

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Maestría en Estudios Ambientales



Lluvia ácida en la región del volcán de Pacaya

Trabajo de graduación presentado por Bessie Evelyn Oliva Hernández para optar por el grado académico de Maestría en Estudios Ambientales

Guatemala,

2005

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades

Maestría en Estudios Ambientales



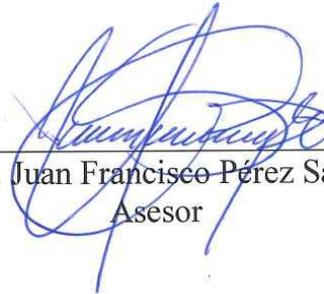
Lluvia ácida en la región del volcán de Pacaya

Trabajo de graduación presentado por Bessie Evelyn Oliva Hernández para optar por el grado académico de Maestría en Estudios Ambientales

Guatemala,

2005

Vo.Bo.:



(f) Dr. Juan Francisco Pérez Sabino
Asesor

Tribunal:

(f) ~~x~~ 
Ing. Rodolfo González Morasso

(f) 
Dr. Adrián Francisco Gil Méndez

(f) ~~x~~ 
MSc. Claudia Lorena Quan Rodas

Fecha de aprobación: 21 de junio de 2005.

PREFACIO

La presente tesis trata sobre la medición de la lluvia y deposición ácida en la región del volcán de Pacaya y la ciudad de Guatemala, durante los años 2001 y 2002, como una contribución para que puedan adoptarse medidas preventivas para la población. Guatemala por su posición geográfica e historia geológica, es un país con 288 estructuras consideradas como volcanes o de origen volcánico. De estas, se cuenta con registros históricos de actividad de ocho volcanes y tres de éstos presentan actividad volcánica en la actualidad. El volcán de Pacaya, localizado a 40 km al sur de la ciudad de Guatemala ha afectado a la ciudad, durante erupciones que han lanzado arena que ha caído a varios kilómetros a la redonda, obligando muchas veces a cerrar el aeropuerto internacional La Aurora, como sucedió en mayo de 1998.

Por su parte, la ciudad de Guatemala fundada en 1776, presenta desde los años 1990 elevados niveles de contaminación atmosférica, especialmente material particulado, según ha reportado el Laboratorio de Monitoreo de la Calidad del Aire de la Escuela de Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Oliva, 2001; Oliva, 2002). Dicha contaminación es causada principalmente por los vehículos automotores y la actividad industrial asentada en la ciudad. No se contaba con información sobre la posible afectación de la calidad del aire por la actividad volcánica.

La idea de la investigación surgió luego de algunas mediciones realizadas durante 2001 y 2002 en el Laboratorio de Monitoreo de la Calidad del Aire, en que se detectó que el pH del agua y la deposición en la ciudad presentaba acidez (Oliva, 2001; Oliva, 2002). Por esta razón la autora, quien fue parte del equipo que realizó esas mediciones, así como el asesor de la tesis Dr. Juan Francisco Pérez Sabino, consideraron importante medir de forma frecuente los niveles de acidez de la lluvia y deposición de material particulado para establecer si pueden ser dañinos a la población, a los cultivos y a la infraestructura, tanto en la ciudad de Guatemala como en las poblaciones ubicadas en las cercanías del volcán de Pacaya.

La autora, Bessie Oliva, ha sido investigadora principal y coordinadora de proyectos de investigación sobre la contaminación ambiental en diferentes ecosistemas y Profesora Titular de los cursos de Química Ambiental y Análisis Inorgánico. La autora ha sido parte de comisiones a nivel

nacional relacionadas con la propuesta y revisión de reglamentos y metodología para la medición y conservación de la calidad ambiental en Guatemala.

En la investigación, se encontró que, en la región del volcán de Pacaya, ocurre lluvia ácida especialmente durante la estación lluviosa. Así, en varios puntos donde se colectaron muestras, se encontraron niveles de pH dentro de la categoría de lluvia ácida, además de altos niveles de material particulado, relacionado con la actividad volcánica, y elevada conductividad característica de la presencia de iones que provocan la acidez. Fue en San Vicente Pacaya el lugar donde se encontró la muestra con el pH más ácido, 3.15, lo cual presenta un riesgo para la población que se expone a la lluvia cuando ocurre este evento.

No obstante, en la ciudad de Guatemala no se encontró lluvia ácida durante el período del estudio, lo que indica que la región de influencia de las emisiones de volcán de Pacaya, que provocan la lluvia ácida no se extiende hasta la ciudad capital. Es importante hacer notar que no hubo erupciones de grandes proporciones durante el período de estudio. Los resultados también indican que la actividad industrial en la ciudad no provocó lluvia ácida en los puntos de muestreo establecidos.

En conclusión, es importante que las autoridades ambientales y sanitarias tomen en cuenta los resultados del estudio, ya que deben adoptarse medidas de prevención y protección para la población que vive en la región del volcán de Pacaya y que es afectada por la lluvia y deposición ácida. La tesis ofrece las recomendaciones pertinentes, además de brindar al lector, información básica sobre el volcanismo en Guatemala, así como sobre los procesos de formación de la lluvia ácida y sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente, a manera de concientización de este fenómeno poco estudiado en el país, la lluvia ácida.

Agradezco al Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas, IIQB, de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por el financiamiento de la investigación a través del proyecto de investigación titulado: “Lluvia ácida en la región del volcán de Pacaya”. Agradezco también a las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de esta investigación.

CONTENIDO

	Prefacio	iv
	Lista de cuadros	viii
	Lista de figuras	x
	Lista de abreviaturas y siglas	xiii
	Resumen	xvi
I.	Introducción	1
II	Marco teórico	4
	2.1 Lluvia y deposición ácida	4
	2.2 Química de la lluvia ácida	4
	2.3 Efectos de la lluvia ácida	5
	2.4 Efectos en la salud humana	6
	2.5 Emisiones volcánicas	8
	2.6 Estudios de emisiones volcánicas en el área de Centroamérica	11
	2.7 Estudios de emisiones volcánicas en el volcán de Pacaya	13
	2.8 Estudios de lluvia ácida en la ciudad de Guatemala	18
III	Justificación	19
IV	Objetivos	20
V	Hipótesis	21
VI	Métodos	22
	6.1 Descripción del área de estudio	22
	6.1.1 Volcán de Pacaya	22
	6.1.2 Vientos	24
	6.1.3 Centros poblados	25
	6.1.4 Amenazas naturales	27
	6.1.5 Población	29
	6.1.6 Salud	30
	6.2 Muestreo	30
	6.2.1 Selección de las estaciones de muestreo	30
	6.2.2 Toma de muestras	33

6.2.3	-Equipo de muestreo	33
6.2.4	Mediciones de parámetros físicos en el campo	35
6.2.5	Medición de sólidos totales	35
6.2.6	Medición de metales	35
6.3	Evaluación de resultados	36
6.4	Elaboración de mapa de áreas susceptibles	36
VII	Resultados	37
7.1	Deposición húmeda y seca	37
7.2	Sólidos totales	44
7.3	Conductividad	47
VIII	Discusión	55
IX.	Conclusiones	59
X	Recomendaciones	61
XI	Bibliografía	62
XII	Anexos	68
	A. Apéndice A	68
	B. Apéndice B	72
	1. Equipo	72
	2. Reactivos	72
	3. Cristalería	73
	4. Materiales	73
	C. Apéndice C	74
	D. Apéndice D	75
	Mapas temáticos	75

LISTA DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Guía sobre los niveles de asesoramiento a corto plazo sobre el dióxido de azufre.	7
2	Promedio de la dirección de los vientos superiores en Guatemala, 1982 – 1986 y los porcentajes de vientos provenientes de cada dirección.	25
3	Información poblacional según el Censo 2002 de las poblaciones cercanas al volcán de Pacaya.	30
4	Datos de las 4 estaciones de muestreo ubicadas en las faldas del volcán de Pacaya y área de influencia de las erupciones volcánicas y de las 2 estaciones ubicadas en la ciudad de Guatemala.	32
5	Valores de potencial de hidrógeno, pH, medidos en cuatro sitios de muestreo ubicados en la región de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala y el promedio de las dos regiones, para efectos de comparación.	37
6	Evaluación de la normalidad del pH en función de la procedencia.	39
7	Evaluación de la normalidad del pH en función de la época de colecta de las muestras.	40
8	Resumen del pH en función de las diferentes localidades.	41
9	Resumen del pH en función de la época de colecta de las muestras.	42
10	Análisis no paramétrico de Kruskal Wallis para contrastar las medianas del pH en función de las diferentes procedencias.	42
11	Contraste de Levene sobre la igualdad de las varianzas error (a) en función de la época de colecta.	42
12	Análisis de varianza de dos vías para un diseño por bloque en el que se contrastan las medias poblacionales del pH en función de la época de colecta.	43
13	Valores de sólidos totales en mg/L, medidos en cuatro sitios de muestreo ubicados en la región de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala.	44
14	Conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las muestras de deposición húmeda y seca en cuatro sitios ubicados en el área de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios control en la ciudad de Guatemala.	47
15	Valores de pH comparados con el valor de SO_2 en erupciones registradas.	49
16	Evaluación de la normalidad de la conductividad en función de la procedencia.	50
17	Evaluación de la normalidad de la conductividad en función de la época de colecta.	50
18	Resumen de la conductividad en función de las diferentes procedencias.	52
19	Resumen de la conductividad en función de la época de colecta.	52
20	Análisis no paramétrico de Kruskal Wallis para contrastar las medianas de la conductividad en función de las diferentes procedencias.	52

21	Análisis no paramétrico de Mann Whitney para contrastar las medianas de la conductividad en función de la época de colecta.	53
22	Coefficiente de correlación y prueba de hipótesis para evaluar el coeficiente de correlación poblacional entre el pH y la conductividad y los sólidos totales.	54
23	Resultados de lluvia ácida para el año 2002, medidos en dos sitios de muestreo en la ciudad de Guatemala, Edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Ciudad Universitaria zona 12 Universidad de San Carlos de Guatemala (zona 12 USAX) y Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media -EFPEM- ubicado en la Avenida Petapa, entrada a la USAC, zona 12; por el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC.	74

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	La figura del lado izquierdo es la imagen del volcán Pacaya tomada con una cámara digital a una distancia de 3.64 km. La imagen de la derecha es una imagen simultánea del volcán Pacaya, tomada en el mismo lugar utilizando una cámara UV, con una exposición de 0.5 s para discriminar el SO ₂ . La resolución de pixeles es de 0.87 m por pixel y la velocidad de la pluma de 7.7 m/s. La absorbancia de la pluma está a escala en los resultados de la barra de calibración en colores abajo.	14
2	Mapa que muestra los flujos de lava en el sitio del volcán de Pacaya, debido a las erupciones durante los meses de septiembre de 1998 y enero de 2000.	15
3	Vista aérea tomada el 14 de enero de 2002, que muestra la parte alta del cono Mackenney, en el volcán Pacaya con una pluma de gas blanco soplando de Sur-Este a norte.	17
4	Medición de flujos de SO ₂ en la región del volcán de Pacaya para el periodo de 1999 – 2003 en toneladas métricas por día.	18
5	Mapa de ingreso y topográfico del área del volcán de Pacaya. Fuente: Instituto Geográfico Nacional Hoja Amatitlán 2059 II, en Lira, 2005.	22
6	Bosquejo del mapa del Volcán de Pacaya y sus poblaciones cercanas (ashurado). La posición de los flujos de lava se muestran en color negro. La distribución de los cráteres de impacto de bloques y bombas está indicada por una línea punteada que se extiende desde el cráter MacKenney de aproximadamente 100 m. Las carreteras están indicadas con líneas punteadas.	26
7	Localización del Volcán Pacaya en relación con las comunidades cercanas, en color verde. La línea roja indica la marca de la cicatriz en la capa en forma de herradura durante las erupciones del 2000 antes del colapso del volcán.	27
8	Mapa de Amenaza por Caída de Ceniza. Las líneas amarillas muestran el área afectada por caída de ceniza durante los meses de enero a marzo de 2002, siendo las poblaciones de El Cedro, San Francisco de Sales, Calderas, Mesillas Altas, Mesillas Bajas, San Carlos y Santa Elena Barillas. De junio a octubre de 2002, las poblaciones afectadas fueron El Caracol, El Rodeo, El Patrocinio, Los Ríos.	28
9	Mapa de amenaza por flujos de lava. En gris a rayas se observa la amenaza por flujos de lava del volcán Pacaya. En gris se aprecian los centros poblados Las poblaciones más afectadas por los flujos de lava fueron El Caracol, El Rodeo, El Patrocinio.	29
10	Mapa de los patrones de viento que se presentan en diferentes épocas del año en la región del volcán de Pacaya.	31
11	Mapa de ubicación de los 4 sitios de muestreo en las faldas del volcán de Pacaya.	32
12	Colector convencional. Sistema de captación de agua de lluvia junto con polvos atmosféricos.	34

13	Muestreador para colecta de deposición húmeda y seca colocado directamente sobre la botella colectora. Se puede conectar el embudo con una manguera tipo Tygon (resistente a la corrosión) y colocar el embudo a una distancia de 75 cm, asegurándolo a una superficie.	34
14	Diagramas de Tukey del pH en función de la procedencia.	40
15	Diagramas de Tukey del pH en función época de colecta de las muestras.	41
16	Muestras con carácter ácido (pH menor de 5.6), alcalino (pH mayor a 6.35) y en equilibrio con el dióxido de carbono (CO ₂) atmosférico (pH entre 5.60 y 6.35).	43
17	Sólidos totales encontrados en muestras de deposición ácida en la región del volcán de Pacaya y dos sitios en ciudad de Guatemala.	45
18	Gráfico de dispersión para evaluar la relación entre el pH y los sólidos totales.	46
19	Conductividad en muestras de deposición húmeda en cuatro sitios de muestreo en el área de influencia del volcán de Pacaya y dos sitios en la ciudad de Guatemala.	49
20	Diagramas de Tukey de la conductividad en función de la procedencia.	51
21	Diagramas de Tukey de la conductividad en función de la época de colecta de las muestras.	51
22	Gráfico de dispersión para evaluar la relación entre el pH y la conductividad.	53
	Apéndice A	
23	Valores de pH medidos en la deposición húmeda y seca en la Aldea El Patrocinio.	68
24	Valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca en la Aldea Concepción El Cedro.	68
25	Valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca tomadas en la Estación INDE El Cedro.	69
26	Valores de pH en la deposición húmeda y seca de las muestras tomadas en San Vicente Pacaya.	69
27	Valores de pH medidos en la deposición húmeda y seca en las muestras de la Floresta, zona 2 de la ciudad de Guatemala.	70
28	Valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca en las muestras colectadas en El Proyecto 4-4, zona 6 de la ciudad de Guatemala.	70
29	Tendencia en los valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca durante el periodo comprendido entre octubre de 2001 y octubre de 2003.	71
30	Carácter ácido, alcalino y en equilibrio de las muestras analizadas en cuatro sitios en la región de influencia del volcán de Pacaya.	71
	Apéndice D	
31	Mapa del área de estudio en época seca medida durante el mes de octubre de 2001. Se observan los valores de pH en el Cedro, el Patrocinio, San Vicente Pacaya, Estación el Inde, La Floresta y Proyecto 4-4. En color rojo se presentan los sitios con los valores de pH que	75

- presentan lluvia ácida, los cuales se encuentran ubicados en la parte baja del mapa, con valores pH de 4.39 para El Cedro y 3.36 para el Patrocinio.
- 32 En el mapa se muestra un sitio con valor de pH ácido en el Patrocinio, en la parte baja del mapa. Los otros sitios de muestreo presentan valores de pH entre 5.8 y 6.69. 76
- 33 Mapa que muestra los valores de pH medidos en abril de 2002, en donde se presenta un valor de pH ácido, por debajo de 5.6 ubicado en la región de la ciudad de Guatemala, el área de La Floresta en la zona 2, con un valor de 5.36 unidades de pH y un valor cercano a la acidez ubicado en Proyecto 4-4 zona 6 con un valor de 5.85. El resto de los sitios de muestreo presenta valores de pH entre 7.88 y 8.16 unidades, considerados valores alcalinos. 77
- 34 Mapa de valores de pH en época húmeda en el sitio de muestreo. Se presentan 3 valores de pH ácido en la región del volcán de Pacaya, visualizado con puntos rojos, ubicados en el Cedro (pH 5.18); El Patrocinio (pH 5.55) y la Estación el INDE (pH 5.56). San Vicente Pacaya ubicado dentro de las cercanías del volcán de Pacaya presenta un valor de 6.04 y los dos sitios ubicados en la región de la ciudad de Guatemala presentan valores de 6.24 para la Floresta, zona 2 y 6.37 para el Proyecto 4-4 en la zona 6. 78
- 35 Mapa de valores de pH en época húmeda medidos en mayo de 2002. Se presentan 3 valores de pH ácido, ubicados en el Cedro (pH 3.75); San Vicente Pacaya (pH 4.07) y Estación INDE (4.21). El Patrocinio ubicado en la región del Volcán de Pacaya presenta un valor de pH de 6.23. Los sitios ubicados en la ciudad de Guatemala, presentan valores de pH 6.36 para la Floresta, en la zona 2 y pH 6.49 para el Proyecto 4-4 en la zona 6; siendo el ubicada en la región del volcán de Pacaya la que presenta valore de pH con lluvia ácida. 79
- 36 Mapa que presenta los 4 sitios de muestreo ubicados en la región del Volcán de Pacaya. Se puede apreciar que 3 de los 4 sitios presentan lluvia ácida durante la época lluviosa, con valores de pH de 3.75 para El Cedro, 4.07 para San Vicente Pacaya y 4.21 para la Estación del INDE. El Patrocinio presenta un valor de pH de 6.23 unidades 80

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

Sigla o abreviatura	Significado
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy, Espectrometría de Absorción Atómica (en español).
Al	Aluminio
ANOVA	Analysis of variance, Análisis de varianza (en español).
Bi	Bismuto
°C	Grado centígrado
Ca ²⁺	Ion calcio.
CA 9	Carretera-9, rutas centroamericanas.
CO ₂	Dióxido de carbono.
COSPEC	Correlation Espectrometry, Espectrómetro de correlación (en español),
Cl ⁻	Ion cloruro
Cu	Cobre
Desv.Est.	Desviación Estándar.
EFPEM	Escuela de Formación de Profesores de Educación Media.
EPA	Environmental Protection Agency, Agencia de Protección del Medio Ambiente (en español).
Fe	Hierro
GPS	Geographical Position System, Sistema de posicionamiento geográfico (en español).
HCl	Ácido clorhídrico.
HF	Ácido fluorhídrico
H ₂ S	Ácido sulfrídrico.
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación.
INSIVUMEH	Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología.
K ⁺	Ion potasio
km	Kilómetro
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
Mg ⁺	Ion magnesio.

mg/L	Miligramos por litro.
mL	Mililitros.
Mn	Manganeso.
Mo	Molibdeno.
Na ⁺	Ion sodio.
NH ₄ ⁺	Ion amonio.
NO ₂	Dióxido de nitrógeno.
NO ₃ ⁻	Ion nitrato.
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O	Oxígeno.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
P	Fósforo
Pb	Plomo
pH	Potencial de hidrógeno.
ppm	Partes por millón.
Proy.	Proyecto.
S	Azufre
Si	Silicio
SiO ₂	Dióxido de silicio.
Sn	Estaño
SO ₂	Dióxido de azufre
SO ₄ ⁻	Ion sulfato.
SO _x	Óxidos de azufre
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences, Paquete estadístico para las ciencias sociales (en español).
SO ₂	Dióxido de azufre.
Ti	Titanio
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.
USGS	United States Geological Survey, Servicio Geológico de Estados Unidos (en español).
µg/m ³	Microgramos por metro cúbico.

$\mu\text{S}/\text{cm}$

microSiemens por centímetro.

w/v

Weight/volumen, Porcentaje peso/volumen (en español).

Zn

Zinc.

RESUMEN

Con el objetivo de determinar el nivel de acidez en la deposición húmeda y seca en la región del volcán de Pacaya y las áreas susceptibles de dicha deposición, se determinó el valor del potencial de hidrógeno, pH, en cuatro sitios en la región del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala.

Dicha evaluación se realizó por medio de lecturas de pH en colectores de vidrio con agua desmineralizada. Las mediciones se realizaron desde octubre de 2001 hasta octubre de 2003, en periodos quincenales. También se realizaron mediciones de conductividad y sólidos totales.

Los resultados obtenidos indican que la actividad del volcán de Pacaya presenta riesgo para las comunidades que se encuentran en el área de influencia, ya que durante los meses de octubre de mayo, agosto y septiembre de 2002 y junio octubre de 2003 se encontraron valores de pH entre 3 y 4 unidades.

La Estación del INDE y la aldea Concepción El Cedro son los sitios de monitoreo que presentan la mayor susceptibilidad a la deposición ácida, ya que fueron los sitios en los que se midió la mayor cantidad de muestras con carácter ácido. En menor proporción se encuentra San Vicente Pacaya y con menor susceptibilidad se encuentra la aldea El Patrocinio.

Se observó que sí existe diferencia entre las muestras tomadas en el área de influencia del volcán de Pacaya y las tomadas en la ciudad de Guatemala. En las muestras colectadas en la ciudad durante el monitoreo, no se midió valores de pH diferentes a los valores normales de agua de lluvia, la que tiene un valor de pH de 5.60 unidades.

El mes que presentó la mayor cantidad de sólidos totales fue junio de 2002, tanto para la ciudad como para los sitios ubicados en el área de influencia del volcán de Pacaya. El mes que presentó conductividad para todos los sitios de muestreo fue mayo de 2002. En agosto del mismo año, se registró el promedio de conductividad más alto para los sitios ubicados en el área del volcán de Pacaya.

Con base en los análisis realizados, se recomienda mantener un programa de monitoreo que permita formular planes de contingencia para prevenir los efectos nocivos de este tipo de contaminantes y ampliar la cantidad de sitios de muestreo, lo que permitirá evaluar de una mejor forma la susceptibilidad del área de influencia.

Las poblaciones de Concepción El Cedro, San Vicente Pacaya, la aldea El Patrocinio y la Estación INDE El Cedro se ven afectadas por la deposición ácida, ya que se encuentran en la región del área de influencia del volcán de Pacaya

ABSTRACT

With the objective of determining the level of acidity in the wet and dry deposition in the region of the Pacaya volcano and the areas susceptible to said disposition, the value of the hydrogen potential, pH, was determined at four sites in the region of the Pacaya volcano and in two sites in Guatemala City.

This evaluation was carried out through pH readings in glass collectors with demineralized water. The measurements were carried out from October 2001 to October 2003, in biweekly periods. Measurements of conductivity and total solids were also made.

The results obtained indicate that the activity of the Pacaya volcano presents a risk for the communities that are in the area of influence, since during the months of October, May, August and September 2002 and June October 2003, pH values were found. between 3 and 4 units.

The INDE Station and the Concepción El Cedro village are the monitoring sites that present the greatest susceptibility to acid deposition, since they were the sites in which the largest number of acidic samples were measured. In a lesser proportion is San Vicente Pacaya and with less susceptibility is the village of El Patrocinio.

It was observed that there is a difference between the samples taken in the area of influence of the Pacaya volcano and those taken in Guatemala City. In the samples collected in the city during monitoring, no pH values were measured that were different from the normal values of rainwater, which has a pH value of 5.60 units.

The month that presented the highest amount of total solids was June 2002, both for the city and for the sites located in the area of influence of the Pacaya volcano. The month that presented conductivity for all sampling sites was May 2002. In August of the same year, the highest average conductivity was recorded for the sites located in the Pacaya volcano area.

Based on the analyzes carried out, it is recommended to maintain a monitoring program that allows formulating contingency plans to prevent the harmful effects of this type of contaminants and expand the number of sampling sites, which will allow for a better evaluation of the susceptibility of the area of influence.

The populations of Concepción El Cedro, San Vicente Pacaya, the El Patrocinio village and the INDE El Cedro Station are affected by acid deposition, since they are located in the region of the area and influence of the Pacaya volcano.

I. INTRODUCCIÓN

La lluvia y la deposición ácida son fenómenos que presentan efectos nocivos en la salud del ser humano, los cultivos y la vegetación en general, las estructuras arquitectónicas así como otros bienes naturales. La deposición ácida está constituida por partículas secas de carácter ácido en la atmósfera y por la precipitación húmeda. El agua de lluvia, por otra parte, debe su carácter ligeramente ácido al ácido carbónico formado en la atmósfera por el dióxido de carbono, alcanzando un pH de 5.6; cuando el agua tiene un valor de pH por debajo de 5.6, es cuando se presenta la lluvia ácida. El principal precursor de la lluvia ácida es el dióxido de azufre, al producirse ácido sulfúrico por su disolución en el agua (Garcés, 2004). Tanto la deposición ácida como la lluvia ácida pueden provocarse por causas naturales y antropogénicas.

Entre los efectos nocivos para la salud humana de los componentes de la lluvia y deposición ácida, se encuentran las enfermedades respiratorias y del corazón, así como cáncer (Gallardo, 1999; Echarri, 2008). Así mismo, las cenizas volcánicas también causan enfermedades respiratorias como asma, faringitis, rinorrea, tos, congestión sinusal entre otras. En cuanto a los ecosistemas acuáticos y terrestres, la lluvia ácida puede presentar efectos nocivos entre los que se encuentran la acidificación del agua y los suelos, necrosis y disminución de la capacidad fotosintética en las plantas, daños en la salud de los animales terrestres y acuáticos. Así mismo, la deposición ácida provoca deterioro en las estructuras arquitectónicas y monumentos, al dañar los materiales de hormigón, caliza, metales y pinturas, causando daños económicos. Entre las causas naturales de la deposición ácida se encuentran las emisiones volcánicas, en las cuales se expulsa material sólido y gaseoso del interior de la Tierra. Entre los principales componentes de estas emisiones que contribuyen a la lluvia ácida se encuentran los iones Cl^- , SO_4^- , NO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , Mg^+ , Ca^{2+} , K^+ y el SiO_2 . A partir de los iones Cl^- y SO_4^- se producen el HCl gaseoso y el H_2SO_4 y SO_2 gaseoso, componentes importantes de la lluvia ácida (Johnson, 1986).

En Guatemala, por su posición geográfica y características geológicas, existen varios volcanes activos, entre ellos el volcán de Pacaya, el volcán de Fuego y el volcán Santiaguito. Por su cercanía a la ciudad de Guatemala y otras ciudades como Amatitlán, Villa Nueva, Villa Canales y Mixco, las emisiones del volcán de Pacaya podrían afectar el pH de la lluvia y deposición ácida

que cae sobre estas ciudades y en los alrededores. Así mismo, la lluvia ácida provocada por las emisiones del volcán de Pacaya, pueden afectar los cultivos en el área de influencia del volcán. El volcán Pacaya, con una altura de 2,552 msnm y ubicado en el municipio de San Vicente Pacaya en el departamento de Escuintla, a 37 km al sur de la ciudad de Guatemala, es un estratovolcán activo desde 1961, presentando erupciones principalmente estrombolianas, flujos de lava y caída de tefra (Durst, 2008). Desde 1978 el volcán ha presentado actividad fumarólica (Eggers, 1979). En el volcán se han medido flujos de SO₂ de más de 1000 toneladas por día, habiéndose observado una tasa promedio de emisiones para el periodo 1999-2002 de 1350 toneladas/día (Rodríguez, 2004).

De esta manera, las emanaciones del volcán de Pacaya pueden contribuir a la lluvia ácida en sus alrededores, en extensiones que dependerán de la magnitud de las erupciones y la dirección de los vientos. Así, por ejemplo, en Costa Rica se ha determinado que los volcanes Poás, Rincón de la Vieja y Turrialba han afectado el territorio dejando los llamados callejones de acidificación, que son porciones de entre uno y dos kilómetros de ancho en que la vegetación se ha marchitado o quemado por la lluvia y niebla ácidas, sin que se note esos callejones se perciban a simple vista (Duarte & Fernández, 2011). En Guatemala, poca atención se le había puesto a la lluvia ácida, existiendo un reporte de medición del pH en agua de lluvia en una estación en la zona 12 de la ciudad de Guatemala, en la cual se determinó un valor medio de pH de 5.87 en 2001 y de 6.53 en 2002, valores que indican que no ocurrió lluvia ácida en ese sector de la ciudad durante los dos años reportados (Oliva, 2002; Oliva, 2003).

