

EXOSPI  
THE

# Análisis del compuesto alcalino $\text{Ca}^{2+}$ en la deposición atmosférica del valle de Sugamuxi, Boyacá

## Analysis of the alkaline compound $\text{Ca}^{2+}$ in the atmospheric deposition in the Valley of Sugamuxi

Para citar este artículo / To reference this article /  
Para citar este artículo: Chaves-Romero, A. (2015)  
Palacios-Díaz, V. (2015). Análisis del compuesto  
alcalino  $\text{Ca}^{2+}$  en la deposición atmosférica del valle  
de Sugamuxi, Boyacá. *Ingenio Magno*, 6, pp. 100-  
111.

TEMPERATURE  
PRESSURE

### Aura Chaves-Romero

Universidad Politécnica de Cataluña  
(España), Doctorado en Ciencias Químicas,  
Departamento de Ingeniería Minera y  
Recursos Naturales  
[alchavesro@gmail.com](mailto:alchavesro@gmail.com)

### Victor Palacios-Díaz

Facultad de Ingeniería, Maestría en  
Ingeniería Ambiental, Universidad  
Pedagógica y Tecnológica de Colombia,  
[www.uptc.edu.co](http://www.uptc.edu.co)

Recepción: 13 de Abril de 2015  
Aceptación: 23 de Septiembre de 2015

## Resumen

En la actualidad diferentes parámetros son usados en diversos estudios de calidad de aire. El presente estudio se realizó en la zona urbana del valle del Sugamuxi, en el departamento de Boyacá (Colombia), donde se analizó la influencia del  $\text{Ca}^{2+}$  como compuesto alcalino en la atmósfera. Se consideró la inestabilidad espacial de la deposición atmosférica global, la influencia alcalina de los compuestos terrígenos y la contribución de las variables meteorológicas del área de estudio.

El muestreo se realizó en 10 puntos distribuidos en la zona urbana de Sogamoso, donde se recolectaron 150 muestras que se analizaron por absorción atómica (se tomaron 90 muestras de eventos de precipitaciones y 60 muestras secas). Los resultados mostraron una deposición atmosférica de carácter alcalino con pH que oscila entre 6,33 y 8,33. El  $\text{Ca}^{2+}$  mostró una concentración media de 8,95 mg/l y se observaron diferencias muy significativas entre la deposición húmeda y seca (5,55 mg/l y 14,08 mg/l, respectivamente). La concentración de los iones mostró relativamente alta variabilidad alcalina en el área de estudio ( $\text{pH} > 7,5$ ), comparada con áreas afines de otras partes del mundo (Suramérica,  $\text{pH} < 5,3$ ; Asia,  $4,5 < \text{pH} < 6$ ), debido posiblemente a la influencia minera de la región (caliza, arcilla y puzolana). Para el análisis estadístico se utilizó el *software* IBM SPSS Statistics 19 y para análisis geográfico, el ArcGIS 10.2 de ESRI. El muestreador empleado no está normalizado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés); el prototipo se desarrolló de equipos similares empleados para este tipo de estudios en Europa.

**Palabras clave:** contaminación atmosférica, contaminantes alcalinos, deposición atmosférica húmeda y seca, eventos de precipitación, composición atmosférica.

## Abstract

Nowadays, there are many different parameters used to study the air quality. This study focuses on the urban area in the Valley of Sugamuxi located in the state of Boyaca, Colombia. The goal of this research was to analyze the influence of  $\text{Ca}^{2+}$  as an alkaline compound in the atmosphere. The spatial instability of the global atmospheric deposition was considered, as well as the alkaline influence of the terrigenous compounds and the contribution of the meteorological variables of the study area.

The samples were taken from 10 different points within the urban area in the city of Sogamoso. 150 samples that were collected and analyzed with atomic absorption spectroscopy. 90 rainfall samples were taken and 60 dry samples taken. The results showed an atmospheric deposition with a pH between 6.33 and 8.33, which is considered as alkaline. The average concentration of  $\text{Ca}^{2+}$  was 8.95 mg/L with significant differences between wet and dry samples (5.55 mg/L and 14.08 mg/L respectively). The relative concentration of ions showed a high variability in the alkalinity parameter in the study area ( $\text{pH} > 7.5$ ), compared to other parts of the world like South America ( $\text{pH} < 5,3$ ) and Asia ( $4,5 < \text{pH} < 6$ ). This is caused possibly by the influence of the mining activities in the region (i.e. limestone, clay and pozzolana). The *software* IBM SPSS Statistics 19 was used for the statistical analysis and ArcGIS 10.2 from ESRI for the geographical analysis. Even though the sampler used is not standardized by the Environmental Protection Agency (EPA), the protocol used is similar to those used in studies in Europe.

**Keywords:** air pollution, alkaline pollutants, atmospheric chemistry, rainfall, wet and dry atmospheric conditions, atmospheric composition.

