas en el estudio. Estas se clasifican en las zonas climáticas descritas en el Cuadro 1. Según esta base, las ciudades de la Zona A se encuentran bordeando la latitud 0°, distribuyéndose en América del sur, el Caribe, África ecuatorial, el Sudeste asiático y el norte del continente oceánico. Las ciudades de la Zona B poseen una distribución más heterogénea ya que se encuentran en el continente americano, en África, en el Oriente medio y Asia central. La zona C, de clima templado, está representada por varias ciudades dispersas por América, gran parte de Europa, África meridional y Asia oriental. Por último, la Zona D son ciudades que solo están presentes en el hemisferio norte, en territorios de América del norte, Europa meridional, Siberia y el noreste de Asia.

¹ P_{th} es una función la cual depende de cómo se distribuyen los montos de precipitación durante el año y de la temperatura anual: $P_{th}=2|Temperatura\ promedio\ anual\ (^{\circ}C)|$, si 2/3 de la precipitación ocurre en invierno; $P_{th}=2|Temperatura\ promedio\ anual\ (^{\circ}C)|+28$, si 2/3 de la precipitación ocurre en verano; $P_{th}=2|Temperatura\ promedio\ anual\ (^{\circ}C)|+14$, si ocurre de cualquier otra forma.

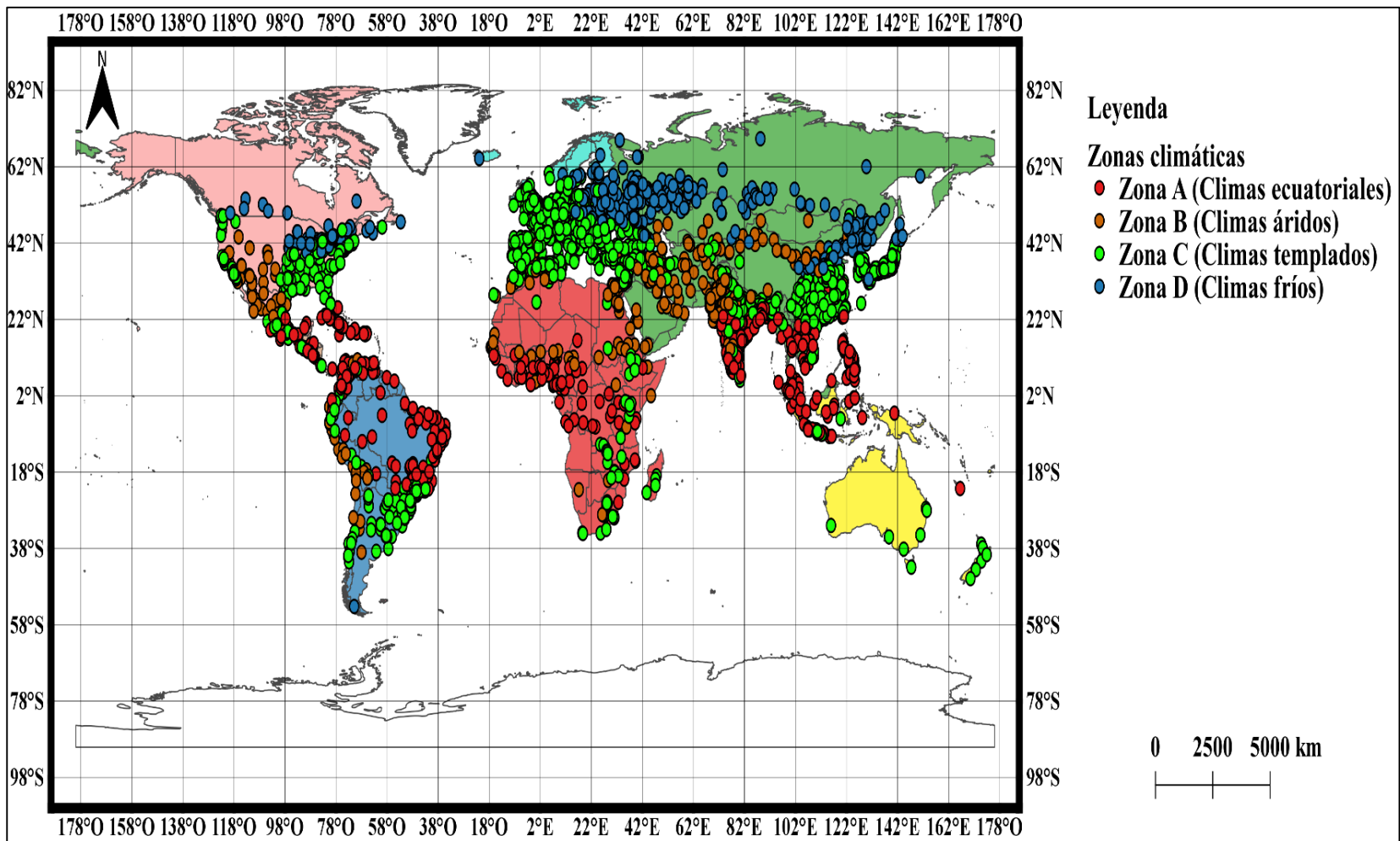


Figura 7: Localización de las ciudades utilizadas en el estudio.

En la Figura 8 se aprecia la cantidad de material particulado de las ciudades seleccionadas catastradas por el Banco Mundial en el año 1999. Para facilitar la observación, las ciudades se han dividido en 5 tramos de material particulado, observándose que las urbes que poseen una mayor concentración de MP₁₀ están, presumiblemente, en el continente en parte del Africano y en el norte de India. Algunos autores han relacionado la alta concentración de MP₁₀ en la degradación del medio ambiente que se ha producido en esta zona (Dasgupta *et al.*, 2005; Mikati *et al.*, 2018).

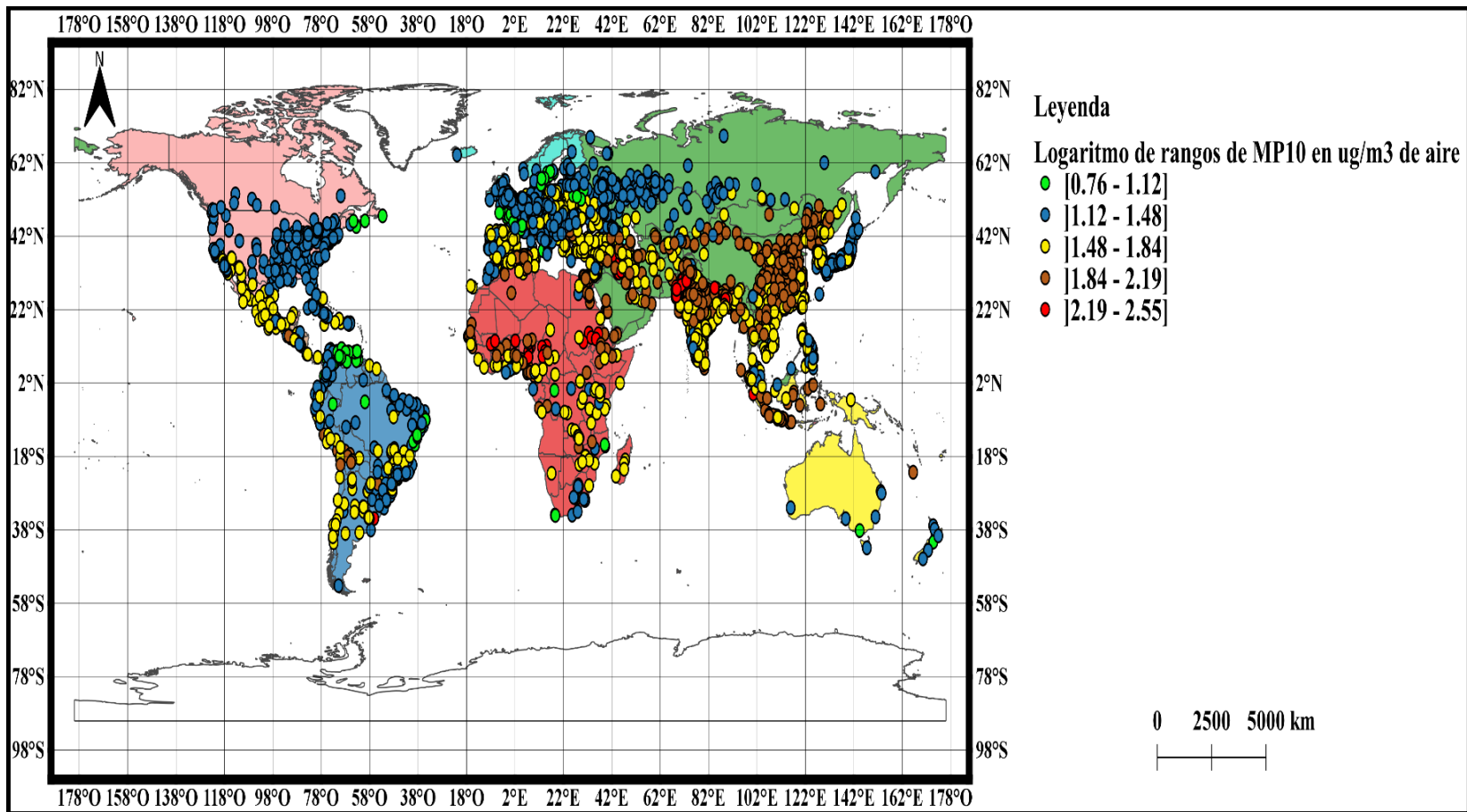


Figura 8: Rangos de material particulado en las ciudades del estudio.

3.2. Análisis de datos climáticos, geográficos, vegetacionales y de concentración de material particulado

3.2.1. Zona ecuatorial

En la Figura 9, se aprecia la relación entre material particulado y las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona ecuatorial (Zona A). Se observa que la variable población tiene una correlación positiva con el MP_{10} ($p < 0,001$, $\rho = 0,1$). Este resultado concuerda con lo hallado por (Vargas, 2012), en el que las actividades diarias humanas, como por ejemplo la construcción de edificaciones, actividades agrícolas y movimiento de vehículos, son focos de generación de polvo y sedimentos que posteriormente son elevados a la atmósfera por la acción erosiva del viento (Kasumba *et al.*, 2011).

En el caso de la precipitación media anual, se observa que hay una relación negativa con respecto a la cantidad de material particulado y es estadísticamente significativa ($p < 0,001$). Este hallazgo está en concordancia con lo analizado por Amato *et al.* (2012) y Blanco *et al.* (2015). Dichos estudios identifican que la precipitación tiene un efecto de barrido de muchos contaminantes de la atmósfera, es por ello que la cantidad de material particulado disminuye llegando a cero cuando la lluvia es intensa. Por otra parte, la precipitación contribuye en el aumento de la concentración y generación de sedimentos y material particulado potencial (Parker y Fossum, 2000).

En el caso de la velocidad máxima del viento, la regresión indica que existe una relación negativa con el MP_{10} ($p < 0,01$, $\rho = -0,1$). Estos resultados coinciden con lo observado por Giri *et al.* (2007). En general, los vientos ayudan a la dispersión de los contaminantes, por lo tanto, una mayor velocidad puede provocar el transporte y movimiento del MP_{10} hacia otros sectores. A pesar de lo anterior, la capacidad de limpieza del viento depende de la dirección y topografía del lugar, ya que montañas o cerros provocan un factor de barrera en que disminuye la ventilación de una localidad (Alvarado *et al.*, 2010).

En el caso de la latitud, ésta tiene una correlación positiva con el MP_{10} ($p < 0,001$ $\rho = 0,1$). Según García-Chevesich *et al.* (2014), se observa que con un aumento de la latitud, se producen una menor cantidad de sedimentos debido al aumento de especies vegetales que cubren el suelo, lo cual previene la generación de estas partículas que viajan a las ciudades, por lo tanto, disminuye la cantidad de MP_{10} . Esta aserveción coincide con lo analizado en este estudio.

El gráfico que relaciona NDVI con el MP_{10} de la Figura 9 muestra una relación negativa y estadísticamente significativa ($p < 0,001$, $\rho = -0,2$). Estos resultados están en concordancia con lo hallado por Burri *et al.* (2011). Este fenómeno se explica porque la vegetación genera barreras que impiden que el material particulado avance por el aire ya que actúa como una especie de barrera que retiene las partículas más gruesas. Por otro lado, también previene la elevación de partículas del suelo, pues constituye una barrera frente al flujo de MP_{10} (FAO, 2019).

En el caso de la temperatura, se observa una relación positiva con el MP_{10} ($p < 0,001$, $\rho = 0,2$), lo cual se estima podría estar correlacionado con la latitud, pero que no tiene una incidencia directa con la concentración de MP_{10} .

El análisis por discretización poblacional y tipo climático de estas variables se encuentra detallado desde el Apéndice I al X. Además, en los Anexos I y II se encuentra la nomenclatura utilizada en los Apéndices.

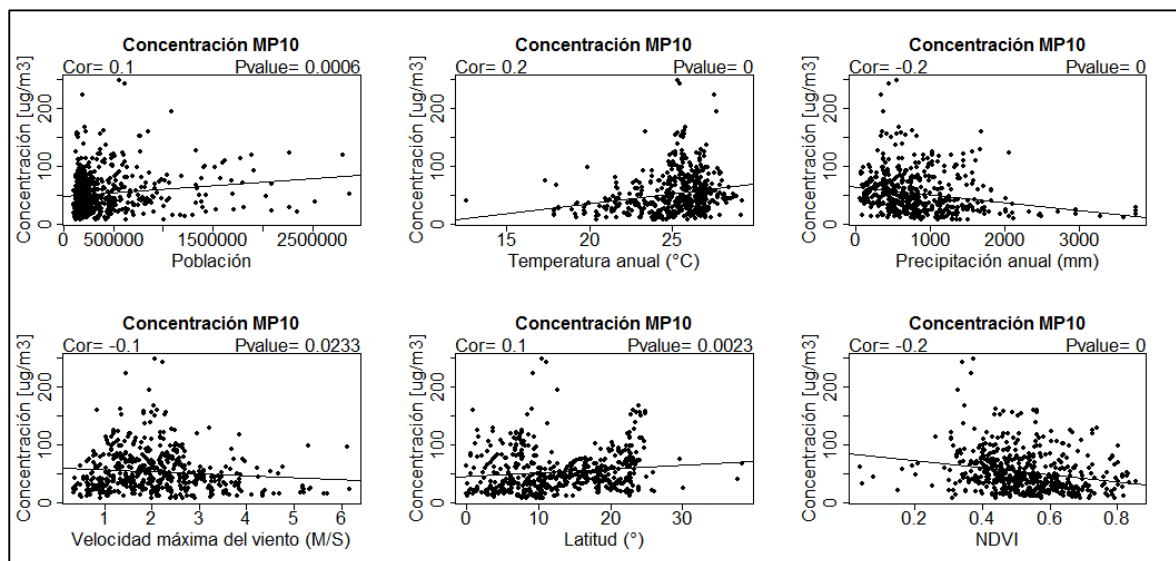


Figura 9: Relación del material particulado (MP₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona ecuatorial (Zona A).

3.2.2. Zona árida

La Figura 10 resume el comportamiento del MP₁₀ con respecto a la tendencia de las variables en estudio en la zona árida. En este caso, se observa que la variable de población no tiene una relación estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p > 0,1$). La población influye a través de sus diversas fuentes de contaminación como lo son el levantamiento de polvo, las industrias, construcciones, entre otras.

En el caso de la precipitación anual, se observó una correlación negativa con la concentración de material particulado ($p < 0,01$, $\rho = -0,2$). Tales resultados son similares a los hallados por Kim *et al.* (2014), por ende, nuevamente se corrobora que la precipitación tiene un efecto de lavado de las partículas que están en suspensión en el aire; las concentraciones de MP₁₀ disminuyen luego de algunas horas de tormentas (Amato *et al.*, 2012). En esta zona es muy común la generación de sedimentos debido a la escasa cobertura vegetal (García-Chevesich *et al.*, 2014).

Se observa una relación significativa entre el MP₁₀ y el viento en la zona árida ($p < 0,1$, $\rho = 0,1$). Estos resultados son similares a lo publicado por Csavina *et al.* (2014) quien relaciona la velocidad del viento con la concentración de material particulado.

En el caso de la latitud, el valor p de la correlación indica que la relación con el material particulado es significativa ($p < 0,1$, $\rho = -0,1$), por lo que existe una relación. Esto está en concordancia a lo hallado por García-Chevesich *et al.* (2014), quienes presumen que la latitud influye en la concentración de material particulado por la generación de cobertura vegetal, producto del aumento de las precipitaciones que se produce al aumentar la latitud.

En el caso del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), en la zona árida se observa una relación no significativa con el MP₁₀ ($p > 0,1$, $\rho = 0,1$). La no correlación se debe a que en zonas climáticas áridas hay una escasa cobertura vegetal (Park *et al.*, 2010).

Para la temperatura media anual, nuevamente se vuelve a observar una relación positiva con el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = 0,4$).

El análisis por discretización poblacional y tipo climático de estas variables se encuentra detallado desde el Apéndice XI al XX. Además, en los Anexos I y II se encuentra la nomenclatura utilizada en los Apéndices.

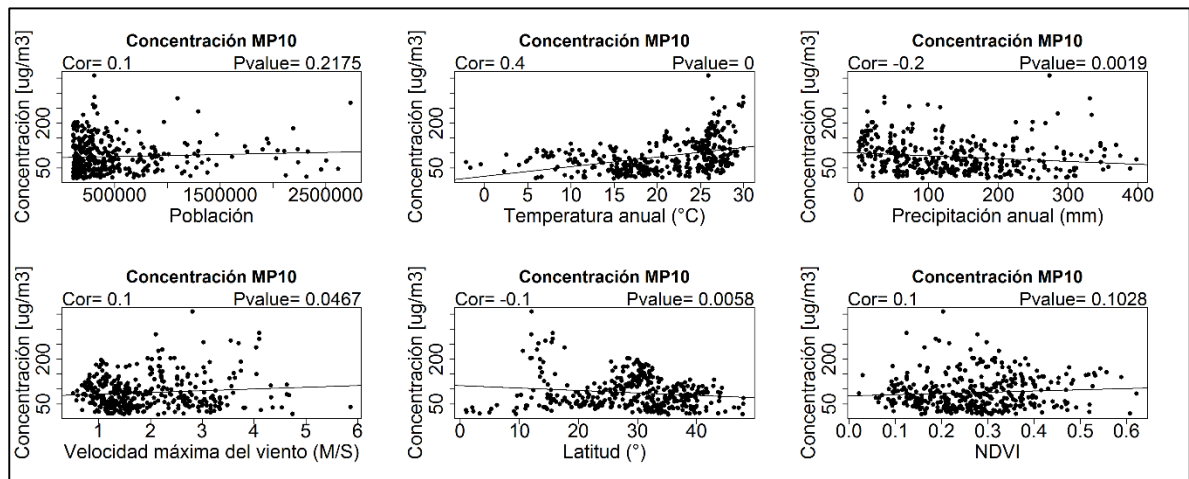


Figura 10: Relación del material particulado (MP₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona árida (Zona B).

