



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES Tropical Journal of Environmental Sciences



Composición química de muestras de depositación total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica en 2012

Chemical composition of total deposition samples collected in the metropolitan area of Costa Rica in 2012

Jorge Herrera^a, José Félix Rojas^b, Víctor Hugo Beita^c y María Chaves^d

^a Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr ^b Químico e Investigador s investigador en dicho Laboratorio, Costa Rica, jfrojas60@yahoo.com. ^c Químico industrial, es encargado de la sección de aire de dicho Laboratorio, Costa Rica, victor.beita.guerrero@gmail.com. ^f Química industrial, es encargada de la Sección de Aguas del mismo Laboratorio, Costa Rica, maria.chaves.villalobos@una.cr.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza
Enrique Leff, UNAM, México
Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica
Arturo Sánchez, Universidad de Alberta, Canadá
Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica
Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica
Gerardo Budowski (†), Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Composición química de muestras de depositación total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica en 2012

*Jorge Herrera, José Félix Rojas,
Víctor Hugo Beita y María Chaves*

J. Herrera, químico, es coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional.

J. F. Rojas, químico, es investigador en dicho Laboratorio.

V. H. Beita, químico industrial, es encargado de la Sección de Aire del mencionado Laboratorio.

M. Chaves, química industrial, es encargada de la Sección de Aguas del mismo Laboratorio.

Resumen

Las concentraciones de iones inorgánicos fueron medidas en muestras de depositación total en siete sitios de San José, Heredia y Belén, durante la temporada de lluvias del año 2012. Los iones SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se analizaron mediante cromatografía de intercambio iónico. Los resultados indicaron que Na^+ y SO_4^{2-} resultaron ser los iones más abundantes. El análisis de correlación de Pearson, aplicado a todos los datos, mostró una alta correlación entre SO_4^{2-} con NO_3^- , Ca^{2+} y NH_4^+ , lo que indica un origen antropogénico y de neutralización, respectivamente. La contribución de NO_3^- a la neutralización resultó ser relativamente pequeña en comparación con el SO_4^{2-} .

Abstract

Inorganic ions concentrations were measured on bulk precipitation samples in seven sites in San José, Heredia and Belén cities during the rainy season 2012. SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} were analyzed by ion chromatography. The results indicated that Na^+ and SO_4^{2-} were the most abundant ions. Pearson's correlation, applied to all data, showed a high correlation between SO_4^{2-} with NO_3^- , Ca^{2+} and NH_4^+ , indicating an anthropogenic and neutralization origin respectively. The contribution of NO_3^- to neutralization was relatively small in comparison with SO_4^{2-} . PCA analysis was used in order to identify the mainly sources (crystal, neutralization and

Introducción

La depositación total es a menudo definida, operacionalmente, como la precipitación de material en un muestreador abierto, en forma continua, en un determinado sitio. La remoción de un contaminante en la atmósfera puede ocurrir por depositación húmeda o seca; la primera tiene lugar en forma intermitente, mientras que la segunda es continua. En la húmeda, los gases y partículas son transportados por gotas de agua hacia la superficie, donde colisionan, son absorbidos o experimentan reacciones químicas en fase acuosa. Así, por ejemplo, el flujo atmosférico es la mayor contribución de metales traza e iones inorgánicos en sistemas marinos y terrestres (Tramontano et al., 1987).

La evaluación del origen de los componentes químicos presentes en las muestras de depositación es difícil, sobre todo porque esta es el resultado de un conjunto complejo de interacciones entre la dinámica de las nubes, los

Se utilizó el análisis PCA, a fin de identificar las principales fuentes (polvo cristal, neutralización y aerosol marino) que contribuyen, principalmente, a la composición química de las muestras de depositación total.

Palabras clave: iones solubles en agua, depositación total, contaminación atmosférica, contaminación urbana, Costa Rica.

marine aerosol) and that contribute to the chemical composition of the bulk precipitation samples.

Keywords: water soluble ions, bulk precipitation, air pollution, urban pollution, Costa Rica.

procesos microfísicos de suspensión y las reacciones químicas de lavado atmosférico (Mouli et al., 2005 y Kulshrestha et al., 1999). El estudio de la composición de la depositación total brinda datos valiosos que permiten evaluar la importancia relativa de las diferentes fuentes de emisión de gases y material particulado a la atmósfera, generados principalmente por las actividades antropogénicas asociadas al desarrollo de grandes centros de población con economías de rápido crecimiento, la producción agrícola y la industrialización con alto consumo de combustibles (Cao et al., 2009).

