

LLUVIA ACIDA DE ORIGEN VOLCANICO¹

*M del Rosario Alfaro**
*Erick Fernández***
*Jorge Barquero***
*José Joaquín Rodríguez***
*Manuel Rodríguez***

La atmósfera juega un papel muy importante en el intercambio de nutrientes para el suelo y las aguas y, la precipitación sirve como un excelente mecanismo para disolver y remover las partículas en la atmósfera. Pero, en la actualidad con la creciente alteración de la atmósfera por la actividad antropogénica, ese papel como fuente de nutrientes no es tan exacto y como producto de esa alteración se origina la precipitación ácida.

La precipitación ácida, comúnmente denominada como "lluvia ácida" es un fenómeno de origen artificial y natural. Este tiene su origen en la actividad industrial, en el crecimiento urbano y, en procesos naturales, tales como la actividad fumarólica y la expansión de suelos anaeróbicos o agregados de sedimentos en el agua. La precipitación ácida depende fundamentalmente de las partículas contaminantes que de una u otra forma están presentes en la atmósfera, de ahí que el movimiento de masas de aire, la humedad, la temperatura y el tipo de emisiones caractericen la precipitación.

Estudios en progreso en los volcanes Poás, Arenal y Turrialba, conducidos por los autores, indican que existe una fuerte actividad fumarólica que genera, entre otras cosas, precipitación ácida afectando áreas circunvecinas a estos volcanes. Estos estudios pretenden reconocer el área de mayor impacto y caracterizar los efectos de la precipitación seca y húmeda sobre los ecosistemas.

Este artículo es un avance de los estudios realizados a la fecha en el volcán Poás.

Precipitación ácida de origen volcánico:

La revisión de registros históricos de muchos volcanes sobre la tierra permite reconocer la alternancia de cortos períodos de fuerte actividad paroxística de diferentes tipos, con largos períodos de actividad fumarólica originada probablemente en la desgasificación de cuerpos magmáticos superficiales. Los volcanes durante estos períodos se comportan como analogías naturales de los grandes complejos industriales y originan alteraciones del medio, tales como la acidificación (Malavassi et al, 1984).

En el volcán Poás, así como en el Arenal y el Turrialba, se ha evidenciado la existencia de este fenómeno, el cual se manifiesta alterando los ecosistemas acuáticos y terrestres circundantes al punto de emisión. Según Casadevall et al la química de los gases volcánicos del Poás y el Arenal se componen fundamentalmente de agua, CO₂, H₂, SO₂, H₂S, HF. Siendo el SO₂ uno de los mayores componentes de las emisiones gaseosas volcánicas y, el principal componente que contribuye a la acidificación.

El estudio que se desarrolla para los volcanes Poás, Arenal y Turrialba, es uno de los primeros en el mundo, quizás el primero, en ocuparse del fenómeno en todas sus dimensiones como tópico de investigación. Obviamente se han presentado dificultades metodológicas para el estudio, en especial por la topografía del área que hace difícil el acceso a

1. Datos preliminares de un estudio sobre el impacto de la precipitación ácida en los ecosistemas forestales en tres áreas volcánicas, Poás, Arenal y Turrialba.

* Escuela de Ciencias Ambientales, UNA.