3.2.3. Zona templada

En la Figura 11, se observa una vez más que la relación entre la población y el material particulado es significativa ($p < 0,001$, $\rho = 0,3$). Esta tendencia es similar a la encontrada por Mazzei *et al.*, (2008), en donde la población genera un aumento de material particulado (MP₁₀) debido a actividades como emisiones industriales, movimiento de tierra y generación de polvo en las calles, lo cual se magnifica posteriormente dada la elevación producto de la erosión eólica, tanto de tipo natural como antrópica.

En la precipitación media anual se observa que la relación es estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = -0,1$). Esto demuestra que la precipitación tiene un efecto mitigador de la cantidad de MP₁₀ que pueda ingresar a la atmósfera mediante el lavado súbito de los contaminantes durante los periodos de ocurrencia de lluvias. Estos resultados también concuerdan con lo encontrado por Zhang *et al.* (2017). Además, se observa el mismo efecto de resuspensión del polvo por las variaciones de humedad descritas por Amato *et al.* (2012).

En el caso de la velocidad media máxima del viento, se observa una relación negativa estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = -0,2$) lo que indica que el material particulado es mayor cuando la velocidad del viento es baja y menor cuando la velocidad del

viento es alta. Esto se debe a que cuando el viento trae más energía, ayuda a mover más partículas a distancias más lejanas, por lo que limpia el aire de la ciudad. Esto está en concordancia con los resultados hallados por Clements *et al.* (2016). Cuando se dan condiciones de calma ambiental, las bajas velocidades del viento generan condiciones propicias para que los contaminantes se mantengan suspendidos en la atmósfera (Hildebrandt y Pokhrel, 2002).

La latitud muestra una relación negativa estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = -0,4$). Esto podría deberse a que el aumento de latitud está relacionado con cambios en la precipitación (aumentos), y aumentos del revestimiento de cobertura vegetal durante largos períodos del año, lo que a su vez genera condiciones poco favorables para la producción de sedimentos (García-Chevesich *et al.*, 2014).

En el caso del NDVI, el gráfico de la Figura 11 revela que esta variable en la zona templada tiene una relación negativa, estadísticamente significativa con la concentración de material particulado ($p < 0,001$, $\rho = -0,3$). Estos resultados guardan relación con el rol protector que juega la vegetación en la prevención de la erosión y por ende, de la generación de material particulado. Como se indicó anteriormente, cuando la vegetación al cubrir más espacios y estar presente por más tiempo, previene la generación de MP₁₀. Estos hallazgos concuerdan con los trabajos de Xuan (1999) y Li *et al.* (2008).

En el caso de la temperatura media anual, el análisis arroja una relación estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = 0,5$). Esta tendencia podría estar relacionada a la correlación que presenta la latitud con la temperatura, y por ende ser una manifestación de la relación existente entre latitud y MP₁₀.

El análisis por discretización poblacional y tipo climático de estas variables se encuentra detallado desde el Apéndice XXI al XXXVIII. Además, en los Anexos I y II se encuentra la nomenclatura utilizada en los Apéndices.

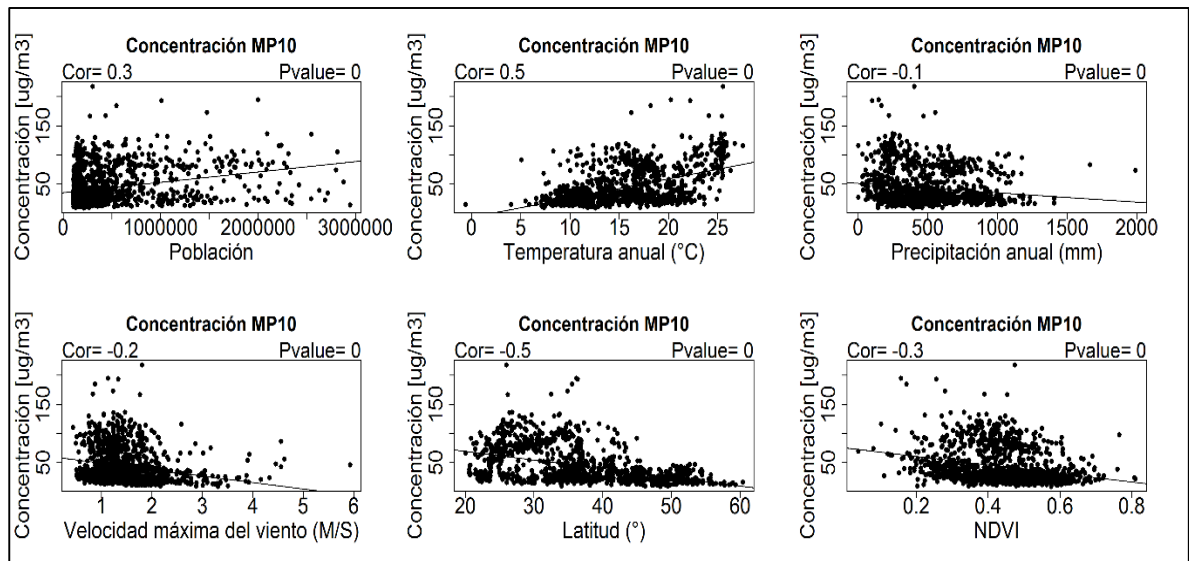


Figura 11: Relación del material particulado (MP₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona templada (Zona C).

3.2.4. Zona fría

En la Figura 12 se exponen gráficamente los resultados de la zona climática fría. El gráfico de población indica que existe una relación positiva entre la población y el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = 0,4$). Estos resultados son similares con los reportados por Kasumba *et al.* (2011) donde se indica que la cantidad de material particulado aumenta debido a las diversas actividades antropogénicas.

En el caso de la precipitación en zonas frías, el gráfico arroja que está estadísticamente relacionada con el material particulado ($p < 0,001$, $\rho = -0,2$). Estos resultados concuerdan con los encontrados por Blanco *et al.* (2015), por lo que la precipitación sigue incitando un efecto de barrido, lo que también se ha observado en las otras zonas climáticas.

Para la velocidad media máxima del viento, se observa una relación significativa y negativa con el MP₁₀ ($p < 0,1$, $\rho = -0,2$). Esto significa que el viento cuando alcanza grandes velocidades es capaz de movilizar y transportar todos los contaminantes del aire debido a su gran poder de arrastre. Esto coincide con lo hallado por Gugamsetty *et al.* (2012).

Para la latitud, se observa una tendencia estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p < 0,001$, $\rho = -0,5$). Esto indica que cuando las ciudades se acercan más hacia la antártica o hacia el ártico tendrán una menor cantidad de material particulado, ya que según García-Chevesich *et al.* (2014) cuando las precipitaciones aumentan, estimula a que haya una mayor cobertura vegetal que mantenga el suelo protegido de la erosión hídrica y eólica, lo que hará que no se generen sedimentos que lleguen a las ciudades, y que posteriormente sean erosionados eólicamente.

En el caso del NDVI, también se observa una relación estadísticamente significativa con el MP₁₀ ($p < 0,1$, $\rho = -0,3$). Esto indica que al igual que las otras zonas climáticas, la vegetación disminuye la cantidad de material particulado por su acción preventiva contra la erosión del suelo, ya que actúa como una cubierta protectora de la lluvia incidente. También funciona como cortina cortavientos que provee de rugosidad superficial al viento, disminuyendo su velocidad al restarle poder erosivo (Guan *et al.*, 2017).

En el caso de la temperatura anual, se observa una relación significativa con el MP₁₀ ($p < 0,1$, $\rho = 0,2$). La tendencia se explica porque la temperatura anual tiene una relación con la latitud, pero que no se obtuvo un efecto directo sobre la concentración de MP₁₀.

El análisis por discretización poblacional y tipo climático de estas variables se encuentra detallado desde el Apéndice XXXIX al XXXXIV. Además, en los Anexos I y II se encuentra la nomenclatura utilizada en los Apéndices.

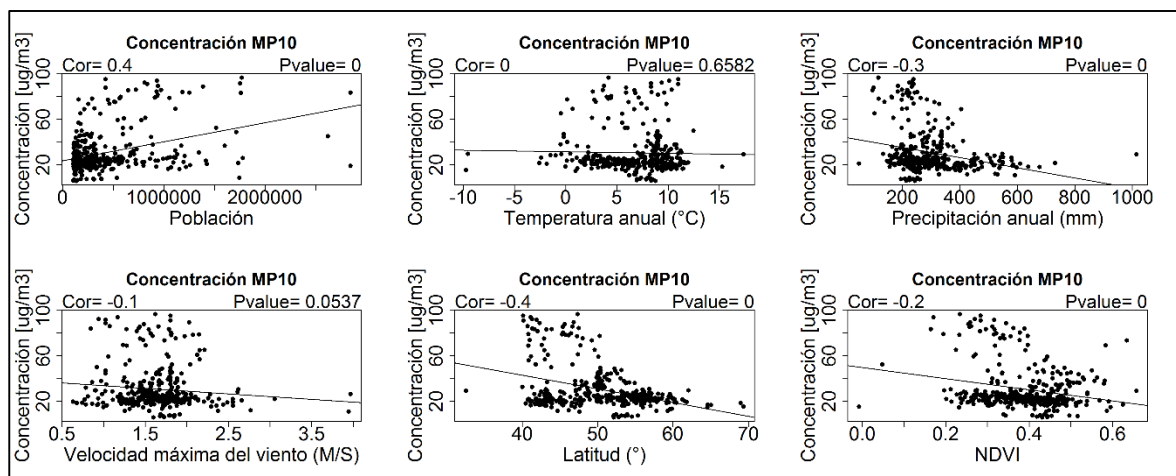


Figura 12: Relación del material particulado (MP₁₀) con las variables climáticas, geográficas y vegetacionales en la zona fría (Zona D).

3.3. Análisis de correlación entre variables

La Figura 13 muestra los resultados de la correlación entre las variables del estudio (se excluye concentración de MP₁₀ por ya haber trabajado con ella, y la población por no tener en general una influencia en las variables climáticas).

En la primera fila, se puede observar que la latitud tiene una baja correlación con el índice de vegetación de diferencia normalizada ($\rho = -0,19$). Esta relación se explica porque la tendencia entre ambas no es lineal, en bajas latitudes hay una gran cantidad de vegetación. Posteriormente, este conjunto de vegetación disminuye ya que se avanza hacia condiciones áridas. Al entrar en las zonas templada y frías, la vegetación vuelve a aumentar para disminuir en las zonas de hielo (Zona E; Ichii *et al.*, 2002).

En el caso de la precipitación anual y la latitud se observa una tendencia negativa. Esto indicaría que al disminuir la latitud, la precipitación aumenta. Esto está directamente asociado con los resultados de Cuadrat y Pita (1997).

En el caso de la temperatura media anual y la latitud se observa que hay una correlación negativa ($\rho = -0,85$), debido a que a mayores latitudes la temperatura es menor. Este resultado es coherente ya que la luz solar llega a los trópicos donde se hallan zonas cálidas y áridas. Al aumentar la latitud, la temperatura que le proporciona la luz solar a las masas de aire es cada vez menor, patrón que prosigue hasta llegar a los polos (Cuadrat y Pita, 1997).

En el caso de la velocidad media máxima del viento con la latitud, se observa una baja correlación negativa ($\rho = -0,17$). Este resultado indica que al disminuir la latitud, la velocidad del viento aumenta. La baja correlación corrobora que el viento dependerá de muchos factores entre los cuales destacan la posición geográfica, el periodo del año y la topografía.

En el caso de la precipitación anual y el NDVI, la Figura 13 indica que hay una relación positiva ($\rho = 0,5$). Esta relación ha sido observada por otros investigadores (Ichii *et al.*, 2002; García-Chevesich *et al.*, 2014), lo cual indica que al aumentar la precipitación, aumenta la

cantidad de vegetación que cubren los suelos. Este resultado respalda los resultados presentados en este trabajo, remarcando que en general las ciudades que están a mayores latitudes poseen una menor cantidad de material particulado.

Para la relación entre temperatura anual y NDVI se obtuvo una correlación baja ($\rho = 0,13$). Esta relación está en concordancia con los resultados divulgados por Ichii *et al.*, (2002), allí se estudia que algunos lugares se observa un aumento de la cantidad de vegetación con el aumento de la temperatura (zonas templadas), pero también en otros lugares se registra una reducción de la cobertura vegetal (zonas áridas) con el aumento de temperatura. En general, estas relaciones no son lineales, son multifactoriales (Ichii *et al.*, 2002).

La correlación entre la velocidad máxima del viento y el NDVI fue muy baja ($\rho = 0,03$), lo que indica que la velocidad máxima del viento no afecta a la vegetación. Estos resultados se deben a que la vegetación se encuentra relacionada con la precipitación, humedad y temperatura.

En el caso de la temperatura anual y la precipitación anual, los datos indican que tienen una correlación positiva ($\rho = 0,22$) patrón que está de acuerdo con los encontrados por Madden y Williams, (1978). Sin embargo, estos mismos autores encontraron correlaciones negativas en diferentes lugares y estaciones, lo que hace notar la complejidad de estas relaciones a grandes escalas.

En el caso de la velocidad media máxima del viento y la precipitación anual, se puede apreciar una baja correlación ($\rho = -0,1$), lo cual es respaldado por estudios como Back y Bretherton, (2005). Estos autores encontraron una relación baja entre la precipitación y la velocidad del viento. Los resultados se deben a que se analizó un dato puntual de un solo año, sin embargo, estos procesos actúan a escalas distintas que no se consideraron en el presente estudio.

Finalmente, en el caso de la velocidad máxima del viento y la temperatura anual, se observa una correlación negativa ($\rho = -0,28$), lo cual es similar a lo hallado por (Fujibe, 2009), quien encontró correlaciones negativas entre la velocidad del viento y la temperatura. Sin embargo, el autor remarca que esta relación depende de la escala con la que se está evaluando, la ubicación geográfica y la topografía del lugar. Al igual que en el caso anterior, los resultados se deben a que se analizó un dato puntual, sin embargo, estos procesos actúan a escalas distintas.

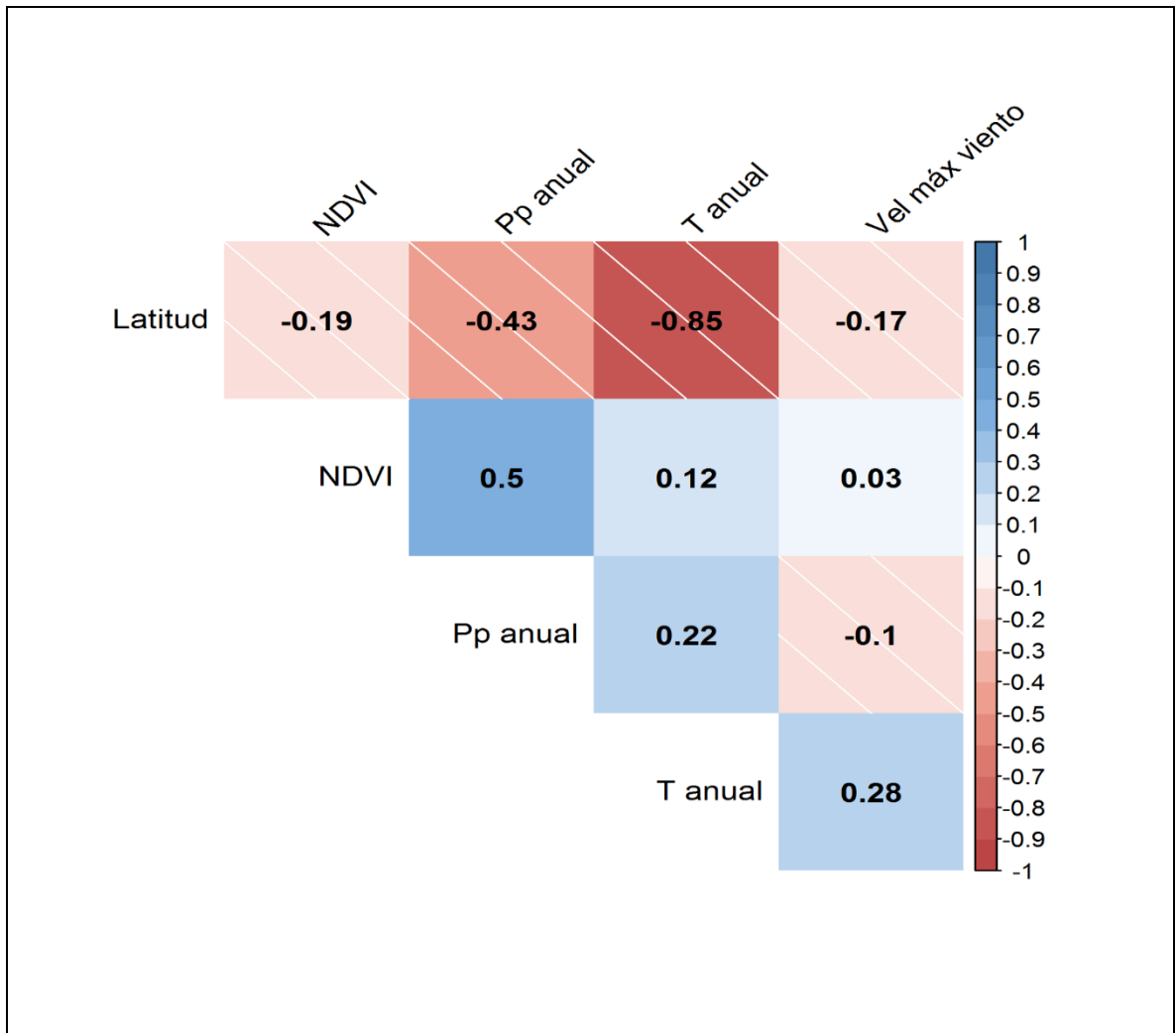


Figura 13: Matriz de correlación entre variables del estudio.

4. CONCLUSIONES

Se creó una base de datos con información de caracterización a través de variables climáticas, vegetacionales y geográficas de 2568 ciudades que permitió identificar distintas relaciones de las variables antes mencionadas con la generación de material particulado en las diferentes zonas climáticas.

De acuerdo a los resultados y análisis presentados en este proyecto, se concluye que:

La precipitación promedio anual muestra una tendencia negativa en todas las zonas climáticas, y una correlación negativa con el MP₁₀. Esto demuestra que la precipitación siempre mejorará la calidad del aire.

En el caso de velocidad máxima anual y latitud, se observa una tendencia negativa con diferentes grados de asociación en la mayoría de las zonas climáticas. Esto indica que al aumentar el valor de estas variables, las ciudades tendrán una menor concentración de MP₁₀.

Es importante notar que la influencia de la variable NDVI en la concentración de MP₁₀ fue consistente y negativa en todas las zonas climáticas analizadas. Se obtuvieron coeficientes de correlación significativos en ciudades de todos los tipos climáticos, con excepción de la zona climática árida pues ésta no presenta una gran cobertura vegetal. Este resultado es particularmente importante para la planificación de medidas de mitigación, pues indicaría que aumento de áreas forestadas favorecerían la descontaminación atmosférica.

Además de mitigar la contaminación del aire, la prevención de la generación de sedimentos mediante la vegetación conlleva múltiples otros beneficios como lo son disminución de las pérdidas ecológicas y económicas asociadas al arrastre de partículas del suelo.

En cuanto a población, se observa una tendencia positiva en la mayoría de las zonas climáticas, pero mostrando diferentes grados de asociación con la concentración de material particulado en distintas zonas climáticas.

