

CAPÍTULO 8. DEPÓSITO ATMOSFÉRICO EN LA ZMVM

DEPÓSITO HÚMEDO O LLUVIA ÁCIDA

Como se comentó en el Capítulo 3 el *depósito atmosférico* se conforma por el *depósito seco* y el *depósito húmedo*, también referido como *lluvia ácida*. Su monitoreo permite estimar la transferencia de compuestos químicos suspendidos en la atmósfera a los ecosistemas terrestres y acuáticos, permitiendo ampliar el conocimiento acerca del flujo químico de estos compuestos y la dinámica de la contaminación, sus fuentes e impactos.

El SO₂ y los NO_x presentes en la atmósfera pueden transformarse en compuestos ácidos a través de reacciones que involucran el vapor de agua, la luz solar y otros gases. Estos ácidos se encuentran en forma de pequeñas gotas suspendidas, que pueden absorberse en la superficie de algunas partículas o formar núcleos que generan nuevas gotas o partículas. Durante un evento de precipitación pluvial, nieve, rocío, niebla, neblina, agua nieve o granizo, estas partículas o gotas ácidas pueden arrastrarse, incrementando la acidez del agua contenida en estos meteoros (Henry J. G. y Heinke G. W., 1989).

Es importante señalar que en condiciones normales, el agua de lluvia presenta una ligera acidez, causada por el equilibrio del ácido carbónico –CO₂– en el agua (Informe Anual 2000, disponible en Internet). En algunas circunstancias puede tornarse alcalina por efecto del polvo de origen geológico.

La lluvia ácida es producto de la contaminación de la atmósfera, la cual puede generarse y depositarse localmente, pero también puede ser arrastrada a cientos o miles de kilómetros por los vientos prevalecientes, este fenómeno es conocido como *Transporte Aéreo de Contaminantes a Grandes Distancias* (TACGD) (Henry J. G. y Heinke G. W., 1989). Los especialistas en esta área describen el comportamiento de la lluvia ácida, como aquél que ocurre viento abajo de las fuentes de emisión de SO₂ y NO_x, los cuales pueden reaccionar químicamente para transformarse en ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃), respectivamente. Existen otros ácidos orgánicos e inorgánicos formados en la atmósfera que tienen una contribución menor.

La lluvia ácida contribuye a la acidificación de ríos y lagos, afectando directamente a las poblaciones de estos ecosistemas. Otros compuestos como el nitrógeno (N), contribuyen al proceso de eutrofización³⁴ de los lagos. En el caso de los bosques, la lluvia ácida puede provocar el debilitamiento de los árboles y la disponibilidad de nutrientes del suelo, así como la formación de otros compuestos. En zonas donde el suelo tiene poca capacidad para neutralizar la acidez del agua de lluvia, se incrementa la disolución de compuestos, como el aluminio, los cuales se transportan hacia los cuerpos de agua.

Los compuestos de la lluvia ácida contribuyen a la corrosión en superficies metálicas y al deterioro de la infraestructura urbana, pintura de automóviles, construcciones y monumentos históricos. Aun cuando la lluvia ácida no provoca un daño directo a la salud humana, sus precursores están asociados a la formación de partículas finas y la disminución de la visibilidad. Como se mencionó en el Capítulo 1, las concentraciones elevadas de partículas se asocian con padecimientos respiratorios y con casos de muerte prematura por afecciones cardíacas o respiratorias.

La acidez del agua de lluvia se reporta en unidades de pH o potencial de hidrógeno, que indica la concentración de iones hidrónio (H⁺) en una solución. La acidez es proporcional a la concentración de H⁺ y se relacionan de la siguiente manera:

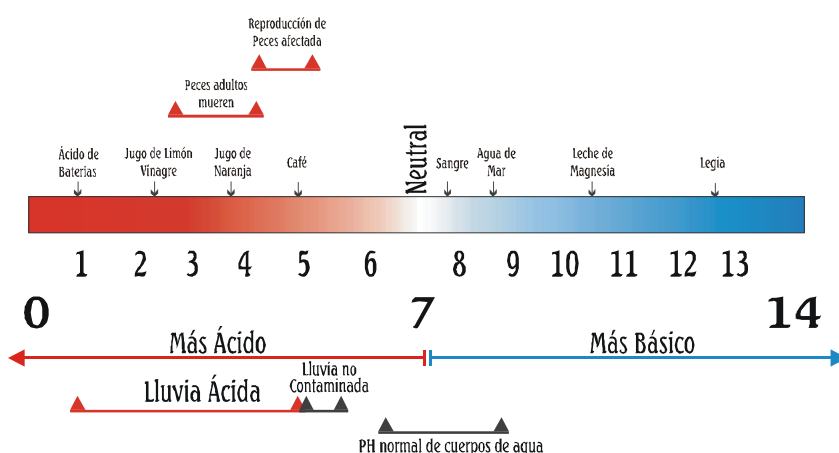
$$pH = -\log[H^+] \quad \text{y} \quad [H^+] = 10^{-pH}$$

³⁴ La *eutrofización* se presenta cuando se observa una reducción en la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Los síntomas de la eutrofización son el crecimiento desmedido de algas, la pérdida de la salud de los peces y crustáceos, y cambios notables en la cadena alimenticia.

El pH de una solución se encuentra en un intervalo de 0 a 14 (Figura 43). Las soluciones ácidas tienen un pH menor a 7, las básicas o alcalinas tienen un valor mayor a 7. Un valor de pH de 7 es considerado como neutro, el agua pura tiene un pH aproximado de 7 (CIID, disponible en Internet; Finlayson-Pitts, 1948; Ahrens, 1999).

La manera de interpretar la escala del pH es la siguiente: una solución con un pH de 4, es diez veces más ácida que una de 5 y cien veces más ácida que una de 6; la proporción se va multiplicando por diez a medida que disminuyen los valores del pH (REDES–Amigos de la Tierra, disponible en Internet). El pH natural del agua de lluvia es de 5.6, ligeramente ácido debido a la presencia de ácido carbónico, a partir de este valor puede ir hasta 2.5 y excepcionalmente hasta 1.5. Cabe señalar que en los ecosistemas acuáticos, la disminución del pH y el incremento de compuestos como el aluminio, puede provocar la muerte en especies sensibles o la disminución de peso y talla.

Figura 43. Escala de pH.



Fuente: Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID)

COMPOSICIÓN DEL DEPÓSITO HÚMEDO

La composición del depósito húmedo es un indicador del impacto en los ecosistemas y materiales antes señalados, y permite ampliar el conocimiento acerca del flujo de sustancias químicas de la atmósfera a la superficie terrestre. Los compuestos analizados en la REDDA son:

➤ Ion Hidrónio (H^+)

La acidez del agua de lluvia depende de la concentración de iones H^+ presentes (medidos a través del pH), que pueden producirse por la disociación de ácidos orgánicos (por ejemplo: ácido fórmico, ácido acético) e inorgánicos (ácido sulfúrico, ácido nítrico, ácido sulfuroso, entre otros) en la fase acuosa.

➤ Ion Nitrato (NO_3^-)

El ion NO_3^- se forma en la atmósfera por la oxidación de los NO_x , a través de diversos mecanismos de reacción. El NO_3^- se encuentra en las fases sólida y líquida de las partículas, formando sales o en pequeñas gotas de HNO_3 ; también se encuentra en disolución acuosa en las nubes y el agua de lluvia.

➤ Ion Sulfato (SO_4^{2-})

Los sulfatos se forman a partir de la oxidación en fase gaseosa o acuosa del SO_2 . Al igual que los nitratos se encuentran en las fases sólida y líquida de las partículas suspendidas y en disolución acuosa en las nubes y el agua de lluvia.

➤ **Cationes (NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+)**

Entre los compuestos de origen natural que neutralizan la acidez del agua se encuentran: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (Na^+), que provienen principalmente del polvo, aerosoles marinos o incendios forestales (Tabla 28). Entre los compuestos de origen antropogénico se encuentra el amonio (NH_4^+).