## 1. Introducción

La deposición atmosférica de contaminantes en forma de aerosoles es un proceso por el cual las partículas y los gases son extraídos de la atmósfera hacia la superficie terrestre, por eventos de precipitación húmeda (*wet-only deposition*) o por gravedad a través de la atmósfera libre (*dry-only deposition*) en ausencia de precipitación. Estos procesos de extracción están relacionados por el origen de las partículas, las características fisicoquímicas y de precipitación (Chaves, 2008) y, en general, las condiciones meteorológicas de la zona.

Durante décadas, algunos países como España, Japón, China, Brasil, Estados Unidos y Canadá han realizado investigaciones orientadas al cálculo de la inmisión de contaminantes, las fuentes, la dinámica meteorológica de dispersión y neutralización, además de sus efectos (Dueñas *et al.*, 2012; Vos y Zhang, 2012; Myles *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2012; Matsuda *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2012; Lloyd, 2010).

Las emisiones a la atmósfera ( $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{SO}_2$ , NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , entre otras) influyen en el comportamiento climático (Querol, 2008), las condiciones meteorológicas (Fowler *et al.*, 2009) impactan el agua y los suelos. Sin embargo, durante muchos años los esfuerzos en la mayor parte del mundo se han dirigido a tratar estos dos problemas separadamente. Además, en los últimos tiempos se ha puesto de manifiesto que las acciones para reducir las emisiones de dichos gases a la atmósfera redundarían en efectos beneficiosos a corto plazo (Querol, 2008).

En Colombia, estas investigaciones están poco documentadas, a pesar de que las emisiones antropogénicas originadas por el tráfico, la minería y la industria se han incrementado, y aun cuando en el ámbito mundial se han demostrado los efectos que tienen los contaminantes atmosféricos sobre los ecosistemas (Lloyd, 2010; Querol, 2008; Corpoboyacá,

2011a, 2007; Fornaro y Gutz, 2006; Jaramillo, 2001). Los objetivos del presente estudio se centran en el análisis de la deposición atmosférica global (húmeda y seca) del  $\text{Ca}^{2+}$  en el valle de Sugamuxi. Se analizaron los factores de neutralización en relación con la dinámica de las variables meteorológicas locales. Los datos obtenidos se comparan con resultados de investigaciones en varias partes del mundo, dado que no existen normas de concentraciones permisibles de  $\text{Ca}^{2+}$  respecto a la calidad de aire.

## 2. Zona de estudio

El área de estudio comprende el municipio de Sogamoso (figura 1), que se localiza en la parte central del departamento de Boyacá, con estas coordenadas: norte  $X = 1^{\circ}123.500$ ; oriente  $Y = 1^{\circ}132.000$ , sur  $X = 1^{\circ}120.500$ ; occidente  $Y = 1^{\circ}124.500$ . Limita al norte con los municipios de Tópaga y Nobsa; al oriente, con los municipios de Tópaga, Monguí y Aquitania; al sur, con los municipios de Tota, Cuítiva e Iza; y al occidente, con los municipios de Iza, Firavitoba y Tibasosa.

Tiene un área de 208,54  $\text{km}^2$ , con altitudes entre los 2500 y los 4000 msnm. Las áreas urbana y rural constituyen la división territorial del municipio. El área urbana está dividida en 67 barrios, y el área rural consta de 17 veredas.

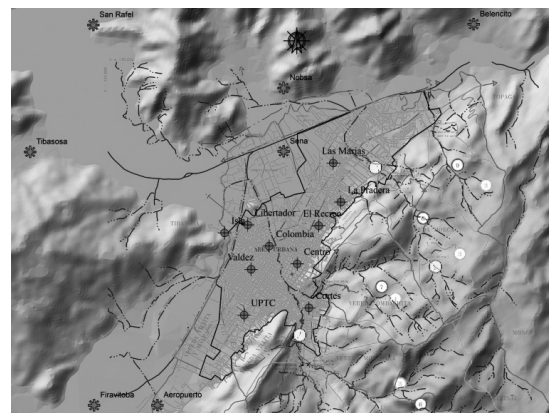




Figura 1. Zona de estudio del valle del Sugamuxi en modelo de elevación del terreno

Signo  representa estaciones de muestreo;  
signo  representa estaciones meteorológicas  
del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Fuente: autor.

El valle del Sugamuxi es considerado como una de las zonas de Colombia de mayor emisión de material particulado, debido posiblemente a su elevada estabilidad atmosférica durante un tercio del año. Su condición normal es de ligera inestabilidad, lo cual muestra condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes y eventos de fuerte contaminación fotoquímica.

Como resultado, el valle se convierte en una de las siete regiones en Colombia (Bogotá, Medellín, Barrancabermeja, Cali, Barranquilla, Cartagena) que concentran la mayor cantidad de emisiones generadas según su tipo de corredor industrial. En consecuencia, esto ha generado que la emisión de contaminantes al aire permita clasificar el valle de Sogamoso como tercer corredor con mayor generación de emisiones atmosféricas, después de Bogotá y Medellín (Corpoboyacá, 2011b).