Finalmente, es importante recalcar que las variables que definen el clima de una zona y las variables vegetacionales están relacionadas con la cantidad de material particulado presente en la atmósfera. Las condiciones climáticas juegan un rol fundamental en la calidad del aire ya que estas pueden fomentar o atenuar la cantidad de MP₁₀ en ésta. La influencia del factor climático es variable y depende de características como: zona climática, estación del año, topografía del lugar, entre otras. La fuerza de la relación de cada variable climática, geográfica y vegetacional será distinta en cada zona climática independientemente de las tendencias generales.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso, F. 2000. Definición de climatología. elementos y factores climáticos. [en línea] <<http://www.um.es/geograf/clima/tema01.html>> [consulta: 18 mayo 2017].
- Alvarado, S., Silva, C. y Cáceres, D. 2010. Modelación de episodios críticos de contaminación por material particulado (PM₁₀) en Santiago de Chile. Comparación de la eficiencia predictiva de los modelos paramétricos y no paramétricos. *Gaceta Sanitaria* 24: 466-472.
- Amato, F. y Schaap, M., Denier van der Gon, H., Padolfi, M., Alastuey, A., Keuken, M. y Querol, X. 2012. Effect of rain events on the mobility of road dust load in two Dutch and Spanish roads. *Atmospheric Environment* 6(2): 352-358.
- Back, L. y Bretherton, C. 2005. The relationship between wind speed and precipitation in the pacific ITCZ. *Journal of Climate* 18(20): 4317-4328.
- Banco Mundial, 2011. Centro de microdatos. [en línea] <<http://microdata.worldbank.org/index.php/catalog/424/datafile/F1>> [consulta: 21 marzo 2017]
- Baumbach, G. y Vogt, U. 1999. Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg. *Atmospheric Environment* 33: 4019-4027.
- Blanco, L., Gáfaró, A. y Rojas, N. 2015. Influence of precipitation scavenging on the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio at the Kennedy locality of Bogotá, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 76: 58-65.
- Brian, J. 1999. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32(3-4): 385-415.
- Burri, K., Gromke, C., Lehning, M. y Graf, F. 2011. Aeolian sediment transport over vegetation canopies: a wind tunnel study with live plants. *Aeolian Research* 3(2): 205-213.
- Canavos, G.C. 1988. Probabilidad y estadística: Aplicaciones y métodos. México, McGraw-Hill. 668p.
- Chepil, W. S. 1945. Dynamics of the wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Science* 60: 305-320.
- Chestnut, L., Schwartz, J., Savitiz, D. y Burchfiel, C. 1991. Pulmonary function and ambient particulate matter: epidemiological evidence from NHANES 1. *Environment Health* 46: 135-144.

- Clements, N., Hannigan, M., Miller, S., Peel, J. y Milford, J. 2016. Comparisons of urban and rural PM_{10-2.5} and PM_{2.5} mass concentrations and semi-volatile fractions in northeastern Colorado. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16(11): 7469–7484.
- Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A., Sáez, A. y Betterton, E. 2014. Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. *The science of the total environment* 487: 82-90.
- Cuadrat, J. y Pita, M. F. 1997. *Climatología*. 2ªed. Madrid. Cátedra. 496p.
- Dasgupta, S., Deichmann, U., Meisner, C. y Wheeler, D. 2005. Where is the poverty–environment nexus? Evidence from Cambodia, Lao PDR, and Vietnam. *World Development* 33(4): 617–638.
- Davis, R. y Gay, D. 1993. An assessment of air quality variations in the southwestern United States using an upper air synoptic climatology. *International Journal of Climatology* 13:755-781.
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hersbach, H., Hólm, E., Isaksen, L., Kallberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A., Monge-Sanz, B., Morcrette, J., Park, B., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. y Vitart, F. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137: 553:597.
- Devore, J. 2008. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. CENGAGE Learning. 742p.
- Dockery, D., Speizer, F., Strain, D., Ware, J., Spengler, J. y Ferris, B. 1989. Effects of inhaled particles in respiratory health of children. *The American Review of Respiratory Disease* 39: 587-594.
- FAO, 2019. Prevención y control de la erosión eólica en las regiones áridas. [en línea] <<http://www.fao.org/docrep/u1510s/u1510s07.htm>> [consulta: 11 febrero 2019]
- Ffolliott, P., Brooks, K., Neary, D., Pizarro, R. y García, P. 2013. Soil erosion and sediment production on watershed landscapes: Processes and Control. Documento técnico N°32. 73p.
- Fujibe, F. 2009. Relation between long-term temperature and wind speed trends at surface observation stations in Japan. *SOLA* 23 (18): 3873–3878.
- García-Chevesich, P., Alvarado, S., Neary, D., Valdes, R., Valdes, J., Aguirre, J., Mena, M., Pizarro, R. y Jofré, P. 2014. Respiratory disease and particulate air pollution in Santiago Chile: Contribution of erosion particles from fine sediments. *Environmental Pollution* 187: 202-205.

García-Chevesich, P.A., 2015. Control de la erosión y recuperación de suelos degradados. Denver, Outskirts Press. 469p.

García-Chevesich, P., Jones, S., Daniels, J., Valdés-Pineda, R., Venegas-Quiñones, H. y Pizarro, R. 2018. Marco legislativo para la gestión de sedimentos en los Estados Unidos. *Ingeniería del Agua* 22(2): 53-67.

García-Chevesich, P., Valdés-Pineda, R., Neary, D., Pizarro, R., Valdes, J., Bown, H. y González, L. En desarrollo. The effects of local climate on PM10 air concentrations in urban areas of Chile.

Giri, D., Murthy, K. y Adhikary, P. 2007. The influence of meteorological conditions on PM10 concentrations in Kathmandu Valley. *International Journal of Environmental Research* 2(7): 49-60.

Goossens, D. y Buck, B. 2010. Gross erosion, net erosion and gross deposition of dust by wind: field data from 17 desert surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* 36(5): 569-710.

Goudie, A.S. 2009. Dust storms: recent developments. *Journal of Environment Manage* 90: 89-94.

Govers, G., Everaert, W., Poesen, J., Rauws, G., De Ploey, J. y Latridou, J. 1990. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. *Earth Surface Processes and Landforms* 11: 515-524.

Guan, Q., Sun, X., Yang, J., Pan, B., Zhao, S. y Wang, L. 2017. Dust storms in northern China: long-term spatiotemporal characteristics and climate controls. *Journal of Climate* 30(17): 6683-6700.

Gugamsetty, B., Wei, H., Liu, C., Awasthi, A., Hsu, S., Tsai, C., Roam, G., Wu, Y. y Chen, C. 2012. Source characterization and apportionment of PM10, PM2.5 and PM0.1 by using positive matrix factorization. *Aerosol and Air Quality Research* 12(4): 476-491.

Hildebrandt, M. y Pokhrel, S. 2002. Climate and air quality: a case study of PM10 pollution in Kathmandu, Nepal. *Papers in Applied Geography* 25: 27-35.

Holland, W. y Reid, D. 1965. The urban factor in chronic bronchitis. *Lancet* 1 285: 445-448.

Ichii, K., Kawabata, A. y Yamaguchi, Y. 2002. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. *International Journal of Remote Sensing* 23(18): 3873-3878.

Kasumba, J., Holmén, B., Hiscox, A., Wang, J. y Miller, D. 2011. Agricultural PM10 emissions from cotton field disking in Las Cruces, NM. *Atmospheric Environment* 45(9): 1668-1674.

- Kim, S., Hong, K., Jun, H., Park, Y., Park, M. y Sunwoo, Y. 2014. Effect of precipitation on air pollutant concentration in Seoul, Korea. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 8(4): 202-211.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. y Rubel, F. 2006. World map of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3): 259-263.
- Köppen, W. y Geiger, R. 1954: *Klima der Erde (Climate of the earth)*. Wall Map 1:16 Mill. Klett-Perthes, Gotha.
- Kupiainen, K. y Pirjola, L. 2011. Vehicle non-exhaust emissions from the tyre-road interface effect of stud properties traction sanding and resuspension. *Atmospheric Environment* 45 (25): 4141-4146.
- Laity, J. 2011. Wind erosion in drylands. En: Thomas, D.S (Eds.), *Arid zone geomorphology: process, form and change in drylands*. UK, John Wiley & Sons, pp. 539-568.
- Laity, J. y Bridges, N. 2009. Ventifacts on earth and mars: analytical, field, and laboratory studies supporting sand abrasion and windward feature development. *Geomorphology* 105: 202–217.
- Langbein, W. y Schumm, S. 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. *Transactions American Geophysical Union* 39: 1076-1084.
- Li, S., Gong, H., Zhao, W. y Liu, J. 2008. Research on Beijing urban heat island and PM10 in the air. IN: 2008 INTERNATIONAL WORKSHOP on education technology and training & 2008 International workshop on geoscience and remote sensing. China. College of Resources Environment and Tourism Capital Normal University Beijing. Pp. 5.
- Madden, R. y Williams, J. 1978. The correlation between temperature and precipitation in the United States and Europe. *Monthly Weather Review* 106(1): 142–147.
- MMA. 2014. Plan de Descontaminación 2014 - 2018. [en línea] <<http://portal.mma.gob.cl/planes-de-descontaminacion-atmosferica-estrategia-2014-2018/>> [consulta: 20 febrero 2019]
- Mazzei, F., D'Alessandro, A., Lucarelli, F., Nava, S., Prati, P., Valli, G. y Vecchi, R. 2008. Characterization of particulate matter sources in an urban environment. *Science of The Total Environment* 401(1-3): 81–89.
- Mikati, I., Benson, A., Luben, T., Sacks, J. y Richmond-Bryant, J. 2018. Disparities in distribution of particulate matter emission sources by race and poverty status. *American Journal of Public Health* 108(4): 480–485.
- Mitra, A. y Sharma, C. 2002. Indian aerosols: present status. *Chemosphere* 49: 1175-1190.
- Monkkonen, P., Uma, R., Srinivasan, D., Koponen, I., Lehtinen, K., Hameri, K., Suresh, R., Sharma, V. y Kulmala, M. 2004. Relationship and variations of aerosol number and PM10

mass concentrations in a highly polluted urban environment—New Delhi. *India Atmospheric Environment* 38(3): 425-433.

NASA. 2019. Global agricultural monitoring. [en línea] <<https://glam1.gsfc.nasa.gov>> [consulta: 03 febrero 2019]

Neas, L., Dockery, D., Koutrakis, P., Tollerud, D. y Speizer, F. 1995. The association of ambient air pollution with twice daily peak expiratory flow rate measurements in children. *American Journal of Epidemiology* 141:111–122.

O’Ryan, R. y Larraguibel, L., 2000. Contaminación del Aire en Santiago: ¿qué es, qué se ha hecho, qué falta?. *Perspectivas en Política, Economía y Gestión* 4 (1): 153-191.

Ostro, B., Sánchez, J., Aranda, C. y Eskeland, G. 1996. Air pollution and mortality: results from a study of Santiago, Chile. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 6 (1): 97-114.

Park, S., Choe, A., Lee, E., Park, M. y Song, X. 2010. The Asian Dust Aerosol Model 2 (ADAM2) with the use of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained from the Spot4/vegetation data. *Theoretical and Applied Climatology* 101(1-2): 191–208.

Parker, J. y Fossum, K. 2000. Chemical characteristics of urban stormwater sediments and implications for environmental management, Maricopa County, Arizona. *Environmental Management* 26(1): 99–115.

Pérez, P. y Reyes, J., 2002. Prediction of maximum of 24-h average of PM10 concentrations 30 h in advance in Santiago, Chile. *Atmospheric Environment* 36(28): 4555-4561.

Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Olivares, C., Valdés, R. y Balocchi, F. 2009. Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la Región de Coquimbo, Chile. Documento técnico N° 18. 94p.

Romieu, I., Meneses, F., Ruiz, S., Sienna, J., Huerta, J. y White, M., 1996. Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in Mexico City. *American journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 154: 300-307.

Sanhueza, P., Vargas, C. y Mellado, P. 2006. Impacto de la contaminación del aire por PM10 sobre la mortalidad diaria en Temuco. *Revista Médica de Chile* 134: 754-761.

Schwartz, J., Slater, D., Larson, T., Pierson, W. y Koenig, J. 1993. Particulate air pollution and hospital emergency room visits for asthma in Seattle. *American Review of Respiratory Disease* 147: 826–831.

Secretaría General de la República. 2010. Plan de prevención y descontaminación atmosférica de la Región Metropolitana [En línea] <http://www.sinia.cl/1292/articles-34930_PPDA_Decreto_Metropolitana.pdf> [consulta: 3 junio 2017]

Sharratt, B. y Edgar, R. 2011. Implications of changing PM10 air quality standards on Pacific northwest communities affected by windblown dust. *Atmospheric Environment* 45(27): 4626-4630.

Termonia, P. y Quinet, A. 2004. A new transport index for predicting episodes of extreme air pollution. *Journal of Applied Meteorology* 43(4): 631-640.

Viana R., M, 2003. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas. Barcelona, Universidad de Barcelona. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección Geológica. 386p.

Vargas, F., Rojas, N., Pachon, J. y Russell, A. 2012. PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota. *Atmospheric Pollution Research* 3(1): 72–80.

Ware, J., Ferris, B., Dockery, D., Spengler, J., Stram, D. y Speizer, F., 1986. Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles on respiratory health of preadolescent children. *American Review of Respiratory Disease* 133: 834-842.

Wei, W., Liding, C., Bojie, F., Zhilin, H., Dongping, W. y Lida, G. 2006. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology* 335: 247-258.

Organización Mundial de la Salud, 2005. WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulphur dioxide: global update 2005, summary of risk assessment [En línea] <<https://apps.who.int/iris/handle/10665/69477>> [consulta: 9 marzo 2019]

Xuan, J. 1999. Dust emission factors for environment of Northern China. *Atmospheric Environment* 33(11): 1767–1776.

Zhang, B., Jiao, L., Xu, G., Zhao, S., Tang, X., Zhou, Y. y Gong, C. 2017. Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM2.5, PM10, PM2.5–10). *Meteorology and Atmospheric Physics* 130(3): 383–392.

6. ANEXOS

ANEXO I. Nomenclatura tipos climáticos (a)

Tipo	Descripción	Criterio
A	Climas ecuatoriales	$T_{mín} \geq +18^{\circ}C$
Af	Bosque lluvioso ecuatorial muy húmedo	$P_{mín} \geq 60 \text{ mm}$
Am	Monzón ecuatorial	$P_{an} \geq 25(100 - P_{mín})$
As	Sabana ecuatorial, con verano seco	$P_{mín} < 60 \text{ mm en verano}$
Aw	Sabana ecuatorial, con invierno seco	$P_{mín} < 60 \text{ mm en invierno}$
B	Climas áridos	$P_{an} < 10 P_{th}$
BS	Estepa	$P_{an} > 5 P_{th}$
BW	Desierto	$P_{an} \leq 5 P_{th}$
C	Climas templados	$-3^{\circ}C < T_{mín} < +18^{\circ}C$
Cs	Clima templado, con verano seco	$P_{vmín} < P_{imín}, P_{imáx} > 3P_{vmín} \text{ y } P_{vmín} < 40 \text{ mm}$
Cw	Clima templado, con invierno seco	$P_{imín} < P_{vmín} \text{ y } P_{vmáx} > 10 P_{imín}$
Cf	Clima templado, muy húmedo	<i>Distinto a Cs y Cw</i>
D	Climas fríos	$T_{mín} < -3^{\circ}C$
Ds	Clima frío, con verano seco	$P_{vmín} < P_{imín}, P_{imáx} > 3P_{vmín} \text{ y } P_{vmín} < 40 \text{ mm}$
Dw	Clima frío, con invierno seco	$P_{imín} < P_{vmín} \text{ y } P_{vmáx} > 10 P_{imín}$
Df	Clima frío, muy húmedo	<i>Distinto a Ds y Dw</i>
E	Climas polares	$T_{máx} < +10^{\circ}C$
ET	Tundra	$0^{\circ}C \leq T_{máx} < +10^{\circ}C$
EF	Hielo	$T_{máx} < 0^{\circ}C$

Continuación ANEXO I: Nomenclatura tipos climáticos

Tipo	Descripción	Criterio
h	Desierto/estepa cálido	$T_{an} \geq +18^{\circ}C$
k	Desierto/estepa frío	$T_{an} < +18^{\circ}C$
a	Verano cálido	$T_{máx} \geq +22^{\circ}C$
b	Verano tibio	<i>no (a) y al menos</i> $4 T_{men} \geq +10^{\circ}C$
c	Verano fresco e invierno frío	<i>no (b) y</i> $T_{mín} > +38^{\circ}C$
d	Extremadamente continental	<i>no (c) y</i> $T_{mín} \leq +38^{\circ}C$

Donde:

T_{an} : temperatura promedio anual

$T_{mín}$: Temperatura mínima del mes más frío

$T_{vmín}$: Temperatura mínima del mes más frío en verano

$T_{imín}$: Temperatura mínima del mes más frío en invierno

T_{men} : temperatura mensual

P_{ac} : Precipitación acumulada anual

$P_{mín}$: Precipitación del mes más seco

$P_{imín}$: Precipitación del mes más seco en invierno

$P_{imáx}$: Precipitación del mes más lluvioso en invierno

$P_{vmín}$: Precipitación del mes más seco en verano

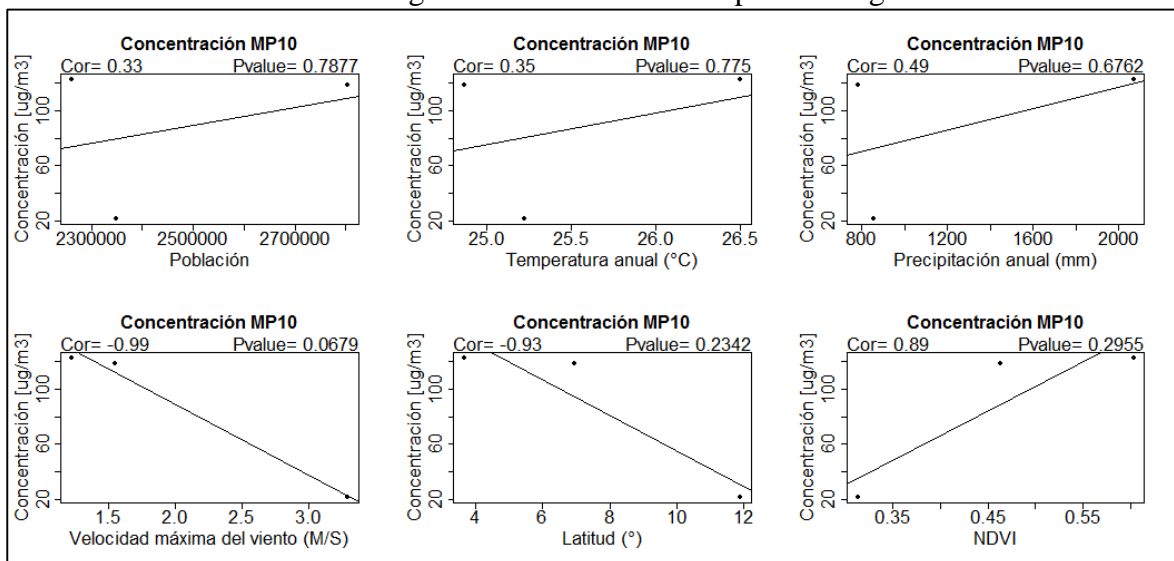
$P_{vmáx}$: Precipitación del mes más lluvioso en verano