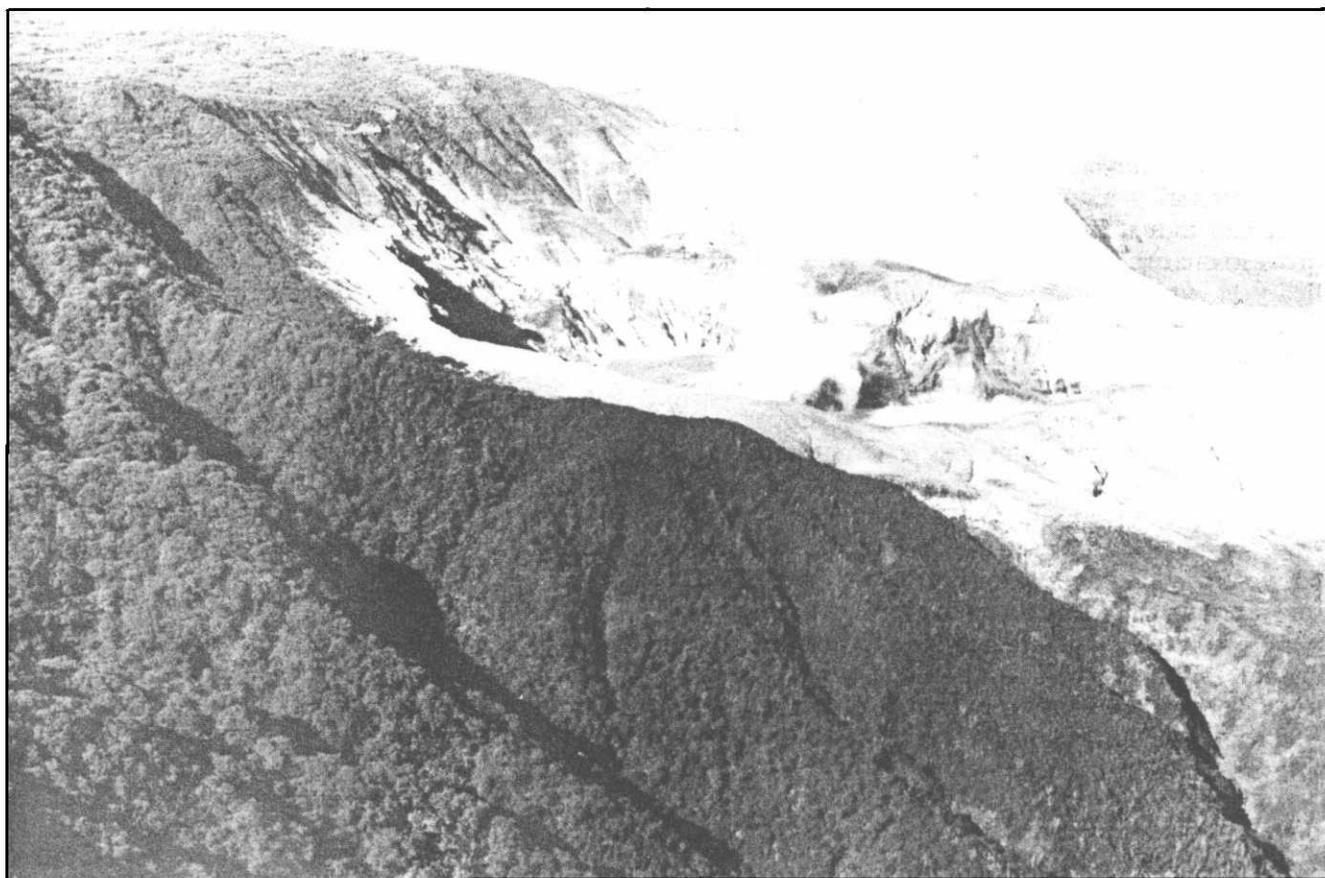
** Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, UNA.

ciertas zonas y, por la falta de un instrumental a control remoto que facilite el estudio de la distribución y caracterización química total de las emanaciones volcánicas.

En el volcán Poás, el comportamiento de los vientos y la fisiografía del volcán son factores determinantes en la orientación de la pluma de gases. Por simple observación es fácil identificar el área de impacto. Ver fotografía.