Un evento de depositación total se cataloga como ácido si tiene un pH inferior a 5,6, el valor esperado en el equilibrio del agua pura con el CO₂ atmosférico (Mello, 2001). La disminución de los valores de pH es básicamente causada por la presencia de ácido sulfúrico, nítrico y ácidos carboxílicos, ácido carbónico, acético y fórmico, entre otros. Los principales precursores de los primeros tres ácidos son las emisiones de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos carboxílicos (Migliavacca et al., 2005). Estos procesos implican reacciones químicas complejas que ocurren en la atmósfera antes de la ocurrencia de eventos de lluvia. La depositación ácida puede ser causada tanto por el transporte a larga distancia de los contaminantes como por la contribución de fuentes locales. Por otra parte, la neutralización de la acidez en el agua de lluvia se produce debido a la presencia de especies alcalinas como el CaCO₃ en polvo en el aire y al amoníaco liberado a partir de fuentes naturales, industriales y agrícolas (Fujita et al., 2000).

La deposición de los flujos de material particulado y la tasa en la que estos se dan por la vía húmeda con respecto a la seca son controladas por las fuentes de emisión, las concentraciones atmosféricas, la distancia

de los sitios al receptor y las condiciones meteorológicas (es decir, la velocidad del viento, la dirección del viento, la frecuencia, cantidad e intensidad de las precipitaciones que prevalecen) (Mijic et al., 2010; Okubo et al., 2013).

El área metropolitana de Costa Rica es una región que se caracteriza por ser una meseta de aproximadamente 2 700 km², con un promedio de altitud de 1 100 m sobre el nivel del mar, la cual forma parte del sistema montañoso que atraviesa el país de noroeste a sureste. Esta zona geográfica se encuentra conformada por la integración de cuatro ciudades (Alajuela, Heredia, Cartago y San José) y numerosos centros de población más pequeños que hasta hace unos años constituían islas en medio de zonas de cultivos, pero que actualmente, debido al patrón de crecimiento observado por la región, se han ido consolidando en un solo centro urbano junto a las ciudades (OUGAM, 2013).

El presente estudio analizó la composición química de muestras de precipitación total colectadas,

en el área metropolitana, con el fin de analizar las variaciones temporales y espaciales, así como para obtener información de las posibles fuentes de contaminantes que contribuyen a determinar tanto las características químicas de estas como los posibles impactos a ecosistemas e infraestructura. El artículo muestra los resultados correspondientes al 2012; sin embargo, el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional realiza un muestreo durante todas las épocas lluviosas, desde el 2005, en los mismos sitios de muestreo.

Metodología

Muestreo

Para realizar el muestreo de depositación total, se seleccionaron siete sitios de muestreo distribuidos en tres municipios del área metropolitana: San José, Heredia y Belén, los cuales se detallan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Ubicación de los sitios utilizados para el muestreo de depositación total en el área metropolitana de Costa Rica

| Código del sitio | Cantón | Ubicación | Representatividad del sitio |
|------------------|----------|-----------------------------------------------|----------------------------------|
| SJ-01 | San José | Plantel Municipal, Municipalidad de San José | Comercial |
| SJ-02 | San José | Sección de Parques, Municipalidad de San José | Comercial |
| SJ-03 | San José | Centro de Reciclaje Municipal, Hatillo | Transición Residencial/comercial |
| SJ-04 | San José | Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca | Comercial |
| SJ-05 | San José | Registro Nacional, Zapote | Comercial |
| BE-01 | Belén | La Ribera | Transición Comercial/residencial |
| HE-01 | Heredia | Rectoría de la Universidad Nacional | Comercial |