ANEXO II. Clasificación de ciudades por tamaño poblacional

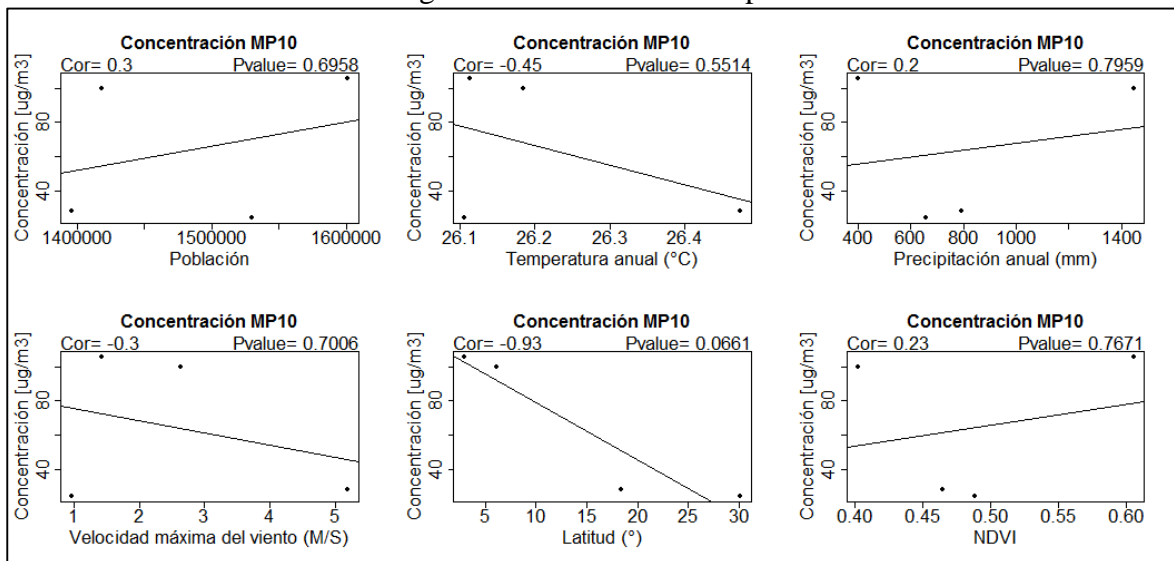
Tipos de ciudades	
Clasificación	Rango
Pequeña	100.000 a 1.000.000 habitantes
Mediana	1.000.000 a 2.000.000 habitantes
Grande	2.000.000 a 3.000.000 habitantes

7. APÉNDICES

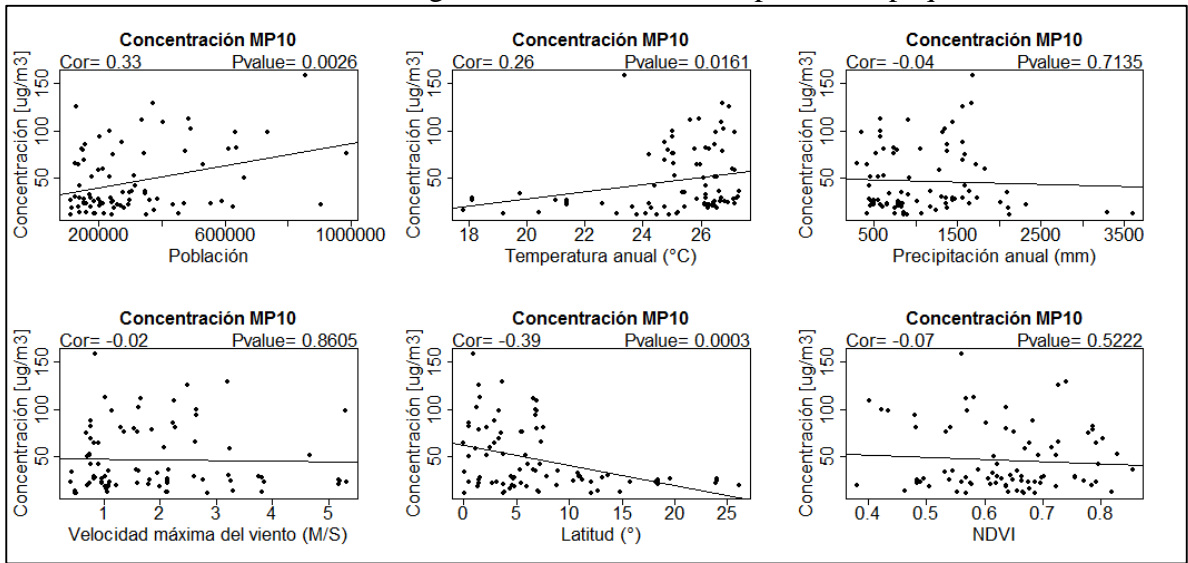
APÉNDICE I. Resultados de regresiones en clima Af de población grande



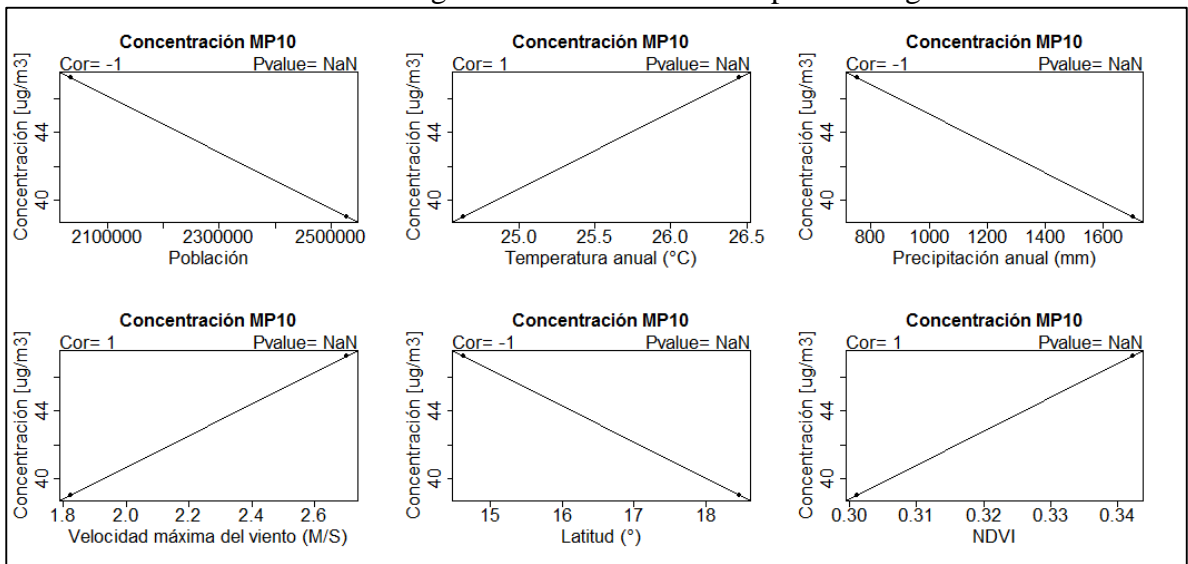
APÉNDICE II. Resultados de regresiones en clima Af de población mediana



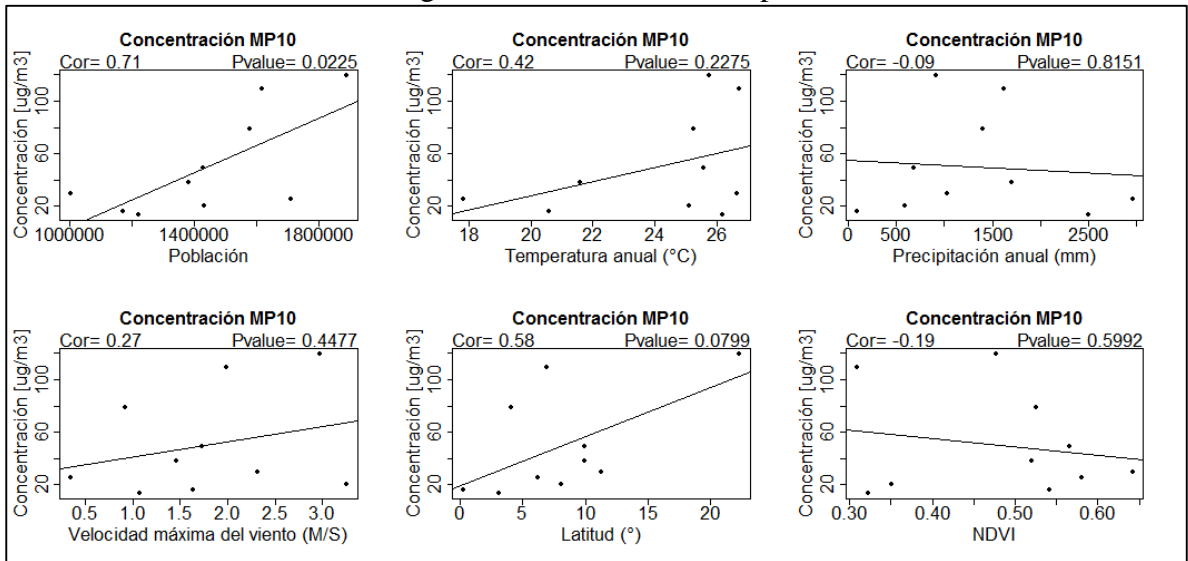
APÉNDICE III. Resultados de regresiones en clima Af de población pequeña



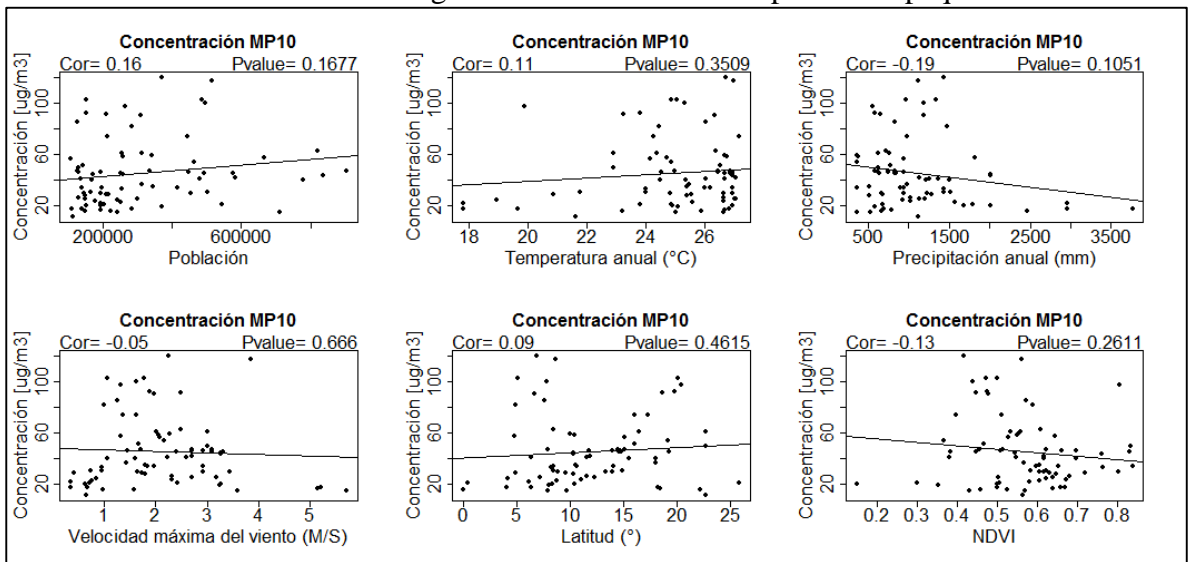
APÉNDICE IV. Resultados de regresiones en clima Am de población grande



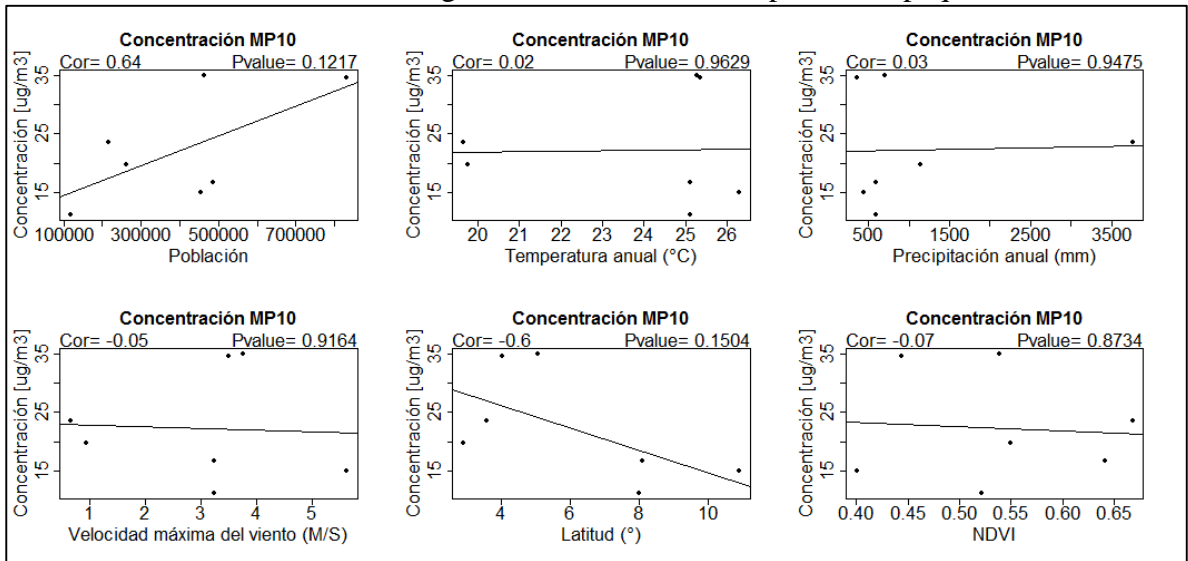
APÉNDICE V. Resultados de regresiones en clima Am de población mediana



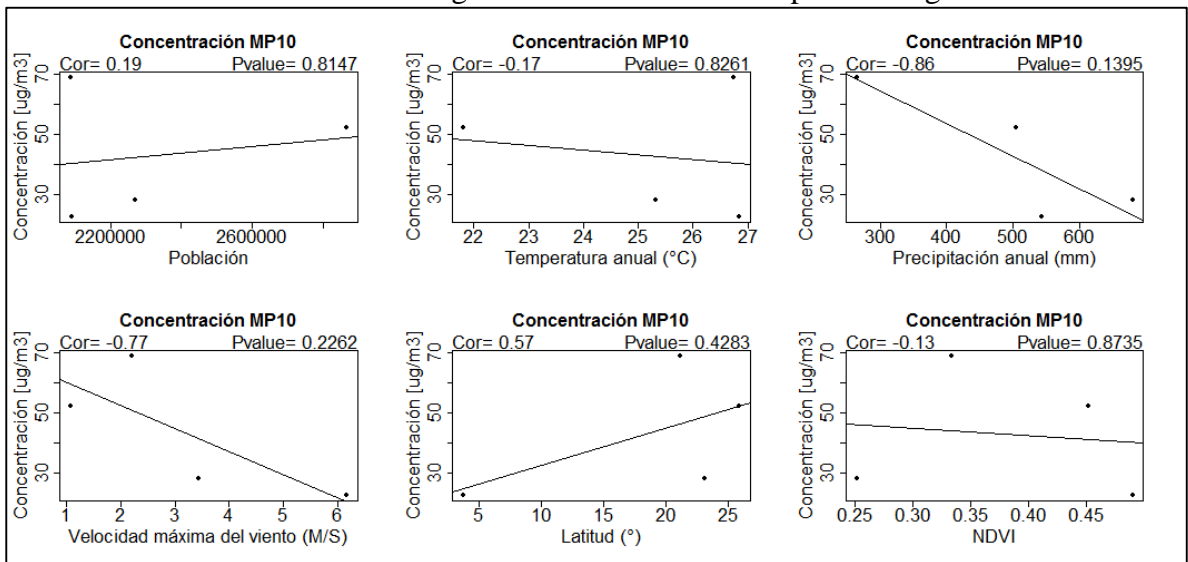
APÉNDICE VI. Resultados de regresiones en clima Am de población pequeña



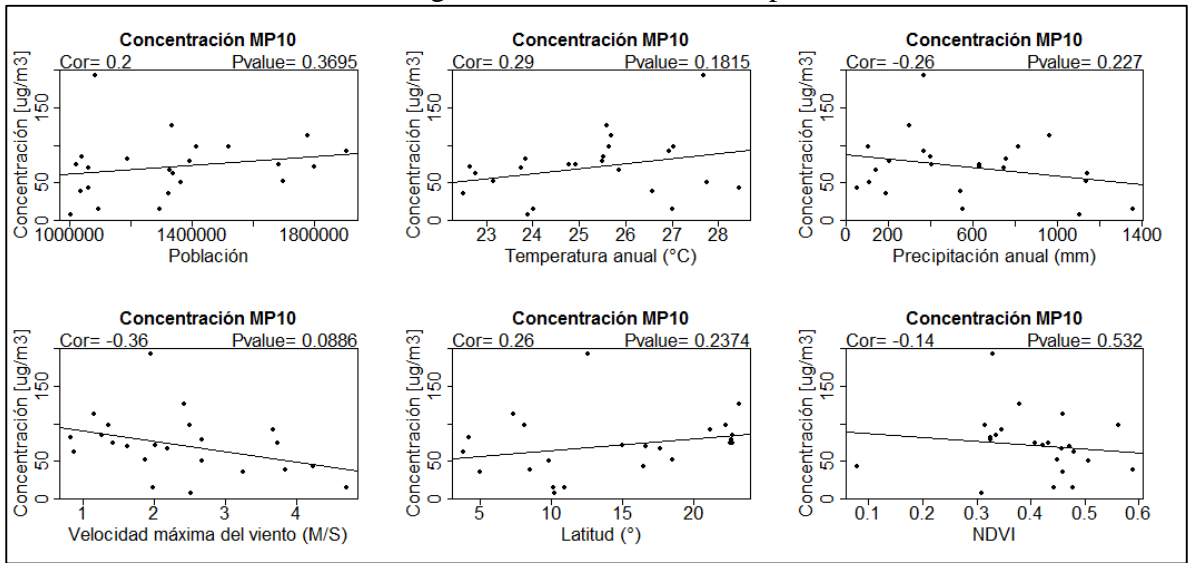
APÉNDICE VII. Resultados de regresiones en clima As de población pequeña