El volcán Poás se encuentra ubicado en la Cordillera Volcánica Central, entre las coordenadas geográficas $10^{\circ} 48' N$, $88^{\circ} 22' W$, a una altura de 2722 m. s.n.m. Se caracteriza como estratovolcán que ha tenido en épocas históricas erupciones estrombolianas, como en 1910 (Calvert et al, 1917) y

en 1953-55 (Fernández, 1961) y, erupciones freáticas, que se le han denominado "tipo geyser", que levanta una "pluma" o columna de agua, arena, lodo y bloques de la laguna del cráter principal (Leiva, 1914; Shaufelberguer y Pittier, 1931; Barquero et al, 1981). Como antes se indicó, ha sido característica de la actividad fumarólica en el cono interno del cráter principal, con temperaturas entre los $60^{\circ} C$ y $200^{\circ} C$ hasta el año 1980, a partir de 1981 se produce un incremento de temperatura hasta de $825^{\circ} C$, lo cual origina una pluma permanente de gases y vapor. Durante el período de estudio del fenómeno de precipitación ácida, se han mantenido temperaturas promedios entre los $300^{\circ} C$ y $500^{\circ} C$. La laguna del cráter principal, ha mantenido un promedio de temperatura entre $40^{\circ} C$ y $50^{\circ} C$ y un pH de 0.5.



Volcán Poás, se puede apreciar el impacto de la actividad volcánica, con pH muy ácidos. Alrededor del cráter y hasta el cerro Pelón, parte superior derecha, se evidencia el área más impactada por el fenómeno de precipitación ácida. (Foto NASA)

Metodología experimental

Este método experimental consiste en el uso de dos tipos de colectores, uno para la deposición seca y otro para la deposición húmeda, particularmente diseñados para este experimento. Ver Figura 1. El experimento de campo abarcó desde noviembre de 1984 a marzo de 1986, en el Parque Nacional Volcán Poás. Los colectores de deposición húmeda y seca suman en total 16; éstos fueron ubicados considerando la conducta de los vientos y la topografía del lugar en conjunción con la actividad fumarólica del volcán Poás. Mediciones fueron hechas en cada estación por períodos de 15 días, evaluándose pH, determinación de la concen-

tración de SO_4 y SO_2 , F^- , Cl^- , expresado en partes por millón. Se determinó la conductividad de las muestras húmedas recogidas. El pH y la conductividad del suelo, para cada una de las 8 estaciones fue evaluada. En total se corrieron un total de 1360 análisis para las muestras de precipitación húmeda y un total de 1280 análisis para las muestras de precipitación seca. Para los suelos fueron un total de 544 análisis. También se hicieron observaciones en el campo de las plantas afectadas directamente, según la sensibilidad evidenciada. Se hicieron lavados con agua destilada, con un pH de 7,0, a especies que se observaron sensibles al fenómeno. Los datos de campo y laboratorio aparecen resumidos en el texto.