Tabla 28. Cationes analizados en el agua de lluvia, SIMAT de la Ciudad de México.

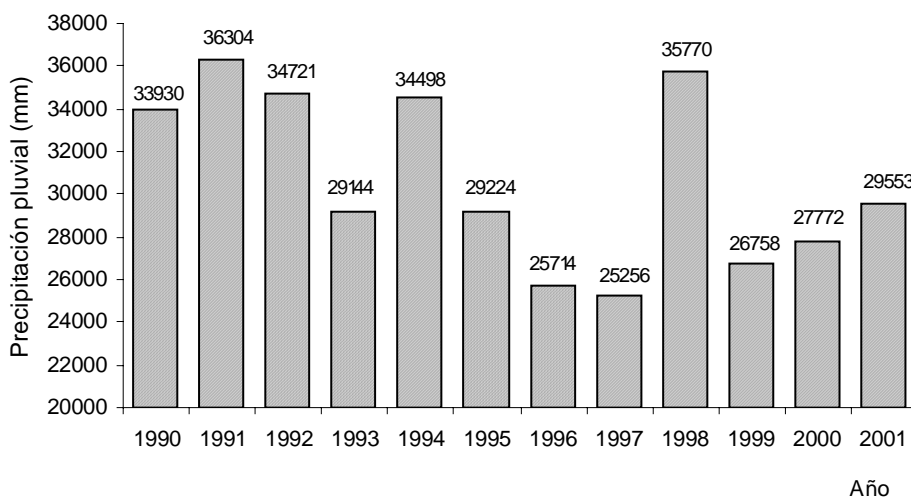
PARÁMETRO	FUENTES DE ORIGEN	PRECURSOR
Amonio (NH_4^+)	Producción ganadera, uso de fertilizantes, procesos industriales (elaboración de alimentos y forrajes), en menor proporción por flujo vehicular, combustión de carbón, actividad bacteriana y de la respiración humana, materia en descomposición abundante en tiraderos a cielo abierto.	Amoniaco
Calcio (Ca^{2+})	Erosión del suelo, origen natural en rocas silíceas.	Suelos alcalinos
Magnesio (Mg^{2+})	Erosión del suelo, origen natural en plantas, agua de mar y corteza terrestre.	Suelos ricos en magnesita y dolomita
Sodio (Na^+)	Erosión del suelo, polvos provenientes de la corteza terrestre.	Cloruro de sodio
Potasio (K^+)	Erosión del suelo e incendios, polvos provenientes de la corteza terrestre.	Combustión de material vegetal.

COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN LA ÉPOCA DE LLUVIAS DE LA ZMVM

En el Capítulo 7 se comentó que debido al "lavado" de la atmósfera durante la época de lluvias de la ZMVM (junio a octubre), la mayoría de los contaminantes atmosféricos presentan concentraciones bajas, lo que permite una mejor calidad del aire. No obstante, el análisis de la composición y propiedades³⁵ del agua de lluvia, por medio del depósito húmedo, permite estimar el impacto que puede provocar en los ecosistemas y materiales.

Previo a este análisis es necesario destacar que la cantidad de lluvia captada en la ZMVM durante la época de lluvias, ha variado a lo largo del período de 1990 a 2001 (Figura 44). En el caso de 1998, la diferencia que presenta con respecto a los otros años, se debió principalmente a las intensas lluvias registradas en septiembre.

Figura 44. Precipitación pluvial captada durante la época de lluvias (junio-octubre) en la ZMVM (período 1990–2001).