Los vientos son factor importante en la dispersión de contaminantes. En la zona de estudio, las velocidades predominantes están en 0,87 y 0,91 m/s para más del 53% del tiempo desde el norte y el noreste (municipio de Corrales); sin embargo, se presentan velocidades de 1,43 m/s provenientes del sureste (municipio de Tibasosa). En los meses de junio, julio y septiembre se presentan velocidades de vientos mayores que el resto del año: alcanzan 1,5 m/s en relación con los meses de abril, octubre y noviembre, con velocidades promedio de 0,7 m/s (Ideam, 2014).

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Descripción de los muestreadores

Se utilizó el prototipo de colector manual para deposición atmosférica global en polietileno, soportado en una base de acero, como se muestra en la figura 2. Las dimensiones del recipiente colector son 270 mm de diámetro superior, 220 mm de diámetro inferior y 280 mm de altura (Chaves, 2001).

Los colectores se ubicaron a una altura de 1,5 m del suelo para evitar la resuspensión, alejados de edificaciones grandes o barreras que impidieran la libre circulación del viento.

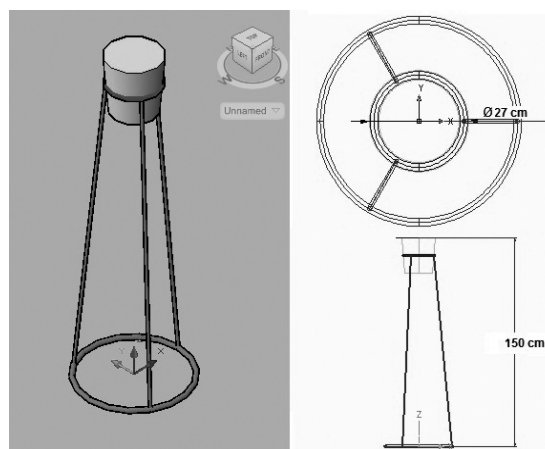


Figura 2. Colector para deposición global (húmeda y seca)

Fuente: autor.

#### 3.2. Toma de muestras y determinaciones analíticas en campo

El proceso de toma de muestras comenzó con el establecimiento del programa de muestreo: se definieron los puntos, la frecuencia y duración de recogida, los procedimientos y equipamientos por utilizar, además de otros aspectos importantes para asegurar la calidad de las muestras.

La toma de muestras se realizó de forma permanente y con periodo bisemanal durante dos meses, desde

noviembre 24 hasta diciembre 22 de 2011. Con ello se aprovechó el periodo de máxima precipitación por causa de la ola invernal presentada en Colombia.

El muestreo de eventos de deposición atmosférica global (húmeda y seca) se realizó a través de colectores manuales de idénticas características. La metodología procedimental aplicada se describe a continuación:

- a. La instalación de los colectores para la deposición húmeda y seca se realizó en la zona urbana de Sogamoso (Colombia).
- b. Se ubicaron 10 puntos de muestreo, para lo cual se usaron como criterios la dirección predominante de los vientos, la distribución en toda la zona objeto de estudio y la poca proximidad a edificaciones altas (más de tres pisos) y vías de tráfico pesado (tabla 1).
- c. El recipiente donde se captó la muestra quedó siempre abierto (día y noche, con lluvia y sin ella).

- a. La toma de las muestras se realizó cada tercer día.
- b. La toma de las muestras se realizó de acuerdo con los siguientes parámetros: para muestra húmeda se midió el volumen total y se tomaron 200 mL; para deposición seca se adicionaron 200 mL de agua ultrapura tipo MilliQ, para disolver la muestra.
- c. La analítica en campo se realizó para sólidos disueltos totales (TDS), conductividad eléctrica (CE), pH y temperatura (T). Se usó un equipo multiparametrico HANNA 991300 (tabla 2).
- d. El almacenamiento de muestras se realizó a 4°C mientras se efectuaba la analítica de esta.

### 3.3. Analítica

El análisis fisicoquímico de las 150 muestras tomadas en los diez puntos de muestreo se realizó en el laboratorio de aguas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Esto se hizo para pH, conductividad y por absorción atómica para las especies  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $Mg^{2+}$ .

**Tabla 1. Ubicación de los puntos de muestreo (coordenadas planas; origen: Bogotá)**

	Punto		Coordenadas		Altura (m)
	Nombre	Dirección	Este (X)	Norte (Y)	
1	Marías	Norte	1128565	1127063	2482
2	Pradera	Noreste	1128787	1125931	2490
3	Recreo	Interpolación central	1128142	1125241	2477
4	Centro	Este	1127516	1124131	2490
5	Cortes	Sureste	1127858	1122850	2510
6	UPTC	Sur	1125969	1122641	2485
7	Isla	Suroeste	1125399	1125031	2480
8	Colombia	Noroeste	1126700	1124650	2485
9	Libertador	Oeste	1126077	1125265	2475
0	Valdez	Interpolación central	1126172	1123974	2485

Fuente: autor.