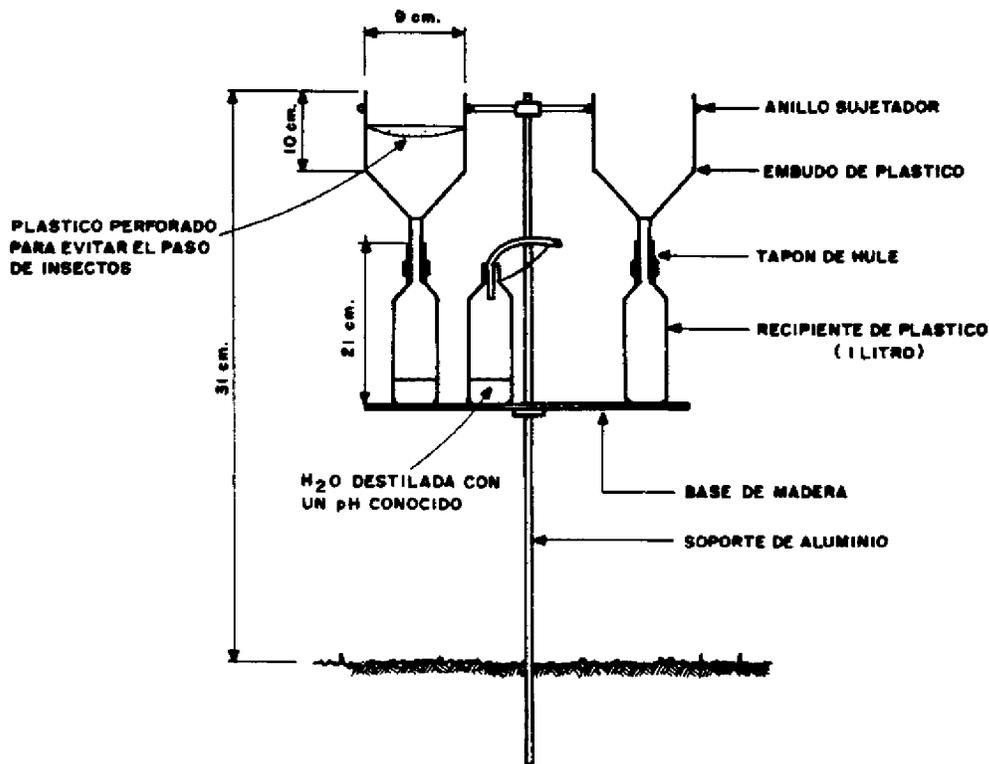


Fig. 1. Diseño específico para recolección de muestras de deposición seca y húmeda. Se utilizó en el colector de deposición seca 100 ml de agua destilada con un pH conocido. El filtro plástico se usó para evitar el paso de insectos a la muestra.

Análisis de las muestras

Después de la recolección de la deposición seca y húmeda, las muestras fueron almacenadas en el laboratorio a una temperatura de 4°C para minimizar una potencial degradación. Subsecuentes

análisis fueron completados para los componentes de interés en este estudio. Las concentraciones de sulfato fueron determinadas usando métodos espectrofotométricos modificados de la American Public Health Association; las concentraciones de cloruros y fluoruro fueron determinadas usando

electrodos específicos y sus métodos (Model 93-17 de Orion para cloro, y Model 94-09-00 de Orion para flúor, en un pH meter 407 Ionalyzer). Los métodos empleados permiten el uso de cantidades pequeñas de muestras, de 40 a 50 ml, para el análisis. La conductividad específica se midió con una celda de vidrio de una constante de 0.1 en conductivity Bridge-Model 31, con una K corregida. Para la determinación de pH del suelo se siguió el Método de pH (K Cl) de Scheffer y Schachtschabel.

En los colectores de deposición seca se depositaron 100 ml de agua destilada, valorada previamente. Después de 15 días de exposición se le siguieron los mismos análisis para deposición húmeda y se hicieron las comparaciones respectivas de alteración de muestra, fundamentalmente en el cambio de pH.

Resultados

El análisis químico de las aguas, colectadas en las ocho estaciones, durante 17 meses, muestran niveles de acidez bajos. Siendo la estación del Cerro Pelón la que presenta un pH promedio de 2.98, donde el pH máximo fue de 3.77 y el mínimo de 2.40. Tómese en cuenta que el pH de la lluvia natural es controlado por la disociación de CO_2 disuelto y a 340 ppmv que da un valor de pH de 5.6 (Chadwick, 1983; Garfield, 1985), comúnmente se asume que la lluvia con valores de pH inferiores a 5.6 es ácida. En tabla 1, se resumen los datos de muestreo de los 17 meses.