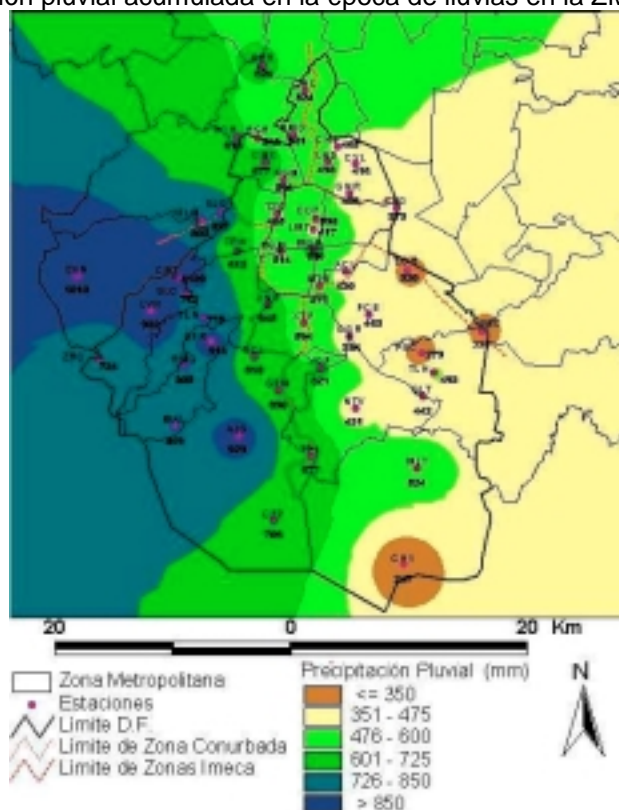


Fuente de datos: DGCOH

³⁵ Las propiedades químicas del agua de lluvia que se analizan son pH, aniones y cationes y de las características físicas la conductividad específica.

Así mismo, es necesario considerar que la precipitación pluvial no es homogénea en la ZMVM, ya que en la región que comprenden las delegaciones Tlalpan, Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Cuajimalpa y los municipios de Huixquilucan y Naucalpan, se registra un mayor volumen de precipitación; mientras que en la región que comprende las delegaciones Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa, Tláhuac, Milpa Alta y los municipios conurbados del este, se registra el menor volumen (Mapa 10).

Mapa 10. Precipitación pluvial acumulada en la época de lluvias en la ZMVM (2001).



Fuente de datos: DGCOH

Al analizar los resultados del depósito húmedo se debe considerar el comportamiento temporal y espacial de la precipitación pluvial en la ZMVM, ya que la presencia de los compuestos antes señalados está influenciada por la intensidad de la precipitación, ya que en medida del incremento en volumen aumenta el depósito de los compuestos indicados.