Tabla 2. Especificaciones HANNA 991300

HI 991300 Portable PH/EC/TDS/Temperature Meter		
Rango	pH	0,00 a 14,00
	EC	0 a 3999 $\mu$ S/cm
	TDS	0 a 2000 ppm
	Temperatura	0 a 60 °C 32 a 140 °F
Resolución	pH	0,01 pH
	EC	1 $\mu$ S/cm
	TDS	1 ppm
	Temperatura	0,1°C a 0.1°F
Exactitud (@20°C/68°F)	pH	$\pm 0,01$ pH
	EC/TDS	$\pm 2\%$ F.S.
	Temperatura	$\pm 0,5$ °C o $\pm 1$ °F
Desviación EMC típica	pH	$\pm 0,03$ pH
	EC/TDS	$\pm 2\%$ F.S.
	Temperatura	$\pm 0,5$ °C o $\pm 1$ °F
Composición de Temperatura	pH	Automático
	EC/TDS	$\beta = 0,0$ a 2,4%/°C

Fuente: Manual de equipo HANNA 991300.

## 4. Resultados

En la figura 3 los diagramas de caja permiten analizar los estadísticos mediana, percentiles 25 y 75, mínimo y máximo, que muestran la distribución de la especie  $Ca^{2+}$  para las muestras de tipo global (húmedas y secas), tomadas en cada zona de muestreo. También muestra los casos 78 y 79 analizados como extremos (más de 3 longitudes de caja del percentil 75) presentados en la estación Cortés. Aunque el procedimiento de muestreo se realizó correctamente, los picos en la concentración 37,6 mg/l y 30,6 mg/l pueden corresponder a condiciones meteorológicas locales especiales o a picos de contaminación en las fuentes de emisión; por ello se descartan, para no sesgar el estudio.

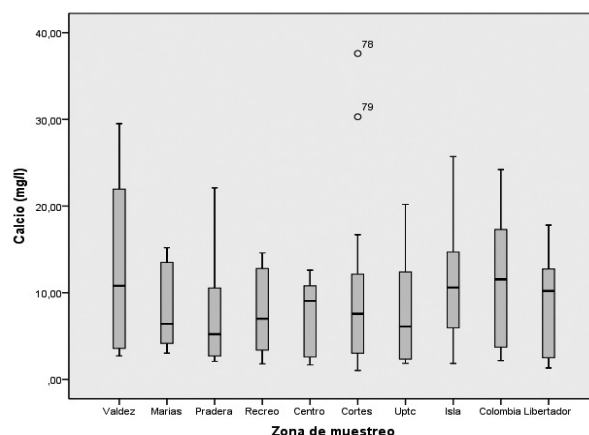


Figura 3. Dispersión de los datos y asimetría de la distribución para la especie  $Ca^{2+}$

Fuente: autor.

### 4.1. Análisis general

El ion  $Ca^{2+}$  presentó una concentración media de  $\mu = 8,95$  mg/l y  $\sigma = 6,45$  mg/l, como referencia a la media general (tabla 3). Las zonas Valdés, Isla y Colombia presentaron medias superiores en un 42,12%, 26,48% y 23,91%, respectivamente. Por el contrario, las estaciones Cortés, Centro y Recreo presentan medias inferiores en 26,14%, 16,42% y 14,41%, respectivamente.

Realizando análisis de comparación múltiple entre las diez zonas estudiadas a través de la prueba DMS (diferencia mínima significativa), con un nivel de confianza del 95%, se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre la zona Valdez con las estaciones Mariás (Pvalor = 0,050), Pradera (Pvalor = 0,044), Recreo (Pvalor = 0,038), Centro (Pvalor = 0,023), Cortés (Pvalor = 0,011) y Libertador (Pvalor = 0,049). También entre las zonas Cortés e Isla, con Pvalor = 0,048.

El  $Ca^{2+}$  presenta alta concentración en las estaciones ubicadas al oeste de la ciudad, zona Valdez, Isla, Colombia y Libertador, debido probablemente a la influencia de las minas de caliza y hornos de cal ubicados en los municipios de Nobsa y Tibasosa. Las

rocas calizas explotadas contienen por lo menos 70% de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) y cantidades variables de carbonatos de magnesio (MgCO<sub>3</sub>).