Por lo anterior, en vista del desconocimiento sobre los efectos sobre cultivos que la actividad del volcán de Pacaya puede causar en sus alrededores y en la acidez de la lluvia en la ciudad de Guatemala, en el presente estudio se planteó el objetivo de realizar una evaluación preliminar de los niveles de acidez en la deposición húmeda y seca en la región del volcán de Pacaya y en puntos de muestreo en la ciudad de Guatemala, como base para el diseño de un monitoreo en el área que permite prevenir efectos nocivos en la población. Entre los principales resultados, se encontró que hay áreas pobladas en los alrededores del volcán, en los que ocurrió lluvia y deposición ácidas en agosto y septiembre de 2002, con valores de pH de hasta 3.43 y 3.18, respectivamente. La lluvia ácida no fue constante durante todo el período de estudio de octubre de 2001 a octubre de 2003,

mientras que en los puntos ubicados en la ciudad de Guatemala, no se determinó que existiera lluvia ácida en el período del estudio.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 LLUVIA Y DEPOSICIÓN ÁCIDA

La lluvia ácida constituye un indicador de la calidad del aire, la cual se puede evaluar mediante la medición de algunos parámetros de calidad del agua como el pH, la conductividad, los sólidos disueltos y la concentración en iones y metales (Gallardo, 1999). El agua de lluvia es ligeramente ácida, por su contenido de ácido carbónico, que se forma a partir del dióxido de carbono presente en la atmósfera, tiene un valor de pH normal de aproximadamente 5.6 unidades (Garcés, 2004) y valores por debajo de este es a lo que se llama lluvia ácida que al caer provoca una limpieza de la atmósfera (Gallardo, 1999). Las fuentes naturales que provocan lluvia ácida pueden ser emisiones volcánicas, tormentas eléctricas, actividad microbiana (Garcés, 2004).

La deposición ácida incluye las partículas secas ácidas que se separan de la atmósfera y vapores ácidos, así como la precipitación húmeda (EPA, 2008). La deposición seca es diferente a la transportada por la precipitación pluvial o lluvia e incluye el material depositado sobre la superficie terrestre, agua o vegetal (Delmelle, 2001). La lluvia ácida antropogénica se diferencia de la lluvia ácida volcánica por el contenido de HCl que esta tiene (Johnson, 1986).

2.2 QUÍMICA DE LA LLUVIA ÁCIDA

El dióxido de azufre, que es soluble en agua y relativamente estable en la atmósfera, donde permanece aproximadamente de 2 a 4 días y puede transportarse por varios kilómetros desde su origen para producir ácido sulfúrico, principal precursor de la lluvia ácida (Garcés, 2004). La lluvia ácida volcánica está compuesta principalmente de ácido clorhídrico (HCl) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) (Johnson, 1985) y que además es muy diferente de la composición de la lluvia ácida producida por contaminantes antropogénicos. Entre los componentes de la lluvia ácida de origen volcánico se puede encontrar los siguientes iones Cl⁻, SO₄⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Na⁺, Mg⁺, Ca²⁺, K⁺ y SiO₂. La composición variable de la lluvia ácida volcánica se puede explicar por las fases de cloruro y azufre existentes en la pluma volcánica. El cloruro se encuentra en forma de gas de HCl, mientras que el azufre se encuentra como gas de SO₂ y aerosoles de SO₄²⁻ (Johnson, 1986).

2.3 EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA

Los efectos nocivos que la lluvia ácida provoca en áreas naturales dependen del tipo de ecosistema en donde ocurra. La precipitación en arroyos, ríos, lagunas y lagos puede ocasionar acidificación de las aguas, y provocar daños a las plantas, a los animales (Gallardo, 1999) e incluso causar la muerte de crustáceos, insectos acuáticos y moluscos y la desaparición del fitoplancton alterando la cadena alimenticia (Baird, 2001). Si la lluvia ácida ocurre durante la temporada de desove (EPA, 2008) provoca la disminución de peces y anfibios al deteriorar los huevos o producir malformaciones y reducir la capacidad de asimilar calcio en los huesos. También puede provocar la obstrucción de las agallas en los peces por efecto del aluminio liberado del sedimento (Echarri, 1998).

En ecosistemas terrestres la lluvia ácida penetra en el suelo lixiviado los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, particularmente fosfatos (PO_4^{3-}) (Johnson, 1986) y afectando las raíces de los árboles (Manahan, 1994), ocasionando daños en las hojas al eliminarles la cubierta cerosa y provocando lesiones que alteran la fotosíntesis, disminuyendo su capacidad de alimentación (Garcés, 2004), debilitándolas y haciendo más lento su crecimiento o haciéndolas susceptibles a plagas y enfermedades (Gallardo, 1999) y menos resilientes (Echerri, 1998) lo que es provocado por una alteración asociada a la regulación del pH intracelular (Nadeau, 2006). De esta forma la deposición ácida directa afecta la vegetación, así como los procesos químicos del suelo, dañando mayormente a las áreas boscosas, ya que las áreas agrícolas tienen en general buena capacidad buffer, además libera elementos tóxicos como el aluminio o el magnesio (Gallardo, 1999) del suelo que también son nocivos para las plantas (EPA, s.f) porque bloquean la absorción de nutrientes en las raíces afectando su desarrollo (Garcés, 2004) y elimina microorganismos fijadores de nitrógeno y otros descomponedores (Baird, 2001). También se puede observar que la interacción de la deposición ácida (pluma de gas), provoca un daño generalizado a la vegetación, que se observa mayormente en la dirección del viento (Nadeau, 2006). En los animales se ha observado pérdida de pelo y desgaste de las mandíbulas, y otras afecciones en la piel (Gallardo, 1999).

El efecto de la deposición ácida especialmente las partículas de polvo ácidas causan daño en los materiales de construcción como caliza y hormigón y dañar sus superficies (EPA, s.f.) al volver porosos los materiales y ocasionar pérdida en la resistencia de estos (Garcés, 2004). Estas partículas ácidas también dañan el metal, la pintura y la piedra, haciendo que se deterioren rápidamente, por lo que las estructuras deben ser reparadas, restauradas o reemplazadas constantemente (EPA, sf).

2.4 EFECTOS EN LA SALUD HUMANA

Los riesgos potenciales para la salud humana se encuentran asociados a los contaminantes precursores de la lluvia ácida, como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), así como partículas de sulfato (EPA, 2008) los que según estudios realizados en varios países del mundo, como México en 1997 (pH de 3.38), Escocia en 1974 (pH de 2.74) y Sao Paulo, Brasil (pH de 2.7) para 1983 a 1985, han provocado enfermedades respiratorias por daños en los bronquios y del corazón (Gallardo, 1999); observándose un incremento en afecciones respiratorias como asma, bronquitis crónica, síndrome de Krupp además de un aumento en casos de cáncer (Echarri, 1998), y ataques cardíacos que pueden causar la muerte de las personas (EPA, 2008).

Las cenizas volcánicas, aunque no sean altamente tóxicas también pueden causar daños a la salud, especialmente a los bebés, a los ancianos y a las personas con enfermedades respiratorias, agravándolas, además, también puede causar resequedad en los ojos (Porter, 2006). En 2010 Wardman (2012) reportó que un total de 74 personas fueron admitidas en un hospital público en Guatemala, después de las erupciones del volcán Pacaya del 28 de mayo y del 7 de junio de 2010, categorizadas como 8% de enfermedades respiratorias que incluyen asma, faringitis, 4% por quemaduras y 85% por traumas múltiples debidos a la caída de tefra (arena volcánica).

Sierra (s.f.) reportó una correlación positiva estadísticamente significativa entre la exposición crónica a SO_2 y partículas finas de sulfato emitidas por el volcán Kilauea (Hawái) y el aumento de la prevalencia de tos, flema, rinorrea, dolor de garganta, garganta seca, congestión sinusal, sibilancias, irritación ocular y bronquitis. Estudios toxicológicos realizados con ratones demostraron que hay un incremento en el daño de los alveolos en ratones que fueron expuestos a emisiones volcánicas (Sierra, s.f.).

En el Cuadro 1 se encuentra una guía sobre los niveles de dióxido de azufre que indican la calidad del aire y las actividades que se recomienda realizar según el riesgo a la salud que represente dicha concentración.

Cuadro 1. Guía sobre los niveles de asesoramiento a corto plazo sobre el dióxido de azufre.

Concentración de SO ₂ (ppm)	Código de color y condición de calidad del aire	Descripción de la calidad del aire	Acción o actividades recomendadas		
			Grupos sensibles	Personas con experiencias de efectos a la salud	Todos los demás
0 – 0.10	Verde (Buena)	Considerado satisfactorio y posee poco o ningún riesgo	Individuos altamente sensibles pueden ser afectados a estos niveles		No se esperan efectos potenciales a la salud
0.11 – 0.20	Amarillo (Moderado)	Aceptable, sin embargo, puede considerarse moderadamente saludable para un pequeño número de personas	Hay que tener en cuenta que los niveles están levemente elevados	Si tiene dificultades respiratorias como presión en el pecho o sibilancias, interrumpa las actividades, usar inhalador y buscar un lugar para sentarse y descansar	No se esperan efectos potenciales para la salud, pero las acciones para reducir la niebla pueden ser útiles.
0.21 – 1.00	Naranja (No saludable para grupos sensibles)	Personas sensibles, individuos sanos con asma leve, pueden experimentar efectos en la salud. Pueden verse afectados en niveles más bajos que el público en general. En el extremo superior de este rango, la mayoría de asmáticos que estén activos al aire libre pueden experimentar algunas dificultades respiratorias. El público en general no se espera que se vea afectado en este rango.	Evite las actividades al aire libre que causan respiración fuerte o respirar por la boca.	Si tiene dificultades respiratorias como presión en el pecho o sibilancias, interrumpa las actividades, usar inhalador y buscar un lugar para sentarse y descansar	No se esperan efectos potenciales para la salud, pero las acciones para reducir la niebla pueden ser útiles.

Concentración de SO ₂ (ppm)	Código de color y condición de calidad del aire	Descripción de la calidad del aire	Acción o actividades recomendadas		
			Grupos sensibles	Personas con experiencias de efectos a la salud	Todos los demás
1.01 – 3.00	Rojo (Insalubre)	Todos pueden comenzar a experimentar efectos en la salud. Los miembros sensibles pueden experimentar efectos de salud más graves.	Evitar las actividades al aire libre y permanecer en el interior	Considerar dejar la zona	Evitar las actividades al aire libre que causan respiración fuerte o por la boca
3.01 – 5.00	Lila (Muy insalubre)	Alerta de salud activa, todos pueden experimentar efectos de salud más graves	Evitar las actividades al aire libre y permanecer en el interior	Salir del área y buscar ayuda médica	Evitar las actividades al aire libre y permanecer en el interior
➤ 5.01	(Marrón) Peligroso	Desencadena advertencias generales de condiciones de emergencia. Poblaciones enteras pueden verse afectadas	Evitar las actividades al aire libre y permanecer en el interior. Abandonar el lugar si lo solicita autoridades de seguridad.	Salir del área y buscar ayuda médica	Evitar las actividades al aire libre y permanecer en el interior. Abandonar el lugar si lo solicita autoridades de seguridad.

Fuente: EPA. *Final SO₂ exposure level. Real-Time & Historical Air Quality Data* (Traducción libre)

2.5 EMISIONES VOLCÁNICAS

Las emisiones volcánicas son eventos que rápida y repentinamente dispersan gases y partículas finas en la atmósfera, las cuales contienen grandes concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) (Rose, 2000) dióxido de carbono (CO₂) y ácido fluorhídrico (HF) (Porter, 2006), que pueden permanecer en nubes volcánicas y en la atmósfera por días, semanas o más tiempo (Rose, 2000). Esta ceniza volcánica puede ser abrasiva y corrosiva, y viajar kilómetros a favor del viento desde la fuente (Porter, 2006). El monitoreo de gases es una herramienta importante utilizada por los

vulcanólogos para entender los procesos volcánicos y monitorear las erupciones y el SO₂ es comúnmente medido de forma remota para determinar las tasas de emisión, las cuales puedan ayudar a tener un mejor entendimiento sobre los procesos eruptivos (Rodríguez, 2004).

Las simulaciones hechas con modelos de gases predicen el lavado extensivo de gases volcánicos fuertemente ácidos (SO₂, HCl, HF), los cuales han sido documentado a través de estudios de caso como en el monte Santa Helena en Washington (2004), monte Spurr en Alaska y monte Pinatubo en Filipinas (USGS, 2009) evaluando las condiciones y efectos en los pobladores y los posibles impactos en la salud o respuestas a emergencias de materiales peligrosos que puedan surgir de las erupciones (Porter, 2006).

Los volcanes constituyen las fuentes más grandes de emisiones de SO₂, HCl y HF que contribuyen significativamente a la deposición ácida regional (Delmelle, 2001) siendo el dióxido de azufre es el gas de la nube volcánica monitoreado más comúnmente (USGS 2009). Los monitoreos han demostrado que el H₂S de las primeras emisiones volcánicas se convierten en SO₂, presentándose mayores concentraciones de SO₂ durante el segundo día de residencia de las nubes volcánicas. El SO₂ se transforma a sulfato en la estratósfera a una tasa de desarrollo de aproximadamente 120 días. En las nubes estratosféricas la pérdida de SO₂ es de aproximadamente 35 días, mientras que en las nubes volcánicas es muy rápida limitando la acumulación de aerosoles estratosféricos (Rose, 2000).

En 2006, Seto presentó los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en el área occidental de Japón del periodo de 1994 a 1999, en cuatro sitios Oki, Matsue, Kurahashi y Ashizuri, la cual recibe de forma natural emisiones volcánicas con grandes cantidades de SO₂. En este estudio se reportó una influencia ácida en el valor de pH de las deposiciones húmedas y secas con 1.77 unidades de pH, correspondientes a una concentración de iones [H⁺] de 0.0159 molar y 16.9 µeq /L, siendo Oki uno de los sitios con mayor deposición ácida en Asia Oriental.

Uno de los principales problemas asociados a las erupciones volcánicas es el de los altos niveles de acidez, turbidez y contenido de fluoruro (Madonia, 2012), sin embargo, el hierro soluble de la ceniza volcánica se puede movilizar e interaccionar con la nube de agua y estar presente en

la deposición húmeda (Duggen, 2010). Además, también se pueden movilizar en el gas volcánico aerosoles de Na, K, Al, Fe, Ca, Zn y Mg, en donde el Mg es de 10 a 20 veces menor que el sodio, y en ese orden descendente de concentración, pero también se han detectado en los aerosoles volcánicos los siguientes elementos Si, Al, Ca, Na, Mg, K, Fe, Ti, P, Cu, Zn, Bi, Pb, Mo, Sn, S, Cl, O (Obenholzner, 2002).

En 2011 Calabrese et al. reportaron las emisiones y la deposición atmosférica medida en el volcán Etna en Italia, entre 2004 a 2007, indicando que los aerosoles volcánicos muestran que los aniones dominantes fueron S^{2-} , Cl^- y F^- y que los metales más abundantes fueron K, Ca, Mg, Al, Fe y Ti con un rango entre 1.5 a 50 $\mu g/m^3$.

Seto (2006) indicó que de los estudios realizados en Japón de 1990 a 1997, las deposiciones húmedas y secas con contenido de azufre y nitrógeno iban en aumento, provenientes de emisiones naturales volcánicas, las cuales causan efectos adversos a la salud humana y en los ecosistemas terrestres y acuáticos sensibles.

Fujita (2003) reportó que desde julio de 2000 el volcán Miyakejima, estrato volcán localizado en el del Pacífico a 200 km al sur de Tokio, empezó a tener episodios de erupción energéticos alcanzando niveles tres veces más altos que los reportados hasta 1983. Las normas de calidad del aire ambiental (EQS) del Ministerio de Ambiente de Japón (MEJ) estipulan que los valores por hora de exposición para el SO_2 no deben exceder de 100 ppb y que el promedio diario de los valores hora no debe exceder de 40 ppb, valores que fueron superados durante los episodios reportados durante el periodo de agosto de 2000 a marzo de 2001, los que en algunos casos habían superado por diez veces su valor, reportando valores promedio de emisión de SO_2 de 15×10^9 g S/d.

En 2003, Aiuppa reportó que colectaron 37 muestras de agua de lluvia al sur del volcán Monte Etna, las cuales presentaban valores de pH en un rango entre 3.80 a 7.22 unidades, indicando que el análisis de series de tiempo revela una buena correlación entre el exceso de sulfato de la lluvia y los flujos de SO_2 del cráter de la pluma del volcán.

2.6 ESTUDIOS DE EMISIONES VOLCÁNICAS EN EL ÁREA DE CENTROAMÉRICA

El arco volcánico de Centroamérica está formado por un cinturón de estratovolcanes, de domos silícicos y calderas sobre un área topográfica activamente cambiante que va desde México hasta Costa Rica (Durst, 2008). En esta cadena o arco volcánico hay volcanes pasivos que emiten SO_2 . Las mediciones realizadas en esos volcanes se consideran la primera estimación global para la contribución anual de SO_2 a la atmósfera, la cual reporta una concentración de 10×10^{12} g/a equivalentes a 1.6×10^{11} mol/año (Fischer, 2008).

El volcán Poas, en Costa Rica es uno de los más activos el cual reporta actividades fumarólicas, erupciones de vapores y explosiones. El cono activo contiene una laguna en el cráter, la Laguna Caliente, localizada entre dos conos antiguos, la cual es extremadamente ácida y con una temperatura que va desde 38 a 96°C, y un pH con un rango entre -0.87 a 0.26. De 1993 a 1997, la lluvia anual en el área del cráter del volcán fue de 3.8 a 4.6 m por año, y reportando un valor de pH del agua entre cero y 1.85, clasificándola como una laguna ácida (Martínez, 2000).

El volcán Poas emite gases disueltos provenientes del magma, que afecta extensas áreas agrícolas al norte del Sarchí y Grecia, causando daño a los animales que se alimentan de la vegetación afectada (CNE, sf). Rowe en 1992 reportó que se tomaron muestras de lluvia ácida en el borde oeste del cráter activo del volcán Poas, y que con el colector utilizado que permaneció abierto a la atmósfera se recolectó deposición ácida húmeda y seca. La determinación del valor de pH en la deposición ácida reportó los siguientes datos: marzo 1985: 2.90; junio 1986: 2.90; enero 1988: 3.04; junio 1988: 1.00; febrero 1989: 0.20; agosto 1989: 2.60 y marzo de 1990 1.30 unidades.

En 2003, Nriagu reportó los flujos de SO_2 medidos entre enero de 1980 y marzo de 2000, en toneladas por día para los volcanes Arenal (1.1×10^2), Fuego (6.4×10^2), Masaya (7.9×10^2), Pacaya (5.1×10^2) Poas (5.00×10^2) y Popocatepetl (1.26×10^3) indicando que los flujos medidos se mantenían constantes. También en 2003, Benítez reportó que la niebla en el área de Hawái, presentaba concentraciones de Fe y Al, en concentraciones de 1 a 6419 nM para el Fe y para el aluminio de 8 a 10,489 nM.

Durante noviembre y diciembre de 2003, Mather (2006) registró concentraciones de SO₂ para la región de Mombacho a San Cristóbal en Nicaragua, con valores de 800, 530 y 220 mg/día para las plumas de San Cristóbal, Telica y Masaya. Delmelle en 2001, reportó los monitoreos realizados en 1999 en el área de influencia del volcán Masaya ubicado en Nicaragua cuyos resultados indican que la tasa de deposición de SO₂ fue entre 2 – 791 mg/m² día, mientras las tasas de deposición de HCl fueron de 1 – 297 mg/m² día. Además, reportó que emite aproximadamente 19 kg/s de SO₂, 7 kg/s de HCl y 1 kg/s de HF dentro de la atmósfera y que esas emisiones son llevadas hacia el oeste por los vientos prevalecientes.

En 1985 Johnson reportó que la pluma volcánica de la caldera del volcán Masaya en Nicaragua estaba compuesta principalmente por ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, y que el pH de la lluvia ácida tenía un rango de 2.5 a 5.0 unidades, y que su composición era muy diferente a la lluvia ácida provocada por contaminantes antropogénicos. En su estudio también indica que de 1960 a 1985 (25 años) el volcán emitió una gran cantidad de gases y que, para las últimas actividades reportadas de una serie de erupciones de ese tipo en 1985, el volcán había excedido la descarga de 1,000 toneladas de SO₂ por día, y que los árboles originales y otra vegetación de esa zona se había muerto por causa de la pluma del gas volcánico y de la lluvia acida asociada. En su estudio también reporta que, durante una colecta de muestras efectuada en 1980 con vientos normales, el pH aumentó a medida que se aleja de la caldera con valores de 2.60, 3.45, 3.78 y 3.97 para el sitio más alejado, reflejando la dilución y la difusión del gas volcánico con la distancia.

Las emisiones volcánicas se pueden medir a través de espectroscopía UV (Mediciones COSPEC -Correlation Spectrometer-) la cual es una técnica remota para medir los gases volcánicos por comparación del espectro de la luz natural que brilla a través del aire claro y que brilla a través de la pluma, determinando así, la cantidad de gas en la pluma volcánica porque el SO₂ absorbe radiación en el rango del ultravioleta (Nadeau, 2006) a longitudes de onda de 300 y 315 nm (Edmonds, 2003) o hasta 330 nm, y esas mediciones de SO₂ se pueden expresar en unidades de concentración multiplicada por el recorrido (Rodríguez, 2004). Nadeau (2006) investigó los efectos de la pluma volcánica del volcán Masaya en Nicaragua reportando SO₂, HCl y HF como principales constituyentes, los cuales causaron graves daños a la vegetación afectando aproximadamente 30,000 pobladores del área cercana al volcán y a unos 540,000 habitantes por

las altas concentraciones de SO₂ a nivel del suelo, causando daños en la salud de la población reportando flujos de SO₂ para 1973 de 10×10^{12} g/a (1.6×10^{11} mol /a) la cual no ha cambiado mucho en las estimaciones realizadas hasta 1998.

Emisiones COSPEC (Correlation Spectrometer) fueron medidas durante el periodo de 1999 a 2002 para los volcanes activos en Guatemala, reportando una tasa promedio de emisiones de 340 toneladas/día para el volcán de Fuego, 120 toneladas/día para el volcán Santiaguito y 30 toneladas/día para el volcán Tacaná. En el Salvador se reportaron para el mismo periodo de tiempo 260 toneladas/día para el volcán San Miguel y 140 toneladas/día para el volcán Santa Ana (Rodríguez, 2004).

2.7 ESTUDIOS DE EMISIONES VOLCÁNICAS EN EL VOLCÁN DE PACAYA

El volcán Pacaya ha estado activo desde 1961, y está dominado por actividad de erupciones estrombolianas, flujos de lava y caída de tefra (Durst, 2008). A partir de 1978 debido a los cambios en el cráter y cambios en la densidad de las rocas del volcán, empezó a tener actividad fumarólica (Eggers, 1979). De 1999 a 2002 se hicieron mediciones por COSPEC de emisiones de SO₂ para establecer la línea base de datos de gases potencialmente peligrosos, llegando a medir grandes flujos de SO₂ de más de 1000 toneladas por día, presentando una tasa promedio de emisiones para el periodo 1999-2002 de 1350 toneladas/día, y para el periodo de veinte años antes de 1992 una tasa de 260 toneladas/día (Rodríguez, 2004).

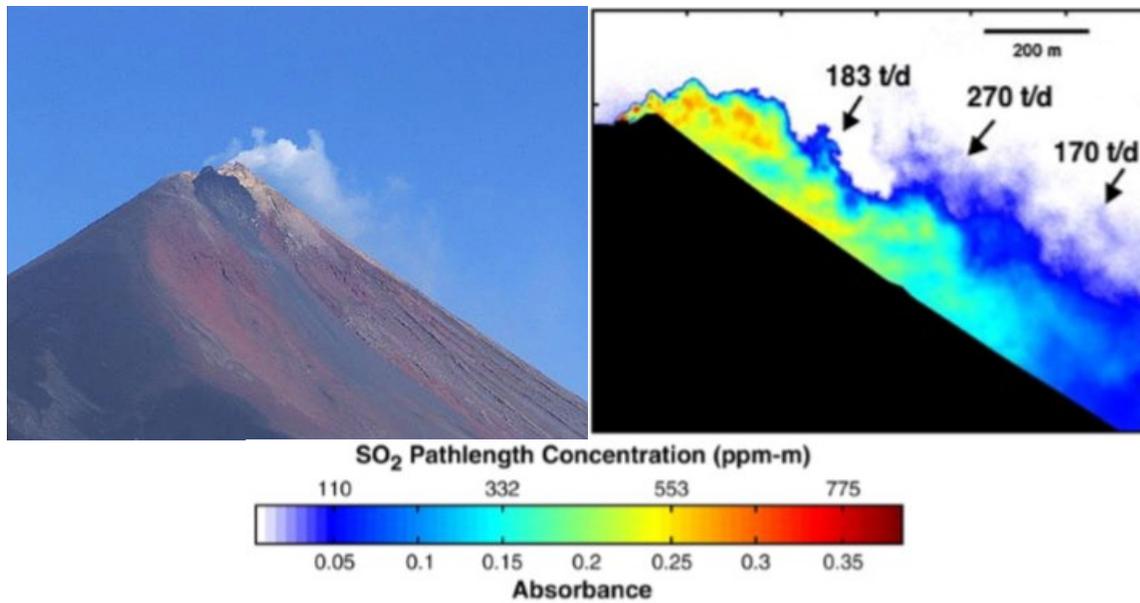


Figura 1. La figura del lado izquierdo es la imagen del volcán Pacaya tomada con una cámara digital a una distancia de 3.64 km. La imagen de la derecha es una imagen simultánea del volcán Pacaya, tomada en el mismo lugar utilizando una cámara UV, con una exposición de 0.5 s para discriminar el SO₂. La resolución de pixeles es de 0.87 m por pixel y la velocidad de la pluma de 7.7 m/s. La absorbancia de la pluma está a escala en los resultados de la barra de calibración en colores abajo.

Fuente: Bluth, 2007.

Bluth (2007) reporta que durante la medición realizada el 20 de enero de 2005, el volcán Pacaya presentó una pluma de gas volcánico que descendió por la pendiente del cono, hacia el sur. Nriagu (2003) reportó emisiones explosivas flujos de SO₂ para el volcán Pacaya de 5.10×10^2 t/día, para un periodo de 5015 días entre enero de 1980 y marzo de 2000.

A continuación, se listan las erupciones volcánicas documentadas por el INSIVUMEH y reportadas por el Instituto Smithsonian (2012), durante la época de 2001-2003:

- 21-27 de febrero de 2001: Durante esta época, se observaron unos 700 sismos en comparación con las dos semanas anteriores, en que se reportaron solo 100 sismos. Las emisiones de gas de dióxido de azufre (SO₂) se incrementaron de 253 toneladas/día a 550 toneladas/día. Se observó lava visible en la cumbre en el cráter MacKenny.
- 29 de mayo al 4 de junio de 2002: Un satélite mostró bajos niveles de ceniza cerca del volcán.

- 12-18 de junio de 2002: El VAAV informó que el 17 de junio a las 0815 horas el satélite mostró hacia el suroeste una pluma muy fina de composición desconocida. Además, las imágenes del satélite mostraron un punto (hotspot) en la cumbre del volcán.
- 2-8 de julio de 2003: El 5 de julio a las 0715 horas, una pluma muy delgada de cenizas fue visible sobre el Pacaya, con una altura de 3 kilómetros extendiéndose a 7.5 kilómetros hacia el suroeste. En Guatemala solo se reportó que el volcán había emitido fuertes sonidos.

En el año 2000, hubo varias erupciones que iniciaron con actividad estromboliana. A continuación, se presenta un diagrama que muestra como las columnas de lava bajaron por el cráter (Smithsonian, 2012; INSIVUMEH, 2004).