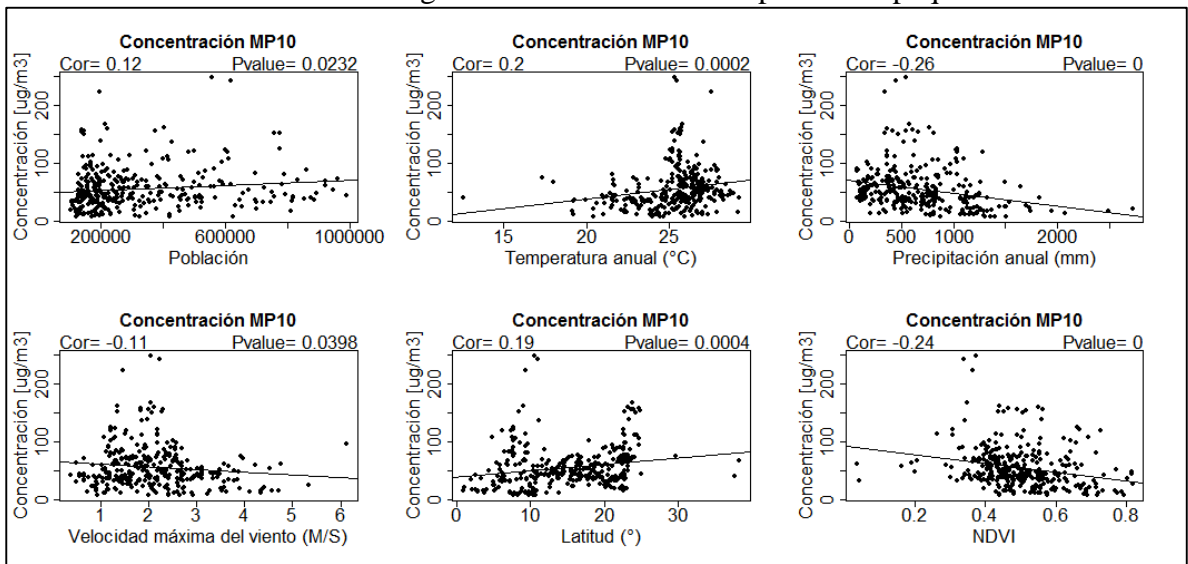
APÉNDICE VIII. Resultados de regresiones en clima Aw de población grande



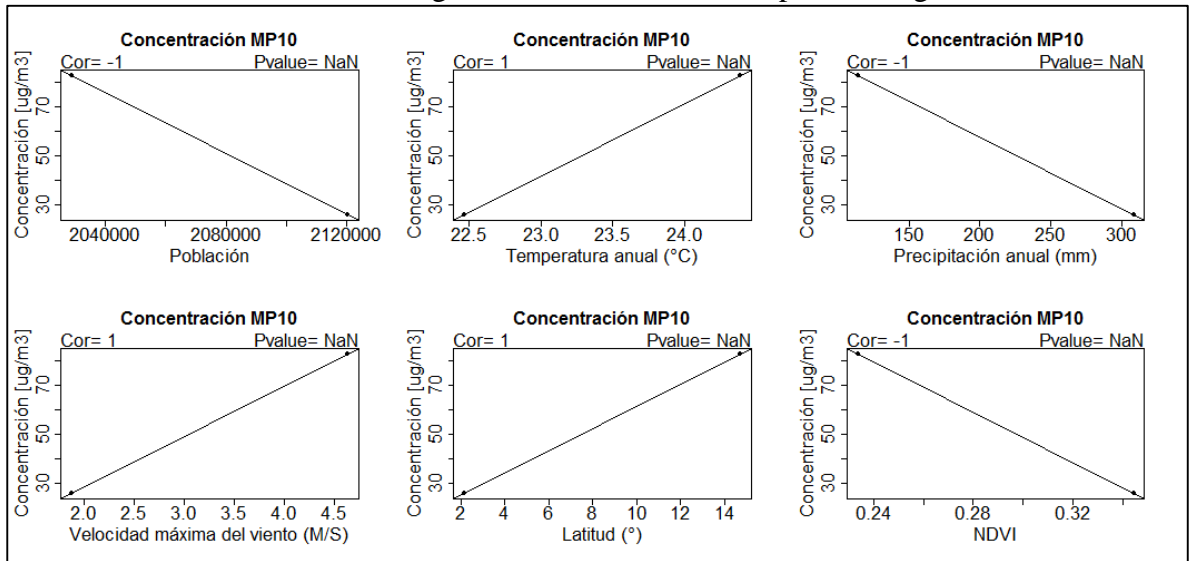
APÉNDICE IX. Resultados de regresiones en clima Aw de población mediana



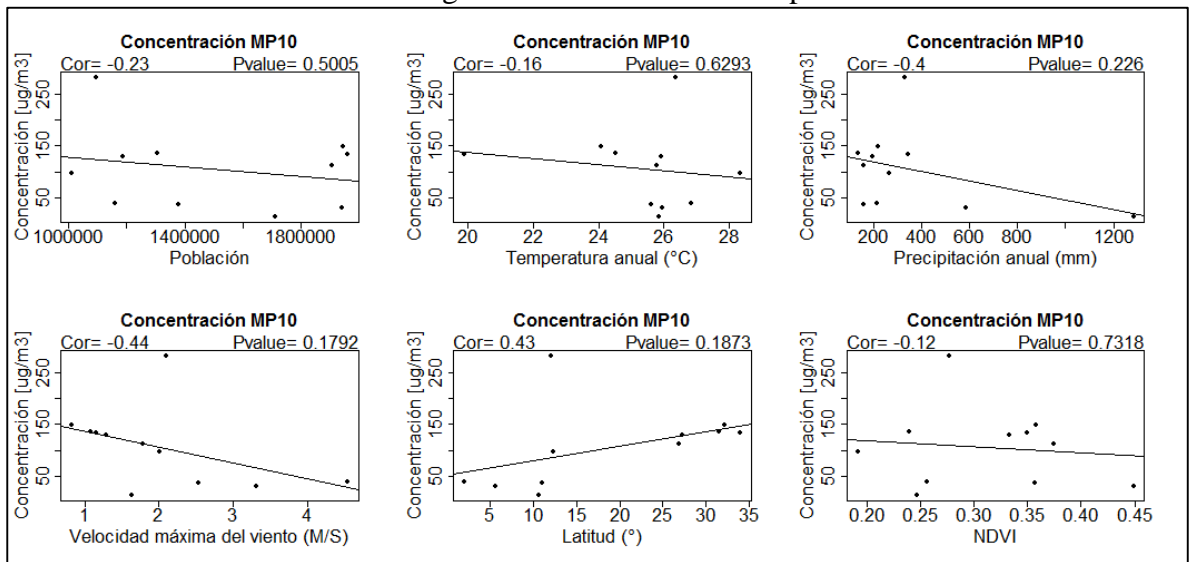
APÉNDICE X. Resultados de regresiones en clima Aw de población pequeña



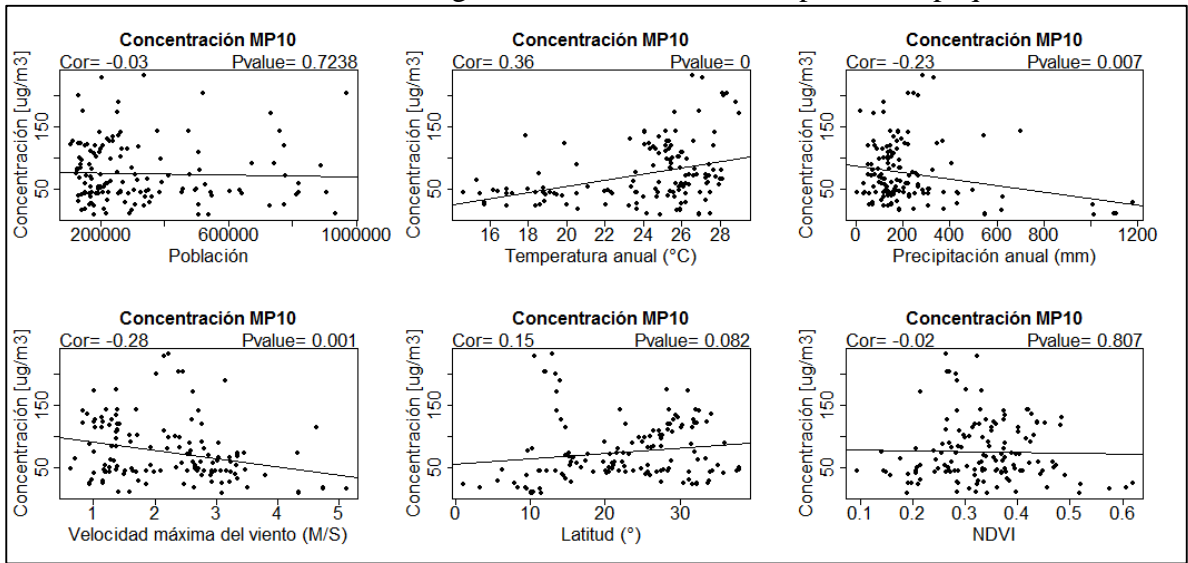
APÉNDICE XI. Resultados de regresiones en clima BSh de población grande



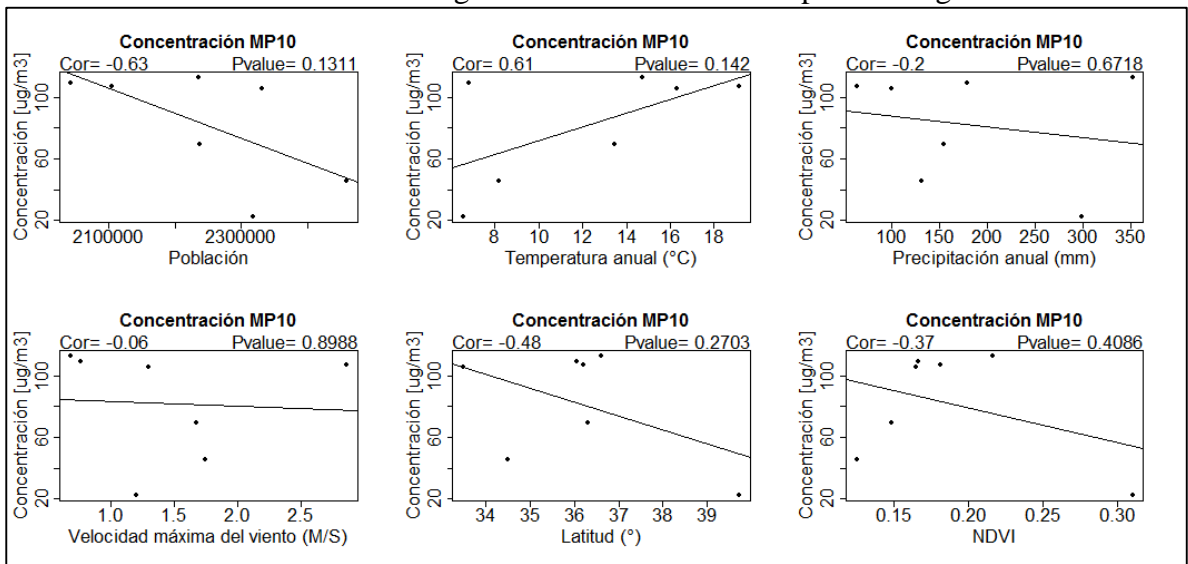
APÉNDICE XII. Resultados de regresiones en clima BSh de población mediana



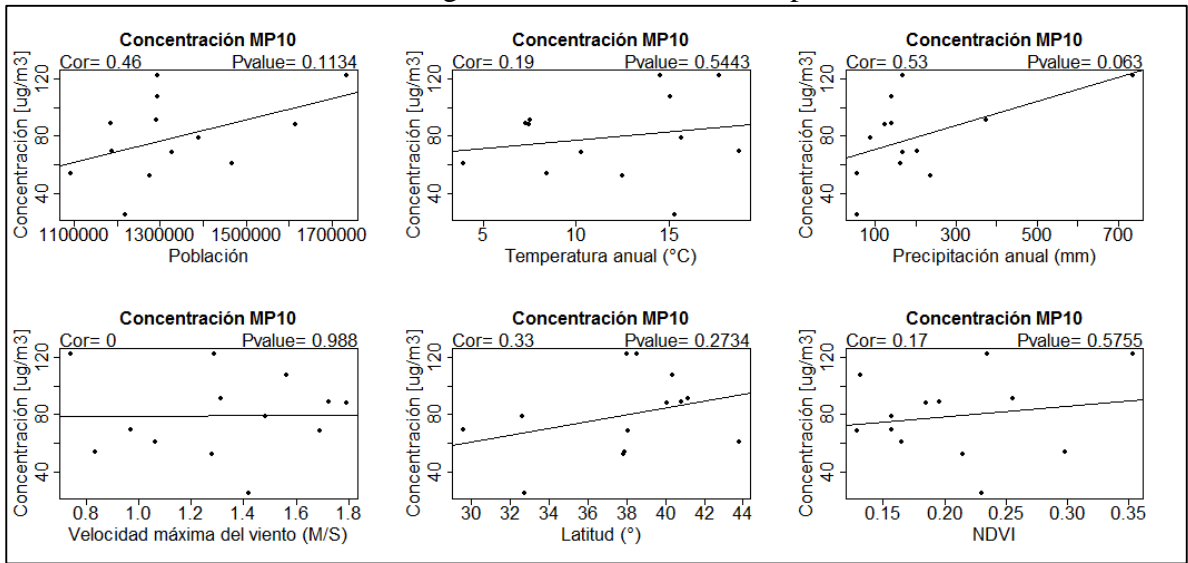
APÉNDICE XIII. Resultados de regresiones en clima BSh de población pequeña



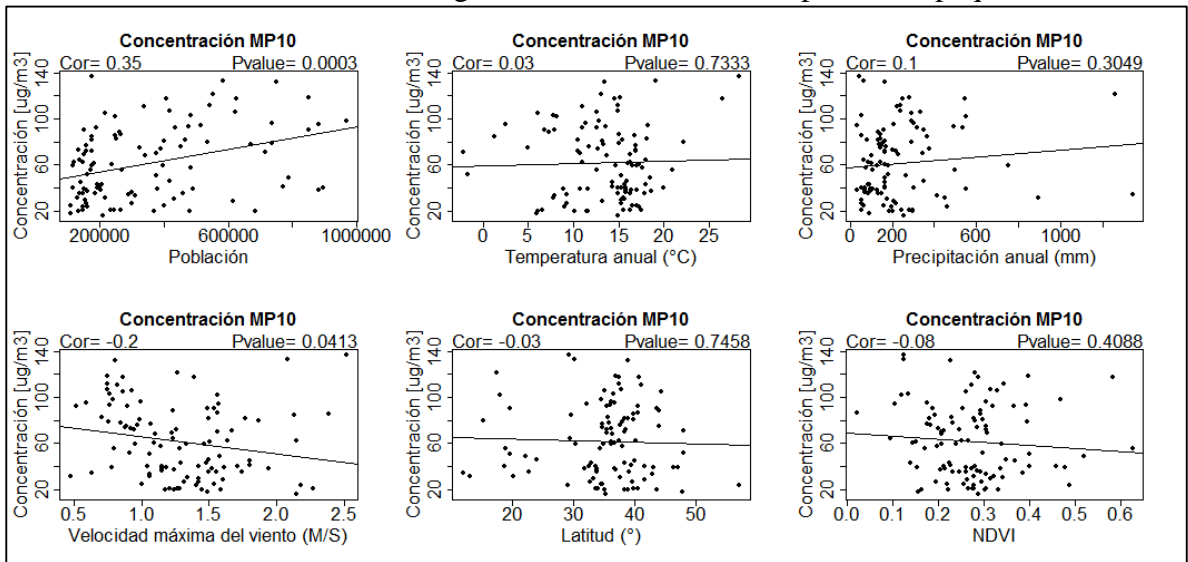
APÉNDICE XIV. Resultados de regresiones en clima BSk de población grande



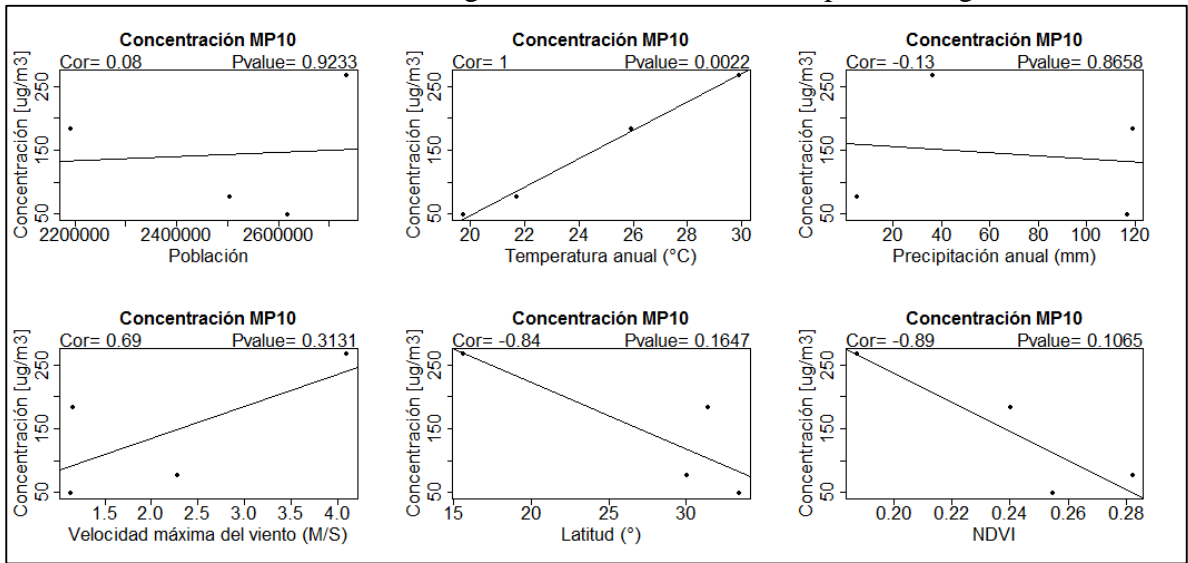
APÉNDICE XV. Resultados de regresiones en clima BSk de población mediana



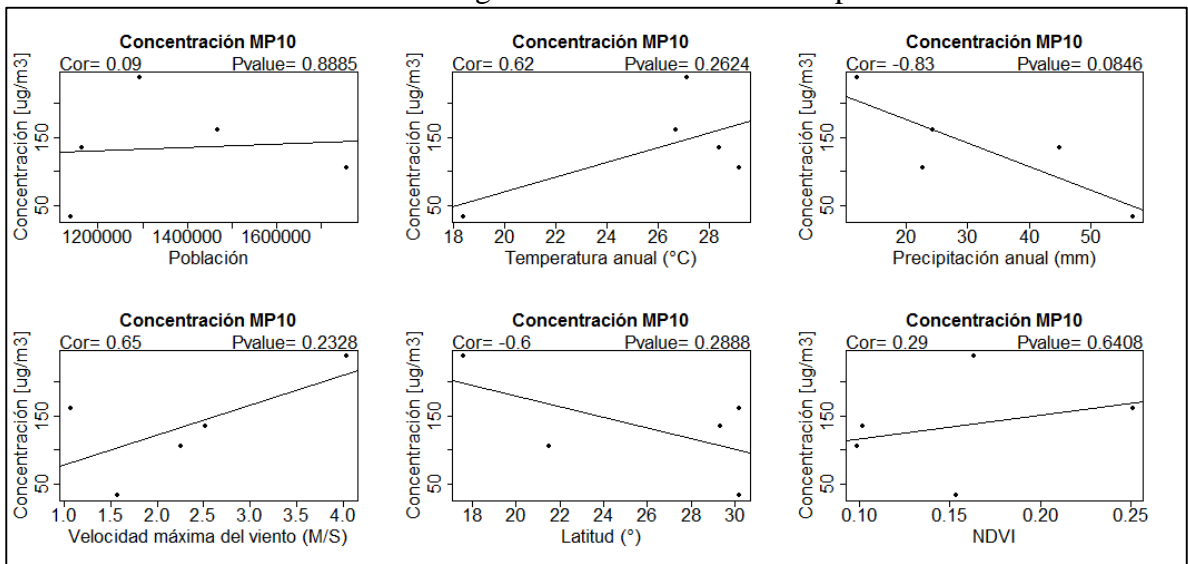
APÉNDICE XVI. Resultados de regresiones en clima BSk de población pequeña