**Tabla 3. Composición química en las diferentes zonas analizadas de concentración iónica para Ca<sup>2+</sup> (mg/l, pH, conductivas eléctrica (CE, dS/**

Zona	Ca <sup>2+</sup>						pH		CE	
	Media	Mediana	Desv. típ.	Mín.	Máx.	Rango	Media	±sd	Media	±sd
Valdez	12,72	10,80	9,60	2,71	29,50	26,79	7,27	0,38	0,30	0,13
Marías	8,21	6,41	4,66	3,03	15,20	12,17	7,42	0,39	0,33	0,15
Pradera	8,01	5,22	6,82	2,09	22,10	20,01	7,27	0,33	0,30	0,15
Recreo	7,66	7,01	4,98	1,79	14,60	12,81	7,02	0,33	0,26	0,13
Centro	7,48	9,06	4,03	1,68	12,60	10,92	7,15	0,39	0,28	0,12
Cortés	6,61	5,77	4,81	1,05	16,70	15,65	6,97	0,40	0,30	0,15
UPTC	8,29	6,11	6,20	1,87	20,20	18,33	7,22	0,45	0,28	0,12
Isla	11,32	10,60	7,32	1,86	25,70	23,84	7,26	0,33	0,31	0,14
Colombia	11,09	11,55	7,54	2,18	24,20	22,02	7,27	0,29	0,31	0,14
Libertador	8,10	10,20	5,61	1,32	17,80	16,48	7,06	0,43	0,29	0,14
General	8,95	8,05	6,45	1,05	29,50	28,45	7,20	0,39	0,30	0,14

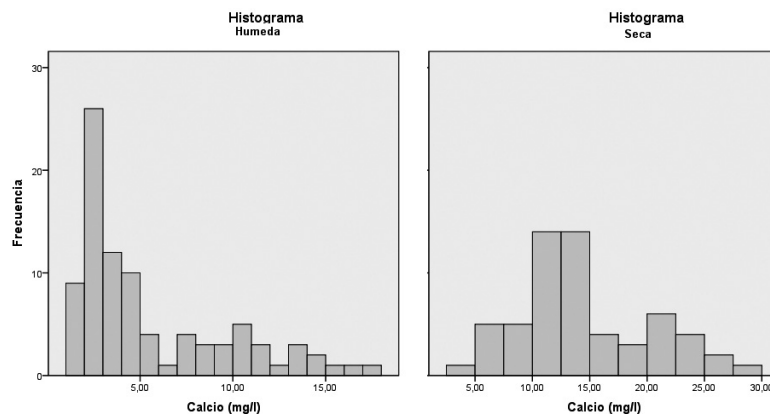
**Muestras tomadas del 24 de octubre al 22 de diciembre de 2011 en el valle del Sugamuxi.**

Fuente: autor.

#### 4.2. Análisis de muestras húmedas y secas

La deposición atmosférica fue tomada en forma global en un mismo colector. En el tiempo de estudio se tomaron 89 muestras que contenían agua de eventos de precipitaciones y 59 muestras secas (sin datos atípicos). Al realizar el análisis que usa como factor el tipo de deposición, se

encuentran diferencias estadísticamente significativas (Pvalor = 0,0) entre húmedas y secas, con valor medio en las concentraciones de 5,55 mg/l y 14,08 mg/l, respectivamente (figura 4).

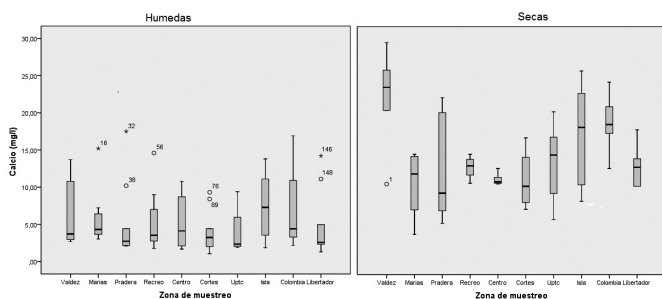


**Figura 4. Comparación en la distribución de Ca<sup>2+</sup> para muestras húmeda y seca (dry-only and wet-only deposition)**

Fuente: autor.

En la figura 5 se aprecia mayor presencia de datos atípicos para las muestras húmedas. Esto se debe principalmente a las condiciones de las precipitaciones en cada episodio de lluvia, en cuanto a la intensidad, duración y frecuencia (Curvas IDF). Los mayores valores medios de concentración encontrados están en la zona Isla, con 7,4 mg/l, y Colombia, con 6,7 mg/l; por el contrario, las zonas UPTC y Cortés presentan menor concentración con 3,99 mg/l y 4,01 mg/l.

La variabilidad de las muestras secas se explica principalmente por la dirección de los vientos, las fuentes de emisión y el tráfico pesado generador de resuspensión, como es el caso de los sectores Valdez (tráfico de la calle 7 vía al Llano), con concentración promedio de 22,2 mg/l; Isla (tráfico hacia Tibasosa), con concentración de 17,2 mg/l; y Colombia (tráfico de la carrera 20 hacia Nobsa), con concentración media de 18,7 mg/l.



**Figura 5. Dispersión de los datos y asimetría de la distribución para muestras húmedas y secas de la especie Ca<sup>2+</sup>**

Fuente: autor.

El pH es un indicador de la relación y las reacciones de neutralización entre aniones y cationes presentes en la atmósfera. En el valle del Sugamuxi se encontraron altos niveles medios de concentración de Ca<sup>2+</sup> (8,95 mg/l), por lo cual se infiere pH de tipo alcalino en la zona (pH>7,5), comparada con áreas de otras partes del mundo, como Suramérica, con pH<5,3 (De Moraes, 2012) y Asia, con

4,5<pH<6 (Abdus-Salam, 2014). Las muestras húmedas presentan diferencias significativamente menores de iones que las muestras secas, debido al lavado y la disolución cuando se presentan eventos de lluvia.