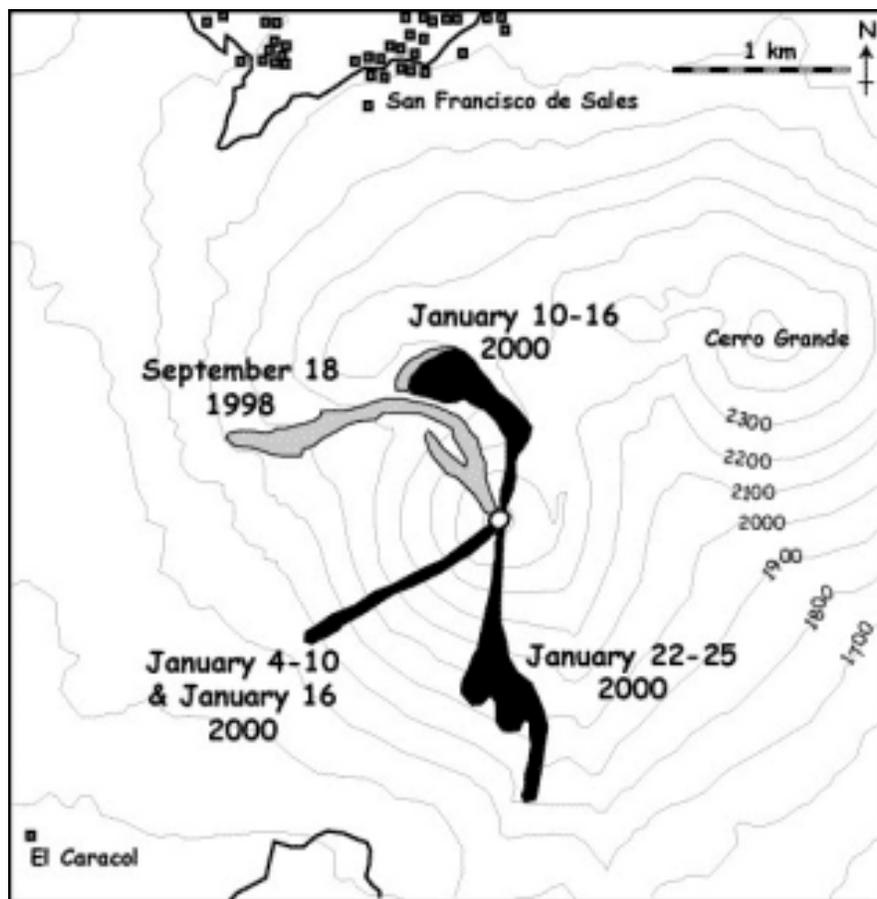


Figura 2. Mapa que muestra los flujos de lava en el sitio del volcán de Pacaya, debido a las erupciones durante los meses de septiembre de 1998 y enero de 2000.

Fuente: Smithsonian, 2012; INSIVUMEH, 2004.

Durante el 2001 la actividad del Pacaya estuvo en un nivel bajo, según las observaciones de campo. Sin embargo, estas actividades estuvieron caracterizadas por desgasificaciones persistentes, en el cono del cráter MacKenney. Durante el mes de febrero se midieron concentraciones altas de SO₂ (Smithsonian, 2012) medidas por una correlación espectrométrica denominada COSPEC, que mide los gases de dióxido de azufre en toneladas métricas por día emitidos por un volcán comparando los espectros de luz incidente con los espectros conocidos de dióxido de azufre para determinar la cantidad de gas en la columna volcánica (USGS s.f.). Estas mediciones se hicieron a lo largo de la carretera que va de Guatemala a Escuintla, durante el 1, 15 y 28 de febrero y el 8 de marzo. Los respectivos valores de flujo fueron de 951, 1,740, 1,448 y 1673 toneladas métricas/día. Esto indica que, aunque no se observen columnas de lava, la desgasificación por SO₂ es muy alta estimando que la desgasificación promedio durante esas erupciones varía significativamente de la estimada con anterioridad, que presenta un promedio de 260 toneladas métricas/día. De agosto del 2000 hasta junio de 2001 se pudo observar columnas de lava, visibles desde la ciudad de Guatemala y Escuintla (Smithsonian, 2012).

Durante el 2002 ocurrieron grandes explosiones de lava del cráter MacKenney, el 16 de enero y el 29 de febrero, también produciéndose incrementos en las concentraciones de SO₂ reportadas por la agencia de Washington VAAV, quienes reportaron bajos niveles de ceniza, que eran visibles con el satélite GOES-8 en la imagen del 30 de mayo de 2002. Después de junio de 2001 la incandescencia en el volcán no fue visible, pero la desgasificación continuó, así como los eventos sísmicos, los cuales se presentaban en rangos de 250-350 eventos tipo B por día. Durante los meses de septiembre y octubre la lluvia ácida producida por la desgasificación vigorosa afectó áreas al norte del Pacaya y quemó las hojas de la vegetación en El Cedro, San Francisco de Sales, y San José Calderas. Los residentes reportaron en esas áreas, algunos pájaros muertos. Durante el 31 de octubre, se produjeron explosiones estrombolianas, con ceniza visible. Se observó una pluma que alcanzaba los 50-200 metros sobre el cráter y la ceniza cayó al sur del volcán. A partir de esta fecha, el INSIVUMEH reportó solo emisiones de gas y dejaron de ser vistas las columnas de lava. El 14 de noviembre, los flujos de SO₂ fueron medidos en 1,800 toneladas métricas por día en el cráter MacKenney (Smithsonian, 2012).

Durante el 2002, en enero se realizaron mediciones del cráter MacKenney, la medición del transepto norte-sur fue de 72 metros y de 94-100 m para el transepto este-oeste, se estimó una profundidad de más o menos 80 metros, habiendo localizado dos fuentes de gas. Durante este tiempo el volcán se caracterizó por la persistente desgasificación. Las mediciones de COSPEC fueron altas, con rangos entre 500 y más de 2,000 toneladas métricas por día. Estas tasas fueron similares, pero más variables que el año anterior (INSIVUMEH, 2004)



Figura 3. Vista aérea tomada el 14 de enero de 2002, que muestra la parte alta del cono Mackenney, en el volcán Pacaya con una pluma de gas blanco soplando de Sur-Este a norte.
Fuente: Smithsonian, 2012.

La agencia de Washington VAAV reportó que para el 5 de julio de 2003, el volcán presentaba una pluma de gas visible, volviéndose a divisar otra pluma de gas visible el 9 de agosto de 2003, las cuales eran plumas de composición desconocida. El INSIVUMEH reportó que durante el 15 al 21 de octubre se reportaron vapores constantes y emisiones de agua y gas que soplaban del noroeste al este del volcán. Una nube gaseosa pesada continuó hasta el 30 de octubre de ese mismo año (Smithsonian, 2012).

En la siguiente figura (4) se pueden observar las concentraciones de SO_2 en toneladas métricas por día emitidas por el volcán Pacaya durante el periodo de 1999 a 2003, reportadas por el INSIVUMEH medidas por el sistema COSPEC en días que se reportaron erupciones volcánicas fuertes.

Medición de SO₂ en el Volcán Pacaya AÑO 1999-2003 Vulcanología INSIVUMEH

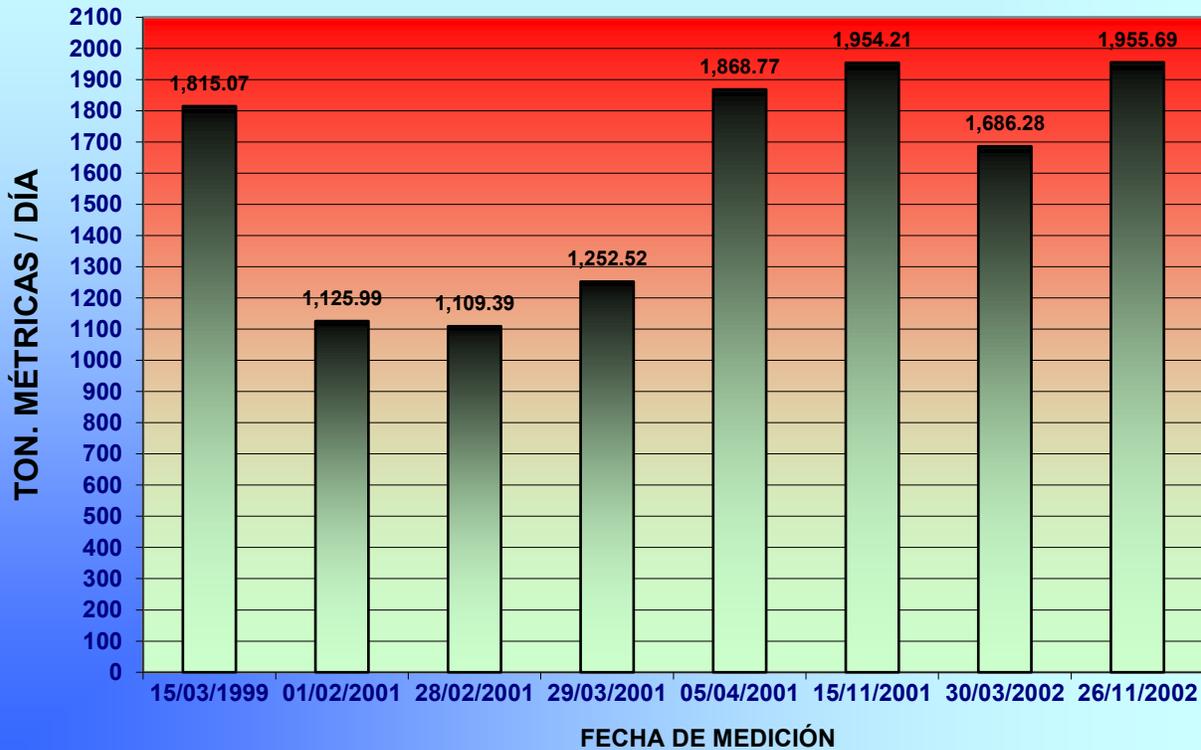


Figura 4. Medición de flujos de SO₂ en la región del volcán de Pacaya para el periodo de 1999 – 2003 en toneladas métricas por día.

Fuente: INSIVUMEH, 2004.

2.8 ESTUDIOS DE LLUVIA ÁCIDA EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

El Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, reporta datos de lluvia ácida en una estación ubicada la Escuela de Formación de Profesores de Educación Media (EFPEM) sobre la Avenida Petapa, con valor medio de pH de 5.87 para el 2001 y de 6.53 para el 2002, los cuales indican que no existe lluvia ácida, según el valor Guía dado por la Organización Mundial de la Salud el cual establece un rango de 5.5 – 7.5 (Oliva, 2002; Oliva, 2003).

III. JUSTIFICACIÓN

Los volcanes activos emanan gases como dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), cloruros y fluoruros, los cuales al entrar en contacto con la atmósfera producen ácidos como el sulfúrico, nítrico, clorhídrico y fluorhídrico. Estos ácidos provocan la corrosión de metales y construcciones, por lo que en áreas con deposición ácida estos se deterioran más rápido que en ambientes no contaminados. Las emanaciones y deposiciones volcánicas afectan al suelo acidificándolo y reduciendo la germinación de las semillas, disminuyendo así el número de plantas y su crecimiento. También se asocia a este tipo de contaminación enfermedades pulmonares como asma, bronquitis y otras enfermedades de las vías respiratorias lo que provoca una amenaza al deterioro de la salud de los pobladores que habitan en la región.

En Guatemala no se ha estudiado aún los efectos que tienen este tipo de emanaciones, por lo que es importante efectuar estudios para establecer cuáles son los niveles de acidez que se producen en áreas cercanas a volcanes activos y poder promover las acciones correspondientes para proteger a la población.

El volcán de Pacaya es un volcán activo, que está catalogado como uno de los más activos de Centro América, el cual se caracteriza por la efusión de flujos de lava, emisión de piroclastos y emisión de columnas de gases. Una de las amenazas del volcán de Pacaya son las emanaciones gaseosas, de las cuales no se ha realizado una zonificación de las áreas más susceptibles. Se han registrado erupciones con explosiones y desgasificaciones, durante las cuales se han reportado enfermedades bronquiales y pulmonares en los pobladores, y necrosis en las hojas de los árboles y arbustos (INSIVUMEH, 2004). Debido a esto es importante estudiar el comportamiento de estos gases por medio de mediciones de deposición húmeda y seca en este volcán activo y establecer si existe deposición ácida y cuáles son los lugares afectados por la misma, para poder crear el mapa de áreas susceptibles para dicha deposición ya que afecta directamente a los pobladores y a la ecología del volcán.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Realizar una evaluación preliminar de los niveles de acidez en la deposición húmeda y seca en el área de influencia de la región del volcán de Pacaya, como base para el diseño de un monitoreo en el área, a fin de prevenir los efectos nocivos en la población.

4.2 Objetivos específicos

- 4.2.1 Determinar el potencial de hidrógeno, pH, en la deposición húmeda y seca en 4 sitios de muestreo en la región del volcán de Pacaya y en 2 sitios en la ciudad de Guatemala.
- 4.2.2 Determinar la conductividad en muestras de deposición húmeda y seca en 4 sitios de muestreo en la región del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala.
- 4.2.3 Establecer una línea base de la deposición húmeda y seca, y conductividad en la región del volcán de Pacaya.
- 4.2.4 Elaborar un mapa de áreas susceptibles para deposición ácida en la región del volcán de Pacaya.
- 4.2.5 Crear una base de datos referente a la deposición húmeda y seca en la región del volcán de Pacaya, la cual servirá para la evaluación de las tendencias y cambios drásticos en los niveles de emanación del volcán Pacaya y en estudios de cambio climático.
- 4.2.6 Establecer si existe riesgo por lluvia ácida en las poblaciones en las cuales se realizan las mediciones.

V. HIPÓTESIS

La deposición ácida en la región del volcán de Pacaya presenta niveles de acidez nocivos para la vegetación, el ser humano y las estructuras en el área de influencia.

VI. MÉTODOS

6.1 Descripción del área de estudio

6.1.1 Volcán de Pacaya

El volcán de Pacaya se ubica en el límite norte entre los departamentos de Escuintla y Guatemala, entre los municipios de San Vicente Pacaya y Palín, departamento de Escuintla y Amatitlán y Villa Canales del Departamento de Guatemala, en la latitud $14^{\circ}22'51''$, y longitud $90^{\circ}36'4''$ (MAGA, 2001). Está ubicado a unos 25 kilómetros al sur de la Ciudad de Guatemala, por la carretera CA 9 Autopista al Pacífico, entrada a la altura del kilómetro 37.5. (Smithsonian, 2012;). La morfografía del volcán de Pacaya y de las regiones cercanas forma un accidente geográfico que constituye un estratovolcán con una altura de 2,552 metros sobre el nivel del mar (msnm), la elevación de su base es de 1,600 metros y forma parte del anillo sur de la caldera de Amatitlán (Evans, 2006).

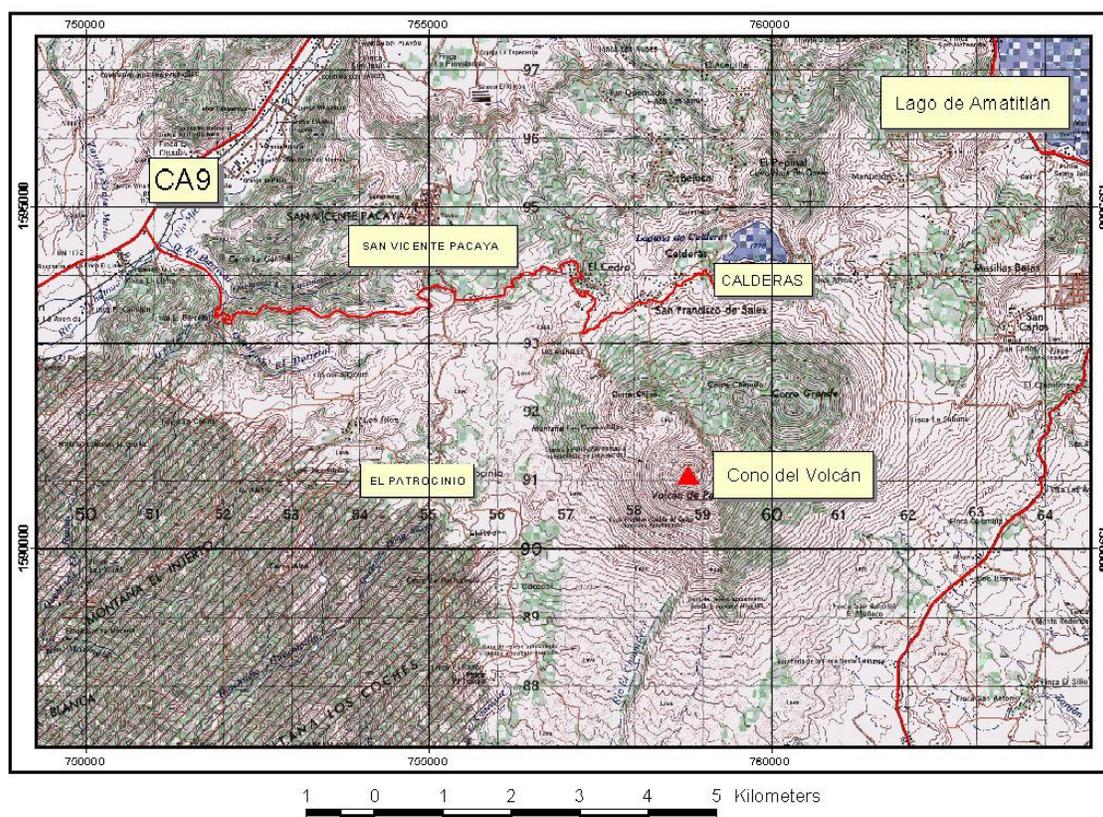


Figura 5. Mapa de ingreso y topográfico del área del volcán de Pacaya.

Fuente: Instituto Geográfico Nacional Hoja Amatitlán 2059 II, en Lira, 2005.

Las laderas del cono son pendientes escarpadas en el lado sur y moderadas en el lado norte. El cráter es circular y tiene un diámetro aproximado de 150 metros. El volcán tiene flujos de lava que se han extendido, presentando también conos parásitos y domos de riodacita. El tipo de roca en su mayoría corresponde a basaltos, y en menor grado flujos de andesitas, riodacitas, dacitas y piroclastos de pómez y cenizas volcánicas. La forma del volcán de Pacaya se debe a la actividad volcánica permanente, la cual es el resultado del cúmulo de rocas volcánicas de diferente tipo y edad. La erosión del suelo en el volcán es de tipo radial afectando al sistema de drenaje. El volcán mantiene una actividad permanente por ser una salida de materiales provenientes de la zona de subducción del Pacífico, lo que provoca salida de materiales lávicos y gases (piroclastos) (MAGA, 2001).

El volcán de Pacaya se encuentra dentro de la unidad fisiográfica de Pendiente Volcánica del Pacífico y es parte del Arco Volcánico Centroamericano, que está formada por una cadena volcánica situada a lo largo de la costa del Pacífico Centroamericano. La actividad volcánica es una consecuencia del proceso de subducción de la Placa de Cocos que se desplaza por debajo de las placas del Caribe y Norteamérica (Villagrán, 2000). La actividad geológica se asocia a las fallas geológicas paralelas a la zona costera, que se encuentran a lo largo de las laderas en la región sur de la cadena volcánica. Es parte de una zona de historia tectónica reciente, que corresponde a una caldera formada en la era del Pleistoceno del periodo Cuaternario al que pertenece también el lago de Amatitlán (López, 2002).

Los suelos del área de influencia se clasifican como suelos de material fluvio-volcánico de reciente elevación media. Según el sistema geomorfológico, la unidad de relieve corresponde a la Cadena Volcánica. Según la distribución de biomas, el área se clasifica como bosque de montaña (Villar, 1998) y según la Clasificación de Holdridge (1982), se pueden clasificar dos zonas de vida, como Bosque Húmedo Sub Tropical (templado), (Evans 2006; Lira 2005) y Bosque Húmedo Sub Tropical (cálido). Por sus características climáticas, según la clasificación de Thornthwaite, el clima es de carácter templado, sin una estación fría bien definida húmedo con invierno seco (Lira, 2005). La precipitación pluvial alcanza un promedio de 2,000 milímetros por año (mm/año) y es mayor durante los meses de junio a septiembre y los meses de diciembre a marzo presentan poca o ninguna precipitación. La humedad relativa presenta un promedio del 80% y una temperatura

media de 17.5°C. El área presenta deposición de ceniza volcánica, lo que contribuye a la permeabilidad de los suelos (Evans 2006; Lira, 2005).

El área del volcán está constituida por cráteres, conos, domos, espinas volcánicas y flujos de lava. Se pueden observar los siguientes accidentes geográficos (Castro 1998, en Evans, 2006):

- El cono McKenney, que se mantiene activo y emite gas y vapor. Presenta un cráter por donde salen flujos de lava durante la actividad volcánica.
- El Cerro Grande, Cerro Chiquito y Cerro Chino, que son formaciones inactivas, que se encuentran montadas sobre un relieve volcánico más antiguo, están consideradas como domos el Cerro Grande y Cerro Chiquito, y como cono el Cerro Chino.
- Fumarolas y sulfataras que presentan materiales ricos en arcillas, haciéndose presentes en el propio cono y en la franja a lo largo de la falla del Centro Hoja de Queso.
- La laguna del Calderas, que constituye la única fuente de agua de consumo humano para la región.

El volcán de Pacaya se encuentra muy activo desde 1961, año desde el cual no ha cesado su actividad volcánica y ha tenido erupciones fuertes presentando flujos y bombas de lava, deposición de ceniza y caída de tefra, afectando las poblaciones cercanas durante las erupciones ocurridas en 1987 y 2000 (Durst, 2008).

6.1.2 Vientos

Los estudios de vientos son escasos para el área del volcán de Pacaya, sin embargo, existe un estudio realizado durante el periodo 1982-1986, que describe el comportamiento de los vientos superiores que ocurren a alturas entre los 3,000 y los 15,000 metros de altura, proporcionando los datos en porcentaje de vientos provenientes de cada dirección resumidas por mes (Lira, 2005).

Cuadro 2. Promedio de la dirección de los vientos superiores en Guatemala, 1982 – 1986 y los Porcentajes de vientos provenientes de cada dirección.

Mes	N	N-NE	E-NE	E	E-SE	S-SE	S	S-SO	O-SO	O	O-NO	N-NO	Calma
Enero	5.00	6.00	5.00	5.00	4.00	3.00	3.00	12.00	20.00	17.00	6.00	3.00	11.00
Febrero	3.09	4.12	3.09	1.03	3.09	4.12	4.12	10.31	27.84	17.53	6.19	3.09	12.37
Marzo	3.00	3.00	4.00	5.00	4.00	2.00	2.00	7.00	24.00	22.00	10.00	4.00	10.00
Abril	8.00	7.00	7.00	5.00	2.00	1.00	2.00	5.00	15.00	20.00	9.00	8.00	11.00
Mayo	6.00	5.00	6.00	7.00	3.00	3.00	3.00	6.00	13.00	13.00	11.00	8.00	16.00
Junio	5.21	8.33	13.54	17.71	12.50	5.21	5.21	1.04	4.17	4.17	4.17	4.17	14.58
Julio	6.06	8.08	14.14	25.25	13.13	3.03	3.03	3.03	2.02	3.03	3.03	5.05	11.11
Agosto	5.15	6.19	14.43	23.71	11.34	4.12	3.09	3.09	3.09	4.12	4.12	4.12	13.40
Septiembre	6.06	9.09	16.16	19.19	11.11	4.04	3.03	3.03	3.03	4.04	4.04	6.06	11.11
Octubre	8.91	12.87	16.83	11.88	4.95	1.98	2.97	3.96	4.95	3.96	5.94	8.91	11.88
Noviembre	1.98	2.97	10.89	17.82	9.90	8.91	7.92	6.93	9.90	7.92	3.96	1.98	8.91
Diciembre	1.98	1.98	5.94	12.87	9.90	4.95	10.89	17.82	16.83	7.92	1.98	0.99	5.94

Fuente: Rose, 1988. *Riesgos por caída de cenizas volcánicas y patrones direccionales de los vientos superiores en Guatemala*. Informe preliminar en Lira 2005

Con base en este estudio se puede determinar la probabilidad de la dirección hacia donde se pueden dispersar las cenizas volcánicas durante las erupciones. Este estudio concluye que los vientos predominantes son de Este y Oeste, por lo que las poblaciones ubicadas en estos sitios serán los más afectados. Durante los meses de enero a marzo, los vientos predominantes son con dirección de oeste hacia este. De abril a mayo ocurren vientos de transición, provenientes del oeste hacia el este a los vientos provenientes del este. De junio a octubre los vientos predominantes son de este hacia oeste. Y de noviembre a diciembre hay nuevamente una transición de vientos del este a oeste a los vientos provenientes del este (Lira, 2005).

6.1.3 Centros poblados

Para el año 2002 cerca de 25,000 personas vivían en las comunidades cercanas al volcán Pacaya (Lira, 2005), a cinco kilómetros del cono activo, ubicadas en 19 poblaciones que pertenecen a la municipalidad de San Vicente Pacaya en el departamento de Escuintla (Wardman, 2010). En el área se pueden observar casas de block o adobe con techos de lámina de zinc. Los centros poblados más afectados por las erupciones son: El Patrocinio, El Rodeo y El Caracol, poblados más próximos a los flujos de lava los que se pueden observar en la figura 6, en color negro (INSIVUMEH, 2004). El Cedro, San Francisco de Sales y Calderas, los que están expuestos a la caída de cenizas (Lira, 2005). Las otras poblaciones aledañas son: Mesillas Altas, Mesillas

Bajas, San Carlos, Santa Elena Barillas, El Chipilinar, Los Llanos, Los Pocitos, Dolores, El Pepinal, El Pericón, San Antonio, El Bejucal y Los Jazmines (INSIVUMEH, 2004; Hetland, 2014).

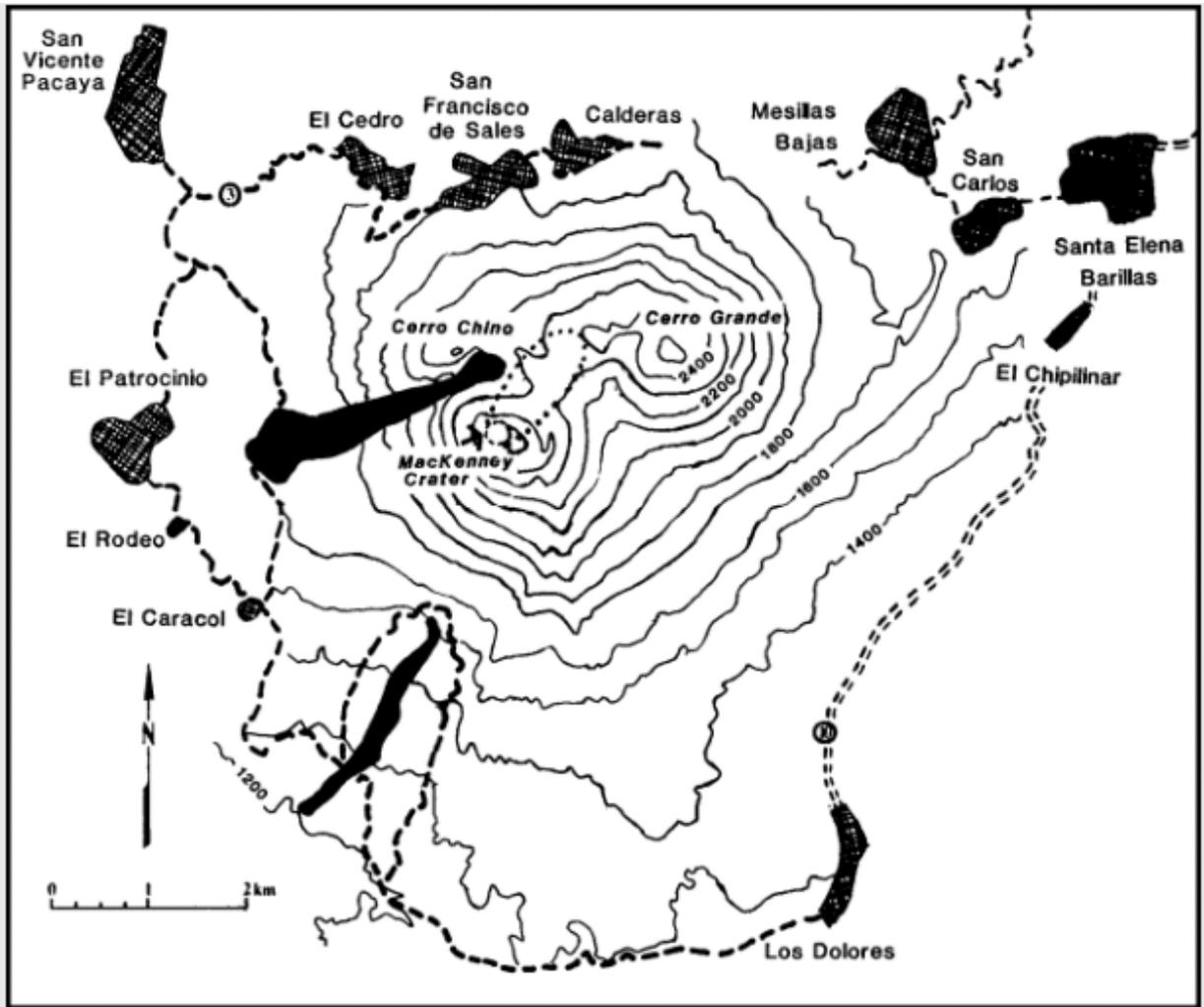


Figura 6. Bosquejo del mapa del Volcán de Pacaya y sus poblaciones cercanas (ashurado). La posición de los flujos de lava se muestran en color negro. La distribución de los cráteres de impacto de bloques y bombas está indicada por una línea punteada que se extiende desde el cráter MacKenney de aproximadamente 100 m. Las carreteras están indicadas con líneas punteadas.