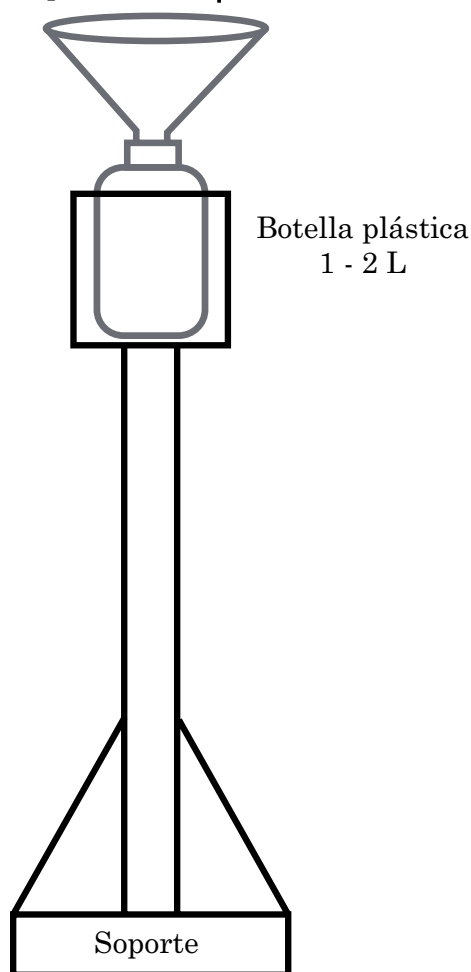
El muestreo de la depositación total se efectuó usando un embudo de polietileno de 20 cm de diámetro, acoplado a una botella de polietileno de alta densidad de un litro, mediante un orificio en la tapa, rellenando el espacio libre, entre

el embudo y la tapa, con silicona caliente, para evitar la contaminación de la muestra (figura 1). El sistema de muestreo se encontraba sostenido por una base de metal de 1,25 m de altura, para prevenir la contaminación del sistema por

salpicaduras. El colector utilizado cumple con las especificaciones recomendadas por Galloway et al. (1982) y permite captar la precipitación húmeda más algunos componentes introducidos al colector en forma seca. Tanto el embudo como la botella de colección para la precipitación total, utilizada en el análisis de iones, se lavaron con agua desionizada, entre muestreos. La colección de las muestras durante las campañas se efectuó en períodos de 24 horas, durante los meses de mayo a noviembre de cada año. Los volúmenes colectados variaron desde 15 hasta 137 ml. El número total de muestras colectadas fue de 1618.

Figura 1. Colector de deposición total

Embudo plástico con $\phi=20$ cm



Tratamiento de la muestra

Una vez colectadas las muestras fueron trasladadas al laboratorio, en donde a la muestra para el análisis de iones se le determinó el volumen de agua colectado, con una probeta, y se procedió a medir tanto el pH como la conductividad de esta, empleando un equipo marca OAKTON, modelo pH/CON 510, el cual permite la medición simultánea de ambos parámetros. La medición de estos parámetros en las muestras de precipitación total se realizó, como máximo, tres horas después de la colección. Posteriormente, se filtró una alícuota de la muestra a través de un filtro de membrana Millipore de $0,22 \mu\text{m}$, la cual se utilizó en el análisis de los principales iones inorgánicos presentes (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , F^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , H^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}). Las muestras se conservaron a $4,0^\circ\text{C}$, adicionando una gota de cloroformo, y la cuantificación de los iones se realizó antes de 48 horas. Cada día de colección de muestras, se trasladó al campo una botella de polietileno de alta densidad, llena con agua desionizada, la cual fue abierta (el tiempo promedio que dura el muestreador en enjuagar tres veces el recipiente que va a contener la muestra colectada y en llenarlo con esta) y, posteriormente, fue trasladada de nuevo al laboratorio para su análisis. Lo anterior con el fin de evaluar posibles fuentes de contaminación de la muestra, por su manipulación durante el muestreo, y de realizar las correcciones necesarias si fuese pertinente. La metodología de muestreo así como el tratamiento de las muestras colectadas se realizó de acuerdo con lo recomendado por Galloway et al. (1982).