En relación con otras áreas de estudio (tabla 4), los niveles de Ca<sup>2+</sup> encontrados en Sogamoso muestran similitud con Beijing (12,17 mg/l) y Lanzhou (17,75 mg/l) en China; sin embargo, con las demás investigaciones están más altos, debido posiblemente a la influencia minera (caliza, arcilla y puzolana) e industrial de la región.

**Tabla 4. Concentración de Ca<sup>2+</sup> en la precipitación atmosférica del valle del Sugamuxi y comparación con otras áreas (mg/l)**

Localización Área de estudio	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	pH
Sogamoso, muestras húmedas	5,55	4,41	7,54
Sogamoso, muestras secas	14,08	23,74	7,73
Sogamoso, deposición global	8,95	12,12	7,61
Llorín, centro-norte de Nigeria*	0,18	0,02	6,90
Carmel, Israel*	0,04	0,15	-
Occidente medio de Francia*	0,03	0,04	5,39
Guaiba, Brasil*	0,01	0,02	5,71
Hong Kong**	0,18	2,07	-
Seúl, Corea del Sur**	0,70	3,41	-
Okinawa, Japón**	0,50	2,59	-
Tirupati, India**	3,03	6,15	-
Ankara, Turquía**	1,43	2,31	-
Nueva Jersey, Estados Unidos **	0,06	0,91	-
Beijing, China (2006)***	12,17	15,17	5,15
Lanzhou, China (2007)***	17,75	9,99	7,70

Fuente: \*Abdus-Salam (2014), \*\*Cheng (2011), \*\*\* Zhang (2012) y autor.



### 4.3. Interpolación del ión $\text{Ca}^{2+}$ en la zona de estudio

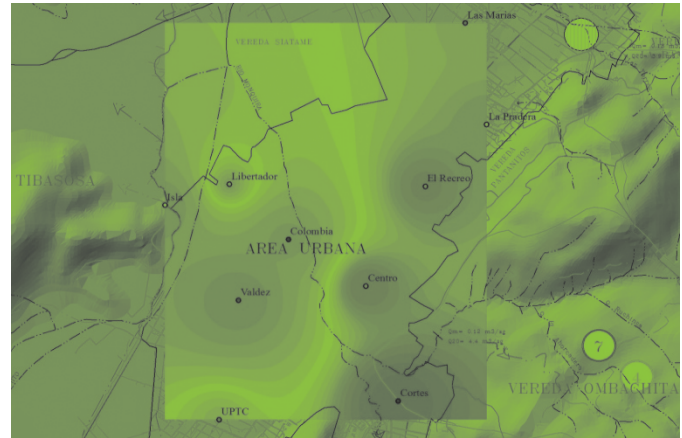
La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar superficies continuas a partir de datos discretos; sin embargo, la utilización de una representativa cantidad de puntos del área en estudio limita su utilización.

Con el objetivo de comparar la dispersión de ión  $\text{Ca}^{2+}$  en la zona de estudio, se emplearon los interpoladores más utilizados en los estudios de análisis de la variación espacial, Kriging e IDW (*inverse distance weighting*) mediante el programa ArcMap de ArcGIS 10.2.

El método IDW es más rápido en los cálculos; sin embargo, tiende a producir patrones poco reales, conocidos como tipo “ojo de buey”, alrededor de los puntos muestreados (figura 6, 7 y 8). Lo anterior expresa el peso que se le puede dar a la variación particular del valor de un punto de muestreo sobre los que están alrededor (Villatoro *et al.*, 2008).

Se recomienda el IDW para bases de datos pequeñas, donde los parámetros del variograma no son conocidos. También, cuando la distancia de muestreo es muy grande e incluso para cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de la correlación espacial. Es importante mencionar que la precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de variación y la intensidad de muestreo (Villatoro *et al.*, 2008).

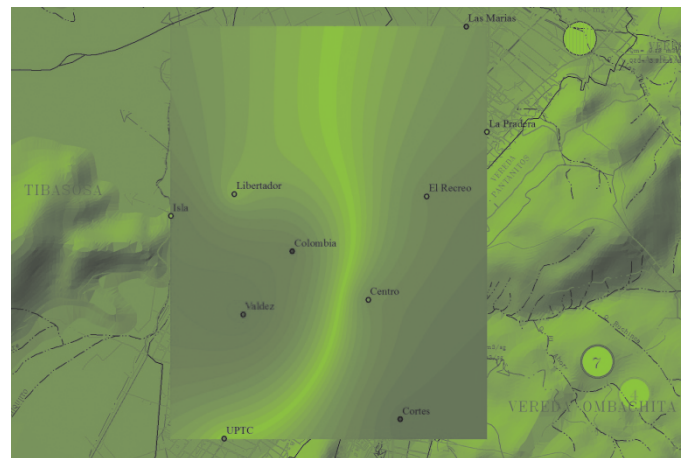
En las figuras 6 y 7 se pueden apreciar concentraciones superiores de 9,5 mg/l en color rojo. Estas franjas tienen niveles más altos de contaminación, debido a la cercanía con las minas de caliza de Tibasosa y Nobsa. Dado las altas velocidades de viento en el valle, posiblemente también se tenga influencia de partículas ( $\text{Ø} \leq 10 \mu\text{m}$ ) provenientes de las explotaciones de puzolanas en las cercanías del municipio de Iza.