Fuente: INSIVUMEH, 2004.

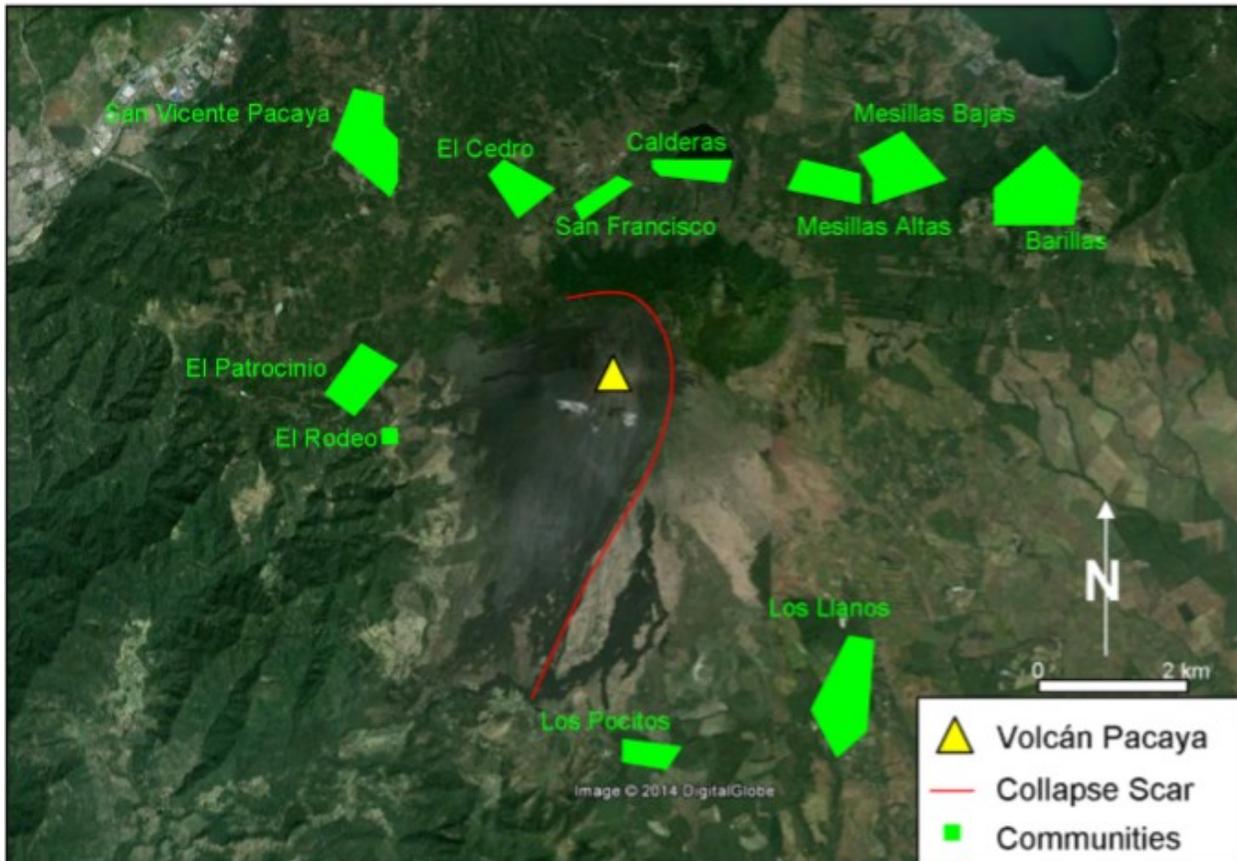


Figura 7. Localización del Volcán Pacaya en relación con las comunidades cercanas, en color verde. La línea roja indica la marca de la cicatriz en la capa en forma de herradura durante las erupciones del 2000 antes del colapso del volcán.

Fuente: Hetland, 2014.

6.1.4 Amenazas naturales

Lira (2005) considera 6 amenazas en el volcán de Pacaya: caída de ceniza, caída de bloques, flujos de lava, lahares, colapso del edificio volcánico y emisión de gases. Sin embargo, para estudios de ordenamiento territorial se consideran las más recurrentes; que son flujos de lava y caída de ceniza.

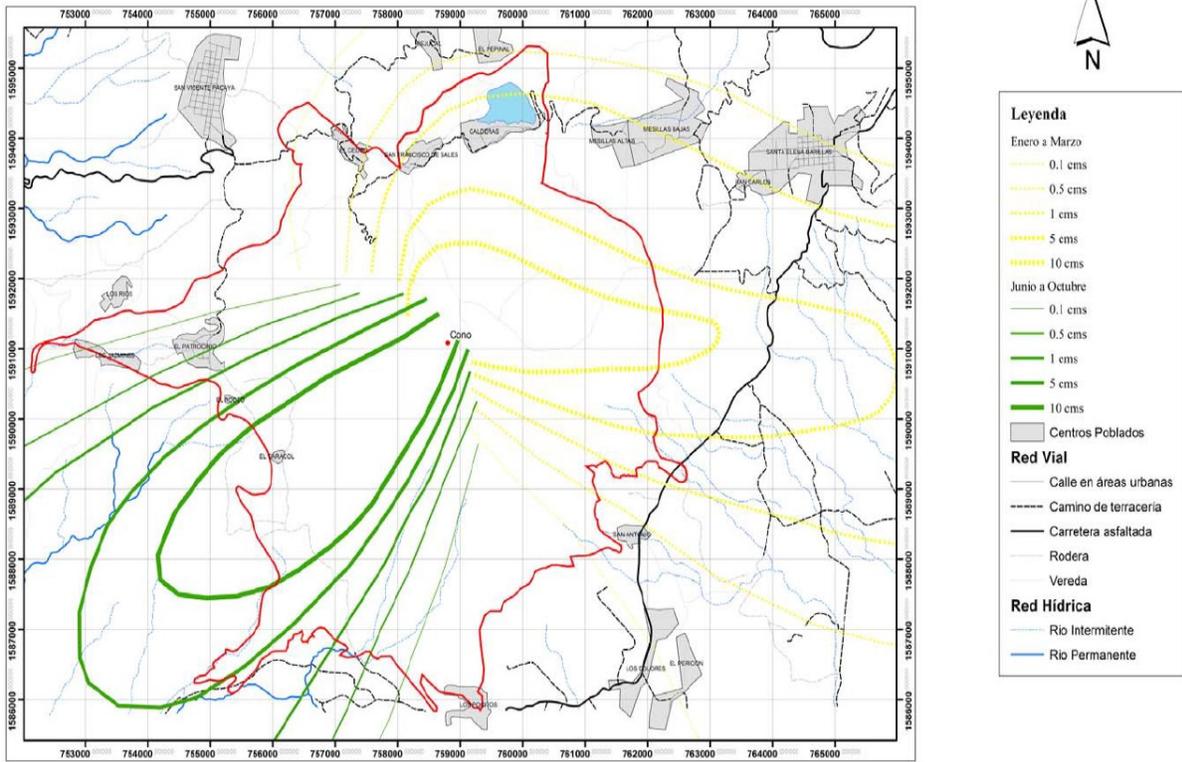


Figura 29: Mapa de Amenaza por Caída de Ceniza

Fuente:
 Información cartográfica básica - IGN
 Amenaza por caída de ceniza - JICA-INSIVUMEH

Figura 8. Mapa de Amenaza por Caída de Ceniza. Las líneas amarillas muestran el área afectada por caída de ceniza durante los meses de enero a marzo de 2002, siendo las poblaciones de El Cedro, San Francisco de Sales, Calderas, Mesillas Altas, Mesillas Bajas, San Carlos y Santa Elena Barillas. De junio a octubre de 2002, las poblaciones afectadas fueron El Caracol, El Rodeo, El Patrocinio, Los Ríos.

Fuente: Lira 2005.

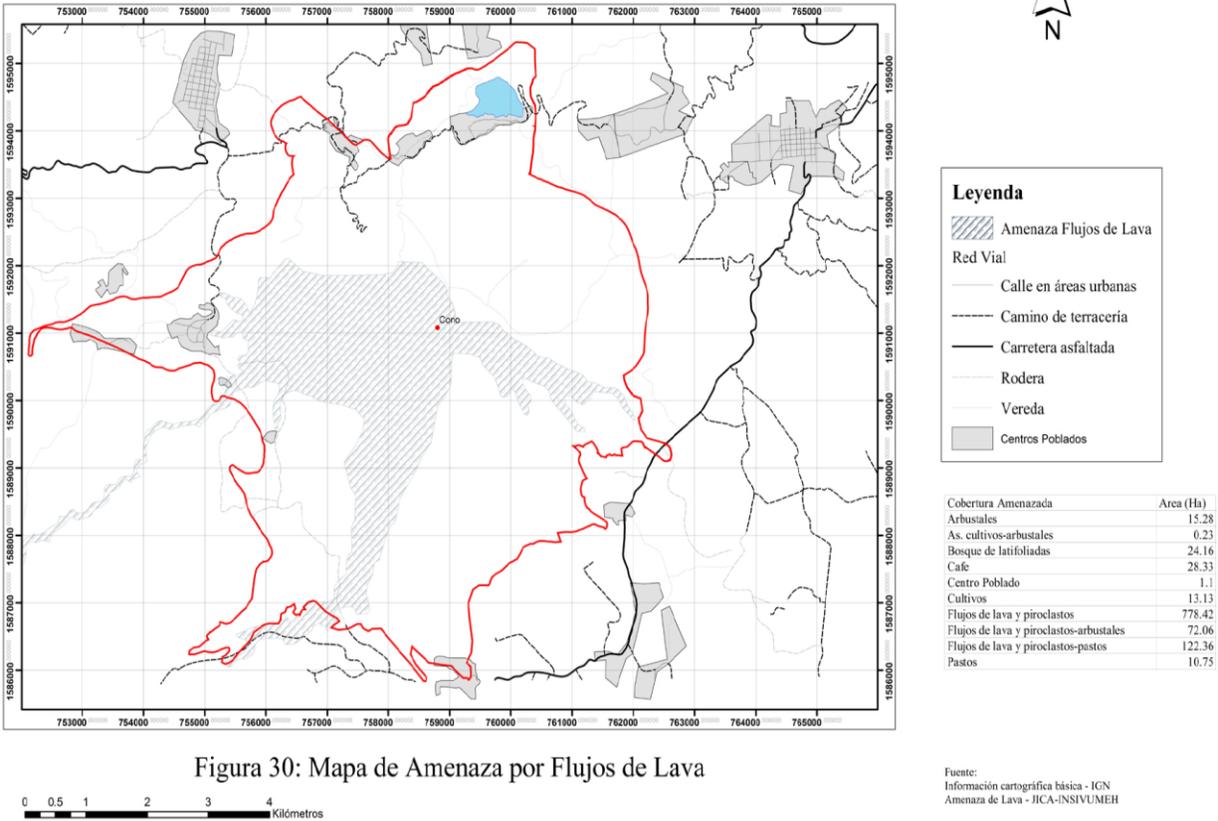


Figura 30: Mapa de Amenaza por Flujos de Lava

Figura 9. Mapa de amenaza por flujos de lava. En gris a rayas se observa la amenaza por flujos de lava del volcán Pacaya. En gris se aprecian los centros poblados Las poblaciones más afectadas por los flujos de lava fueron El Caracol, El Rodeo, El Patrocinio.

Fuente: Lira 2005.

6.1.5 Población:

Según el censo 2002, la densidad poblacional se encuentra resumida en el siguiente cuadro, en donde se presentan todas las poblaciones que se encuentran alrededor del volcán de Pacaya, lo que indica que, para ese año existían unos 25,232 habitantes en el área de influencia, con porcentajes de hombres (12,752) y mujeres (12,480) muy similares, con mucha población joven (Lira, 2005)

Cuadro 3. Información poblacional según el Censo 2002 de las poblaciones cercanas al volcán de Pacaya.

<i>Cuadro 3. Información poblacional según el censo 2002</i>									
Código	Nombre	Categoría	Población	Hombres	Mujeres	0 a 06	07 a 14	15 a 64	Más 65
114007	CALDERAS	ALDEA	800	414	386	175	185	407	33
114048	MESILLAS BAJAS	ALDEA	1666	829	837	371	404	830	61
114049	MESILLAS ALTAS	CASERIO	462	238	224	118	109	216	19
114053	EL PEPINAL	ALDEA	462	246	216	92	112	232	26
114060	SAN CARLOS	ALDEA	258	134	124	61	44	143	10
116059	LOS POCITOS	ALDEA	1305	665	640	245	262	724	74
116060	LOS DOLORES	ALDEA	807	394	413	142	156	469	40
116111	SANTA ELENA BARILLAS	ALDEA	7851	3949	3902	1629	1688	4240	294
116203	EL PERICON	CASERIO	1273	642	631	261	273	691	48
116232	SAN ANTONIO	CASERIO	98	46	52	15	22	56	5
512001	SAN VICENTE PACAYA	PUEBLO	6552	3278	3274	1268	1251	3696	337
512002	BEJUCAL	ALDEA	344	172	172	81	65	186	12
512006	EL CEDRO	ALDEA	848	421	427	174	161	476	37
512007	EL PATROCINIO	ALDEA	1351	708	643	295	289	691	76
512008	EL CARACOL	CASERIO	8	7	1	2	2	4	0
512010	EL RODEO	CASERIO	121	63	58	30	19	68	4
512019	LOS RIOS	CASERIO	312	154	158	66	66	169	11
512020	LOS JAZMINES	CASERIO	27	15	12	9	8	8	2
512033	SAN FRANCISCO DE SALES	ALDEA	687	377	310	155	126	363	43

Fuente: Lira, 2005.

6.1.6 Salud

En el área se encuentran tres centros de salud. Un centro de Salud Tipo B, en San Vicente Pacaya, con dos médicos, con una atención de 4 horas por día. En la aldea El Cedro y aldea Los Chagüites se encuentran dos puestos de salud atendidos por auxiliares de enfermería. De las enfermedades más comunes registradas en el área están: enfermedades diarreicas, parasitismo intestinal, conjuntivitis y Daños de Ira (Lira, 2005)

6.2 Muestreo

6.2.1 Selección de las estaciones de muestreo

Para la selección de las estaciones de muestreo para la colecta de muestras de deposición húmeda y seca en la región del volcán de Pacaya se consideró a los poblados más afectados por las erupciones volcánicas, la dirección predominante del viento (junio – octubre) que sopla en dirección oriente a través del volcán. También los centros poblados más grandes y que no presentan

industrias que puedan afectar la medición de la lluvia ácida por contaminación antropogénica debida a gases de óxidos de nitrógeno o dióxido de azufre; la facilidad de acceso (carretera asfaltada o de terracería) y la disposición de la población para colocar un sistema muestreador en una vivienda o instalación que ofrezca seguridad para que el mismo permanezca durante aproximadamente 15 días. De esta forma se establecieron cuatro estaciones de muestreo ubicados en la región cercana al volcán de Pacaya, los cuales corresponden a San Francisco de Sales, El Patrocinio, El Cedro y San Vicente Pacaya. Estas estaciones de muestreo se ven afectadas mayoritariamente por los vientos durante los meses de enero a marzo, las En la figura 10 se muestran las direcciones en que los vientos tenderán a mover las nubes de ceniza de los volcanes Pacaya.

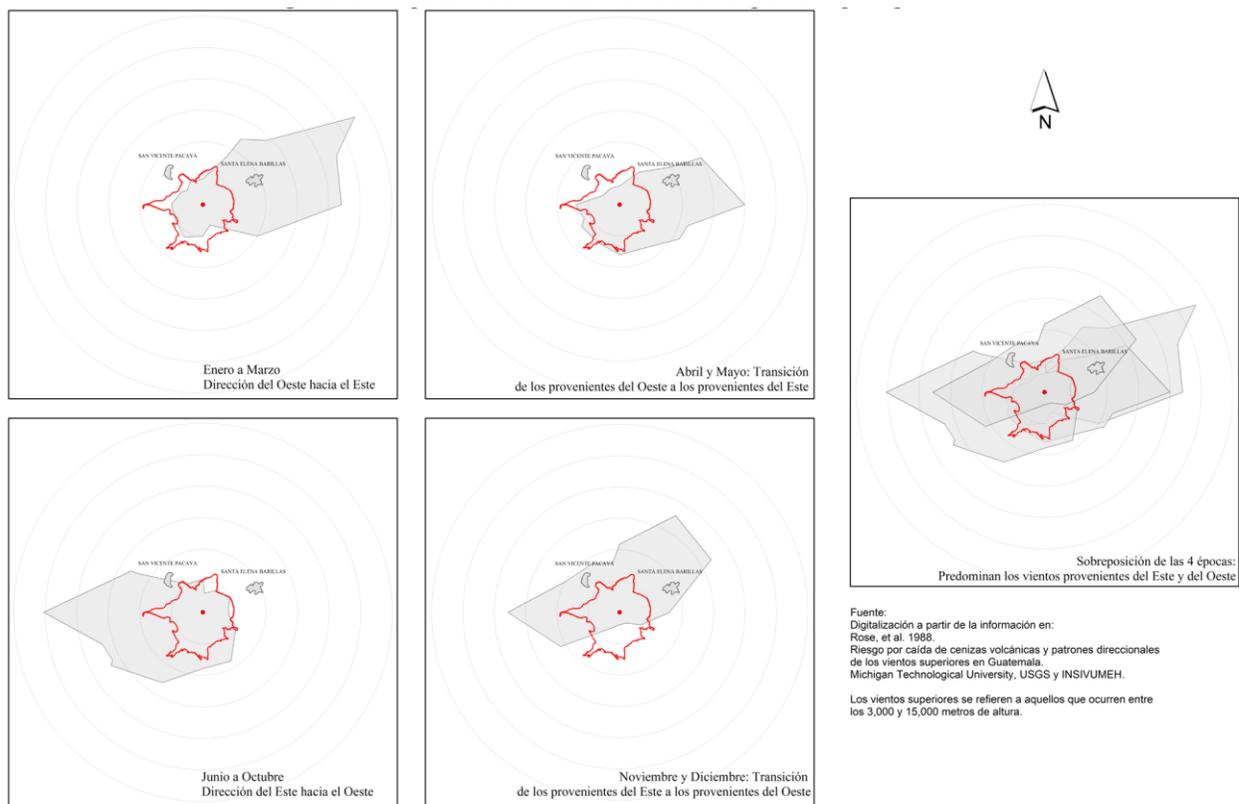


Figura 10. Mapa de los patrones de los vientos que se presentan en diferentes épocas del año en la región del volcán de Pacaya.

Fuente: Lira 2005.

Además, se seleccionaron dos estaciones de muestreo ubicadas en la ciudad de Guatemala, donde las mediciones realizadas durante estudios anteriores establecen que no hay deposición ácida por contaminantes antropogénicos (Oliva, 2003).

Cuadro 4. Datos de las 4 estaciones de muestreo ubicadas en las faldas del volcán de Pacaya y área de influencia de las erupciones volcánicas y de las 2 estaciones ubicadas en la ciudad de Guatemala.

Estación de muestreo	Latitud	Longitud
El Patrocinio	14.38175	-90.63697
El Cedro	14.39433	-90.63552
INDE El Cedro	14.40142	-90.61375
San Vicente Pacaya	14.41477	-90.63550
La Floresta, zona 2	14.70717	-90.62533
Proyecto 4-4, zona 6	14.71950	-90.80483

Fuente: Datos de posicionamiento global, durante la investigación.

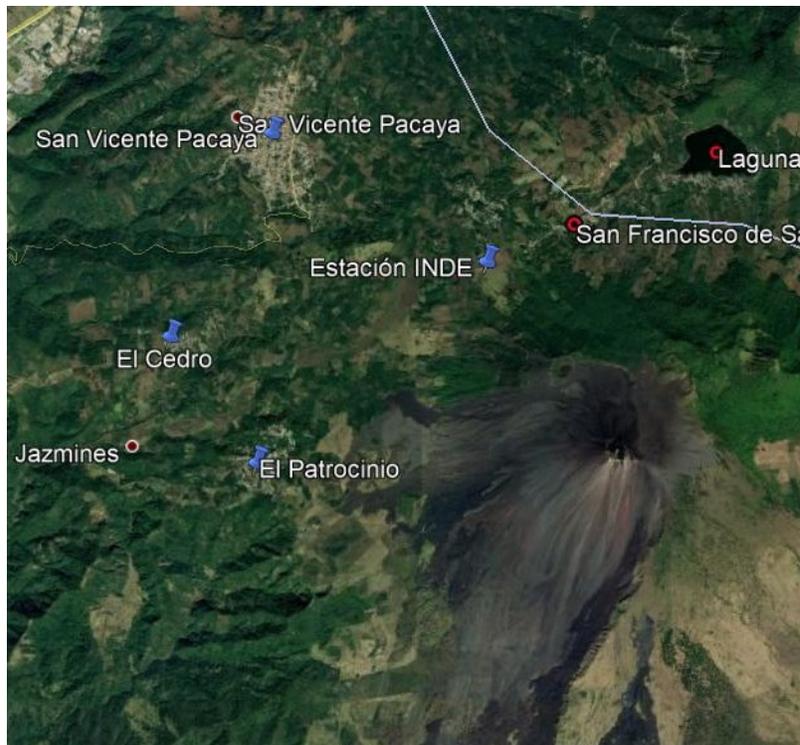


Figura 11. Mapa de ubicación de los 4 sitios de muestreo en las faldas del volcán de Pacaya.

Fuente: datos propios.

6.2.2 Toma de muestras

Se realizó un recorrido de reconocimiento para establecer y fijar las estaciones de muestreo, y para establecer los contactos necesarios para el cuidado del equipo de muestreo. Las muestras de deposición húmeda y seca se colectaron en botellas de vidrio de un litro de capacidad de color ámbar para proteger de la luz y la evaporación. Las muestras se colectaron cada 15 días aproximadamente durante la estación seca y lluviosa, en el período de diciembre de 2001 a octubre de 2002. Las botellas con muestra se transportaron en una hielera a 4°C hasta el laboratorio en donde se realizaron los análisis físicoquímicos. Todos los sitios de muestreo se registraron por medio de un sistema de posicionamiento geográfico (GPS) para la ubicación de los sitios en mapas.

6.2.3 Equipo de muestreo

Este consistió en colectores convencionales, los cuales captan el agua de lluvia junto con los polvos atmosféricos. El sistema colector tiene un embudo de polietileno de 20 centímetros de diámetro acoplado a una manguera tipo Tygon resistente a la corrosión y con paredes pulidas para que no se adhiera material a su superficie interna, la cual está incorporada a una botella de vidrio ámbar de un litro de capacidad. Este sistema puede estar sostenido por una base de metal o ser ubicado en un soporte. También puede colocarse el embudo directamente sobre la botella como se muestra en las figuras **12** y **13**. Las unidades de muestreo se colocaron a 1.75 – 3.5 metros por encima del suelo, en áreas abiertas lo más posible.

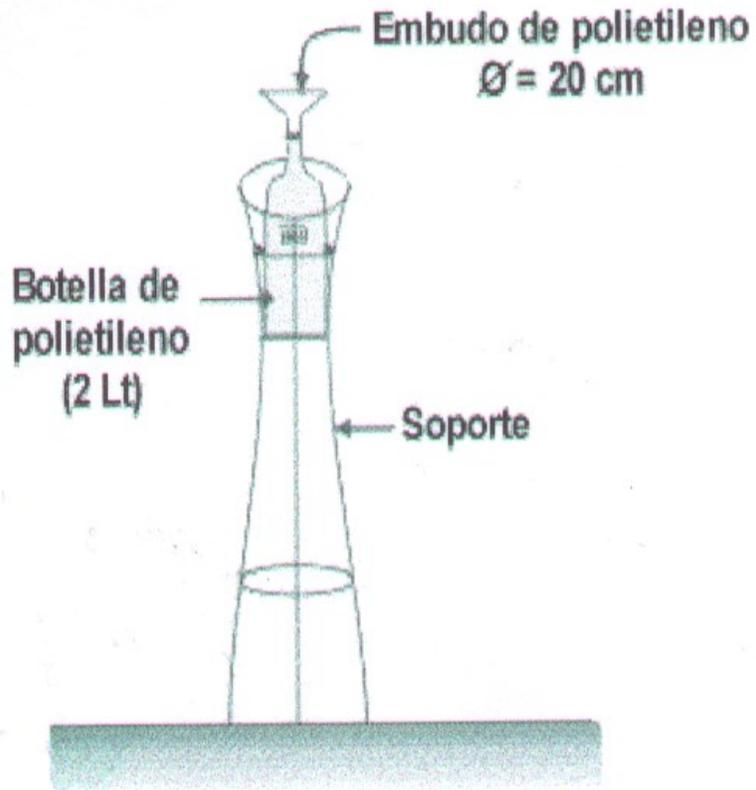


Figura 12. Colector convencional. Sistema de captación de agua de lluvia junto con polvos atmosféricos.
Fuente: Gallardo, 1999.



Figura 13. Muestreador para colecta de deposición húmeda y seca colocado directamente sobre la botella colectora.
Se puede conectar el embudo con una manguera tipo Tygon (resistente a la corrosión) y colocar el embudo a una distancia de 75 cm, asegurándolo a una superficie.

Fuente Ceburnis, 1998.

6.2.4 Mediciones de parámetros físicos en el campo

Muestras de deposición ácida

Las mediciones en campo se hicieron utilizando un medidor multiparamétrico WTW Multi 197i de campo con un electrodo de vidrio para medición de pH, con termocupla para medir la temperatura y una celda de conductividad.

6.2.5 Medición de sólidos totales

Los sólidos totales se midieron por gravimetría, evaporando 100 mL de la muestra colectada en una cápsula de porcelana previamente tarada y midiendo por diferencia, utilizando una balanza analítica marca Sartorius con capacidad de 0.1 – 210 g (APHA-AWWA, 1998)

6.2.6 Medición de metales

Se analizaron los niveles de Cu, Zn, Fe y Mn por medio de la técnica de espectrometría de absorción atómica por llama (AAS) utilizando un equipo marca Thermo S Series. Para el análisis de Cu, Zn y Mn se utilizó una solución de lantano al 5% (w/v) y ácido clorhídrico HCl. Las muestras fueron filtradas con filtros 0.45 μm y se introdujeron al sistema de llama por medio de una bomba peristáltica y conducidas a la llama. Se utilizaron estándares del mismo metal para la preparación de la curva de calibración y su cuantificación. Para el análisis de Fe no se necesita preparación y las muestras son aspiradas directamente al sistema, usando estándares del mismo metal para su cuantificación.

Todas las mediciones se realizaron siguiendo estándares de calidad y observando buenas prácticas de laboratorio. Los datos fueron generados para determinar la deposición húmeda y seca de la región cercana al volcán de Pacaya, en diferentes temporadas del año.

6.3 Evaluación de resultados

Para la evaluación de los resultados se utilizó estadística descriptiva, presentándose la media aritmética de las mediciones efectuadas por sitio de muestreo. Se calculó la desviación estándar para cada sitio.

Para la evaluación estadística de los resultados se utiliza el programa SPSS, se realiza prueba de Tuckey, análisis paramétrico y ANOVA.

6.4 Elaboración de mapa de áreas susceptibles

Los mapas de áreas susceptibles reúnen y exhiben organizadamente la información crítica relativa a una amenaza, incidente o actividad que es vista como un riesgo, real o potencial. La elaboración de mapas de áreas susceptibles se basa en el concepto de seguridad sobre la identificación de riesgos y son de utilidad para observar y desarrollar programas de prevención dirigidos a áreas específicas. Los mapas se han utilizado para dar seguimiento a emergencias y desastres y para determinar e ilustrar tanto los riesgos como sus soluciones. Puede presentar una imagen o gráficos para mostrar la gravedad de un problema. Los mapas de riesgos también pueden incluir datos o cifras. En la elaboración de un mapa la información agregada mejorará la forma de establecer patrones y predicciones, así como las condiciones que podrían conducir a la propagación de un riesgo (Harowitz, 2003). Por lo anterior se realizó un mapa de áreas susceptibles para la deposición ácida, utilizando como base una hoja cartográfica del área y los sitios de muestreo estudiados en el volcán de Pacaya.

VII. RESULTADOS

Los resultados de las mediciones y análisis de laboratorio realizadas a las muestras de deposición húmeda y seca tomadas en la región del volcán de Pacaya se presentan a continuación.

7.1 Deposición húmeda y seca

A continuación, se presentan los valores de la deposición húmeda y seca evaluada en muestras de cuatro sitios ubicados en la región de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala.