También, el análisis de deposición seca indica que en el Cerro Pelón se dieron cambios drásticos en el pH del agua destilada. Se observaron descensos en el pH desde 0.02 hasta 2.72, considérese que el pH es una medida exponencial que va de 0 a 14, donde el valor 7 es considerado neutro. Esta área, la más impactada por la pluma de gases debido a la acción de los vientos, que va de noreste a suroeste, y a la topografía del terreno que presenta suelos muy ácidos cuyo valor promedio en el pH es de 2.9 donde el máximo es de 4 y el mínimo de 2.4. Estos niveles de acidez provocan la remoción de nutrientes como el Ca^{++} , Mg^{++} y N, así como la acumulación de Al en el suelo, que es tóxico para plantas y peces. Sin embargo, los efectos en el ciclo de nutrientes en el suelo dependerá de los efectos netos de lixiviación y absorción. En esta área de mayor impacto hay grandes extensiones despobladas de vegetación producto de las condiciones ambientales y, en las áreas donde aparece vegetación encontramos que ésta no crece en condiciones óptimas.

Por ejemplo, el Copey (*Clusia* sp.) que es un árbol, aquí aparece como un pequeño arbusto, con necrosis parcial y con una avanzada clorosis, en especial las plantas que están a campo abierto. La más resistente a estas condiciones adversas parece ser *Pernetia coreacea*, que por la composición dura de la cutícula la vuelve más resistente a la precipitación ácida, sin embargo hay parches donde estas plantas también se ven afectadas por la precipitación ácida, en especial a nivel de bordes de la hoja. La precipitación ácida puede afectar la disponibilidad de N y P en los suelos, afectando el desarrollo de las plantas. Según Croman y Schofield (1979) a un pH 4.0, el Al se moviliza en el suelo incrementando los niveles de toxicidad y la movilización de P. Esto provoca una alteración de los nutrientes que repercute en una disminución del N por la alteración de la actividad microbiológica, provocando consecuentemente un decrecimiento en la planta. Nótese en figura 2 que los niveles de acidez en Cerro Pelón van de 2.40 a 3.70. En este punto se alcanzan los niveles más altos en ppm de SO_4 y Cl, principales formadores de la típica precipitación ácida. Según Faivre-Pierret y Le Guern (1983) los gases sulfurosos, en especial el SO_2 , son muy tóxicos a la vegetación, donde aparece necrosis a concentraciones de 0,3 ppm, ó 80 ug m^{-3} y la combinación de este gas con HF incrementa los daños. El H_2S , que también está presente en la pluma de gases del Poás es tóxico para la vegetación. A concentraciones de 1 a 5 ppm inhibe la respiración y fotosíntesis. En relación al HF encontrado en el Poás, que el valor promedio máximo se ubica en la estación del Cerro Pelón con 3.55 ppm y un mínimo de 0.23 en la estación de la Entrada. Faivre-Pierret y Le Guern (1983) indican que el HF que es tóxico a la vegetación y no es parte del metabolismo de las plantas. El F es acumulado produciendo la necrosis gradual de la planta, que se da a concentraciones de 10^{-4} ppm ó $0,2 \text{ ug m}^{-3}$. En el área denominada Cerro Pelón la destrucción de la vegetación se debe a la acción de la precipitación con pH muy bajos y a la incorporación de elementos extraños al metabolismo de la planta, como es el caso del F^- . Otro de los puntos afectados es la parte este del cráter, en esta sección los valores de pH de la precipitación húmeda van desde 3.4 hasta 5.7. En esta área la influencia de los gases sobre la vegetación se da siempre y cuando se marque un cambio en la dirección de los vientos, sea suroeste-noreste, también en este punto la deposición seca da indicios de contribuir al deterioro de la vegetación circundante. Según el método empleado para evaluar la precipitación seca, se observaron cambios que van desde 0.59