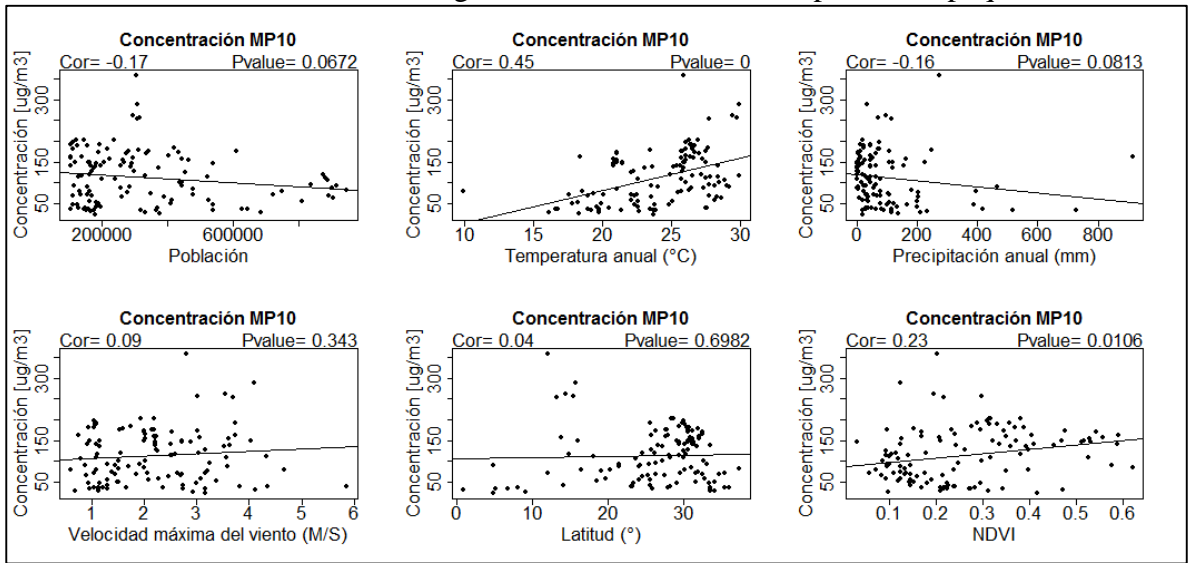
APÉNDICE XVII. Resultados de regresiones en clima BWh de población grande



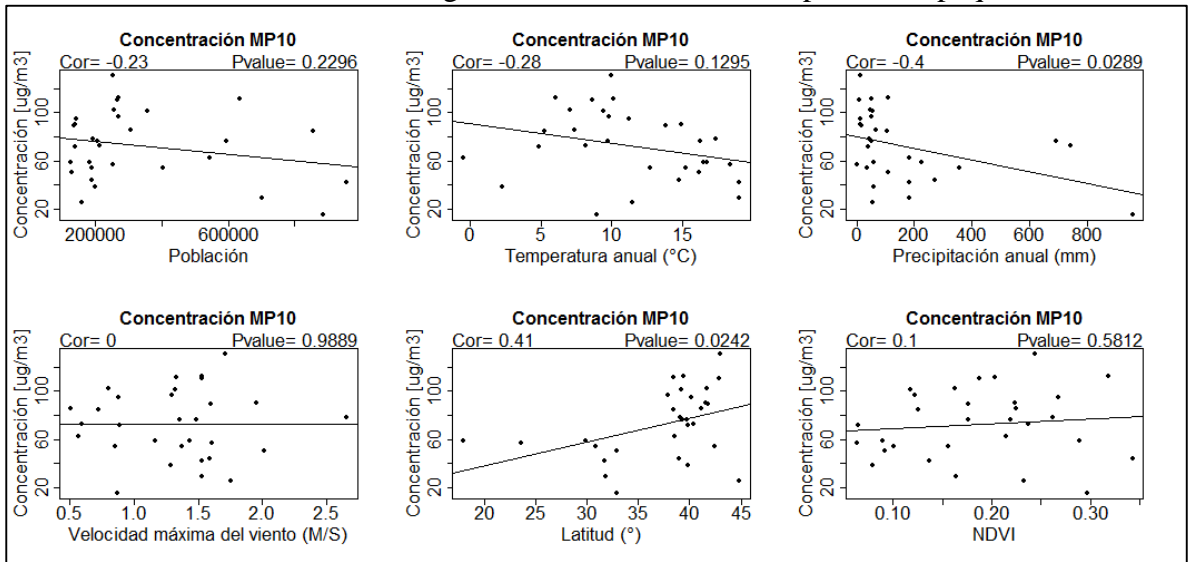
APÉNDICE XVIII. Resultados de regresiones en clima BWh de población mediana



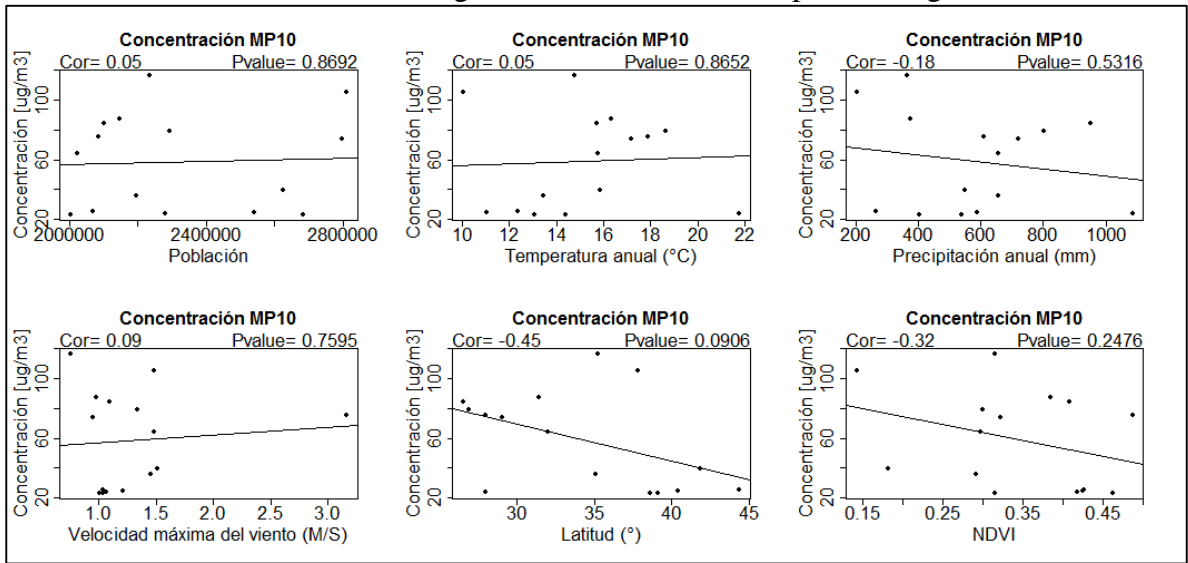
APÉNDICE XIX. Resultados de regresiones en clima BWh de población pequeña



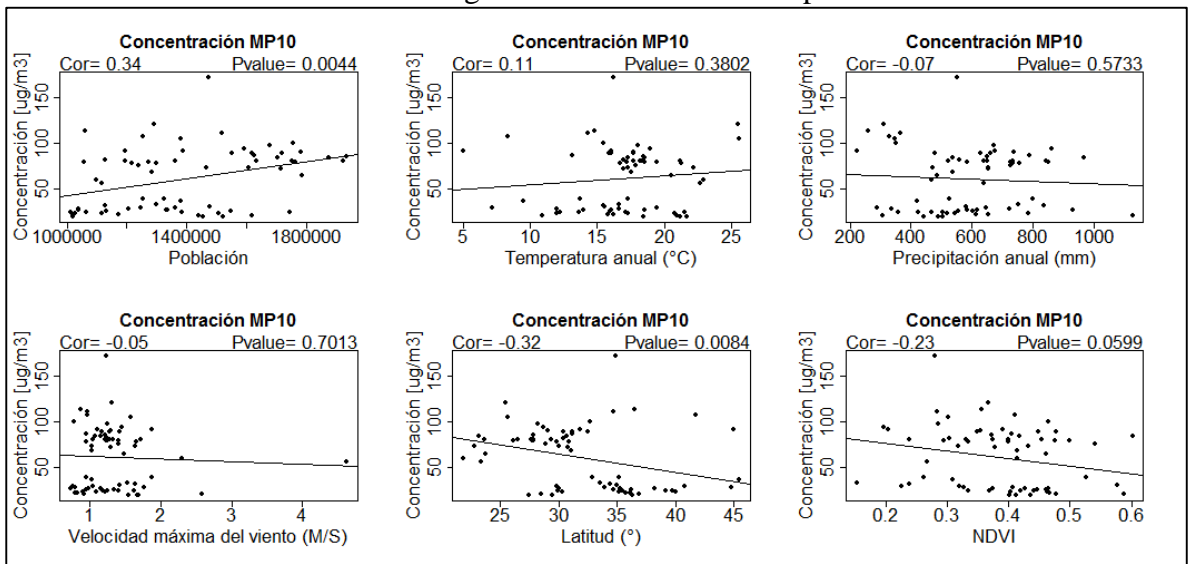
APÉNDICE XX. Resultados de regresiones en clima BWk de población pequeña



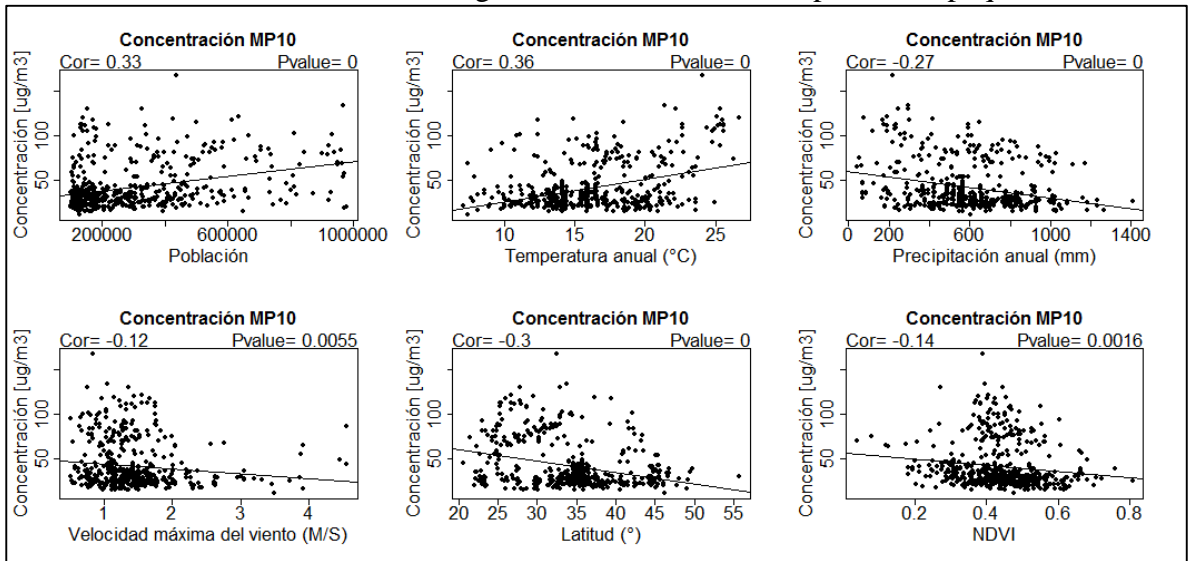
APÉNDICE XXI. Resultados de regresiones en clima Cfa de población grande



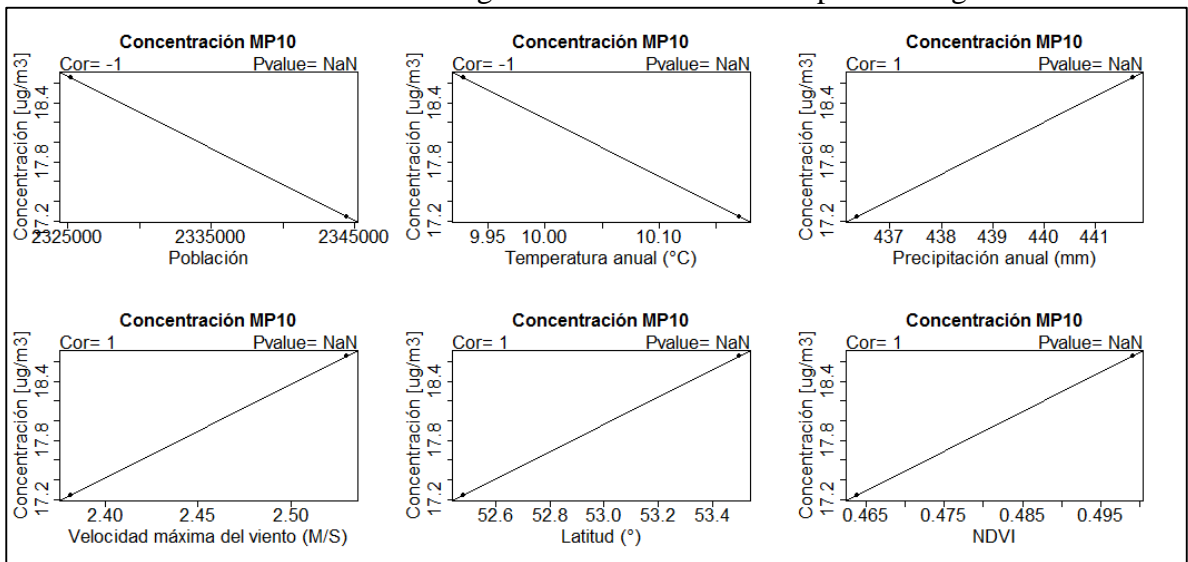
APÉNDICE XXII. Resultados de regresiones en clima Cfa de población mediana



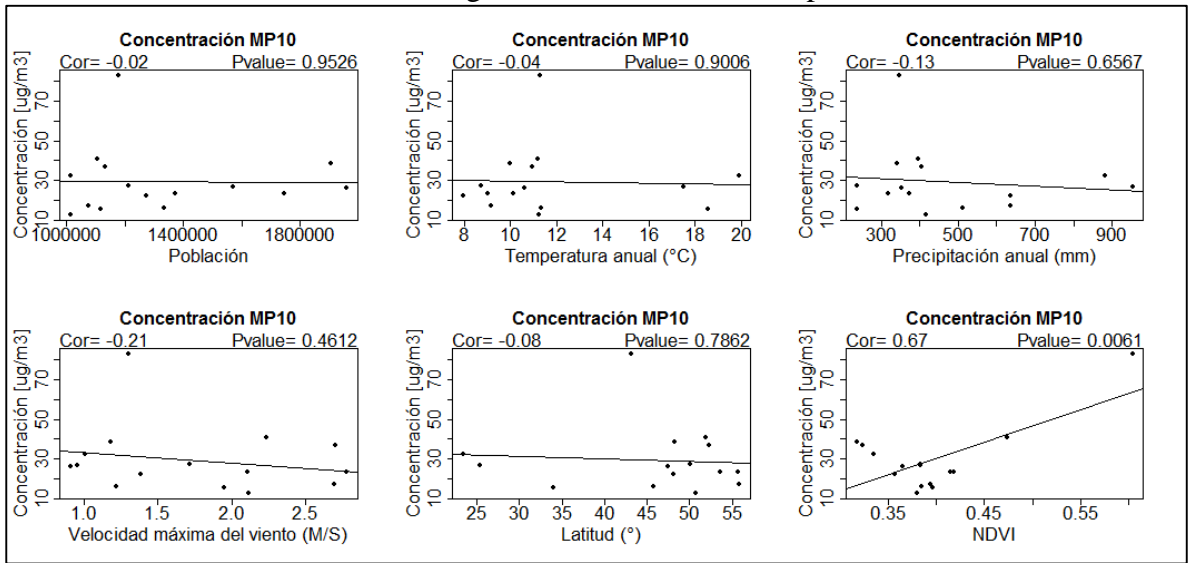
APÉNDICE XXIII. Resultados de regresiones en clima Cfa de población pequeña



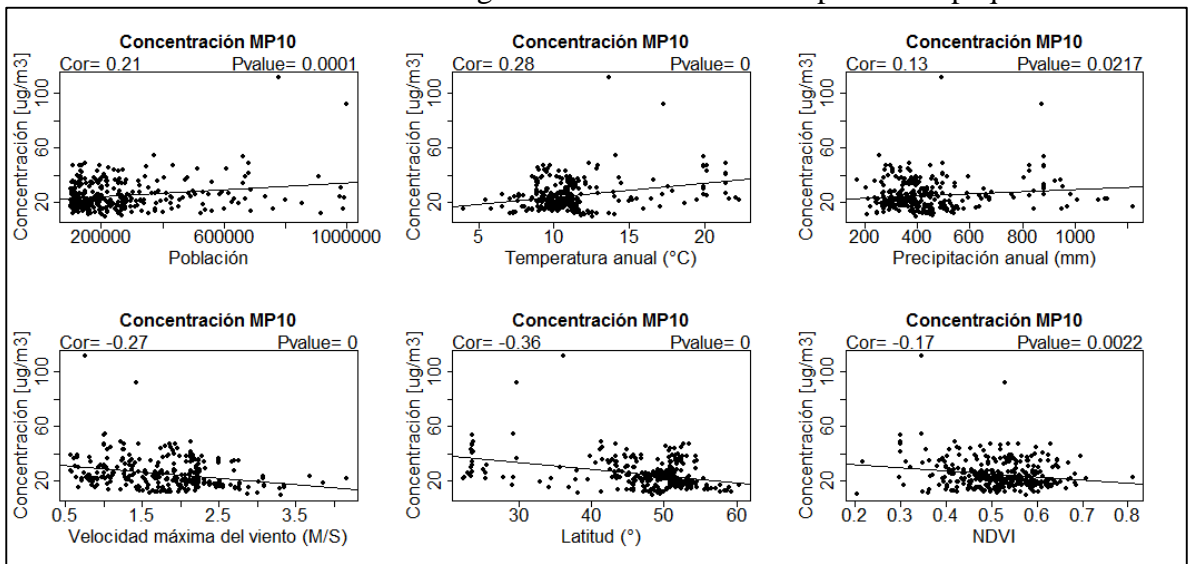
APÉNDICE XXIV. Resultados de regresiones en clima Cfb de población grande