Cuadro 5. Valores de potencial de hidrógeno, pH, medidos en muestras de deposición húmeda en cuatro sitios de muestreo ubicados en la región de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala y el promedio de las dos regiones, para efectos de comparación.

Fecha	El Patrocinio	Concepción El Cedro	INDE El Cedro	San Vicente Pacaya	La Floresta zona 2	Proy. 4-4 zona 6	Promedio Región del Pacaya	Promedio Ciudad de Guatemala
EPOCA SECA								
26/10/2001	3.36	4.79	5.00	*	6.97	7.18	4.38	7.08
7/12/2001	5.90	7.89	7.46	6.62	7.20	6.86	6.97	7.03
21/12/2001	7.94	7.90	7.68	8.80	7.82	8.32	8.08	8.07
4/01/2002	7.63	7.82	7.59	8.45	8.54	6.94	7.87	7.74
18/01/2002	8.28	8.43	7.82	8.50	7.49	7.91	8.26	7.70
22/03/2002	5.27	5.90	5.82	5.77	6.69	6.48	5.69	6.59
5/04/2002	8.77	8.33	8.77	8.30	6.76	6.80	8.54	6.78
19/04/2002	7.93	8.15	8.48	7.88	5.36	5.85	8.11	5.61
ÉPOCA HÚMEDA								
3/05/2002	5.55	5.18	5.56	6.04	6.24	6.37	5.58	6.31
17/05/2002	7.11	6.49	6.38	5.87	6.39	6.20	6.46	6.30
30/05/2002	6.23	3.75	4.21	4.07	6.36	6.49	4.57	6.43
15/06/2002	5.80	4.31	4.60	5.57	7.54	7.12	5.07	7.33
28/06/2002	6.25	4.75	5.54	5.55	7.34	7.33	5.52	7.34
1/0/2002	6.14	6.84	7.00	8.38	6.99	7.48	7.09	7.24
26/07/2002	5.63	6.66	4.98	6.63	5.64	5.87	5.98	5.76
9/08/2002	6.83	6.82	7.60	4.68	7.30	6.77	6.48	7.04
24/08/2002	3.94	3.49	3.43	6.71	7.15	4.12	4.39	NM
6/09/2002	6.72	6.77	6.69	3.49	7.71	8.17	5.92	NM
18/09/2002	6.70	3.85	3.84	3.18	7.03	5.93	4.39	NM
19/10/2002	7.24	4.03	7.54	5.87	7.82	5.75	6.17	6.79

Fecha	El Patrocinio	Concepción El Cedro	INDE El Cedro	San Vicente Pacaya	La Floresta zona 2	Proy. 4-4 zona 6	Promedio Región del Pacaya	Promedio Ciudad de Guatemala
ÉPOCA SECA								
1/11/2002	7.52	4.77	4.24	4.13	7.29	7.28	5.17	7.29
15/11/2002	6.96	7.08	7.86	6.84	7.81	7.95	7.19	7.88
6/12/2002	5.59	7.77	6.73	6.84	6.70	7.43	6.73	7.07
ÉPOCA HÚMEDA								
12/06/2003	4.41	6.36	6.55	*	6.55	6.36	5.77	NM
25/06/2003	6.68	8.84	3.78	6.83	7.41	7.18	6.53	NM
1/10/2003	6.43	8.99	3.92	7.22	7.03	7.44	6.64	NM
Promedio	6.42	6.38	6.12	6.34	7.01	6.92	6.29	6.97
Desv. Est	1.29	1.73	1.63	1.62	0.77	0.72	1.25	0.66

* : Equipo dañado por robo de alguna pieza o completo.

Fuente: Datos propios

De los cuatro sitios de muestreo ubicados en la región del volcán de Pacaya, San Vicente Pacaya fue la población que presentó el valor más bajo de pH, con un valor de 3.18, seguido de la aldea El Patrocinio con un valor de 3.36. Los meses que presentan los valores más bajos de pH corresponden a octubre de 2001, mayo, junio, agosto, septiembre y noviembre de 2002.

Las muestras con mayor valor de pH corresponden a la aldea Concepción El Cedro, con un valor de 8.99 y a San Vicente Pacaya con un valor de 8.80 para los meses de octubre de 2003 y diciembre de 2001 respectivamente. La aldea El Patrocinio y la Estación del INDE El Cedro presentan un valor de pH de 8.77, durante el mes de abril de 2002, para ambos sitios.

En las mediciones realizadas, para un mismo muestreo, no se observó valores de pH con carácter ácido en los cuatro sitios estudiados, sin embargo, en cinco muestreos se observaron valores de pH con carácter ácido en tres sitios, en octubre de 2001, en mayo y junio de 2002, septiembre y noviembre de 2002, siendo la aldea Concepción El Cedro, la Estación INDE El Cedro y San Vicente Pacaya, las que tienen esta ocurrencia de valores de pH. La aldea El Patrocinio, Concepción El Cedro y la Estación INDE El Cedro presentan valores de pH ácidos durante los meses de octubre 2001, mayo y agosto de 2002.

Los meses que presentaron los valores más bajos de pH medidos durante los muestreos realizados son agosto de 2002, con valores de 3.94, 3.49 y 3.43 para los sitios de El Patrocinio, Concepción El Cedro y la Estación INDE El Cedro respectivamente y septiembre de 2002 con valores de 3.85, 3.84 y 3.18 para los sitios de Concepción El Cedro, la Estación INDE El Cedro y San Vicente Pacaya respectivamente.

Los meses de agosto y septiembre de 2002 fueron los que presentaron tendencia de carácter ácido en la deposición húmeda. Las figuras 23 a 30 en el anexo A, presentan gráficas del pH de los seis sitios de muestreo.

En general el pH de las muestras colectadas en la región del volcán Pacaya fue menor a la de las muestras colectadas en la ciudad de Guatemala. Los promedios son 6.42, 6.38, 6.34 y 6.12 unidades para los sitios El Patrocinio, Concepción El Cedro, San Vicente Pacaya y Estación del INDE, en ese orden. En la ciudad de Guatemala se obtuvo los siguientes promedios 7.01 y 6.92 unidades, para la Floresta zona 2 y Proyecto 4-4 zona 6, respectivamente. Los meses que presentaron promedios de pH con valores mas bajos son octubre de 2001 con un valor de 4.38 unidades; agosto y septiembre de 2002 con un valor de 4.39 para los dos meses y 4.57 para el mes de mayo de 2002.

Se puede observar que la aldea Concepción El Cedro y la Estación del INDE son los sitios que presentan la mayor cantidad de muestras con carácter ácido con 9 y 11 muestras respectivamente. En menor cantidad San Vicente Pacaya, con 7 muestras y en mucho menor cantidad la aldea El Patrocinio con 5.

Cuadro 6. Evaluación de la normalidad del pH en función de la procedencia

Procedencia		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Valor p
pH	El Patrocinio	.976	26	.780
	Concepción El Cedro	.933	26	.092
	INDE El Cedro	.936	26	.106
	San Vicente Pacaya	.891	26	.010
	La Floresta Z2	.977	20	.889
	Proyecto 4-4 Z6	.641	21	.000

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: La distribución de normalidad de la variable respuesta no parece ser normal en todos los grupos cuando éstos se forman por categorías del factor evaluado, por tanto, deben hacerse contrastes no paramétricos.

Cuadro 7. Evaluación de la normalidad del pH en función de la época de colecta de las muestras

Época de colecta		Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Valor p
pH	Época seca	.925	60	.001
	Época lluviosa	.847	96	.000

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: La distribución de normalidad de la variable respuesta no parece ser normal cuando se forman grupos por categorías del factor evaluado, por tanto, deben hacerse contrastes no paramétricos.

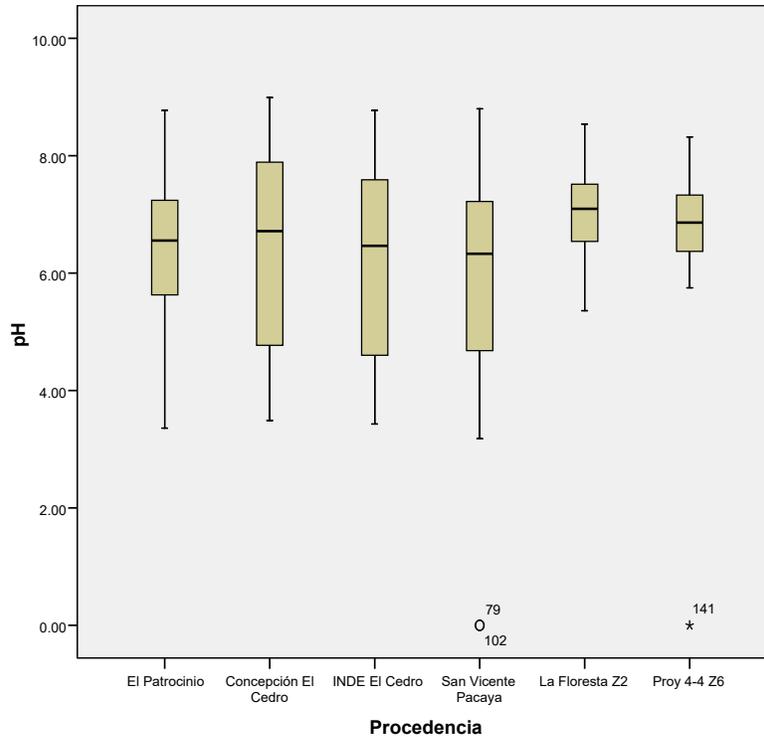


Figura 14. Diagramas de Tukey del pH en función de la procedencia

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

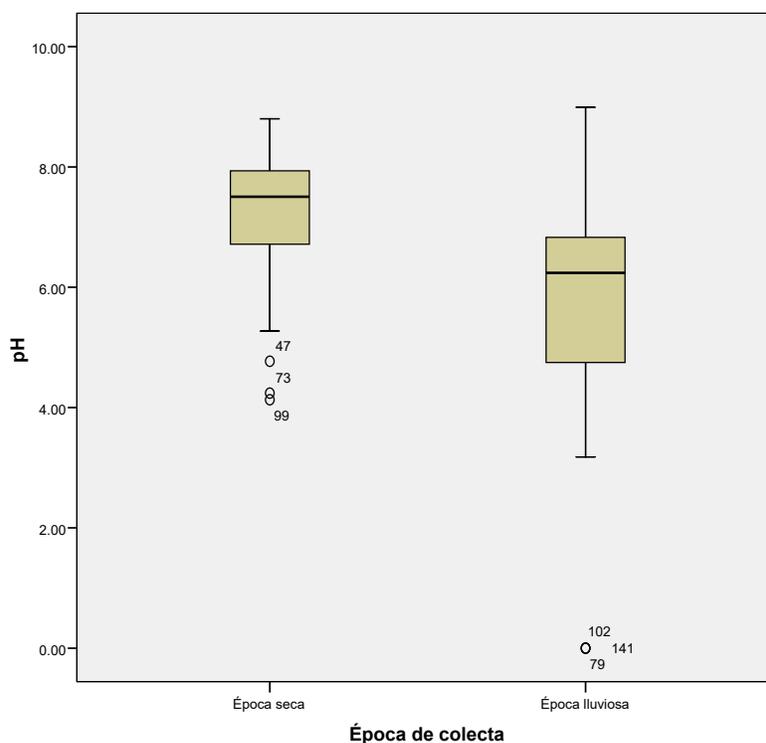


Figura 15. Diagramas de Tukey del pH en función época de colecta de las muestras

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Cuadro 8. Resumen del pH en función de las diferentes localidades

	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza para la media al 95%	
El Patrocinio	6.4158	1.29360	5.8933	6.9383
Concepción El Cedro	6.3831	1.72813	5.6851	7.0811
INDE El Cedro	6.1181	1.62932	5.4600	6.7762
San Vicente Pacaya	5.8546	2.32033	4.9174	6.7918
La Floresta Z2	7.0125	0.77371	6.6504	7.3746
Proyecto 4-4 Z6	6.5895	1.66477	5.8317	7.3473

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: se ordenan las medias de los valores de pH de mayor a menor. En esta tabla se compara los valores de los intervalos de confianza de cada lugar de procedencia con el nivel máximo permisible de pH.

Cuadro 9. Resumen del pH en función de la época de colecta de las muestras

	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza para la media al 95%	
Época seca	7.2315	1.11682	6.9430	7.5200
Época lluviosa	5.7506	1.73004	5.3774	6.1237

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: se ordenan las medias de los valores de pH de mayor a menor.

Cuadro 10. Análisis no paramétrico de Kruskal Wallis para contrastar las medianas del pH en función de las diferentes procedencias

	pH
Chi-cuadrado	0.855
gl	5.0
Valor p	0.973

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: no hay diferencia estadísticamente significativa para las medianas del pH entre los lugares de procedencia.

Cuadro 11. Contraste de Levene sobre la igualdad de las varianzas error (a) en función de la época de colecta.

F	gl 1	gl 2	Valor p
1.652	11	133	0.091

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Contrasta la hipótesis nula de que la varianza error de la variable dependiente es igual a lo largo de todos los grupos.

Interpretación: las varianzas son iguales, por tanto y según la prueba de normalidad se procede a realizar el análisis de varianza.

Cuadro 12. Análisis de varianza de dos vías para un diseño por bloque en el que se contrastan las medias poblacionales del pH en función de la época de colecta

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo	5961.476(a)	7	851.639	376.575	.000
Época de colecta	72.172	1	72.172	31.913	.000
Bloques	12.913	5	2.583	1.142	.341
Error	312.092	138	2.262		
Total	6273.568	145			

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: hay diferencia estadísticamente significativa para las medianas del pH según la época de colecta cuando se nulifica el efecto de la procedencia (bloques), es decir, se comparan los valores del pH de época seca y lluviosa en cada lugar de procedencia.

Del total de 142 muestras obtenidas durante el estudio, 25 presentan carácter ácido con un pH por debajo de 5.60 lo que representa un porcentaje de 18%, 21 presentan un valor de pH entre 5.61 y 6.35 que equivale al 15% y 96 muestras presentan carácter alcalino con un pH por arriba de 6.35 para un porcentaje de 67% (ver Figura 13).

Porcentaje de muestras con carácter ácido, en equilibrio y alcalinas

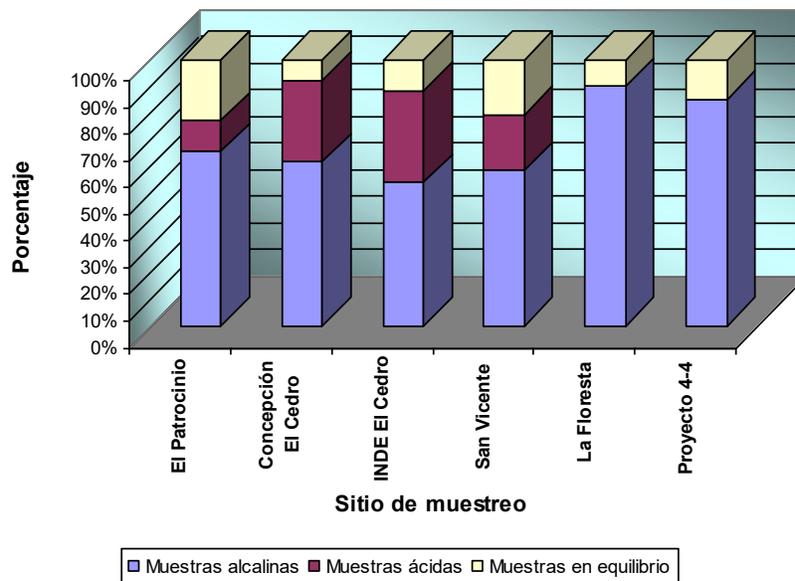


Figura 16. Muestras con carácter ácido (pH menor de 5.6), alcalino (pH mayor a 6.35) y en equilibrio con el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico (pH entre 5.60 y 6.35).

Fuente: Datos propios.

7.2 Sólidos totales

Cuadro 13. Valores de sólidos totales en mg/L, medidos en cuatro sitios de muestreo ubicados en la región de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala.

Fecha	Patrocinio	Concepción El Cedro	Inde El Cedro	San Vicente Pacaya	La Floresta zona 2	Proy 4-4 zona 6	Promedio Región Pacaya	Promedio Ciudad Guatemala
22/03/2002	13	37	19	14	8	30	21	19
ÉPOCA HÚMEDA								
3/05/2002	10	12	5	11	8	3	9	6
17/05/2002	43	4	3	4	4	26	13	15
30/05/2002	84	58	4	33	29	27	45	28
15/06/2002	162	51	85	41	68	31	85	50
28/06/2002	82	169	143	152	164	52	137	108
12/07/2002	110	42	44	142	25	33	84	29
26/07/2002	58	23	25	39	NM	53	36	53
9/08/2002	84	39	20	43	27	17	47	22
24/08/2002	60	55	34	23	NM	NM	43	NM
6/09/2002	39	19	23	31	NM	NM	28	NM
18/09/2002	58	29	29	22	NM	NM	35	NM
19/10/2002	66	1	13	11	NM	NM	23	NM
ÉPOC SECA								
1/11/2002	NM	NM	NM	NM	17	NM	NM	17
12/06/2003	57	106	20	NM	NM	NM	61	NM
1/10/2003	74	3255	28	172	NM	NM	882	NM
Promedio	67	260	33	53	39	30	103	35
Desv. Est.	37	830	36	57	51	16	240	33

NM: No medido.

Fuente: Datos propios.

En el Cuadro 2 se presentan las concentraciones de sólidos totales encontrados en los diferentes sitios de muestreo. La mayor cantidad de sólidos totales medidos en el estudio se presentó durante el mes de octubre de 2003 en la aldea Concepción El Cedro con 3,255 mg/L. San Vicente Pacaya, la aldea Concepción El Cedro y El Patrocinio presentan como valores máximos 172, 169 y 162 mg/L respectivamente.

Se puede observar que en el mes de junio de 2002 tanto para la región del Volcán de Pacaya como para los sitios en la ciudad de Guatemala los valores de sólidos totales presentan valores elevados. En el mes de julio de 2002 también hay un incremento en la cantidad de sólidos medidos para San Vicente Pacaya y para la aldea El Patrocinio con 142 y 110 mg/l.

Los meses que en promedio presentan la mayor cantidad de sólidos son octubre de 2003 con un valor de 882 mg/L, para los sitios ubicados en la región del volcán de Pacaya y en junio de 2002 con un valor de 137 mg/l para la región del volcán de Pacaya y un valor de 108 mg/l para los sitios en la ciudad de Guatemala.

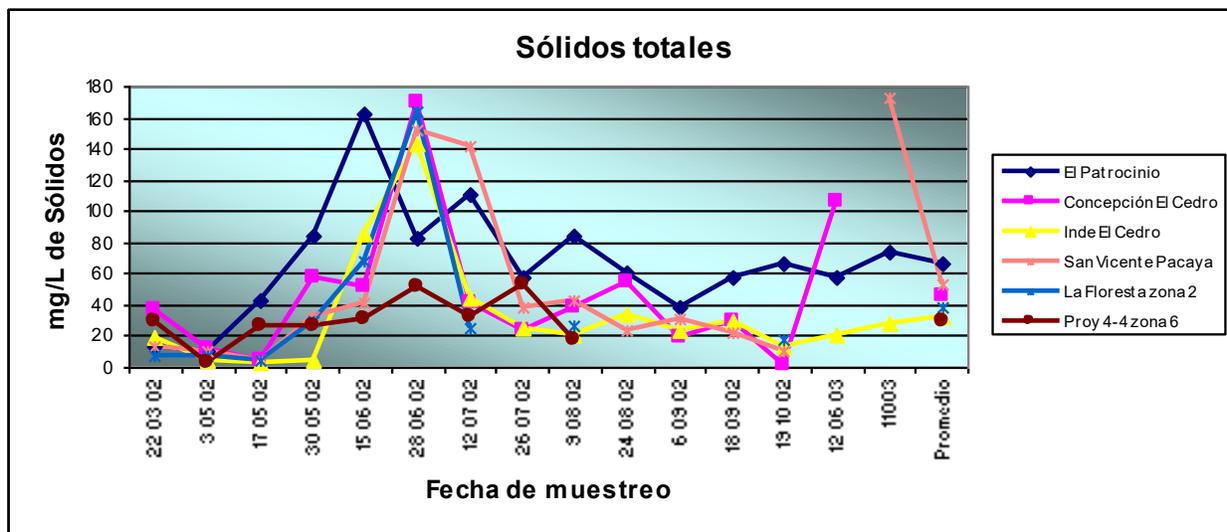


Figura 17. Sólidos totales encontrados en muestras de deposición ácida en la región del volcán de Pacaya y dos sitios en ciudad de Guatemala.

Fuente: Datos propios.

En la Figura 13 se puede observar que los meses que tienen mayor tendencia a presentar gran cantidad de sólidos fueron octubre de 2003, junio y julio de 2002. Durante junio de 2003 también se puede observar que hay un incremento en la cantidad de sólidos medidos.

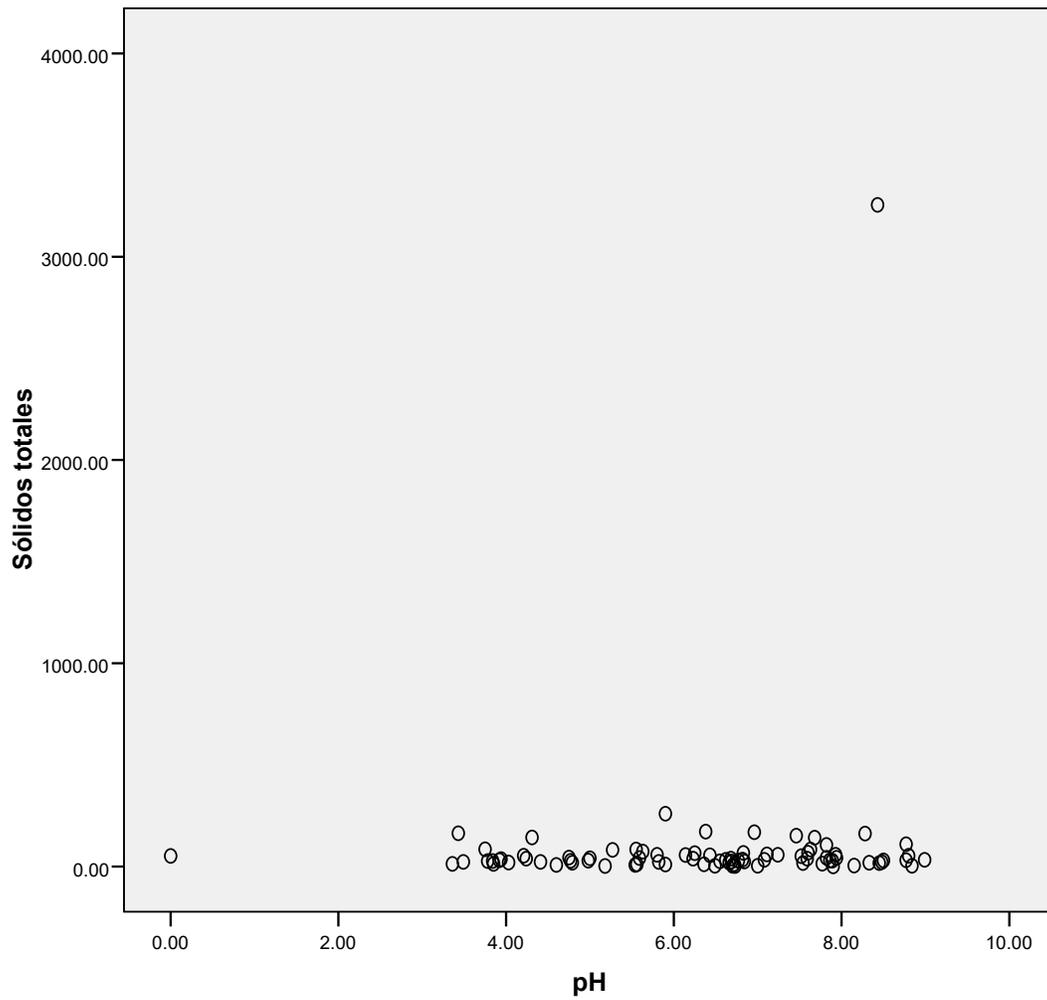


Figura 18. Gráfico de dispersión para evaluar la relación entre el pH y los sólidos totales

Fuente: manejo de datos en SPSS 19

Interpretación: no se observa relación lineal entre las variables evaluadas.

7.3 Conductividad

Cuadro 14. Conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las muestras de deposición húmeda y seca en cuatro sitios ubicados en el área de influencia del volcán de Pacaya y en dos sitios control en la ciudad de Guatemala.

Fecha	El Patrocinio	Concepción El Cedro	INDE El Cedro	San Vicente Pacaya	La Floresta zona 2	Proyecto 4-4 zona 6	Promedio Región Pacaya	Promedio Ciudad Guatemala
ÉPOCA SECA								
26/10/2001	NM	NM	NM	NM	12.5	19.6	NM	16.1
7/12/2001	21.7	3.5	3.1	2.4	3.2	2.4	7.7	2.8
21/12/2001	30.0	27.0	20.0	25.0	26.0	5.0	25.5	15.5
4/01/2002	26.0	25.0	24.0	7.0	13.0	12.0	20.5	12.5
18/01/2002	8.0	29.0	18.0	27.0	NM	NM	20.5	NM
22/03/2002	5.0	9.2	6.6	5.7	3.0	7.6	6.6	5.3
19/04/2002	NM	NM	NM	NM	3.0	7.6	NM	5.3
ÉPOCA HÚMEDA								
3/05/2002	3.4	2.0	2.3	1.7	2.4	2.2	2.3	2.3
17/05/2002	338.0	47.0	72.4	31.0	101.5	205.0	122.1	153.3
30/05/2002	298.0	214.0	123.3	110.3	5.1	21.1	186.4	13.1
15/06/2002	19.8	6.2	5.8	4.1	8.5	4.2	9.0	6.4
28/06/2002	13.8	4.5	2.1	3.3	NM	NM	5.9	NM
2/07/2002	NM	NM	NM	NM	9.4	8.6	NM	9.0
12/07/2002	23.2	11.3	11.9	20.5	60.4	124.0	16.7	92.2
26/07/2002	157.8	63.1	49.5	63.0	NM	75.2	83.4	75.2
9/08/2002	218.0	70.0	67.2	41.4	37.6	15.8	99.2	26.7
24/08/2002	342.0	413.0	559.0	10.6	NM	NM	331.2	NM
6/09/2002	23.4	4.1	4.2	32.5	NM	NM	16.1	NM
18/09/2002	91.3	94.2	94.4	316.0	NM	NM	149.0	NM
19/10/2002	22.8	12.5	7.4	2.4	8.7	22.8	11.3	15.7
ÉPOCA SECA								
1/11/2002	18.1	7.4	9.9	11.3	4.4	7.0	11.7	5.7
15/11/2002	27.1	17.1	25.3	22.7	NM	NM	23.1	NM
6/12/2002	36.7	53.8	15.7	21.3	NM	144.4	31.9	144.4
ÉPOCA LLUVIOSA								
12/06/2003	39.5	95.8	98.5	NM	NM	NM	77.9	NM
25/06/2003	81.2	NM	15.6	35.4	NM	NM	44.1	NM
1/10/2003	93.8	NM	78.1	176.3	NM	NM	116.1	NM
Promedio	84.3	57.6	57.1	44.1	19.9	40.3	61.6	35.4
Desv Est	108.9	95.3	115.3	73.1	27.7	60.4	78.8	49.5

NM: No medido

Fuente: Datos propios.

En el Cuadro 3 se presentan los valores de conductividad medidos en las muestras de deposición húmeda y seca en la región del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala. En general la conductividad en la región del volcán de Pacaya fue mayor a la de los sitios ubicados en la ciudad de Guatemala. Observándose que los valores más altos de conductividad se presentaron durante el mes de agosto de 2002 para la Estación del INDE, aldea Concepción El Cedro y aldea al Patrocinio, con 559, 413 y 342 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Durante el mes de mayo de 2002 también se presentó un incremento en la conductividad medida para todos los sitios de muestreo. Dicho mes el sitio que presentó el mayor valor fue El Patrocinio con 338 y 298 $\mu\text{S}/\text{cm}$, seguido de Concepción El Cedro con 214 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Estación del INDE y San Vicente Pacaya con 214 y 123 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente, para los sitios en la región del volcán de Pacaya. En la ciudad de Guatemala ocurrió un incremento en la medición de conductividad para los dos sitios con 205 y 101 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para el Proyecto 4-4, zona 6 y La Floresta zona 2 en ese orden.

El sitio que presentó la mayor cantidad de mediciones con valores altos de conductividad es la aldea El Patrocinio, seguida por la aldea Concepción El Cedro, en menor cantidad la Estación del INDE y en mucho menor proporción San Vicente Pacaya. Los sitios ubicados en la ciudad de Guatemala presentan muy pocos valores con altas conductividades.