Análisis químico

La determinación de los iones se realizó mediante cromatografía de intercambio iónico con supresión, empleando un equipo marca DIONEX ICS-3000, de acuerdo con las condiciones de operación indicadas en el cuadro 2. Las especies iónicas

Cuadro 2. Condiciones instrumentales empleadas en la determinación de iones en las muestras de deposición total colectadas

| | Aniones | Cationes |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Detector | Conductividad eléctrica acoplada al supresor | |
| Columna | Dionex IonPac AS9-HC Tamaño de partícula: 9 µm (2 x 250 mm) | Dionex IonPac CS12A Tamaño de partícula: 9 µm (2 x 250 mm) |
| Supresor electrolítico | Dionex ASRS ULTRA II | |
| Fase móvil | Disolución de Na ₂ CO ₃ 9 mM a un pH = 10,88 | Disolución de ácido metanosulfónico 20 mM |
| Volumen de inyección | 10 µl | |
| Flujo de fase móvil | 0,25 ml/min | |
| Temperatura de columna | 30 °C | |

fueron identificadas y cuantificadas por interpolación, en una curva de calibración de siete disoluciones estándar preparadas en un ámbito de trabajo de 0,1 a 8,0 mg/l para aniones y de 0,5 a 7,0 mg/l para cationes. Las disoluciones de la curva de calibración se corrieron una vez cada diez muestras analizadas, junto con una disolución de control de calidad de 5,0 mg/l preparada a partir de una muestra certificada sintética marca DIONEX.

En forma adicional, se determinaron los límites de detección de los iones, para lo cual se analizaron diez muestras de blancos independientes medidos cada uno una vez, utilizando el mismo procedimiento de análisis aplicado a las muestras recolectadas. Los límites de detección se calcularon con la concentración que genera una señal igual al promedio de la señal de los blancos

más tres veces la desviación estándar de estos. Los límites de detección obtenidos se muestran en el cuadro 3. La metodología de análisis fue tomada de Herrera (2009).

Las concentraciones de iones obtenidas se ponderaron por volumen, utilizando la ecuación 1:

$$X \text{ ponderada} = \frac{\sum(V_i \times X_i)}{V_t} \quad (1)$$

V_i = volumen de precipitación total colectada para la muestra i

X_i = concentración del analito obtenida para la muestra i

V_t = volumen de precipitación colectada para la totalidad de muestras por sitio

Cuadro 3. Límites de detección (mg/l) obtenidos para las muestras de deposición total analizadas

| SO ₄ ²⁻ | NO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | PO ₄ ³⁻ | F ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | NH ₄ ⁺ |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------------------|
| 0,09 | 0,03 | 0,08 | 0,08 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,06 | 0,03 |

Resultados y discusión

En el cuadro 4 se presentan los valores medios ponderados por volumen con su respectiva desviación estándar, obtenidos para conductividad, y los iones inorgánicos mayoritarios determinados en las muestras de depositación total colectadas en los sitios de monitoreo. Tal como se puede observar, los valores de pH más ácidos se registran en los sitios BE-01 (4,37), HE-01 (4,45) y SJ-04 (4,52), los cuales están ubicados en zonas comerciales de alto flujo vehicular. Para estos tres sitios, aproximadamente entre el 10 % y el 21 % de los eventos presenta pH más ácidos que 5,6, que es el pH del agua de nube en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico (Charlson y Rodhe, 1982). Las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las muestras de precipitación total obedecen el siguiente orden: $\text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{NO}_3^-$ y representan el 58 %, 20,1 %, 12,6 %, 6,4 %, 2,1 %, 1,9 % y 0,9 %, respectivamente.

El cuadro 5 expone la matriz de coeficientes de correlación de Pearson, resultante entre las

concentraciones de iones en las muestras de depositación total. Al aplicar dicha herramienta, se encuentran correlaciones altas y significativas a $p < 0,05$ entre SO_4^{2-} con NO_3^- , Ca^{2+} y NH_4^+ y correlaciones significativas ($p < 0,05$) de SO_4^{2-} con Na^+ y K^+ , así como entre el ion NO_3^- , Na^+ , K^+ y Ca^{2+} , lo que sugiere que una parte importante de estos iones podría tener el mismo origen antropogénico. La correlación más alta fue entre Ca^{2+} y SO_4^{2-} , seguida de NO_3^- y NH_4^+ . El coeficiente de correlación (r), un número entre -1 y 1, es utilizado para cuantificar la fuerza de la relación entre dos de las variables; p es la probabilidad de equivocarse al afirmar que existe una verdadera diferencia. Ha sido ampliamente aceptado que hay diferencia estadísticamente significativa cuando $p < 0,05$ (Glantz, 2002).