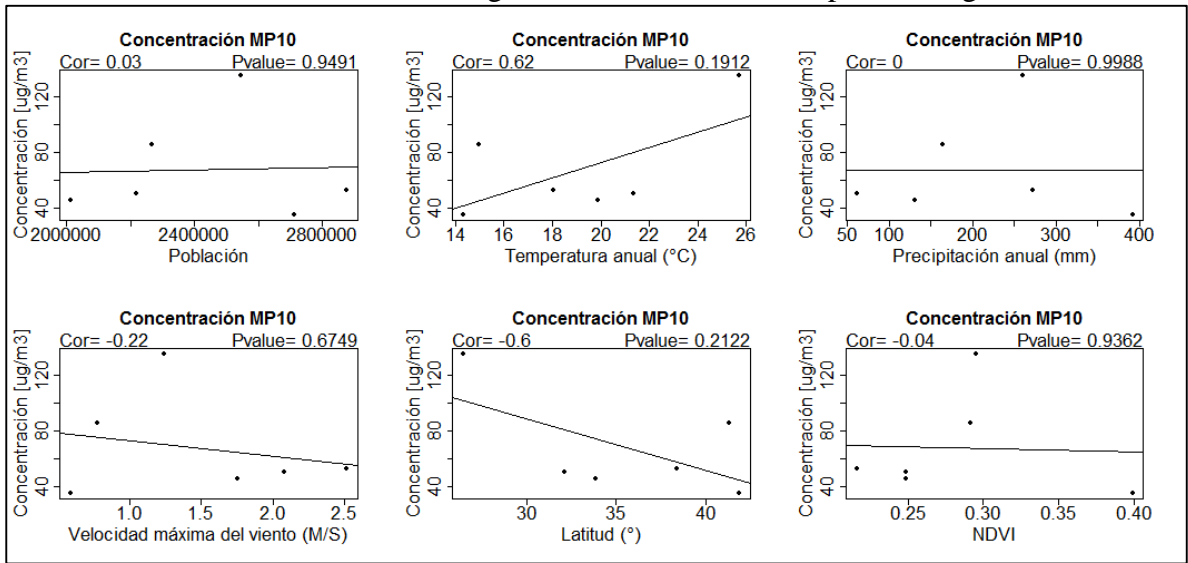
APÉNDICE XXV. Resultados de regresiones en clima Cfb de población mediana



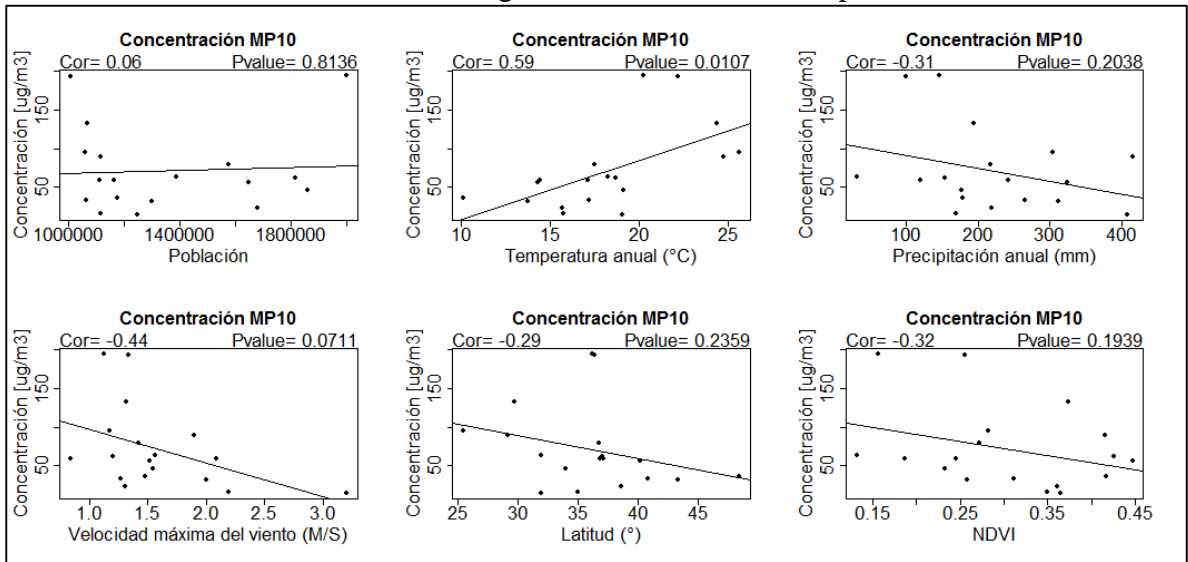
APÉNDICE XXVI. Resultados de regresiones en clima Cfb de población pequeña



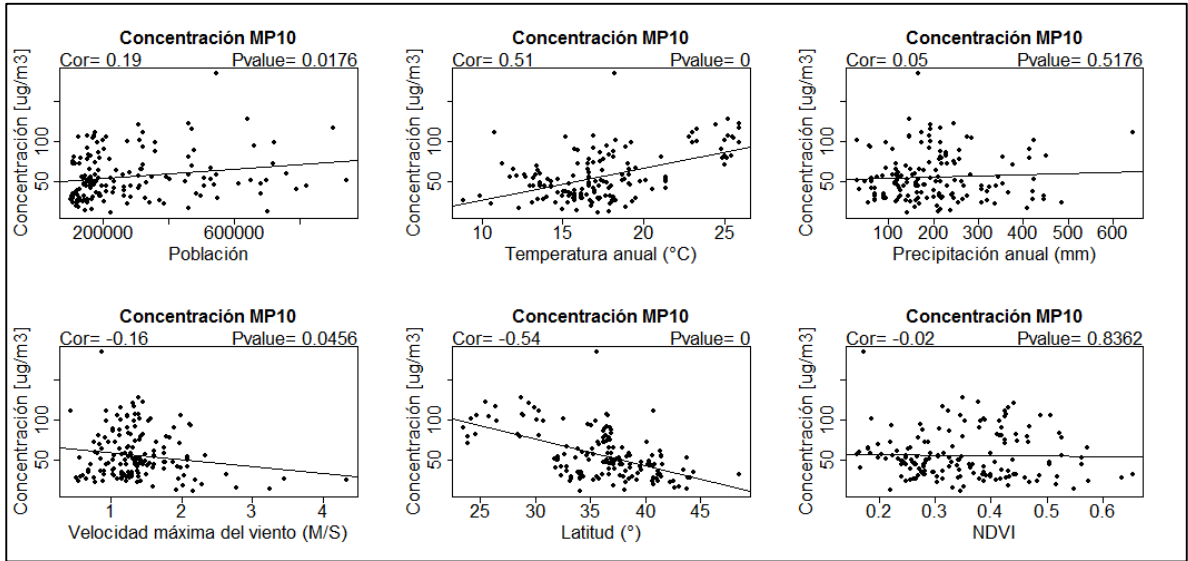
APÉNDICE XXVII. Resultados de regresiones en clima Csa de población grande



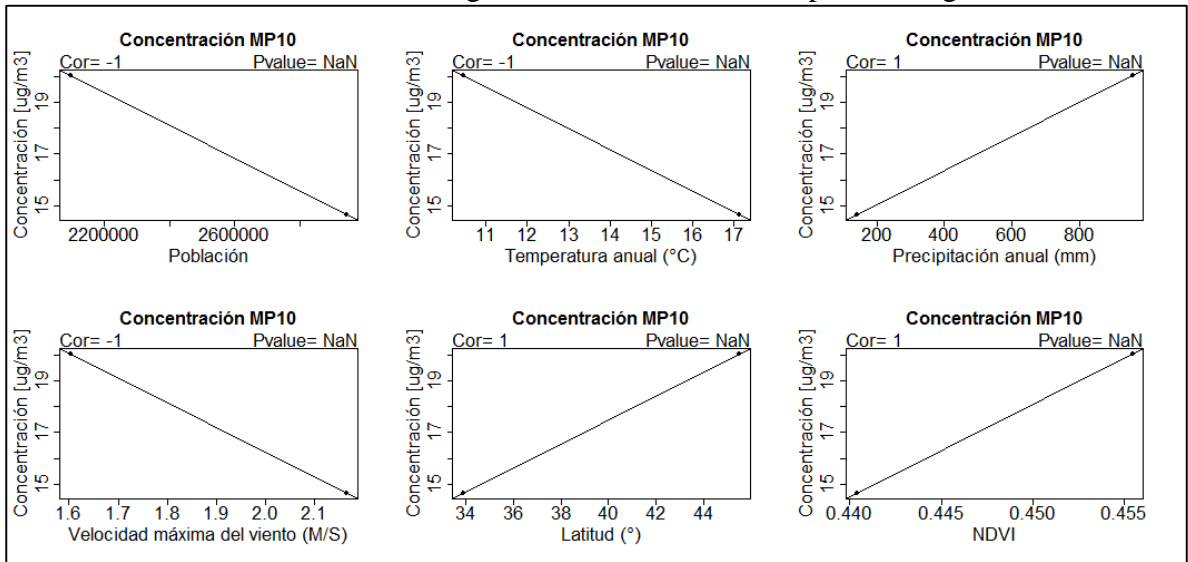
APÉNDICE XXVIII. Resultados de regresiones en clima Csa de población mediana



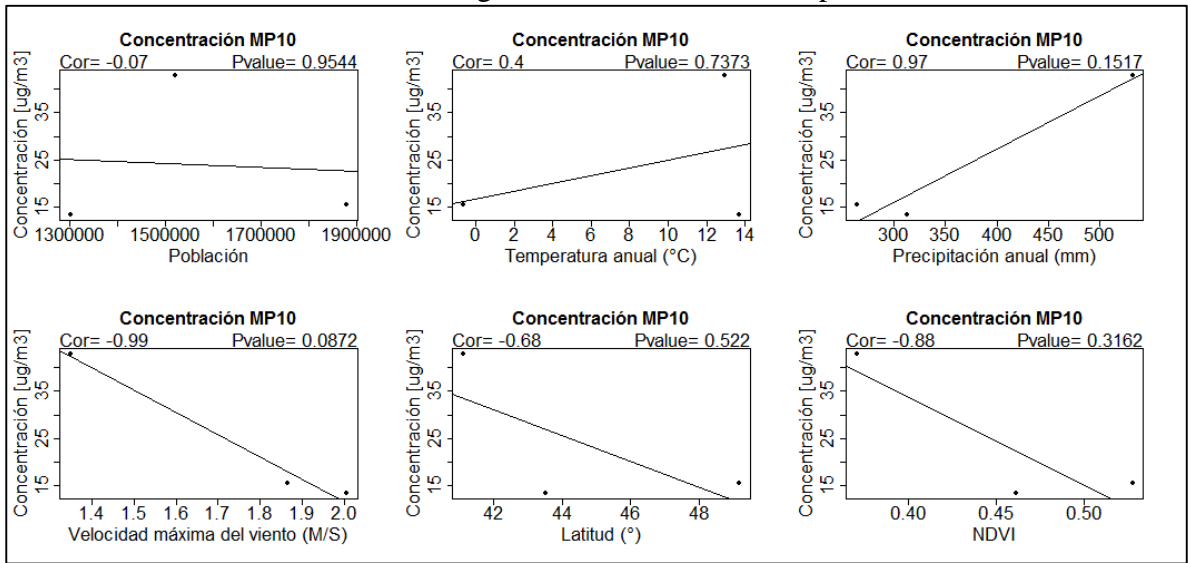
APÉNDICE XXIX. Resultados de regresiones en clima Csa de población pequeña



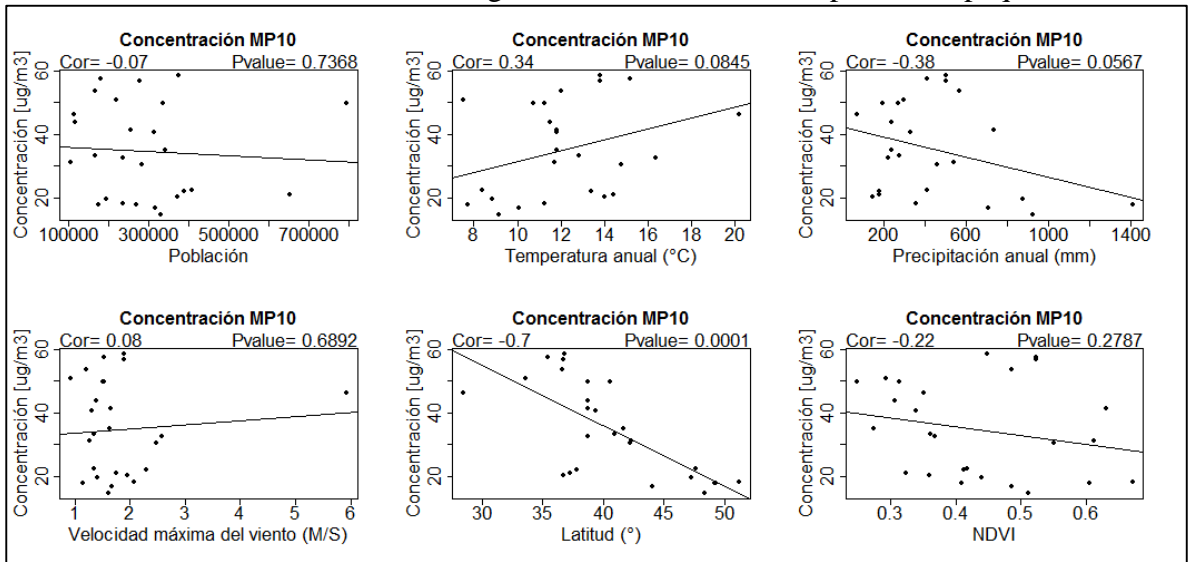
APÉNDICE XXX. Resultados de regresiones en clima Csb de población grande



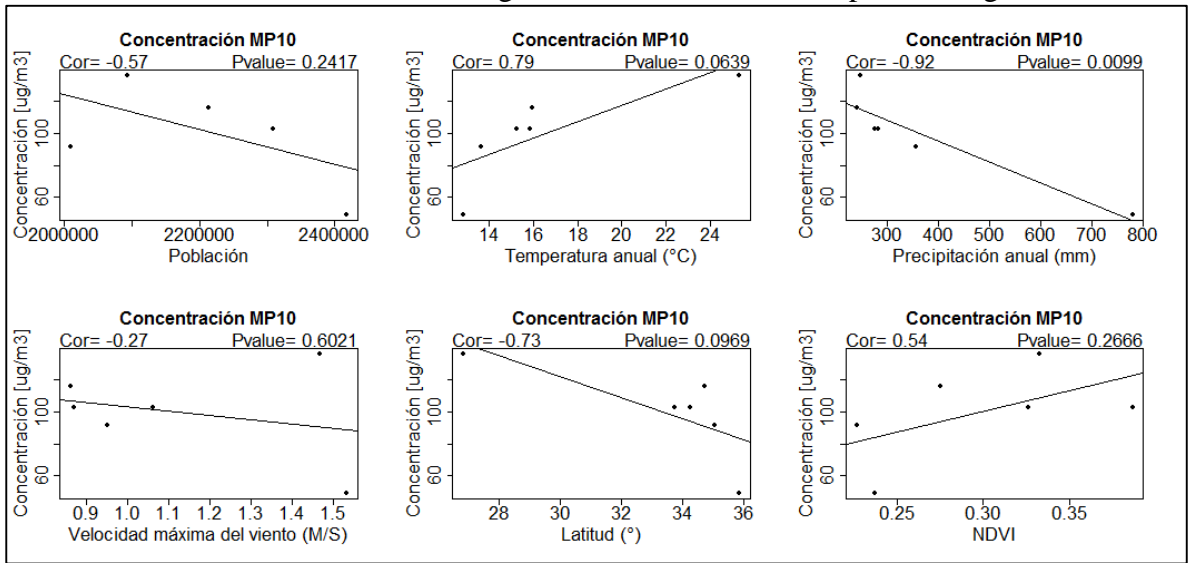
APÉNDICE XXXI. Resultados de regresiones en clima Csb de población mediana



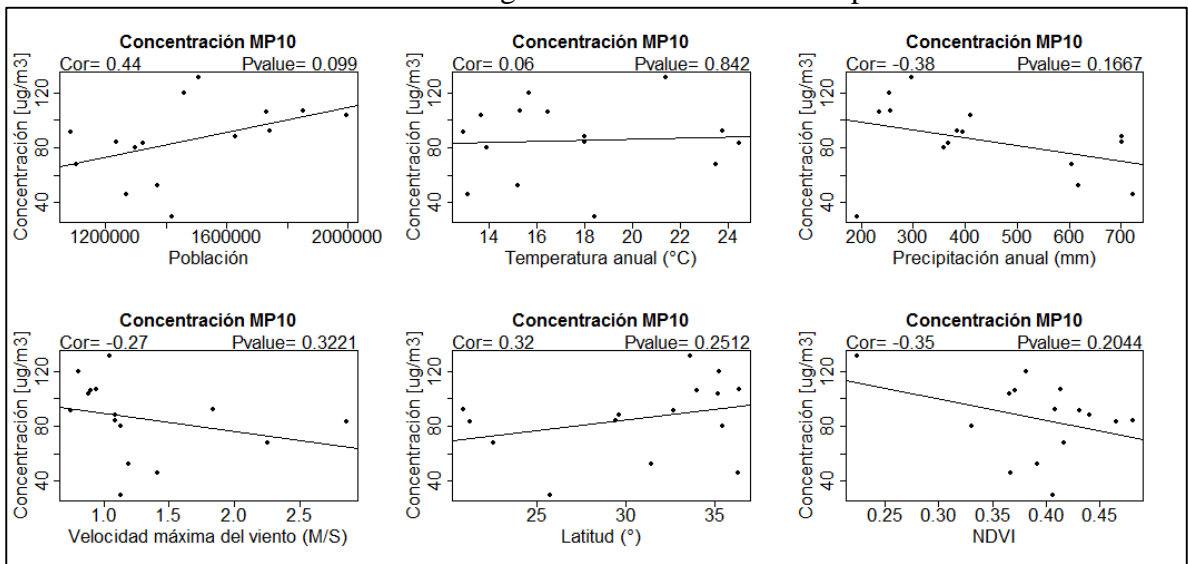
APÉNDICE XXXII. Resultados de regresiones en clima Csb de población pequeña



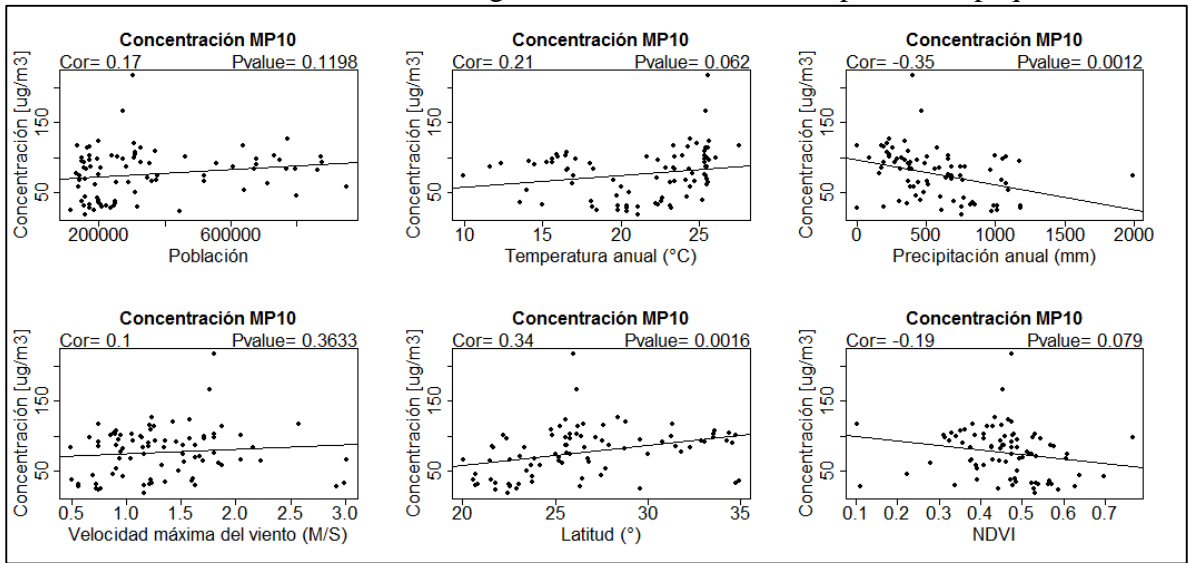
APÉNDICE XXXIII. Resultados de regresiones en clima Cwa de población grande