El mayor promedio para los sitios ubicados en la región del volcán de Pacaya lo presentó la aldea El Patrocinio, con un valor de 84.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los meses que presentaron en promedio los valores mas altos de conductividad para los sitios ubicados en la región del volcán de Pacaya son agosto, mayo y septiembre del 2002 con un valor de 331.2, 186.4 y 149 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Para los sitios ubicados en la ciudad de Guatemala, el promedio más alto se presentó durante mayo de 2002 con un valor de 153.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

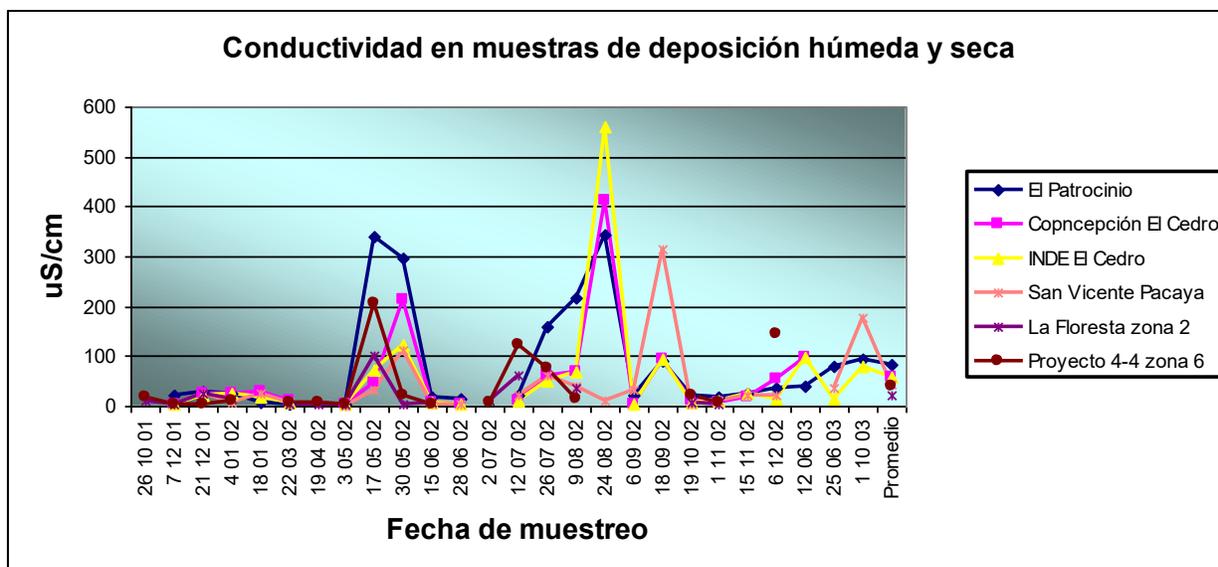


Figura 19. Conductividad en muestras de deposición húmeda en cuatro sitios de muestreo en el área de influencia del volcán de Pacaya y dos sitios en la ciudad de Guatemala.

Fuente: Datos propios.

En la Figura 15 se puede observar que la conductividad fue mayor durante mayo y agosto de 2002. También se observa un incremento en los valores durante los meses de agosto y septiembre de 2002 y un leve incremento en los valores en octubre de 2003.

Cuadro No. 15. Valores de pH comparados con el valor de SO₂ en erupciones registradas.

Fecha de medición en las estaciones de muestreo	Valor de pH promedio de las estaciones de muestreo	Fecha de medición COSPEC hecha por el INSIVUMEH	Valor de SO ₂ COSPEC Toneladas métricas por día	Erupciones registradas
26/10/2001	4.38	15/11/2001	1954	
30/05/2002	4.57	30/03/2002	1687	29 may-4 jun 2002
15/06/2002	5.07			12-18 jun 2002
24/08/2002	4.39			
18/09/2002	4.39	26/11/2002	1956	

Fuente: elaboración propia con datos de los muestreos de lluvia ácida, datos de COSPEC reportados por INSIVUMEH y datos de erupciones registradas por IVHHN.

Cuadro 16. Evaluación de la normalidad de la conductividad en función de la procedencia

Procedencia		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Conductividad	El Patrocinio	0.701	23	0.000
	Concepción El Cedro	0.595	21	0.000
	INDE El Cedro	0.466	23	0.000
	San Vicente Pacaya	0.586	22	0.000
	La Floresta Z2	0.670	15	0.000
	Proyecto 4-4 Z6	0.662	17	0.000

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: La distribución de normalidad de la variable respuesta no parece ser normal en todos los grupos cuando estos se forman por categorías del factor evaluado, por tanto, deben hacerse contrastes no paramétricos.

Cuadro 17. Evaluación de la normalidad de la conductividad en función de la época de colecta

Época de colecta		Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Conductividad	Época seca	0.578	39	.000
	Época lluviosa	0.660	82	.000

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: La distribución de normalidad de la variable respuesta no parece ser normal en todos los grupos cuando éstos se forman por categorías del factor evaluado, por tanto, deben hacerse contrastes no paramétricos.

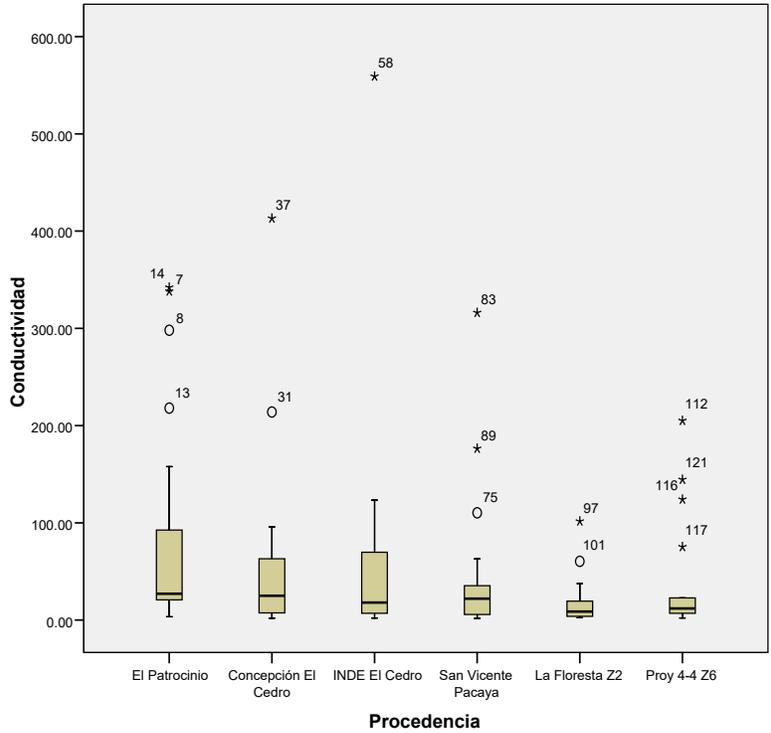


Figura 20. Diagramas de Tukey de la conductividad en función de la procedencia

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

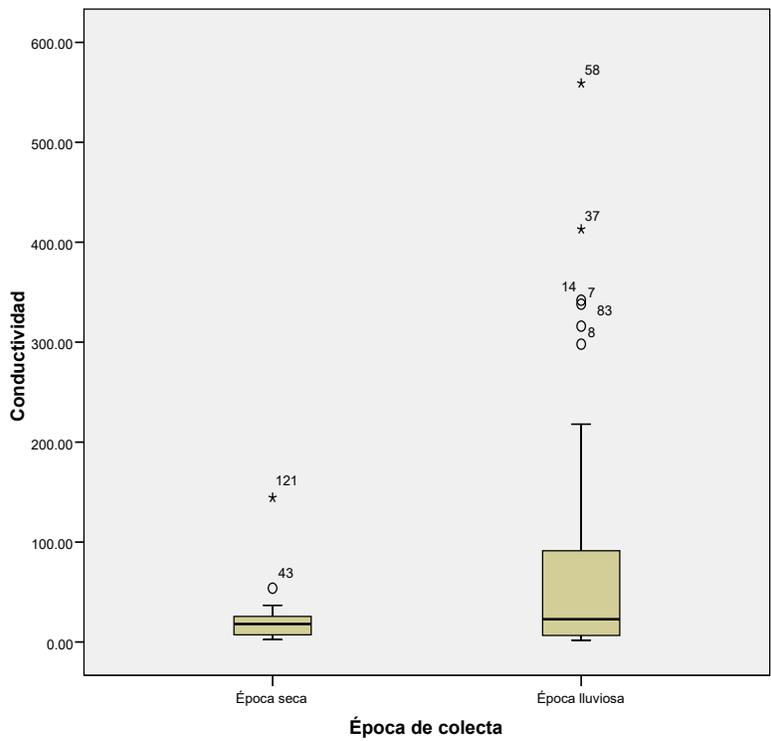


Figura 21. Diagramas de Tukey de la conductividad en función de la época de colecta de las muestras

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Cuadro 18. Resumen de la conductividad en función de las diferentes procedencias

	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza para la media al 95%	
El Patrocinio	84.2870	108.93502	37.1799	131.3940
Concepción El Cedro	57.6048	95.32034	14.2155	100.9941
INDE El Cedro	57.1435	115.27433	7.2951	106.9918
San Vicente Pacaya	44.1318	73.13277	11.7066	76.5571
La Floresta Z2	19.9133	27.68829	4.5801	35.2466
Proyecto 4-4 Z6	40.2647	60.40529	9.2072	71.3222
Total	53.0306	89.48101	36.9246	69.1366

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: se ordenan las medias de los valores de conductividad de mayor a menor.

Cuadro 19. Resumen de la conductividad en función de la época de colecta

	Media	Desviación típica	Intervalo de confianza para la media al 95%	
Época seca	20.2846	23.36079	12.7119	27.8573
Época lluviosa	68.6049	104.13519	45.7239	91.4859
Total	53.0306	89.48101	36.9246	69.1366

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: se ordenan las medias de los valores de conductividad de mayor a menor.

Cuadro 20. Análisis no paramétrico de Kruskal Wallis para contrastar las medianas de la conductividad en función de las diferentes procedencias

	Conductividad
Chi-cuadrado	9.870
gl	5
Valor p	0.079

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: no hay diferencia estadísticamente significativa para las medianas de la conductividad entre los lugares de procedencia.

Cuadro 21. Análisis no paramétrico de Mann Whitney para contrastar las medianas de la conductividad en función de la época de colecta

	Conductividad
U de Mann-Whitney	1260.500
W de Wilcoxon	2040.500
Z	-1.877
Valor p (bilateral)	.060

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: no hay diferencia estadísticamente significativa para las medianas de la conductividad entre las épocas de colecta de las muestras

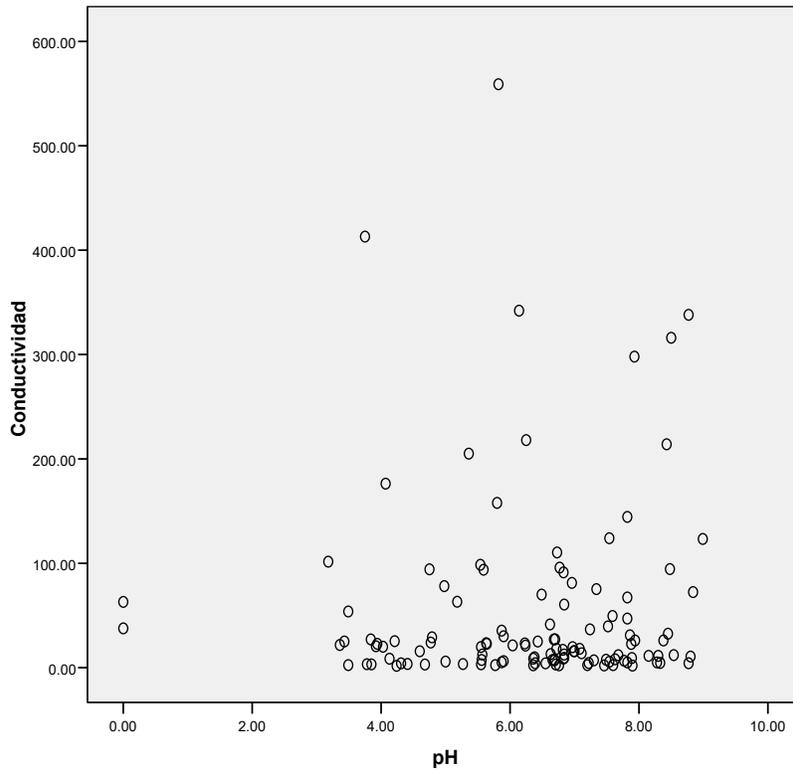


Figura 22. Gráfico de dispersión para evaluar la relación entre el pH y la conductividad

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: no se observa relación lineal entre las variables evaluadas

Cuadro 22. Coeficiente de correlación y prueba de hipótesis para evaluar el coeficiente de correlación poblacional entre el pH y la conductividad y los sólidos totales

		Conductividad	Sólidos totales
pH	Coeficiente de correlación	0.021	0.050
	Sig. (bilateral)	0.817	0.655

Fuente: manejo de datos en SPSS 19.

Interpretación: el coeficiente de correlación entre el pH y la conductividad y sólidos totales es muy bajo, no se encuentra relación lineal entre estas variables al observar la muestra; por otro lado, en la población no se puede descartar la hipótesis, con un nivel de confianza del 95%, que el coeficiente de correlación poblacional es igual a cero.

VIII. DISCUSIÓN

En el Cuadro 5 y en las Figuras 22 a 29, se presentan los resultados de los valores de pH medidos en muestras de deposición húmeda durante el periodo de estudio realizado de octubre de 2001 a octubre de 2003, en cuatro sitios en la región del volcán de Pacaya y en dos sitios en la ciudad de Guatemala.

En la región del volcán de Pacaya se observaron valores de pH bajos, para los cuatro sitios de muestreo; un valor de 3.18 unidades para San Vicente Pacaya durante el mes de septiembre de 2002, el cual es el menor valor medido durante el estudio. Seguido por un pH de 3.36 para la aldea El Patrocinio durante el mes de octubre de 2001. La estación INDE el Cedro presentó un valor de 3.43 unidades para el mes de agosto de 2002 y la aldea Concepción el Cedro presentó un pH de 3.49 también para el mes de agosto de 2002. En las muestras tomadas en la ciudad de Guatemala los menores valores de pH encontrados fueron 5.36 y 5.64 unidades abril y julio de 2002, para el sitio ubicado en La Floresta zona 2 y 5.75 y 5.85 unidades para octubre y abril de 2002 respectivamente, para el sitio ubicado en el Proyecto 4-4 zona 6. Estos valores de pH están cercanos al valor de pH del agua de lluvia que tiene un valor de 5.60 unidades, lo que indica que las muestras colectadas en la ciudad no presentan carácter ácido.

Al comparar las medianas obtenidas en la región del volcán de Pacaya con las medianas obtenidas en los sitios de la ciudad de Guatemala, se puede observar por el análisis no paramétrico de Kruskal Wallis, Cuadro 10, que no existe diferencia estadísticamente significativa entre los lugares de procedencia. Solo existe diferencia significativa por época de muestreo, época húmeda y época seca observándose menores valores de pH durante la época húmeda.

Para la región del volcán de Pacaya los meses que en promedio presentaron los menores valores son octubre de 2001 y mayo, agosto y septiembre de 2002, con valores de 4.38, 4.57, 4.39 y 4.39 unidades, lo que indica que si hay deposición ácida en dicha región. Esto afecta a la población de manera directa, ya que la lluvia ácida produce afecciones respiratorias, necrosis en las hojas de las plantas, lo que puede afectar las plantaciones en el área de influencia (café y maíz), y que además, reduce el tiempo de vida de los materiales de construcción, como ocurre con las

láminas de zinc en los techos de las viviendas, las cuales se deterioran en un periodo entre 1 y 5 años, afectando económicamente a los pobladores (consulta directa a pobladores del lugar).

Durante el mes de junio de 2002 (Cuadro 13), las muestras de los cuatro sitios ubicados en el área de influencia del volcán de Pacaya presentan valores altos de sólidos totales (rango entre 82 y 169 mg/L). Estos valores altos de sólidos totales coinciden con los bajos valores de pH medidos durante el mismo mes, lo que puede relacionarse con la actividad volcánica del Pacaya. Lo mismo sucede durante el mes de octubre de 2003, cuando un valor bajo de pH coincide con un alto valor en sólidos totales para el mismo mes en la Estación INDE El Cedro.

La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de electrolitos presentes en el agua. Durante el mes de mayo de 2002 se observaron valores bajos de pH, valores altos en las mediciones de sólidos totales y alta conductividad eléctrica debida a los iones en solución que se encuentran en las muestras de deposición húmeda. La elevada conductividad que se presentó durante el mes de agosto del 2002 (rango entre 10.6 – 559 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Cuadro 14) pudo haber sido ocasionada por los iones disueltos en la niebla, los cuales son arrastrados de la atmósfera cuando llueve. Estos iones son los que causan la conductividad en el agua.

Comparando los valores promedio de pH obtenidos en la región del volcán de Pacaya, con los valores obtenidos en los dos sitios de muestreo ubicados en la zona 2 y zona 6, se encontró que la distribución de normalidad no parece ser normal cuando se forman por categorías en los valores de pH, como se puede ver en el Cuadro 6. Esto se debe a que los dos sitios ubicados en la ciudad de Guatemala están dentro del área de influencia de una industria de cemento que durante algunos meses pudo haber afectado los valores de pH, y no están afectados por el volcán de Pacaya.

En el cuadro 13 se puede observar que los valores de pH en la región del volcán de Pacaya que presentan valores bajos correspondientes a lluvia ácida, se presentaron durante el mes de octubre de 2001 con valores de 3.36, 4.79 y 5.00 unidades, para El Patrocinio, Concepción el Cedro y la Estación INDE El Cedro respectivamente; y un valor de 5.27 unidades para el sitio ubicado en El Patrocinio que se reportó durante el mes de marzo de 2002. El resto de las mediciones corresponden a valores de pH por encima del valor de la lluvia ácida, (5.6 unidades), y con valores

de pH alcalinos por encima de 8.00 unidades, como los que se reportaron en El Patrocinio (8.28 y 8.77); en Concepción El Cedro (8.43, 8.44 y 8.15); en la Estación INDE El Cedro (8.77 y 8.48) y en San Vicente Pacaya (8.80, 8.45, 8.50 y 8.30). Estos valores alcalinos medidos en la región del volcán de Pacaya indican que durante esos periodos no hubo lluvia acida causada por emisiones volcánicas lo que al promediar todos los valores de pH dan un valor similar al obtenido en los sitios de la ciudad de Guatemala ubicados en la Floresta zona 2 (8.54 reportado en enero de 2002) y Proyecto 4-4 de la zona 6, (8.32 reportado en diciembre de 2001).

Sin embargo, si se observa diferencia significativa cuando los valores se agrupan por sitio de muestreo, como puede observarse en el Cuadro 6, en donde la evaluación de la normalidad del pH en función de la procedencia parece no ser normal en todos los grupos cuando estos se forman por categorías del factor evaluado. Existe diferencia significativa cuando los datos se analizan por época de muestreo, identificando que durante la época húmeda los valores de pH se encuentran más bajos e influenciados por el valor del pH del agua de lluvia (5.6 unidades) como se puede observar en el Cuadro 12 en donde se comparan las medias de los valores de pH.

Es importante hacer notar que durante las erupciones volcánicas, el instituto Nacional de Sismología Vulcanología Meteorología e Hidrología -INSIVUMEH- midió la cantidad de dióxido de azufre en la región del volcán de Pacaya por el método COSPEC, reportando valores de 1,869 y 1954 toneladas métricas por día para el 5 de abril y el 15 de noviembre de 2001 respectivamente. Lo anterior se refleja en los bajos valores de pH obtenidos en la región de influencia del volcán de Pacaya y colectados durante el periodo entre el 19 de abril y el 3 de mayo de 2001 con un valor promedio para la región de 5.58; para el periodo entre el 17 y el 30 de mayo de 2001 se presentó un valor promedio de pH para la región de 4.57 que si representa lluvia ácida y afectó a las comunidades de Concepción El Cedro, Estación Inde El Cedro y San Vicente Pacaya, que se encuentran en el área de influencia del viento Este – Oeste reportado por el INSIVUMEH (2004) y que también se reporta como el área de amenaza por caída de ceniza por Lira (2005).

Durante la época húmeda en octubre de 2001 se registró un promedio de 4.38 unidades de pH para la región del volcán de Pacaya, mientras que para los dos sitios ubicados en la región de

la ciudad de Guatemala se registró un valor de 7.08, lo que demuestra que estos dos sitios no están bajo la influencia del volcán de Pacaya.

Al comparar los valores promedio de los dos grupos de estudio (área de influencia del volcán de Pacaya y zona 2 y 6 de la ciudad de Guatemala) contra el valor promedio de 6.24 unidades (Cuadro 23, Apéndice C), reportado por el Laboratorio de Monitoreo del Aire, de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC, para las mediciones realizadas de febrero a noviembre de 2002, para el sitio ubicado sobre el Edificio T-10 en la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC (Oliva, 2003), el cual se considera como un sitio no contaminado y bajo en influencia industrial; los valores no son estadísticamente diferentes; 6.24 ± 0.96 , 6.29 ± 1.25 y 6.97 ± 0.66 para zona 12, región del volcán de Pacaya y zona 2 y 6 respectivamente.

Con las mediciones realizadas, se pueden establecer mapas preliminares de riesgos, Figuras 31, 32, 34, 35 y 36, en las cuales se observó con color rojo los valores de pH por debajo de 5.60 unidades y que representan el área de mayor riesgo por lluvia ácida en los sitios ubicados en la Estación INDE El Cedro y Concepción El Cedro, un área de riesgo medio al sitio ubicado en San Vicente Pacaya, y un área de menor riesgo para la aldea El Patrocinio, que son los sitios que presentan en los mapas menor frecuencia de tonos rojos que representan la lluvia ácida por influencia del volcán de Pacaya. El beneficio de un gráfico de este tipo es que los pobladores de la región pueden identificar el riesgo por deposición ácida, al ver en el mapa puntos rojos, asociado el color al peligro, si se establecen índices de color por lluvia ácida.

IX. CONCLUSIONES

1. Los menores valores de pH registrados durante el periodo de estudio se presentaron durante el mes de agosto de 2002 para los sitios de muestreo ubicados en El Patrocinio, Concepción El Cedro e INDE El Cedro, con valores de 3.94, 3.49 y 3.43 respectivamente y durante el mes de septiembre del 2002 para los sitios de muestreo ubicados en Concepción El Cedro, Estación INDE El Cedro y San Vicente Pacaya con valores de 3.85, 3.84 y 3.18.
2. Los sitios de muestreo que presentan deposición ácida con mayor frecuencia corresponden a Concepción El Cedro y la Estación INDE El Cedro, las cuales presentaron 8 y 9 muestras con carácter ácido durante el periodo del estudio. Estos son los poblados que presentan por lo tanto el mayor riesgo ante la deposición ácida y que están en el área de influencia de vientos este-oeste reportado por INSIVUMEH.
3. En los sitios ubicados en la ciudad de Guatemala, en la zona 2 y zona 6, ninguno presentó deposición ácida, en su mayoría las muestras fueron de carácter alcalino con 18 y 17 muestras respectivamente.
4. En el área de influencia del volcán de Pacaya, los valores de sólidos totales con valores altos coinciden con los valores de pH bajos, lo que puede relacionarse con la actividad volcánica del Pacaya. Los valores de conductividad durante dichos meses también aumentan debido a la disolución de iones durante la deposición húmeda. Estos incrementos en sólidos y en conductividad ocurrieron durante el mes de junio de 2002 y octubre de 2003.
5. En el mapa de áreas susceptibles para deposición ácida los sitios que presentan la mayor susceptibilidad a la deposición ácida son la aldea Concepción El Cedro y la Estación INDE el Cedro, San Vicente Pacaya presenta mayor susceptibilidad, y El Patrocinio es la población con menor susceptibilidad.
6. Se reportan valores de pH por debajo de 5.6 unidades para la región de influencia del Volcán de Pacaya, lo cual representa lluvia ácida. Sin embargo, esta no es periódica, sino que depende

de las emisiones volcánicas del Pacaya y de la cantidad de gases como SO_2 y NO_2 que emita, además de otros aniones y cationes presentes.

X. RECOMENDACIONES

1. Investigar por medio cromatografía iónica y absorción atómica, el contenido de presente en la deposición húmeda y seca, para estudiar como influyen dichos constituyentes (aniones y cationes) a la química de la deposición húmeda y seca.
2. Realizar mediciones de sodio, calcio, magnesio y amonio en futuras mediciones de deposición ácida para estudiar las correlaciones entre los iones ácidos y básicos, por ejemplo, calcio, magnesio y amonio, y los aniones como sulfato, cloruro y nitrato y estudiar un origen común de los iones.
3. Continuar con estudios de deposición ácida en la región del volcán de Pacaya, ampliando los sitios de muestreo para contar con más información sobre las poblaciones que se encuentran en riesgo por la deposición ácida causada por eventos volcánicos y poder elaborar con mayor certeza mapas de áreas susceptibles para la deposición ácida.
4. Se recomienda hacer estudios de desgaste de infraestructura, ya que durante el estudio se observó que las láminas de zinc utilizadas para los techos de las casas por los pobladores presentaban una vida útil más corta (8 meses a un año), que lo esperado para dicho material (5-10 años), lo que influye directamente en la economía de la población.
5. Se recomienda a los gestores de las comunidades, utilizar mapas de riesgo que proporcionan información sobre la exposición a lluvia ácida, que facilita la visualización de la amenaza de una forma gráfica y es mucho más fácil de entender al utilizar un código de color, en donde el rojo representa un peligro. Estos mapas pueden ser útiles para motivar a las poblaciones aledañas a resguardarse o movilizarse a otros sitios, para prevenir el posible riesgo a su salud, cuando exista lluvia ácida, a fin de minimizar las enfermedades respiratorias asociadas a esta.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Aiuppa, A., Bonfanti, P. & D'Alessandro, W. 2003. *Rainwater Chemistry at Mt. Etna (Italy): Natural and Anthropogenic Sources of Major Ions*. Journal of Atmospheric Chemistry 46: 89. <https://doi.org/10.1023/A:1024878323823>
- Alcalá, F.; Custodio, E. 2004. *La deposición atmosférica de cloruro al terreno en España*. Boletín Geológico y Minero. 115. Especial 319:330. ISSN: 0366-0176.
- Alfaro, M. & Rodríguez, J. 1993. *La acidez de la precipitación total en la zona del volcán Poas (período 1992)*. Contaminación Ambiental Medellín (Antioquia), 14 (25): 16-23. Ene-jun 1993.
- APHA, AWWA, WPCF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. American Public Health Association, Washington, DC. 1193
- Baez, A., et al. 1997. *Cloudwater and Precipitation Chemistry at Popocatepetl Volcano: A High Elevation Site*. Journal of Environmental Quality 26 253-8 Ja/F.
- Baldicero, L. 1997. *Los Volcanes Afectan el Clima del Planeta*. Ciencia Hoy. Vol 7 (38).
- Benites, C.; Vink, S.; Carrillo, J.; Huebert, B. 2003. *Volcanically influenced iron and aluminium cloud water deposition to Hawaii*. Atmospheric Environmental 37: 535-544.
- Bird, C. 2001. *Química Ambiental*. Editorial Reverté. Barcelona. ISBN: 84-291-7092-X.
- Bluth, G.; Shannon, J.; Watson, I.; Prata, A.; Realmuto, V. (2007). *Development of an ultra-violet digital camera for volcanic SO₂ imaging*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 161: 47-56.
- Calabrese, S. Aiuppa, A.; Allard, P.; Bagnato, E.; Bellomo, S.; Brusca, L.; Alessandro, W.; Parello, F. 2011. *Atmospheric sources and sinks of volcanogenic elements in a basaltic volcano (Etna, Italy)*. Geochimica et Cosmochimica Acta 75: 7401-7425.
- Ceburnis, D. Valiulis, D. 1998. *Investigation of absolute metal uptake efficiency from precipitation in moss*. The Science of the Total Environment 226: 247-253.
- Cimino, G. Toscano, G. 1999. *Dissolution of trace metals from lava ash: influence on the composition of rainwater in the Mount Etna volcanic area*. Environmental Pollution. 99 (1998) 389-393.
- CNE. Sf. *Qué es una erupción volcánica*. Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Costa Rica.