FIGURA 2
VOLCAN POAS (Nov. 1984 - Mar. 1986)
PRECIPITACION ACIDA ORIGEN VOLCANICO

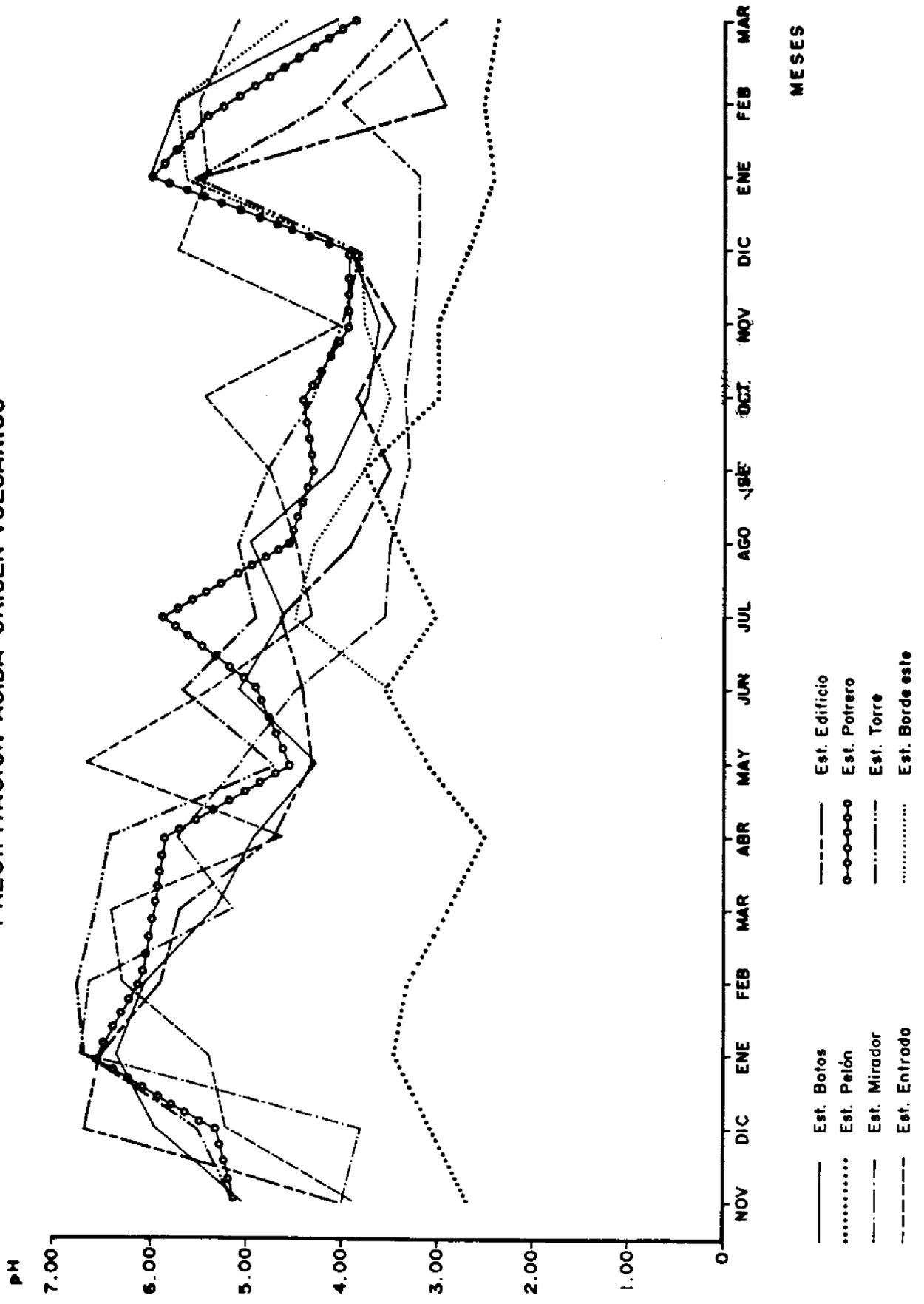


TABLA 1

VALORES PROMEDIOS PARA LAS 8 ESTACIONES DE DEPOSICION HUMEDA EN EL VOLCAN POAS DURANTE 17 MESES DE MUESTREO

Estación	pH*	Conductividad umhos	SO ₄	F	Cl	pH del suelo
Botos	4.9	31.9	8.3	0.3	3.2	3.6
Pelón	2.9	345.1	36.3	3.6	21.6	2.9
Mirador	4.3	96.9	11.4	0.5	7.1	3.6
Entrada	5.2	78.0	11.4	0.2	5.6	4.5
Edificio	4.5	63.2	8.7	0.4	5.6	4.5
Potrero	5.1	24.0	9.8	0.3	4.1	4.3
Torres	5.1	46.4	10.0	0.3	10.0	4.1
Borde Este	4.3	48.9	8.0	0.5	4.0	3.3