**Figura 6. Dispersión de  $\text{Ca}^{2+}$  mediante IDW en la zona de estudio**

Fuente: autor.

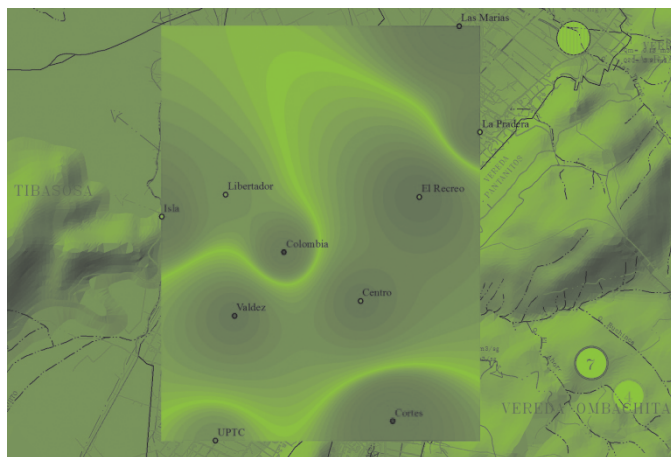
Las zonas con color amarillo presentan concentraciones de entre 8,5 mg/l y 9 mg/l. Por su parte, las zonas verdes presentan concentraciones entre 7,5 mg/l y 8,5 mg/l. Al analizar los mapas de dispersión para  $\text{Ca}^{2+}$  por los dos métodos de interpolación, se evidencia el uso de datos más próximos en IDW, por lo cual se generan “ojos de buey” en las estaciones Valdés, Centro y Recreo.



**Figura 7. Dispersión de la especie  $\text{Ca}^{2+}$  mediante Kriging en la zona de estudio**

Fuente: autor.

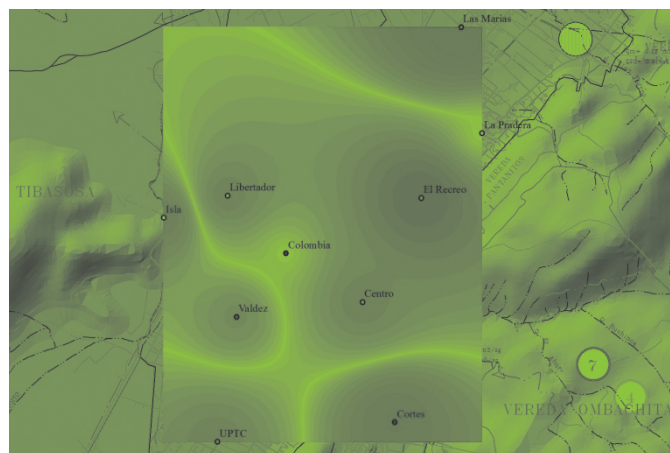
Teniendo en cuenta que no se dispone de una base de datos representativa (varios años), y las estaciones de muestreo están a una distancia considerable, se realiza la interpolación mediante IDW para los parámetros de pH y conductividad eléctrica.



**Figura 8. pH mediante IDW en la zona de estudio**

Fuente: autor.

La conductividad y el pH que fueron medidos *in situ* mostraron diferencias significativas cuando se midieron en el laboratorio, posiblemente porque estas fueron medidas varios días después. La conductividad eléctrica se expresó en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con lo cual miden los sólidos totales disueltos de los que fue posible obtener con bastante aproximación el valor de la dureza del agua, expresada en grados franceses. Se sabe que la dureza del agua está determinada por la concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la que constituye el 90% aproximadamente de los sólidos disueltos en el agua. La unidad de medición de dureza más común es el grado francés (of), definido así:  $1 \text{ of} = 10 \text{ ppm de } \text{CaCO}_3$ .



**Figura 9. Conductividad Eléctrica mediante IDW en la zona de estudio**

Fuente: autor.

Teniendo en cuenta que  $1 \text{ of} = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$ , se observó que la mayor alcalinidad la mostraron las muestras secas ( $\geq 23 \text{ of}$ ) y se clasificaron, según los of, en ligeramente duras, mientras que las muestras de deposición húmeda mostraron menor alcalinidad ( $\leq 15 \text{ of}$ ). Sin embargo, como la alcalinidad no pudo ser analizada directamente debido al tiempo transcurrido desde el muestreo y el análisis, se puede calcular por métodos indirectos que confirmen si su influencia se debe a los carbonatos o a los bicarbonatos (Chaves, 2008) existentes en la atmósfera, debido a la relación existente entre el pH y la alcalinidad.