- Delmelle, P., Bernard, A. 2000. Journal of volcanology and geothermal research. 97: 55-75.
- Delmelle, P.; Stix, J. Bourque, C.; Baxter, P.; García-Alvarez, J.; Barquero, J. 2001. *Dry deposition and Heavy Acid Loading in the Vicinity of Masaya Volcano, a Major Sulfur and Chlorine Source in Nicaragua*. Environ. Sci. Technol. 35, 7, 1289-1293.
- Domenech, X., Peral, J. 2006. *Química ambiental de sistemas terrestres*. (1ª. Edición). España: Editorial Reverté, S.A.
- Duggen, S. Olgun, N. Croot, P., Hoffmann, L., Dietze, H., Delmelle, P., Tescher, C. 2010. *The role of airborne volcanic ash for the surface ocean biogeochemical iron-cycle: a review*. Biogeosciences, 7. 827-844.
- Durando, M. & Aragón, S. 1982. *Atmospheric lead in downtown Guatemala City*. Environmental Science Technology. 16, 20-23.
- Durst, K. 2008. *Erupted magma volume estimates at Santiaguito and Pacaya volcanoes, Guatemala using digital elevation models*. Thesis for the degree, Michigan Technological University-
- Echarri, L. 1998. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Ed. Teide. España. 200 pp.
- Edmonds, M. Oppenheimer, C.; Pyle, D.; Herd, R.; Thompson, G. 2003. *SO₂ emissions from Soufrière Hills Volcano and their relationship to conduit permeability, hydrothermal interaction and degassing regime*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 124: 23-43.
- Eggers, A. Chavez, D. 1979. *Temporal gravity variations at Pacaya volcano, Guatemala*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 6: 391-402.
- Evans, M. 2006. *Caracterización de la vegetación natural de sucesión primaria en el Parque Nacional Volcán de Pacaya y Laguna de Calderas, Guatemala*. Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación. Escuela de Posgrado. Costa Rica. 91pp.
- EPA. 2008. *EPA's Report on the Environment*. Highlights of National Trends. United States, Environmental Protection Agency.
- EPA. (s.f.). *Volcanoes*. United States, Environmental Protection Agency. Disponible en www.epa.gov.
- EPA (s.f). *Volcanoes: Data. Information about Air Quality: Real-Time & Historical Air Quality*. Disponible en www.epa.gov.

- Fischer, T. 2008. *Fluxes of volatiles (H₂O, CO₂, N₂, Cl, F) from arc volcanoes*. *Geochemical Journal*. 42:21-38.
- Gallardo, A, García L. 1999. *Lluvia ácida*. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente; Dirección General de Prevención y control de la Contaminación; Red Automática de Monitoreo Atmosférico –R.A.M.A.-
- Garcés, L. Hernández, M. 2004. *La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local*. *Revista Lasallista de Investigación*. 1 (2), 67-72.
- Grosjean, D. 1983. *Distribution of atmospheric nitrogenous pollutants at Los Angeles area smog receptor site*. *Environmental Research & Technology, Inc*. Vol. 17: 13-19, No. 1 1983.
- Harowitz, S. 2003. *Elaboración de Mapa de Riesgos*. Security Management Online. Security Management Magazine. Published by the American Society for Industrial Security. USA. November.
- Hetland, B. 2014. *A Surface displacement analysis for volcán Pacaya from October 2001 through March 2013 by means of 3-D modeling of precise position GPS data*. Michigan Technological University: Thesis Master of Science.
- Herranz, M.; Bolívar, J.; Liger, E.; Payeras, J.; Pinilla, J. 2007. *Procedimiento de toma de muestras de la deposición total para la determinación de la radiactividad*. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección de Documentos Técnicos 11. Serie Vigilancia Radiológica Ambiental.
- INSIVUMEH. 2004. *Boletín Volcán de Pacaya*. Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos. Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT (INSIVUMEH). Guatemala. 2ª Ed. 8pp.
- IVHHN Gas Guidelines. s.f. *The International Volcanic Health Hazard Network*. Durman University. www.ivhhn.org/gas/guidelines.html
- JICA (Japan International Cooperation Agency, JA); IGN (Instituto Geográfico Nacional, GT); INSIVUMEH (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, GT); SEGEPLAN (Secretaria General de Planificación de la Presidencia, GT). 2003. *The study for establishment of base maps and hazard maps for GIS in the republic of Guatemala*. Guatemala, Kokusai Kogyo. 570 p.
- Johnson, N.; Parnell, R. 1986. *Composition, distribution and neutralization of “acid rain” derived from Masaya volcano, Nicaragua*. *Tellus*, 38B, 106-117.

- Lira, E. 2005. *Propuesta de Ordenamiento Territorial del Parque Nacional Volcán de Pacaya*. Tesis de grado, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 143pp.
- López, L. 2002. *Manejo integral de los desechos sólidos en el parque nacional volcán de Pacaya*. Tesis de grado. Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ciencias y Humanidades, Departamento de Ingeniería Civil. Guatemala.
- Maher, T.; Pyle, D.; Tsanev, V.; McGonigle, A.; Oppenheimer, C. Allen, A. 2006. *A reassessment of current volcanic emissions from the Central American arc with specific examples from Nicaragua*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 149: 297-311.
- Manahan, S. 1996. *Environmental Chemistry*. Sixth Edition. Lewis Publisher. USA. 811 pp.
- Martínez, M.; Fernández, E.; Valdez, J.; Barboza, V.; Van der Laar, R.; Duarte, E.; Malavassi, E.; Sandoval, L.; Barquero, J.; Marino, T. 2000. *Chemical evolution and volcanic activity of the active crater lake of Poás volcano, Costa Rica, 1993-1997*. Journal of volcanology and geothermal research. 97: 127-141.
- Mercado, R. et al. 1998. *Riesgos por caída de cenizas volcánicas y patrones direccionales de los vientos superiores en Guatemala, Informe Preliminar*. Michigan Technological University/USGS, Sección de Meteorología, INSIVUMEH, Sección de Vulcanología INSIVUMEH
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. 2001. *Mapa fisiográfico-Geomorfológico de la República de Guatemala, a escala 1:250,000 Memoria Técnica. Plan de acción forestal para Guatemala PAFG*. Instituto Nacional de Bosques INAB. Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA) Programa de Emergencias y Desastres Naturales (MAGA-BID). 109 p.
- Moreno, M. 2003. *Toxicología ambiental: evaluación de riesgo para la salud humana*. MacGraw-Hill Interamericana de España, S.A., Madrid. 370pp.
- Nadeau, A. 2006. *A multi-parameter investigation of volcanic plume behavior and resultant environmental impact at a persistently degassing volcano Masaya, Nicaragua*. Thesis submitted for de degree of Master of Science. Simon Fraser University.
- Nriagu, J. Becker, C. 2003. *Volcanic emissions of mercury to the atmosphere: global and regional inventories*. The Science of the Total Environment. 304: 3-12.

- Oliva, P. 2002. *Informe Anual 2001. Calidad del aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire, Departamento de Análisis Inorgánico, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. 2003. *Informe Anual 2002. Calidad del aire en la ciudad de Guatemala*. Laboratorio de Monitoreo del Aire, Departamento de Análisis Inorgánico, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Oliva, P. 2003. *Lluvia ácida y presencia de electrolitos en el agua de precipitación para la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Informe final.
- Orozco, C., Pérez, A., González, A. 2003. *Contaminación Ambiental*. Una visión desde la Química (1ª Edición). España: Editorial: Thomson Editores.
- Reif S., Matias O., Rose W.I., Bluth G.J., Flynn L.P., Harris A.J. 2001. *Volcanism at Pacaya, Guatemala 1985-2001: Potential of TM Images in Assessing Strombolian Activity*. American Geophysical Union, Fall Meeting.
- Rodríguez, L.; Watson, I.; Rose, W.; Branam, Y.; Bluth, G.; Chigna, G.; Matías, O.; Escobar, D.; Carn, S.; Fischer, T. 2004. *SO₂ emissions to the atmosphere from active volcanoes in Guatemala and El Salvador, 1999-2002*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 138: 325-344.
- Rose W.; Bluth, J.; Ernst, G. 2000. *Integrating retrievals of volcanic cloud characteristics from satellite remote sensors: a summary*. The Royal Society: Phil. Trans. R. Soc. Lond. A vol 358 1585-1606.
- Rowe, G.; Ohsawa, S.; Takano, B.; Brandtley, S.; Fernandez, J. Barquero, J. 1992. *Using Crater Lake chemistry to predict volcanic activity at Poás Volcano, Costa Rica*. Bull Volcanol 54:494-503.
- Rubinson, K, Rubinson J. 2000. *Análisis Instrumental*. Prentice Hall. España. P. 847.
- Rubio, M.; Lissi, E.; Riveros, V.; Paez, M. 2001. *Remoción de contaminantes por lluvias y rocíos en la región metropolitana*. Boletín de la Sociedad Chilena de Química. Vol:46 (3) pp: 353-361. ISSN 0366-1644.
- Sandoval, L. 1996. *Efecto de las emisiones volcánicas sobre la vegetación del Parque Nacional Poas*. Tesis de grado. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Escuela de Ciencias Biológicas. Heredia, Costa Rica.

- Seip, H. 1999. *Acidification in China: Assessment based on studies at forested sites from Chongqing to Guangzhou*. Royal Swedish Academy of Sciences. *Ambio* Vol 28 No. 6, Sept 1999. pp 522-528.
- Seto, S.; Hara, H. 2006. *Precipitation chemistry in western Japan: Its relationship to meteorological parameters*. *Atmospheric Environment*. Vol 40 1538-1549.
- Sierra, M.; Vargas, C.; Bobadilla, K.; Aztatzi, O. (s.f) *Health impact f volcanic emission*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.73283>
- Smithsonian National Museum of Natural History. 2012. *Pacaya. Global Volcanism Program. Smithsonian / USGS*. Consultado en <http://www.volcano.si.edu/world/>
- Spiro, T. Stigliani W. 2004. *Química Medioambiental* (2ª. Edición) España: Editorial Pearson, Prentice Hall.
- USEPA. (s.f.) *Acid Rain*. U.S. Environmental Protection Agency. Homepage.
- USGS. (s.f). *Cascades Volcano Observatory, Vancouver Washington*. USGS Science for a Changing world. Homepage.
http://vulcan.wr.usgs.gov/Monitoring/Descriptions/description_COSPEC.html
- Vega de Kuyper, J. 2007. *Química del Medio Ambiente*. (2ª Edición). Chile: Editorial Alfaomega.
- Villagrán, J. 2000. *Monitoreo geofísico del volcán Pacaya*. Informe Final, Proyecto CONCYT 73-98.
- Villar, L. 1998. *La flora silvestre de Guatemala*. Editorial Universitaria. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Wardman, J.; Sword-Daniels, V. Stewart, C., Wilson, T. 2012. *Impact assessment of the Mau 2010 eruption of Pacaya volcano, Guatemala*. GNS Science Report 2012/09. 90 p.

APÉNDICE A

Gráficas de las diferentes valores de pH, conductividad en las muestras de agua colectadas en el volcán de Pacaya.

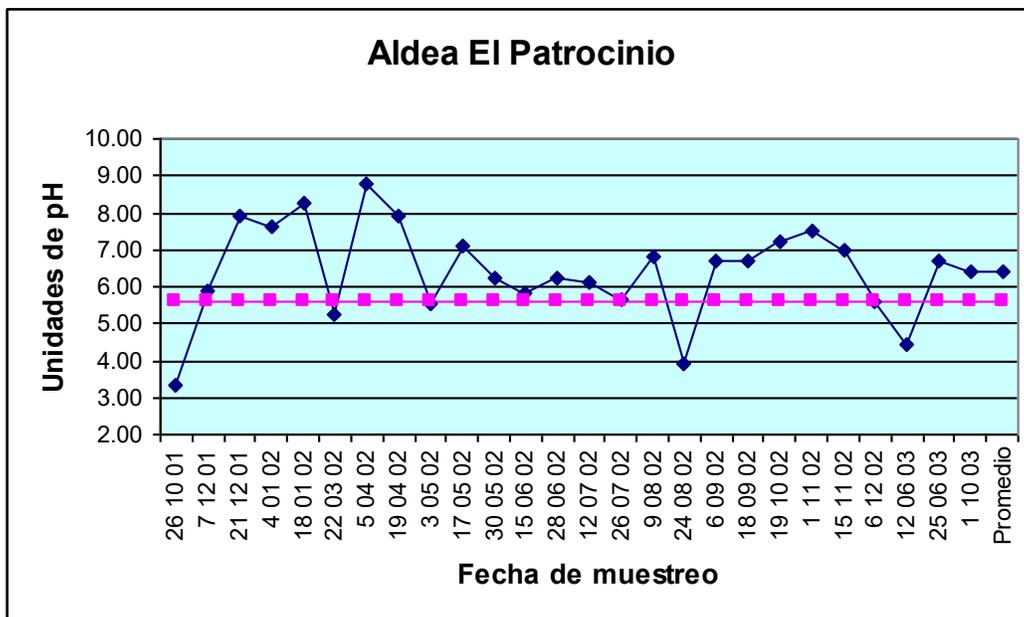


Figura 23. Valores de pH medidos en la deposición húmeda y seca en la Aldea El Patrocinio.

Fuente: Datos propios.

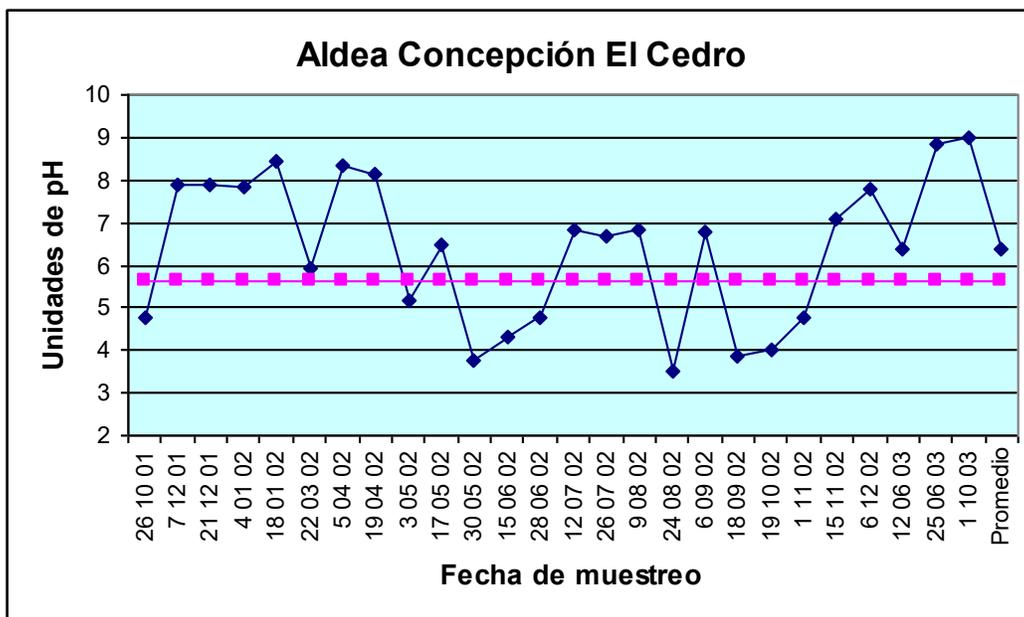


Figura 24. Valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca en la Aldea Concepción El Cedro.

Fuente: Datos propios.

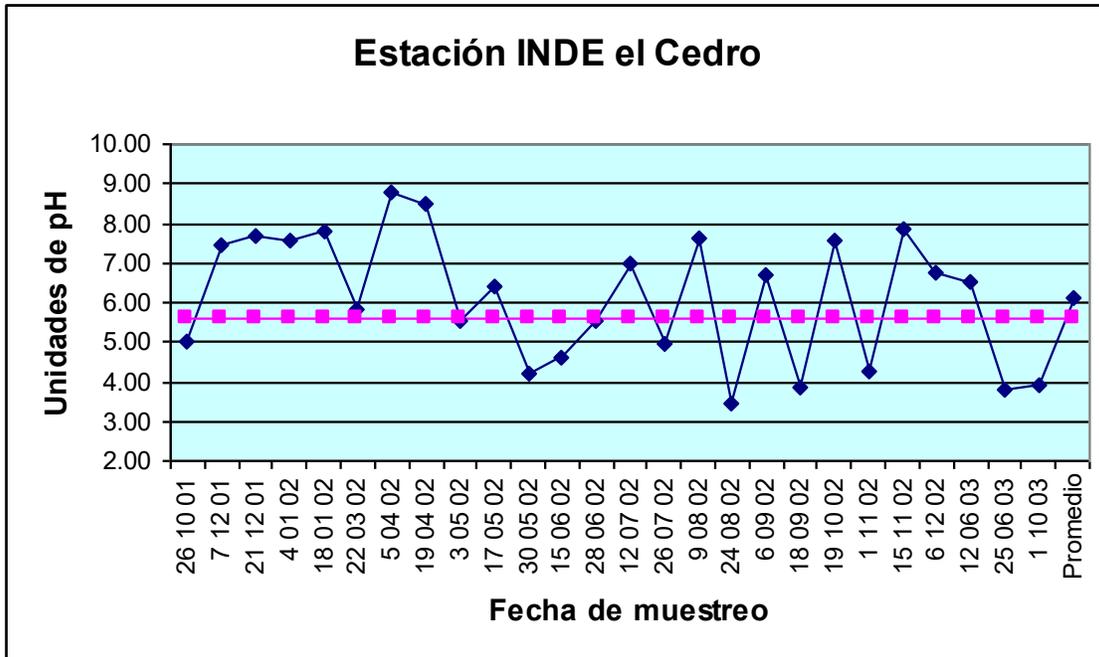


Figura 25. Valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca tomadas en la Estación INDE El Cedro.

Fuente: Datos propios.

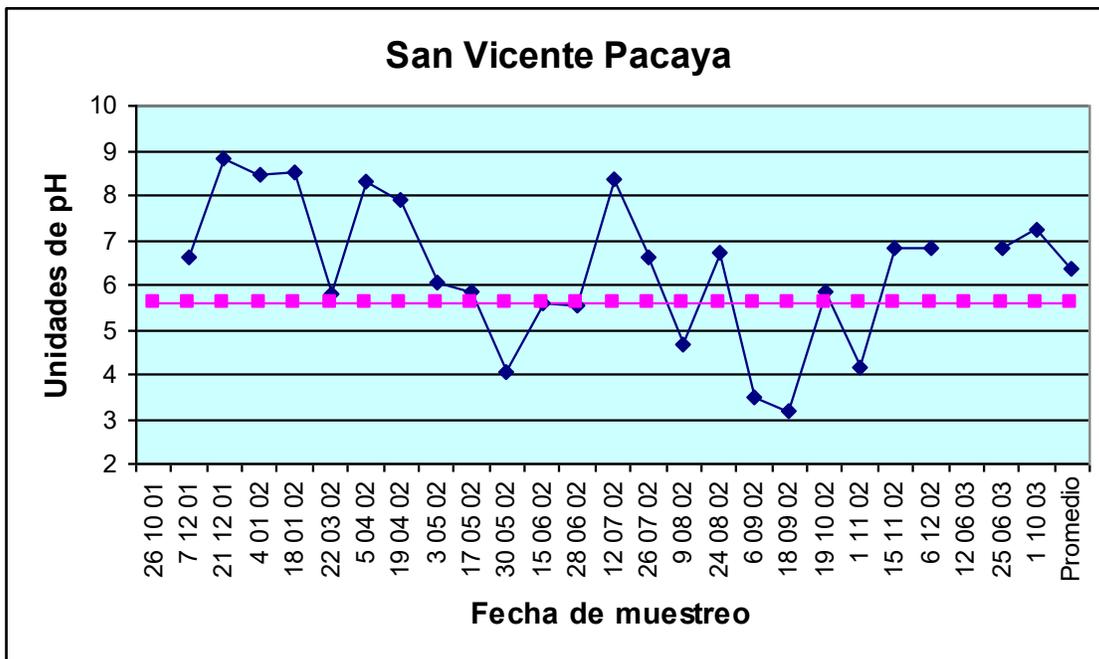


Figura 26. Valores de pH en la deposición húmeda y seca de las muestras tomadas en San Vicente Pacaya.

Fuente: Datos propios.

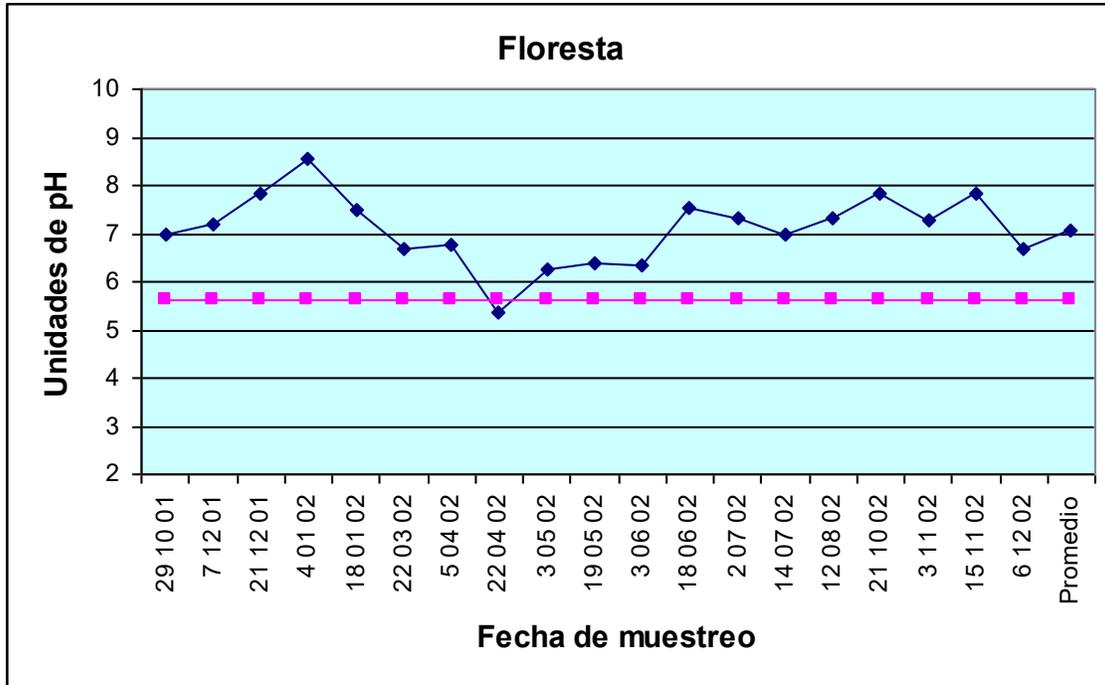


Figura 27. Valores de pH medidos en la deposición húmeda y seca en las muestras de la Floresta, zona 2 de la ciudad de Guatemala.

Fuente: Datos propios.

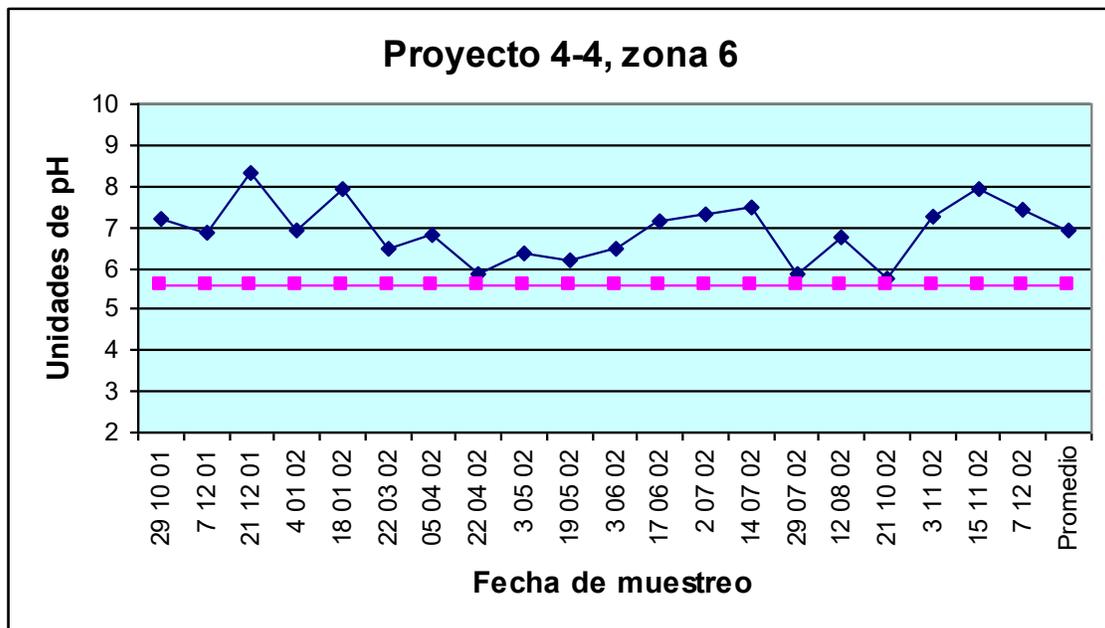


Figura 28. Valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca en las muestras colectadas en El Proyecto 4-4, zona 6 de la ciudad de Guatemala.

Fuente: Datos propios.

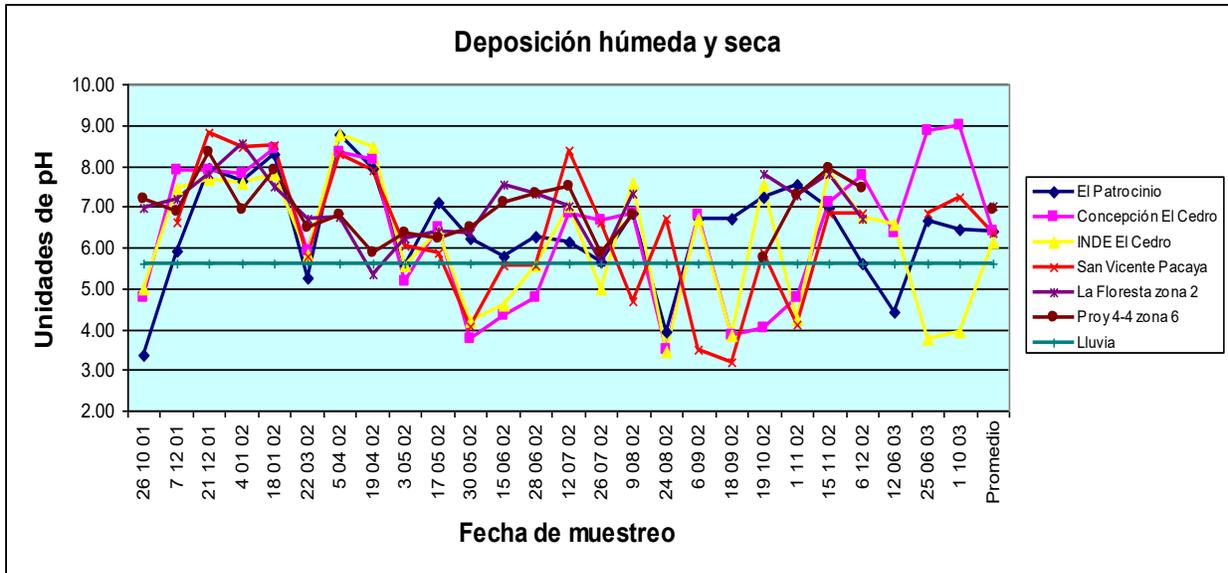


Figura 29. Tendencia en los valores de pH medidos en las muestras de deposición húmeda y seca durante el periodo comprendido entre octubre de 2001 y octubre de 2003.

Fuente: Datos propios.