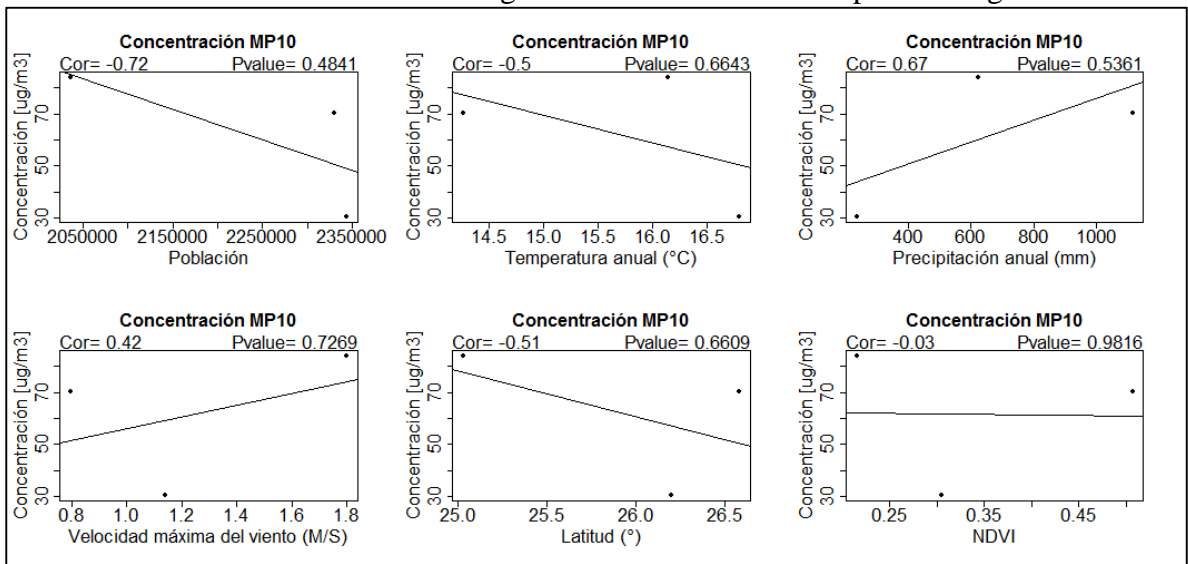
APÉNDICE XXXIV. Resultados de regresiones en clima Cwa de población mediana



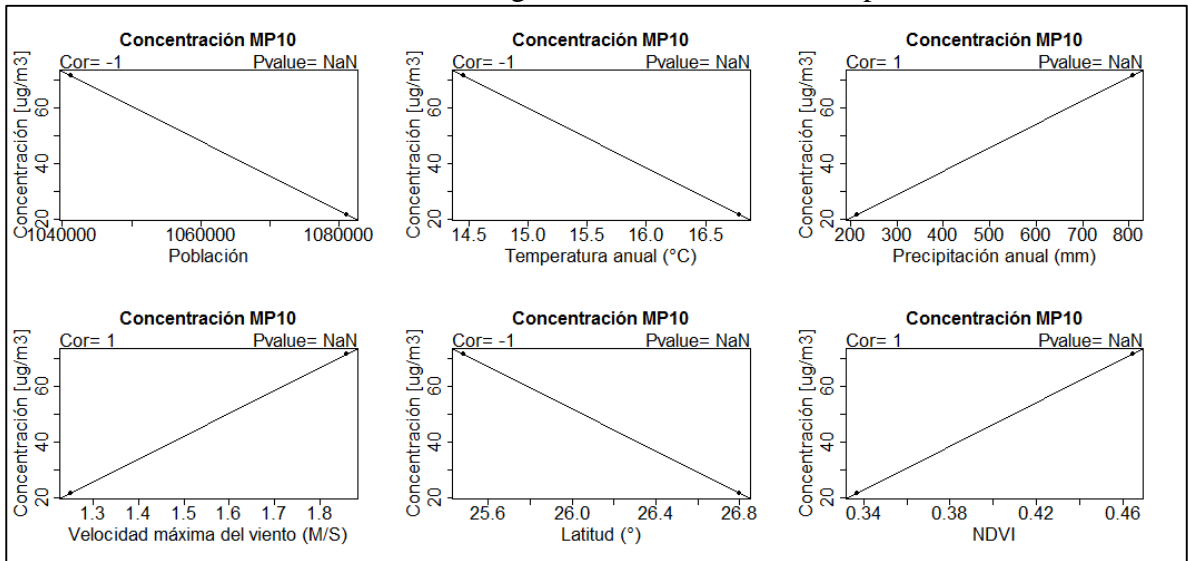
APÉNDICE XXXV. Resultados de regresiones en clima Cwa de población pequeña



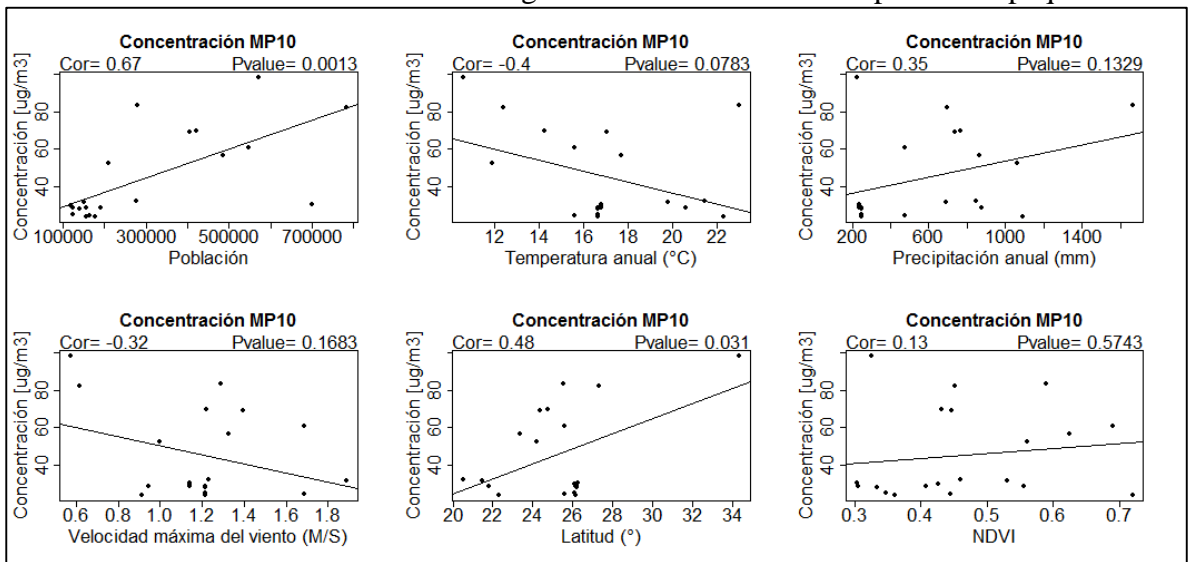
APÉNDICE XXXVI. Resultados de regresiones en clima Cwb de población grande



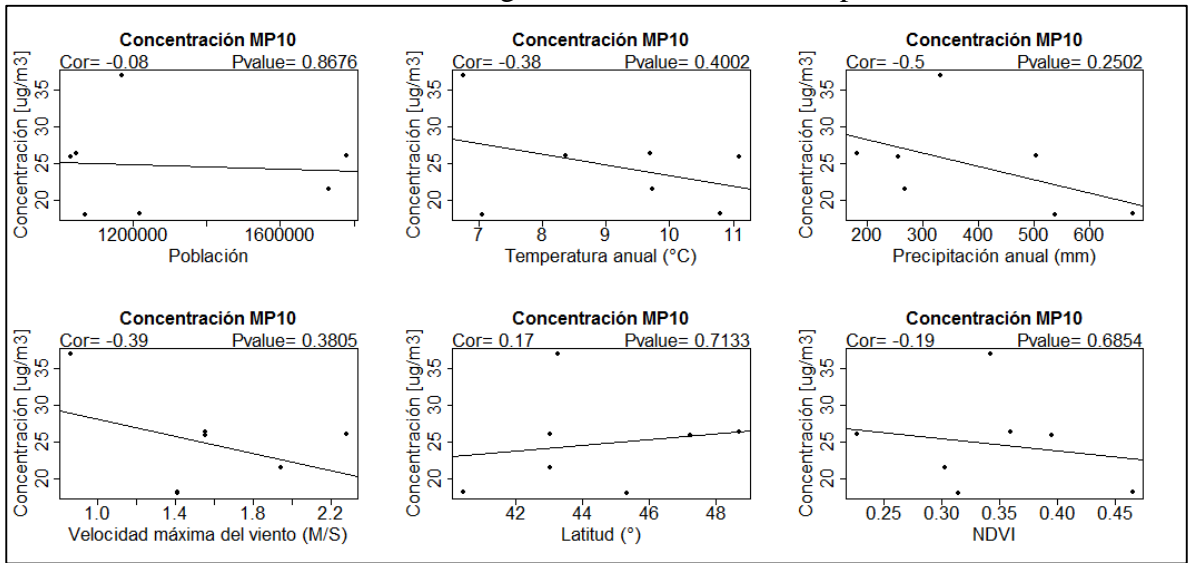
APÉNDICE XXXVII. Resultados de regresiones en clima Cwb de población mediana



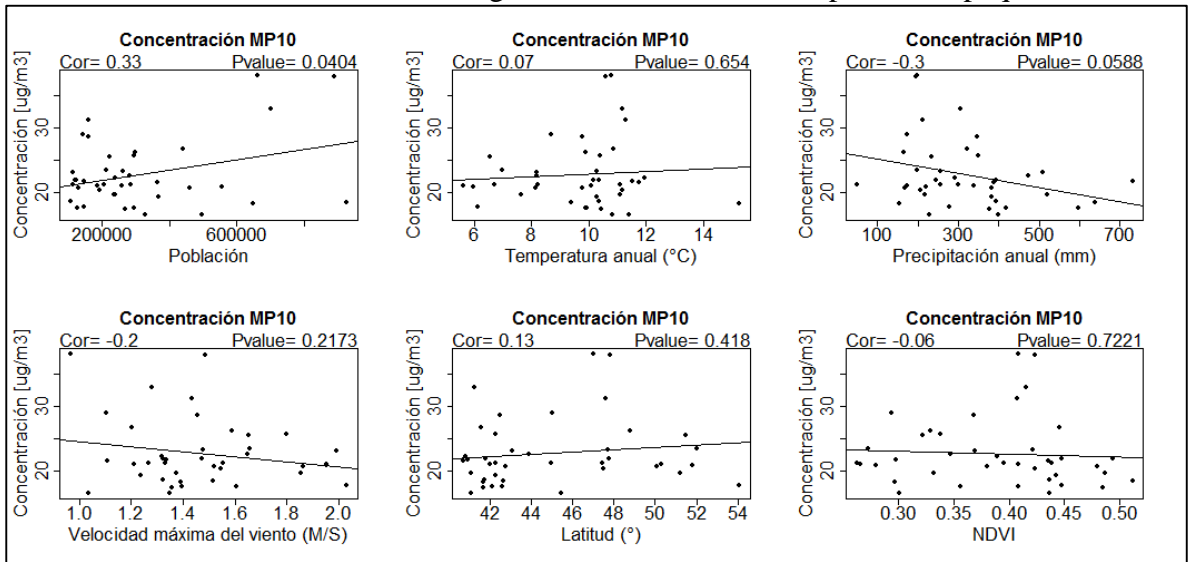
APÉNDICE XXXVIII. Resultados de regresiones en clima Cwb de población pequeña



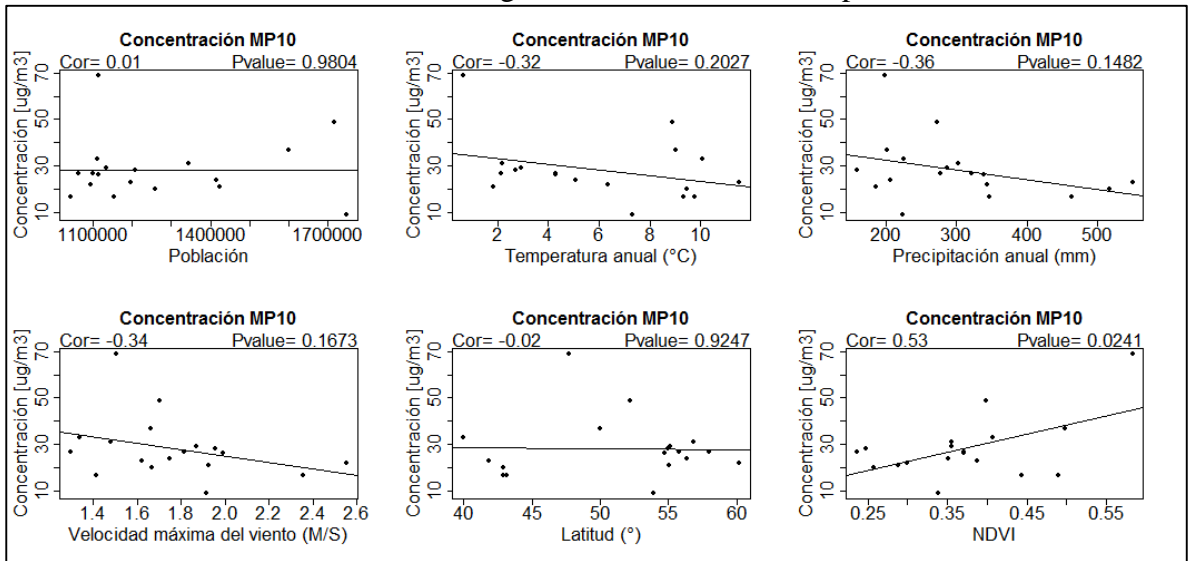
APÉNDICE XXXIX. Resultados de regresiones en clima Dfa de población mediana



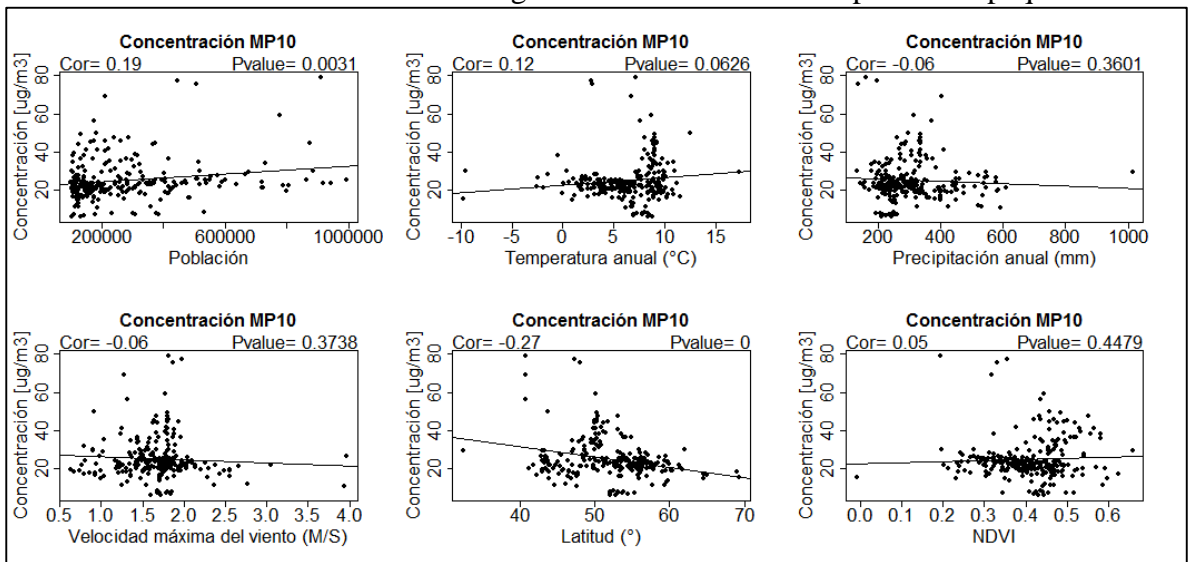
APÉNDICE XXXX. Resultados de regresiones en clima Dfa de población pequeña



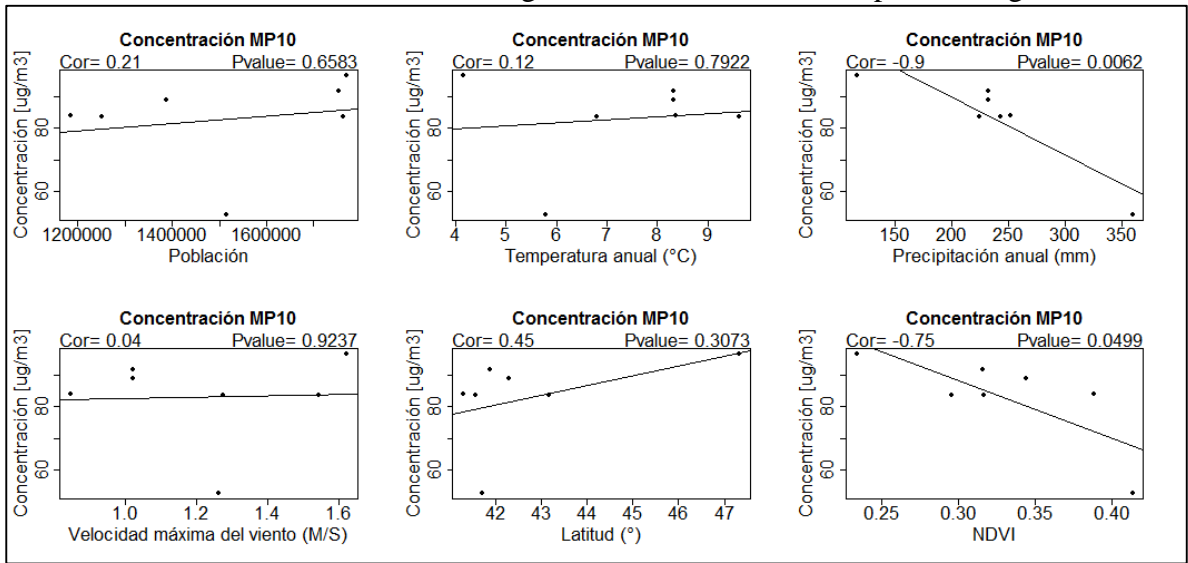
APÉNDICE XXXXI. Resultados de regresiones en clima Dfb de población mediana



APÉNDICE XXXXII. Resultados de regresiones en clima Dfb de población pequeña



APÉNDICE XXXXIII. Resultados de regresiones en clima Dwa de población grande



APÉNDICE XXXXIV. Resultados de regresiones en clima Dwa de población mediana