* La precipitación mensual fue determinada en una única estación, la que registró una precipitación anual de 3721.9 mm. La precipitación mínima se dio en el mes de marzo de 1985 y la máxima en junio de 1985.

hasta 2 unidades en el pH. Los datos obtenidos en este punto, pese a ser una estación de datos intermitentes, por depender de la conducta de los vientos, son bastantes indicadores de que la precipitación es ácida e impacta negativamente la vegetación. En la tabla 1 se pueden observar los datos promedios encontrados en esta estación. También en este punto aparece el Copey, el *Viburnun* sp., *Persea vesticola*, *Cavendishia* sp. *Myrica cerifera*, *Vaccinum consaguineum* y *Pernetia coreacea*, entre otras, con clorosis y daños en la cutícula y en algunos casos se da necrosis marginal e intervenial, en especial cuando el pH de la precipitación es muy bajo. El *Viburnun* sp. es una de las especies más sensibles a la precipitación ácida, aparece con temprana decoloración de las hojas, lo que implica una alteración en el metabolismo de la planta, y es seguido por una clorosis para terminar en necrosis. Otra de las estaciones que muestran pH bajos es la cercana al Mirador donde el pH promedio es de 4.30, con un máximo de 6.70 y un mínimo de 3.20. Las otras estaciones se colocaron al sureste y suroeste de la pluma de gases, lo que es área boscosa, a fin de evaluar el impacto de la precipitación en la vegetación. En todas las estaciones se obtuvieron pH bajos y la vegetación presenta desde lesiones

dispersas a lo largo de la hoja hasta disecación y necrosis de la hoja. Algunas especies son más resistentes tanto a la precipitación ácida húmeda como a la seca, como es el caso de *Pernetia coreacea*. En tabla 2, se presenta una lista de las principales especies afectadas y el grado de afectación.

En todas las ocho estaciones se dieron cambios de pH conocido, según el método de deposición seca y, a nivel de la vegetación la deposición seca es más importante que la húmeda en razón de que las partículas o aerosoles permanecen más tiempo en la superficie de la hoja, provocando la apertura de los estomas, facilitándose así la absorción de compuestos o elementos extraños al metabolismo de la planta. En el caso de la deposición húmeda parece ser menos dañina, esto debido a que los niveles de precipitación son más altos si se comparan con otras áreas dándose una mayor dilución. Sin embargo, en el caso específico del volcán Poás el daño en la vegetación y en la infraestructura se debe a tres componentes: deposición seca, deposición húmeda y la niebla ácida, esta última típica de la región.

TABLA 2
 PRINCIPALES ESPECIES AFECTADAS POR LA PRECIPITACION ACIDA
 EN EL VOLCAN POAS

Especie	Necrosis	Clorosis*	Lesiones temporales
<i>Pernetia coreacea</i>		X	X
<i>Viburnum</i> sp.	X	X	
<i>Persea vesticola</i>			
<i>Cavendishia</i> sp.		X	X
<i>Myrica cerifera</i>	X	X	
<i>Vaccinium consaguineum</i>			
<i>Roponoe pittieri</i> Mez	X	X	
<i>Vaccinium poasanum</i>	X	X	
<i>Ageratina amisocroma</i>			
<i>Myrica cerifera</i>		X	X
<i>Myconia myrtillifolia</i>		X	X
<i>Hillia loranthoides</i>		X	X

* Después de una prolongada exposición a la acidificación la planta que originalmente se identifica a nivel de clorosis puede degenerar en necrosis por la alteración indirecta pero prolongada de su metabolismo, sea por la toxicidad de sustancias absorbidas o por una alteración en su ciclo de nutrientes.