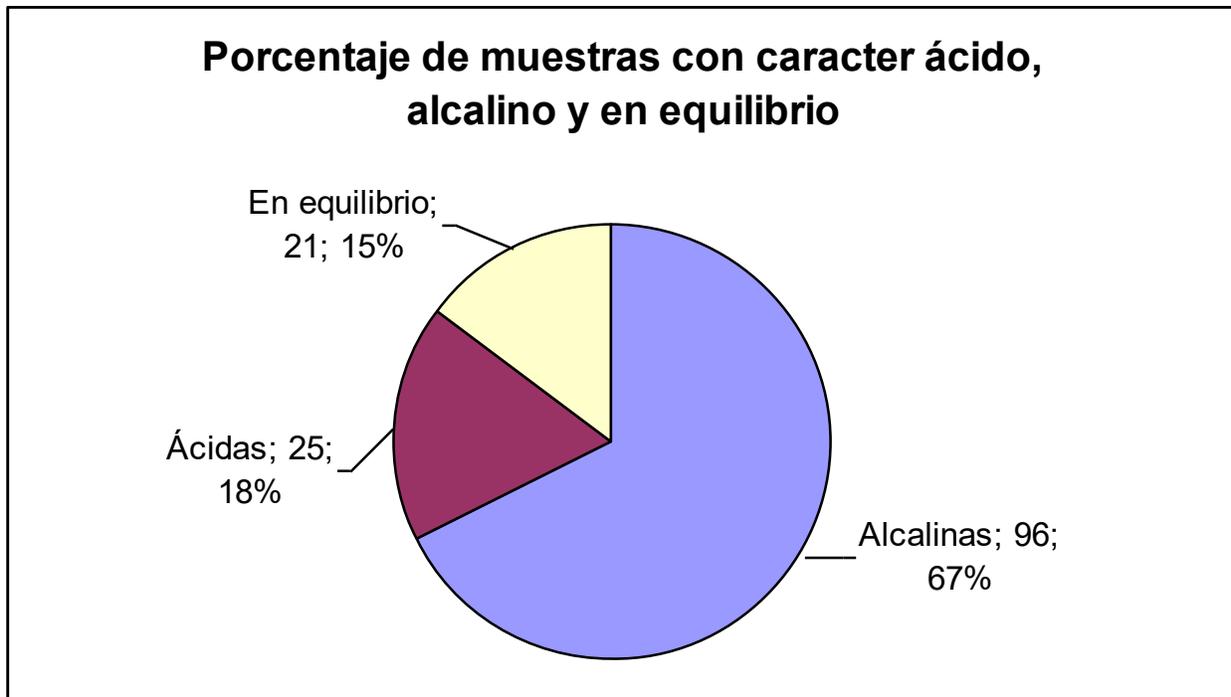


Figura 30. Carácter ácido, alcalino y en equilibrio de las muestras analizadas en cuatro sitios en la región de influencia del volcán de Pacaya.

Fuente: Datos propios.

APÉNDICE B

Equipo y materiales necesarios para el muestreo y análisis de laboratorio.

1. Equipo

Espectrofotómetro de absorción atómica de llama, Varían

Balanza analítica con sensibilidad de 0.1 mg

Horno de convección

Horno de microondas

Campana de extracción de gases

Potenciómetro

Conductímetro

Sistema de posicionamiento geográfico (GPS)

Refrigeradora

Plancha de calentamiento

Pipetas automáticas (1 ml, 5 ml, 10 ml)

Equipo de cómputo

Impresora de tinta

Vehículo tipo pickup de doble tracción

2. Reactivos. Todos los reactivos utilizados son grado analítico.

Ácido clorhídrico al 37%

Ácido nítrico

Estándares de 1000 ppm para metales (Fe, Cu, Mn, Zn)

Agua destilada

Agua ultrapura

3. Cristalería

Botellas de vidrio de color ámbar de 1 litro de capacidad

Cápsulas de porcelana de 100mL de capacidad

Vasos de precipitar de 250 mL

Varillas de agitación

4. Materiales

Desecadora

Caja de transporte o hielera

Pinza para cápsulas

Guantes

Marcadores indelebles

Masking tape

Etiquetas adheribles

Cuaderno de apuntes para campo y laboratorio

APÉNDICE C

Cuadro 23. Resultados de lluvia ácida para el año 2002, medidos en dos sitios de muestreo en la ciudad de Guatemala, Edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Ciudad Universitaria zona 12 Universidad de San Carlos de Guatemala (zona 12 USAC) y Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media -EFPEM- ubicado en la Avenida Petapa, entrada a la USAC, zona 12; por el Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la USAC.

	2002										Promedio	Desv. Est.
	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov		
USAC zona 12	7.98	6.41	6.8	5.62	4.82	5.37		5.71	6.50	6.97	6.24	0.96
Avenida Petapa z 12	7.51	6.74	6.743	5.88	6.25	6.65	5.64	6.45	6.57	6.88	6.53	0.53
Promedio											6.39	0.74
Desv. Est.											0.20	0.309

Fuente: Oliva, 2003.

APÉNDICE D

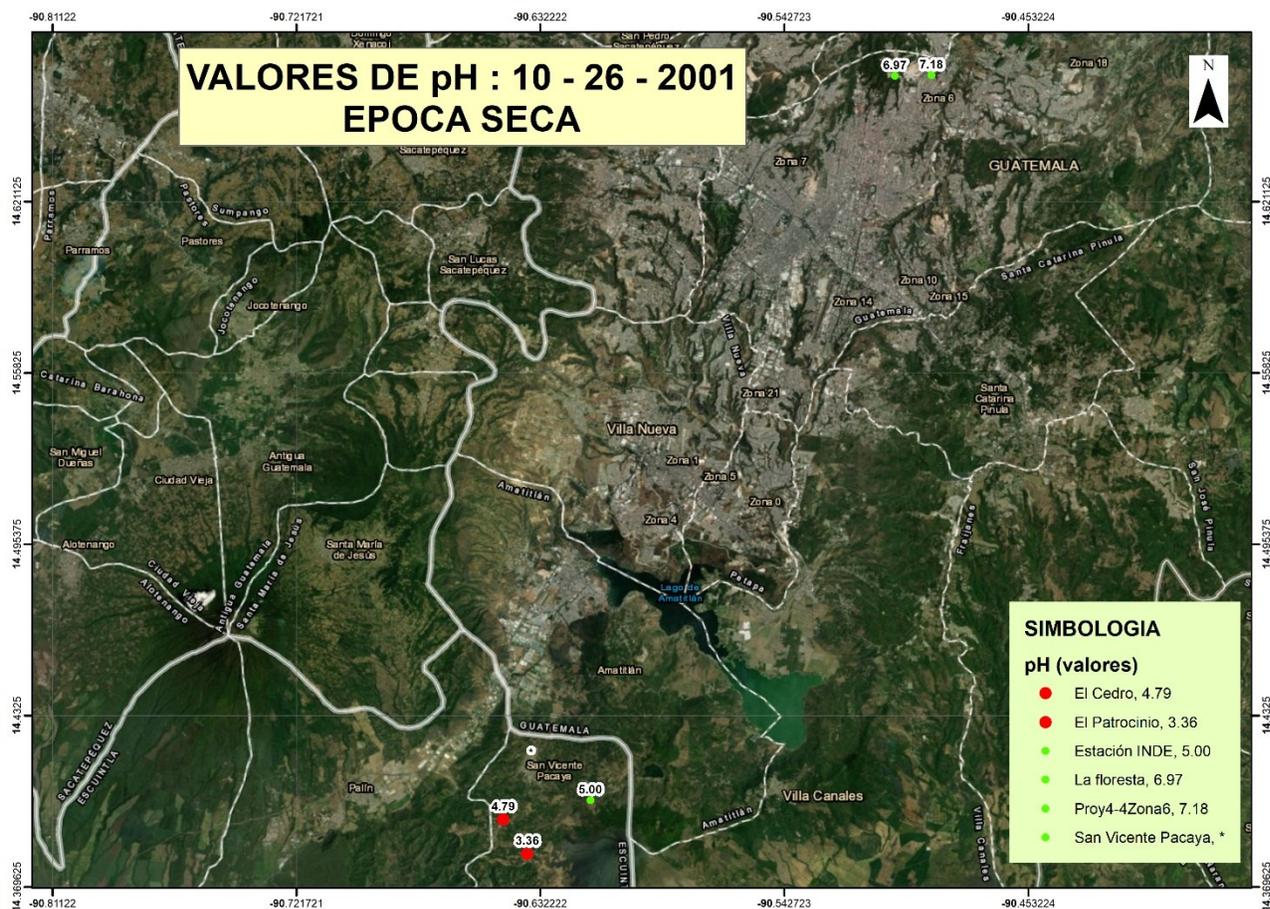


Figura 31. Mapa del área de estudio en época seca medida durante el mes de octubre de 2001. Se observan los valores de pH en el Cedro, el Patrocinio, San Vicente Pacaya, Estación el Inde, La Floresta y Proyecto 4-4. En color rojo se presentan los sitios con los valores de pH que presentan lluvia ácida, los cuales se encuentran ubicados en la parte baja del mapa, con valores pH de 4.39 para El Cedro y 3.36 para el Patrocinio.

Fuente: Elaboración propia.

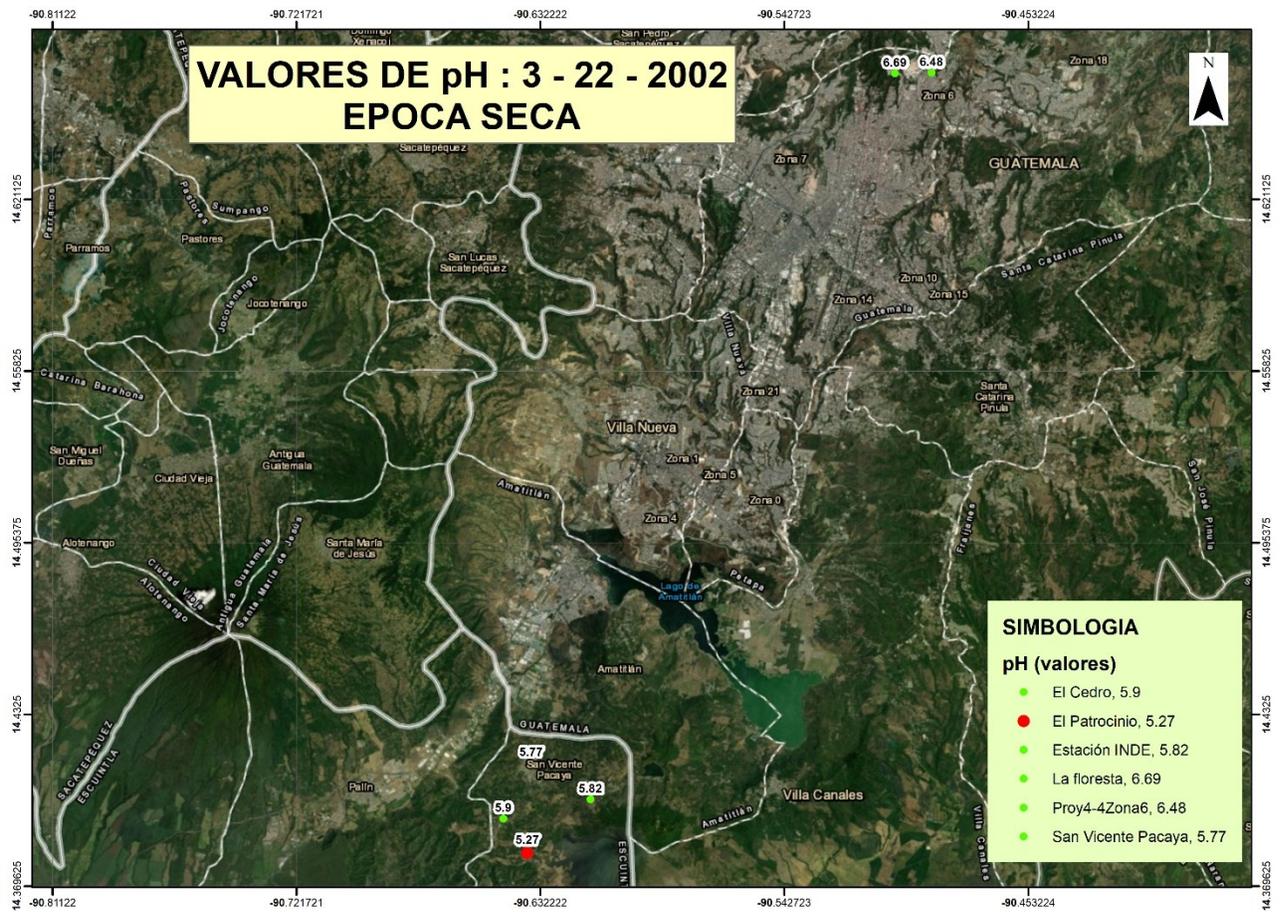


Figura 32. En el mapa se muestra un sitio con valor de pH ácido en el Patrocinio, en la parte baja del mapa. Los otros sitios de muestreo presentan valores de pH entre 5.8 y 6.69.

Fuente: Elaboración propia.

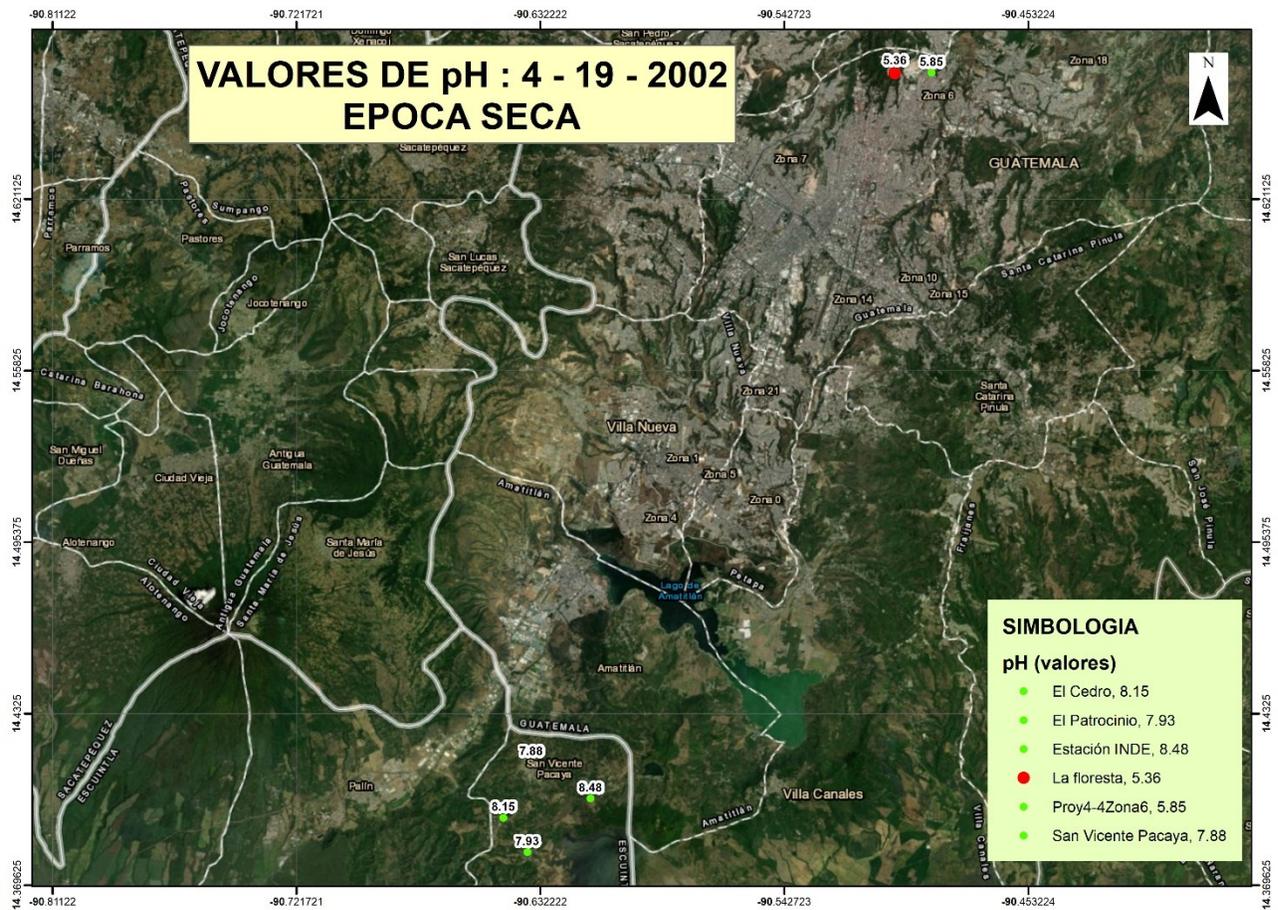


Figura 33. Mapa que muestra los valores de pH medidos en abril de 2002, en donde se presenta un valor de pH ácido, por debajo de 5.6 ubicado en la región de la ciudad de Guatemala, el área de La Floresta en la zona 2, con un valor de 5.36 unidades de pH y un valor cercano a la acidez ubicado en Proyecto 4-4 zona 6 con un valor de 5.85. El resto de los sitios de muestreo presenta valores de pH entre 7.88 y 8.16 unidades, considerados valores alcalinos.

Fuente: Elaboración propia.

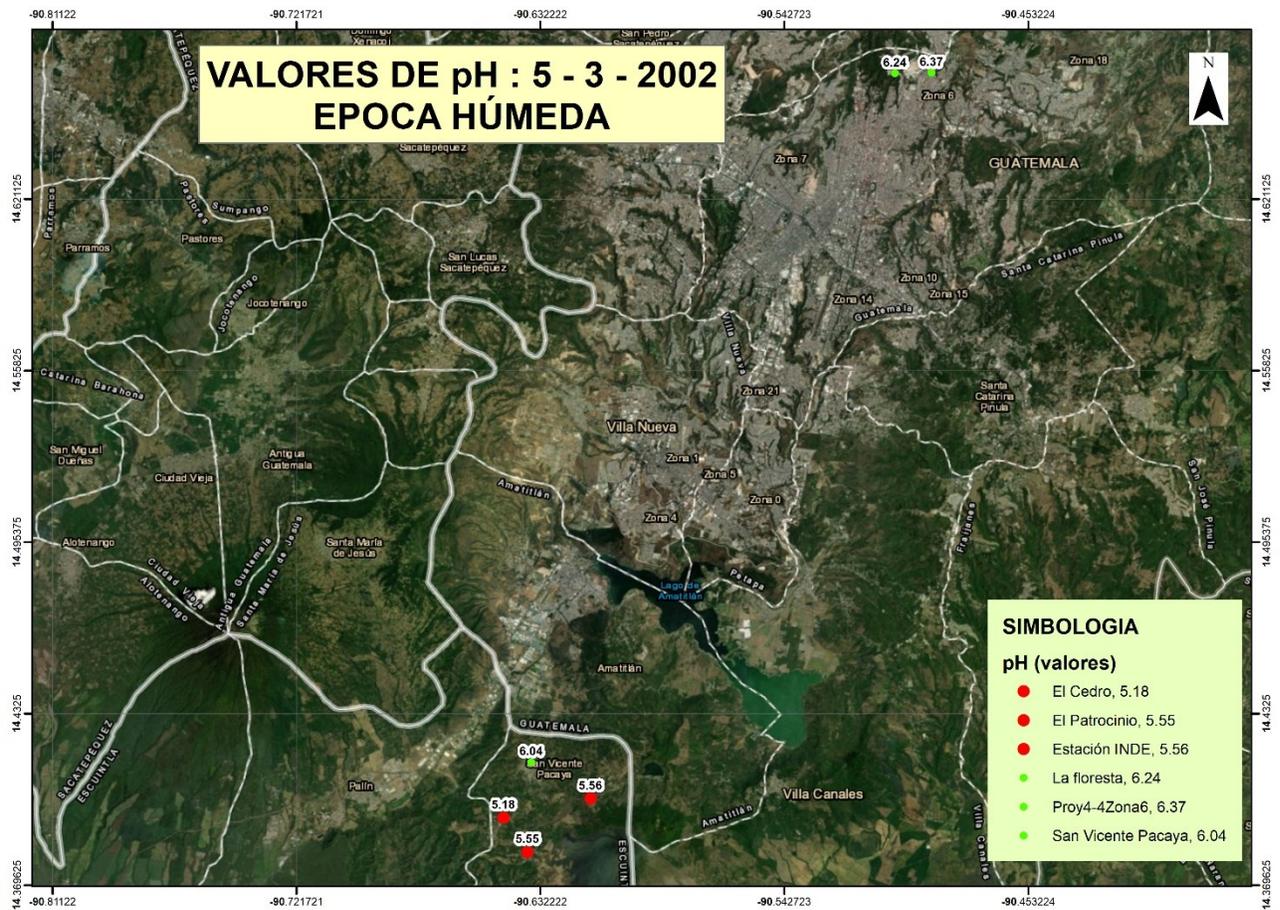


Figura 34. Mapa de valores de pH en época húmeda en el sitio de muestreo. Se presentan 3 valores de pH ácido en la región del volcán de Pacaya, visualizado con puntos rojos, ubicados en el Cedro (pH 5.18); El Patrocinio (pH 5.55) y la Estación el INDE (pH 5.56). San Vicente Pacaya ubicado dentro de las cercanías del volcán de Pacaya presenta un valor de 6.04 y los dos sitios ubicados en la región de la ciudad de Guatemala presentan valores de 6.24 para la Floresta, zona 2 y 6.37 para el Proyecto 4-4 en la zona 6.

Fuente: Elaboración propia.

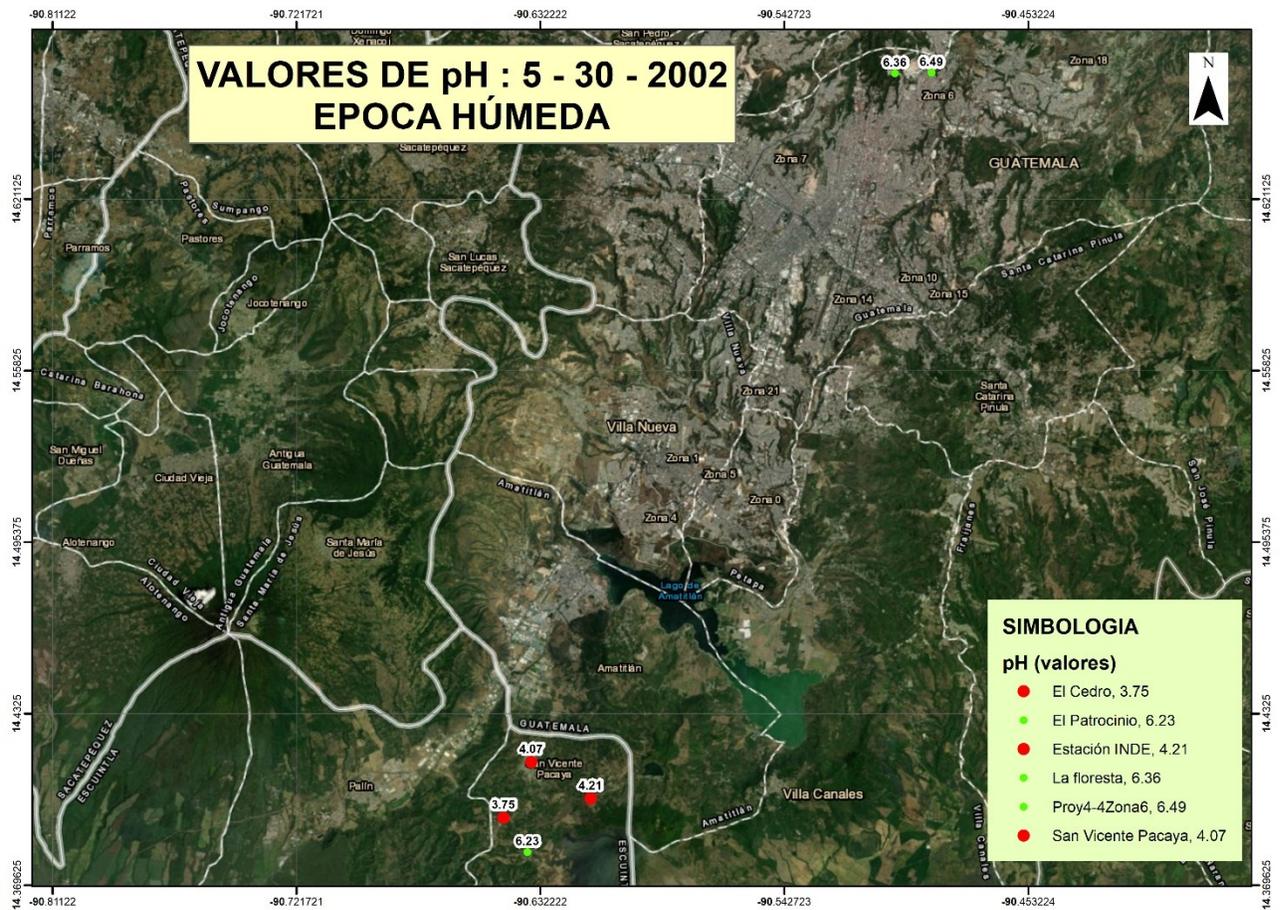


Figura 35. Mapa de valores de pH en época húmeda medidos en mayo de 2002. Se presentan 3 valores de pH ácido, ubicados en el Cedro (pH 3.75); San Vicente Pacaya (pH 4.07) y Estación INDE (4.21). El Patrocinio ubicado en la región del Volcán de Pacaya presenta un valor de pH de 6.23. Los sitios ubicados en la ciudad de Guatemala, presentan valores de pH 6.36 para la Floresta, en la zona 2 y pH 6.49 para el Proyecto 4-4 en la zona 6; siendo el ubicada en la región del volcán de Pacaya la que presenta valore de pH con lluvia ácida.

Fuente: Elaboración propia.

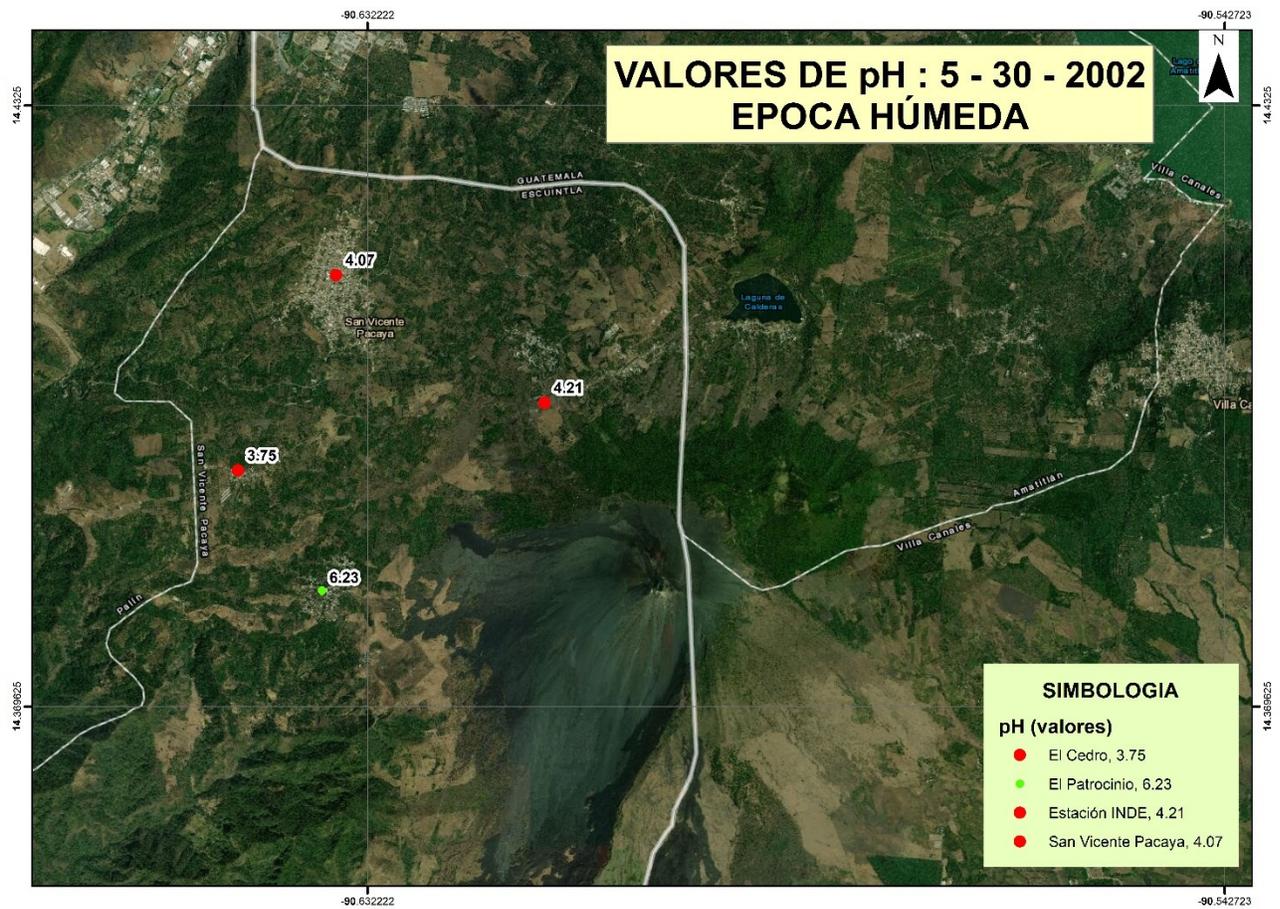


Figura 36. Mapa que presenta los 4 sitios de muestreo ubicados en la región del Volcán de Pacaya. Se puede apreciar que 3 de los 4 sitios presentan lluvia ácida durante la época lluviosa, con valores de pH de 3.75 para El Cedro, 4.07 para San Vicente Pacaya y 4.21 para la Estación del INDE. El Patrocinio presenta un valor de pH de 6.23 unidades.

Fuente: Elaboración propia.