## 5. Conclusiones

Conocidos los resultados de la concentración del ión  $\text{Ca}^{2+}$  dentro del área de estudio en la deposición húmeda, se puede deducir que en las muestras colectadas cerca de las minas de caliza y los hornos de cal se presenta mayor concentración del ión analizado, con tendencia decreciente hacia el centro de la zona urbana de de Sogamoso; sin embargo, se evidencia incremento hacia la Isla, Colombia y Valdez, debido posiblemente por la resuspensión ocasionada por la incidencia del tráfico pesado vehicular.

La dispersión de contaminantes y su relación con las concentraciones halladas en cada una de las estaciones están influenciadas por las variables meteorológicas como la geomorfología (figura 1), las precipitaciones y la dirección predominante de los vientos (Ideam, 2014).

La deposición seca mostró mayor alcalinidad que la deposición húmeda debido posiblemente a la alta concentración de bicarbonatos o carbonatos cálcicos de procedencia terrígena.

No se detectaron muestras de carácter ácido, posiblemente por neutralización durante los eventos de lluvia. Sin embargo, esto solo se podrá demostrar cuando se haga un estudio secuencial de varios eventos de precipitación húmeda.

## Referencias

- Abdus-Salam, N., Adekola, F. y Otuyo-Ibrahim, M. (2014). Chemical composition of wet precipitation in ambient environment of Ilorin, north central Nigeria. *Journal of Saudi Chemical Society*, 18(5), 528-534.
- Chaves, A. (2008). Compuestos de neutralización ( $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ ), asociados a la deposición atmosférica (Wet Only and Dry only). *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 6(1), 12-17.
- Chaves, A. (2001). *Deposición atmosférica alrededor de la central térmica Teruel (NE España)* (tesis de doctorado). Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chen, L. *et al.* (2012). Dry deposition velocity of total suspended particles and meteorological influence in four locations in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, 24(4), 632-639.
- Cheng, Y., Liu, Y., Huo, M., Sun, Q., Wang, H., Chen, Z. y Bai, Y. (2011). Chemical characteristics of precipitation at Nanping Mangdang Mountain in eastern China during spring. *Journal of Environmental Sciences*, 23(8), 1350-1358.
- Corpoboyacá (2011a). *Modelación de la calidad de aire en el valle de Sogamoso*. Tunja: Autor.
- Corpoboyacá (2011) *Calidad del aire en el valle de Sogamoso*. Bogotá: Autor.
- De Moraes, V., Sanches, L., De Carvalho, M. t De Souza, J. (2012). Spatio-temporal variability of anions in wet precipitation of Cuiabá, Brazil. *Atmospheric Research*, 107, 9-19.
- Dueñas, C., Fernández, M. y Gordo, E. (2012). Chemical and radioactive composition of bulk deposition in Málaga (Spain). *Atmospheric Environment*, 62, 1-8.
- Fornaro, A. y Gutz, I. (2006). Wet deposition and related atmospheric chemistry in the Sao Paulo metropolis, Brazil. Part 3: Trends in precipitation chemistry during 1983-2003. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5893-5901.
- Fowler, D. *et al.* (2009). Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, 43(33), 5193-5267.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam) (2014). *Valores medios mensuales de velocidad del viento (m/s)*. Bogotá: Autor.
- Jaramillo, F. (2001). *Bases para la investigación de la contaminación atmosférica en el Valle de Sogamoso: El caso del material particulado generado en la fabricación artesanal de ladrillo y cal* (trabajo de grado). Bogotá: Universidad de los Andes.
- Lloyd, P. (2010). Changes in the wet precipitation of sodium and chloride over the continental United States, 1984-2006. *Atmospheric Environment*, 44(26), 3196-3206.
- Matsuda, K. *et al.* (2012). Dry and wet deposition of elemental carbon on a tropical forest in Thailand. *Atmospheric Environment*, 54, 282-287.
- Myles, L. *et al.* (2012) A comparison of observed and parameterized SO<sub>2</sub> dry deposition over a grassy clearing in Duke Forest. *Atmospheric Environment*, 49, 212-218.

Querol, X. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública*, 82, 447-454.

Shen, W., et al. (2013) Atmospheric deposition and canopy exchange of anions and cations in two plantation forests under acid rain influence. *Atmospheric Environment*, 64, 242-250.

Villatoro, M., Henríquez C., Sancho F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105.

Vos, T. y Zhang, L. (2012). High resolution mapping of total deposition of acidifying pollutants. *Atmospheric Environment*, 57, 80-90

Zhang, X., Jiang, H., Zhang, Q. y Zhang, X. (2012). Chemical characteristics of rainwater in northeast China, a case study of Dalian. *Atmospheric Research*, 116, 151-160.