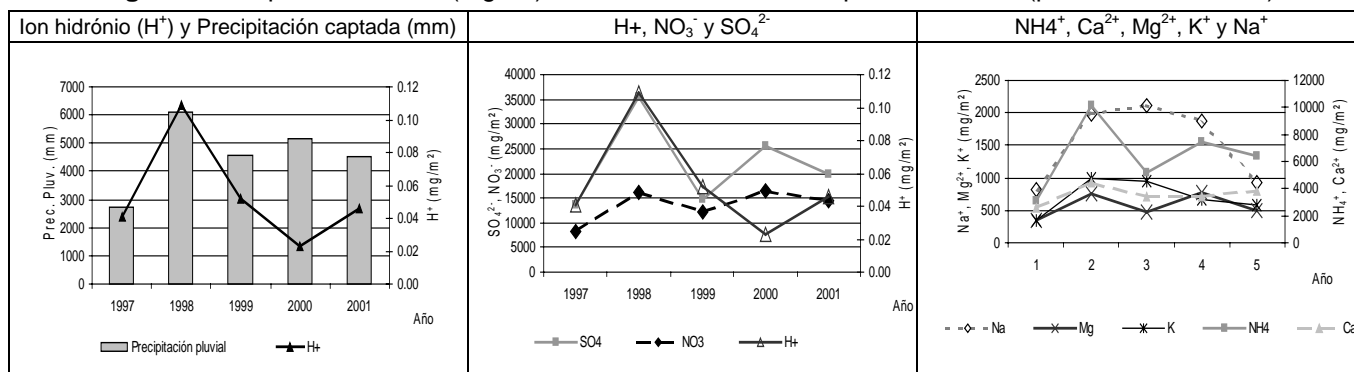
COMPORTAMIENTO DE LOS COMPUESTOS DEL DEPÓSITO HÚMEDO EN LA ZMVM, 1997 A 2001

Al evaluar el comportamiento del indicador de depósito acumulado para los compuestos del agua captada durante la época de lluvias del período 1997–2001, se aprecia que en 1998 se registró el mayor depósito de estos compuestos (Figura 45). Por el contrario, en 1997 cuando se registraron niveles bajos de precipitación pluvial, los compuestos de origen natural (K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} y Na^+), tuvieron un menor depósito húmedo.³⁶

En relación con el año 2000, destaca por haber presentado niveles bajos del H^+ , aun cuando los niveles de NO_3^- y SO_4^{2-} aumentaron. Al mismo tiempo se presentó un aumento en el depósito de los compuestos de origen natural (K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} y Na^+). Por su parte, en el año 2001 volvió a incrementarse la presencia del H^+ , por lo que debió incrementarse la acidez de la lluvia.

³⁶ El Anexo 8 muestra el comportamiento para cada compuesto por estación de monitoreo a lo largo del período 1997-2001 (Promedio ponderado y Depósito).

Figura 45. Depósito húmedo (mg/m^2) en la ZMVM durante la época de lluvias (período 1997–2001).



COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LOS COMPUESTOS DEL DEPÓSITO HÚMEDO

El comportamiento espacial de los indicadores depósito y promedio ponderado (ver Capítulo 3) durante la época de lluvia de 2001, ilustran el proceso de transporte viento abajo de contaminantes atmosféricos en la ZMVM. En el caso del promedio ponderado, los valores obtenidos para NO_3^- y SO_4^{2-} en la región sur, son tan altos o mayores que los obtenidos en el norte de la ciudad, mientras que los valores más bajos de pH (4.6 a 5.0) prevalecieron en el suroeste. Por su parte, los compuestos de origen natural reflejan una posible influencia de fuentes de emisión localizadas hacia el norte y este de la ciudad, donde predominan suelos sin cubierta vegetal (Mapa 11).