Conclusiones:

- Los sulfatos y el Cl parecen ser los mayores contribuidores del proceso de acidificación.
- El proceso de acidificación impacta claramente los ecosistemas acuáticos y terrestres, así como la infraestructura del lugar. Sin embargo son necesarios más estudios para cuantificar el efecto indirecto en la fisiología de algunas especies vegetales que se ven afectadas
- El diseño y perfeccionamiento de métodos de evaluación tanto de la deposición húmeda como seca son indispensables a fin de conocer mejor el complejo problema de la contaminación atmosférica.
- Se tiene evidencia sustancial sobre el impacto indirecto de la actividad fumarólica del volcán Poás sobre los ecosistemas y, la relación directa en esta área entre la precipitación pluvial y la concentración de SO₂, SO₄ y Cl. Cuando hay un aumento en la precipitación pluvial de la zona se da una mayor dilución de los componentes atmosféricos y su impacto en la vegetación se ve aminorado.
- En épocas secas, de alta actividad fumarólica las plantas sensibles a la acidificación, según tabla 2 y aquellas de hojas con gran capacidad hidrotónica absorben las partículas de la atmósfera, produciéndose posteriormente lesiones directas, como necrosis. En otros casos donde el periodo de reacción metabólica es más lenta se da el fenómeno de clorosis, que posteriormente culminará en necrosis.
- En este artículo no se entró a considerar el impacto del fenómeno en el hombre, por requerir este tema un cuidadoso y largo análisis que se desarrollará en una etapa posterior del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- Barquero, J. et al. *La actividad del volcán Poás en los años 1978-1980*. Boletín de Vulcanología N°11. Proyecto de Investigaciones Vulcanológicas, Universidad Nacional, julio 1981.
- Calvert, A. y Calvert, P. *El volcán Poás en 1910*. Antología "El volcán Poás". Vargas, A. Compilador. EUNED 1979.
- Casadevall, T. J. et al. *Sulfur Dioxide and particles in quiescent volcanic plumes from Poás, Arenal, and Colima volcanoes, Costa Rica and Mexico*. Aceptado para su publicación en *Journal of Geophysical Research, Atmospheric Section*. (Original Consulted).
- Chadwich, M. *Acid Deposition and the Environment*. *Ambio*. Vol XII (2) pp. 80-82. 1983.
- Croman, C.S. y Schofield L. *Aluminum leaching response to acid precipitation: effects in high elevation watersheds in the Northeast*. *Science* 204: 304-306. 1979.
- Faivre-Pierret R., Le Guern, E. *Health risks Linked with whalation of volcanic gases and aerosols Cap. 7*. En: *Forescasting Volcanic Events. Development in Volcanology*. H Tazieff J. C. Sabroux Eds. Elsevier Publishing Co. 1983.
- Fernández, R. *La actividad del Poás en el año 1953 y su transformación de pseudo geiser en volcán humeante*. Antología "El volcán Poás". Vargas, A. Compilador. EUNED. 1979.
- Garfield, E. *Acid Rain. Part I. What is it what does it do?* *Comments*. N°9. March 4, 1 1985
- Leiva, E. *El volcán Poas*. Antología "El volcán Poás". Vargas, A. Compilador. EUNED. 1979.
- Malavassi, E. et al. *Lluvia ácida de origen volcánico en Costa Rica y su impacto*. Primer Congreso de Geografía de Costa Rica. San José, Costa Rica. 23 pp. 1984.
- Schunfelbequer, P. y Pittier, H. *El volcán Poás*. Antología "Le volcán Poás". Vargas, A. Compilador. EUNED. 1979.