Las correlaciones entre las especies iónicas de carácter ácido (H^+ , SO_4^{2-} , NO_3^-) sugieren una neutralización parcial de la acidez. La correlación entre el SO_4^{2-} y NO_3^- era predecible, debido a la coemisión de sus precursores SO_2 y NO_x y a la similitud de su comportamiento en la precipitación total. El NH_4^+ y el SO_4^{2-} presentaron una correlación más fuerte que la existente entre este catión y el NO_3^- .

Cuadro 4. Concentraciones promedio ponderadas por volumen, obtenidas en las muestras de depositación total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica en 2012

| Sitio de muestreo | H^+ μeq/l | Cond (μS/cm) | SO_4^{2-} μeq/l | NO_3^- μeq/l | Cl^- μeq/l | PO_4^{3-} μeq/l | F^- μeq/l | Na^+ μeq/l | K^+ μeq/l | Ca^{2+} μeq/l | NH_4^+ μeq/l |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|
| SJ-01 | 27,1 (2,4) | 17,3 (8,1) | 65 (8) | 4,8 (0,9) | 5,3 (1,1) | 11,3 (1,7) | 2,1 (0,3) | 187 (25) | 7,6 (1,9) | 52 (7) | 57 (6) |
| SJ-02 | 22,8 (1,9) | 11,1 (4,3) | 51 (7) | 4,2 (0,6) | 4,7 (1,3) | 14,6 (2,0) | 1,7 (0,2) | 179 (21) | 8,1 (2,3) | 45 (5) | 54 (9) |
| SJ-03 | 17,6 (2,4) | 13,8 (9,2) | 56 (9) | 5,3 (0,7) | 5,9 (2,1) | 9,6 (1,5) | 1,5 (0,3) | 182 (27) | 8,3 (1,9) | 42 (9) | 47 (12) |
| SJ-04 | 30,3 (1,7) | 20,1 (6,2) | 70 (8) | 5,5 (0,9) | 6,2 (1,8) | 12,4 (2,3) | 1,3 (0,4) | 164 (31) | 7,8 (2,5) | 46 (8) | 58 (9) |
| SJ-05 | 20,2 (1,6) | 12,5 (6,2) | 48 (4) | 4,4 (0,5) | 6,7 (2,0) | 11,2 (2,2) | 1,8 (0,3) | 176 (33) | 7,7 (1,4) | 44 (6) | 41 (7) |
| BE-01 | 42,4 (3,5) | 21,8 (9,7) | 77 (11) | 5,3 (1,1) | 7,4 (1,8) | 13,9 (1,5) | 2,3 (0,3) | 180 (29) | 8,5 (1,9) | 53 (7) | 65 (7) |
| HE-01 | 35,7 (2,8) | 16,4 (7,9) | 66 (9) | 4,7 (0,9) | 8,2 (1,6) | 15,2 (1,9) | 1,4 (0,2) | 204 (27) | 8,7 (2,2) | 57 (8) | 69 (10) |

Nota: El valor entre paréntesis corresponde a la desviación estándar de los datos.

Cuadro 5. Correlación de Pearson entre las concentraciones de iones, presentes en las muestras de depositación total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica en 2012

| Variables | Cl ⁻ | NO ₃ ⁻ | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | NH ₄ ⁺ | H ⁺ | F ⁻ | PO ₄ ³⁻ |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| SO ₄ ²⁻ | 0,273 | 0,782 | 0,255 | 0,613 | 0,895 | 0,804 | 0,433 | 0,089 | 0,387 |
| Cl ⁻ | | 0,176 | 0,271 | 0,766 | 0,103 | 0,055 | 0,018 | 0,128 | 0,083 |
| NO ₃ ⁻ | | | 0,226 | 0,201 | 0,582 | 0,664 | 0,392 | -0,022 | 0,265 |
| Na ⁺ | | | | 0,111 | 0,647 | 0,767 | -0,015 | -0,048 | 0,112 |
| K ⁺ | | | | | 0,730 | 0,785 | 0,003 | -0,032 | 0,487 |
| Ca ²⁺ | | | | | | 0,516 | -0,295 | 0,090 | 0,658 |
| NH ₄ ⁺ | | | | | | | 0,088 | 0,104 | 0,545 |
| H ⁺ | | | | | | | | 0,035 | 0,181 |
| F ⁻ | | | | | | | | | 0,000 |
| PO ₄ ³⁻ | | | | | | | | | |