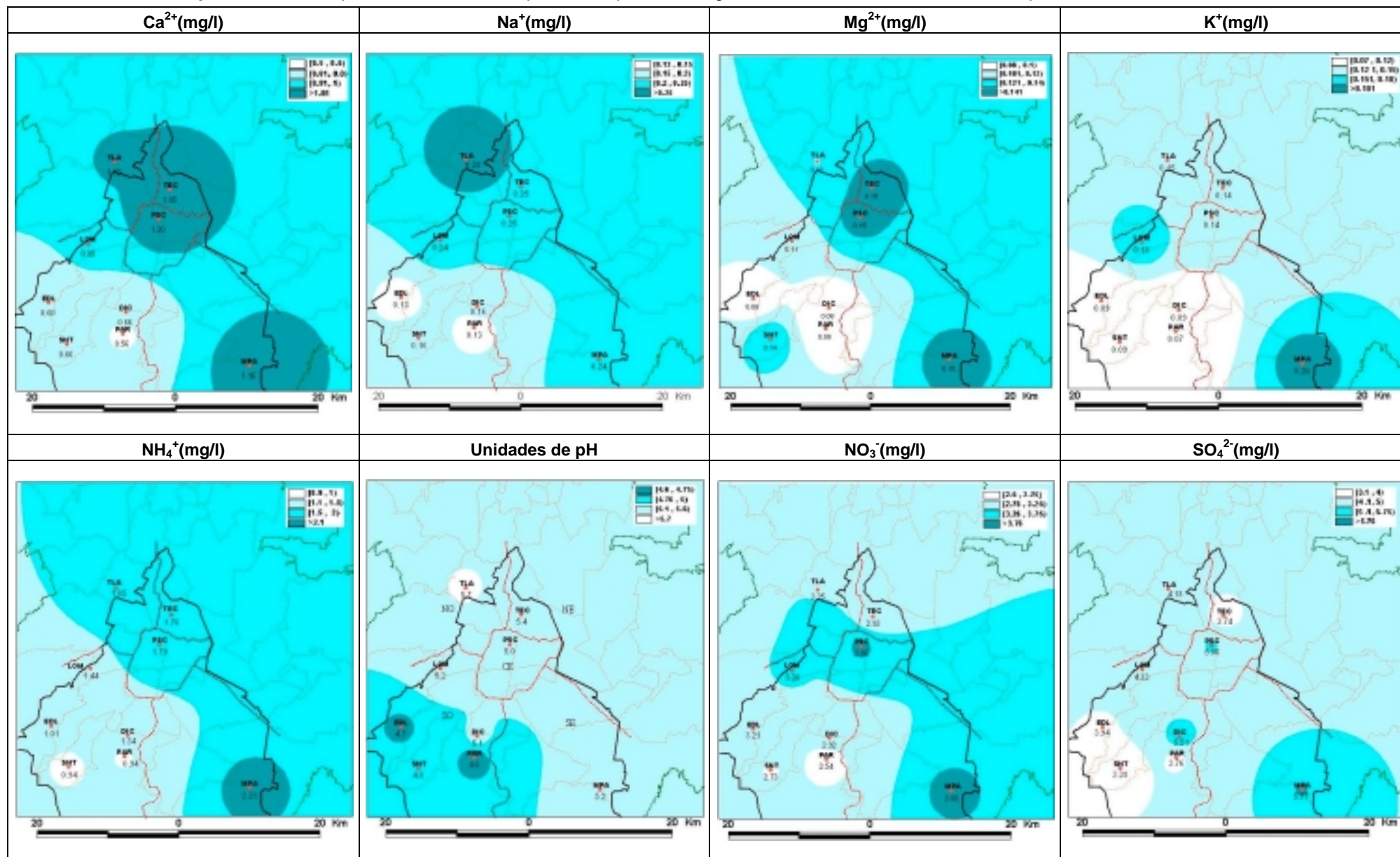
Por su parte, el análisis del depósito mostró que la región comprendida por las delegaciones Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Tlalpan y Coyoacán, y el municipio de Huixquilucan del Estado de México, recibió la mayor cantidad de iones depositados (Mapa 12). Esta región se caracteriza por recibir la mayor cantidad de precipitación pluvial. Así mismo la región que comprenden las delegaciones Gustavo A. Madero, Tláhuac y Milpa Alta, y el municipio de Tlalnepantla, se caracterizaron por registrar un menor depósito.

En adición a los resultados del apartado anterior, se concluye que durante 1998 se registró la mayor cantidad de compuestos en el agua de lluvia y que la región suroeste de la ZMVM recibe en mayor proporción aniones y cationes, al mismo tiempo que presenta los niveles más ácidos en el agua de lluvia. Cabe señalar que esta región concentra áreas de conservación ecológica, cuya altura máxima llega a alcanzar hasta 3,800 msnm (considerada como una de las de mayor altitud en la ZMVM), con diversidad de climas³⁷ y uso de suelo (bosque, pastizal y agrícola), dos de las tres subcuencas hidrológicas de la ZMVM (Río Huajapa y Río Huautla), cuerpos de agua (Río Almoloya-Otzolotepec), varias corrientes de agua (El Sordo, Texcalatlaco, La Magdalena y El Cuatzin) y el Acuífero Tarango (INEGI, 2001).

Es importante comentar que la variación que presentó el pH durante 2001 en la ZMVM, fue similar a la que reporta la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) en el Programa Nacional de Deposito Atmosférico (NADP, por sus siglas en inglés, disponible en Internet).

³⁷ Templado subhúmedo, semifrío subhúmedo y semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano.

Mapa 11. Promedio ponderado de los compuestos captados en agua de lluvia en la ZMVM durante la época de lluvias 2001.



Mapa 12. Depósito húmedo de los compuestos captados en agua de lluvia en la ZMVM durante la época de lluvias 2001.