Lo anterior concuerda con lo observado para el sistema NH₄⁺/SO₄²⁻/NO₃⁻, en donde el NH₃ libre, que puede provenir mayoritariamente de emisiones generadas en actividades agropecuarias, reacciona primero con el H₂SO₄ para formar tanto (NH₄)₂SO₄ como (NH₄)HSO₄ y el NH₃ remanente puede luego formar NH₄NO₃ por interacción química con el HNO₃ (Seinfeld y Pandis, 1998). En el área metropolitana de Costa Rica, el SO₂ es emitido por procesos industriales de combustión de diésel y *fuel oil*. El NO₂ es producido por procesos de combustión de los vehículos de motor. Ambos contaminantes se oxidan a los ácidos respectivos en la atmósfera.

Al analizar los resultados presentados en el cuadro 5, se podría decir que las combinaciones predominantes entre las especies químicas presentes en las muestras de depositación total son: NaCl, KCl, H₂SO₄, (NH₄)₂SO₄, HNO₃, NH₄NO₃ y CaSO₄. Estas pueden ser formadas en las gotas de agua atmosféricas por contacto con aerosoles y la subsecuente reacción de especies gaseosas. No

existen diferencias importantes entre los patrones de correlación encontrados para los sitios de muestreo de precipitación total.

La contribución relativa del NO₃⁻ a la acidificación puede ser determinada a través de la relación [NO₃⁻] / ([NO₃⁻] + [nss SO₄²⁻]), se obtiene un valor entre 0,061 a 0,084, así como se muestra que aproximadamente del 6,1 % al 8,4 % de la acidez de la precipitación total se debe al NO₃⁻ mientras que el 93,9 %-91,6 % se puede atribuir al SO₄²⁻.

En el área de estudio, más del 62,3 % del SO₄²⁻ presente en las muestras de depositación total posee un origen diferente al marino. La concentración de sulfato que no proviene del aerosol marino se calculó utilizando la ecuación reportada por Keene et al., 1986:

$$SO_4^{2-} \text{ nss} = SO_4^{2-} \text{rs} - (SO_4^{2-}/Cl^-) \text{ sw} \times Cl^- \text{ ds} \quad (1)$$

El Cl⁻ fue considerado la especie de referencia, el SO₄²⁻ nss es la concentración de sulfato proveniente de fuentes diferentes al aerosol marino,

mientras que el SO_4^{2-} es la concentración de este ion observada en las muestras de deposición total y el cociente ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$) incluye las concentraciones de estas especies en muestras de agua de mar.

El método de análisis de componentes principales es una herramienta estadística que se puede utilizar para deducir las fuentes de los componentes químicos mayoritarios presentes en la deposición total (Balasubramanian et al., 2001; Ozeki et al., 2004). A partir de la ejecución del análisis, se extrajeron los componentes principales con valores Eigen > 1 y se consideró significativos los factores > 0,5. En el cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos.

Se obtuvieron tres componentes principales que explican el 74,2 % de la varianza total de los datos. F1 contiene como factores significativos Cl^- , Na^+ y K^+ , lo cual evidencia el aporte del aerosol marino a la composición de la precipitación total. El alto porcentaje de varianza explicado por

este factor sugiere que la precipitación total en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica es considerablemente influenciada por fuentes naturales como el aerosol marino.

El componente principal 2 explica el 26,4 % de la varianza total y contiene como factores SO_4^{2-} , NO_3^- , H^+ y NH_4^+ , los cuales pueden ser asociados a un origen antropogénico. El tercer componente extraído incluye al Ca^{2+} , K^+ y PO_4^{3-} , que son generados mayoritariamente por polvo de suelo y material crustal.

Conclusiones

Las principales especies iónicas presentes en las muestras de deposición total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica son el Na^+ y SO_4^{2-} . La composición química de la precipitación evidencia el aporte del aerosol marino, sobre todo en el caso del Na, K y Cl.

Cuadro 6. Análisis de componentes principales aplicado a las muestras de deposición total obtenidas en el área metropolitana de Costa Rica en 2012

| | F1 | F2 | F3 |
|---------------------------------|----------------|----------------|---------|
| Cl^- | 0,894 | -0,174 | 0,144 |
| NO_3^- | 0,109 | 0,886 | -0,094 |
| SO_4^{2-} | 0,247 | 0,713 | 0,220 |
| Na^+ | 0,731 | 0,099 | 0,346 |
| NH_4^+ | 0,112 | 0,638 | 0,091 |
| K^+ | 0,855 | -0,185 | -0,561 |
| H^+ | -0,003 | 0,745 | 0,296 |
| Ca^{2+} | 0,443 | 0,477 | 0,647 |
| PO_4^{3-} | 0,155 | 0,064 | 0,897 |
| Valores Eigen | 2,387 | 2,315 | 1,934 |
| Porcentaje de la varianza total | 29,7 | 26,4 | 18,1 |
| Posible fuente | Aerosol marino | Neutralización | Crustal |

Los sitios de muestreo ubicados en zonas de alto flujo vehicular presentaron los valores de pH más ácidos, en donde solamente del 10 % al 21 % del total de las muestras presentó valores de pH por debajo de 5,60. Un 6,1 % de la acidez de la precipitación total se debe al NO_3^- , mientras que el 93,9 % se puede atribuir al SO_4^{2-} . Ambos iones son mayoritariamente aportados por fuentes antropogénicas.

Referencias

- Balasubramanian, R., Victor, T. y Chun, N. (2001). Chemical and statistical analysis of precipitation in Singapore. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 451-456.
- Cao, Y., Wang, S., Zhang, G., Luo, J. y Lu, S. (2009). Chemical characteristics of wet precipitation at an urban site of Guangzhou, South China. *Atmospheric Research* 94, 462-469.
- Charlson, R. O. y Rodhe, H. (1982). Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature* 295, 683-685.
- Fujita, S., Takahashi, A., Weng, J. y Huang, L. (2000). Rainwater chemistry in East Asia. *Atmospheric Environment* 34, 525-537.
- Galloway, J. N., Linkens, G. E., Keene, W. C. y Miller, J. M. (1982). The composition of precipitation in remote areas of the world. *Journal Geophysical Research* 87, 8771-8776.
- Glantz S. A. (2002). *Primer of biostatistics* (5th ed.). Division New York: McGraw-Hill.
- Herrera, J. (2009). *Caracterización química de partículas PM10 y muestras de depositación total colectadas en el área metropolitana de Costa Rica*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Keene, W. C., Pszeny, A. H., Galloway, J. N. y Hawley, M. E. (1986). Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. *Journal of Geophysical Research* 91, 6647-6658.
- Kulshrestha, U., Monika, T., Jain, K. y Prabhat, A. (1999). Measurements of atmospheric aerosols at New Delhi during INDOEX Pre-Campaigns. *Current Science* 76 (7), 968-972.
- Mello, W. Z. (2001). Rainwater chemistry in the coast of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Pollution* 114, 235-242.
- Mijic, Z., Stojic, A., Perisic, M., Rajsic, S., Tasic, M., Radenkovic, M. y Joksic, J. (2010). Seasonal variability and source apportionment of metals in the atmospheric deposition in Belgrade. *Atmospheric Environment* 44, 3630-3637.
- Migliavacca, D., Teixeira, E. C., Wiegand, F., Machado, A. C. y Sanchez, J. (2005). Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaiba hydrographic basin, Brazil. *Atmospheric Environment* 39, 1829-1844.
- Mouli, P., Mohan, S. y Reddy, S. (2005). Rainwater chemistry at a regional representative urban site: influence of terrestrial sources on ionic composition. *Atmospheric Environment* 39, 999-1008.
- Okubo, A., Takeda, S. y Obata, H. (2013). Atmospheric deposition of trace metals to the western North Pacific Ocean observed at coastal station in Japan. *Atmospheric Research* 129, 20-32.
- Observatorio Urbano de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. (2013). Información de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Disponible en www.ougam.ucr.ac.cr
- Ozeki, T., Ihara, T., Okada, T., Kikuchi, R. y Ogawa, N. (2004). Monitoring of long-distance transportation of pollutants in precipitation in coastal areas facing the Japan Sea, Japan (2000-2001) and the grouping of ions in pollutants by principal component analysis. *Bunseki Kagaku* 53 (12), 1427-1434 (in Japanese with English abstract).
- Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New York.
- Tramontano, J. M., Scudlark, J. R. y Church, T. M. (1987). A method for the collection, handling and analysis of trace metals in precipitation. *Environment Science and Technology* 21, 749-753.