

**Determinación de la Sensibilidad a la Acidificación del Agua de Precipitación en
una Ventana del Ecosistema Alto-Andino del Parque Nacional Natural de
Puracé.**

YANLIKA AURORA VIDAL PINILLA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Bióloga.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
POPAYÁN
2005**

**Determinación de la Sensibilidad a la Acidificación del Agua de Precipitación
en una Ventana del Ecosistema Alto-Andino del Parque Nacional Natural de
Puracé.**

YANLIKA AURORA VIDAL PINILLA

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Bióloga.**

Director:

Dr. APOLINAR FIGUEROA CASAS

Asesor:

Doctor FABIO CABEZAS

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
POPAYÁN
2005**

Nota de aceptación

Director _____
PhD. Apolinar Figueroa Casas

Jurado _____
Profesor Julio Cesar Gil

Jurado _____
Profesor Antonio Jose Valverde

Fecha de sustentación: Mayo 26 de 2005.

A Dios por permitirme afrontar los momentos difíciles y por darme la oportunidad de compartir los felices con los seres que aún me quedan y quienes amo.

A mi madre Aurora constructora de sueños, creadora de esperanzas; a quien amo con el corazón y me acompaña desde el cielo.

A mis hermanos Gehovell y Kubler porque su presencia en mi vida ha sido el mejor regalo.

A mi tía Rosa por su amor y apoyo incondicional.

A Daniel por animarme a seguir y ser gran soporte para mi vida.

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus agradecimientos por la colaboración para la realización de este trabajo a :

Apolinar Figueroa Casas, Universidad del cauca.

Fabio Cabezas, Universidad del cauca.

Silvio Carvajal, Universidad del cauca.

Kubler Alexis Vidal, Universidad del cauca.

Robert Daniel Benavides, Universidad del valle.

Robinson Rodríguez, UCICA.

Martha Burbano, Universidad del cauca.

Mónica Valencia, Universidad del cauca.

Luisa Burbano, Universidad del cauca.

Samir Joaqui, Universidad del cauca.

Juan Pablo Martines, Universidad del cauca.

Clara Aurora Pinilla.

Rosa Elisa Pinilla.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO DE TÉRMINOS	16
RESUMEN	19
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
INTRODUCCIÓN	21
2. OBJETIVOS	23
2.1. Objetivo general	23
2.2. Objetivos específicos	23
3. HIPÓTESIS	24
4. MARCO TEÓRICO	25
4.1. Dinámica del agua	25
4.1.1. Comportamiento químico del agua	26
4.1.1.1. Estabilidad de la molécula de agua	26
4.2 Precipitación	31
4.3 Deposición de partículas secas (DPS)	33
4.3.1 Partículas y aerosoles	33
4.4. Elementos aportados por la precipitación al ecosistema	34
4.4.1. 1. Azufre	35
4.4.1.1.1 Azufre como contaminante	36
4.4.1.2 Nitrógeno	38
4.4.1.2.1 Nitrógeno como contaminante	39

4.4.2. Origen de los iones en precipitación	41
4.4.3. Precipitación ácida	42
4.5. Los volcanes y la lluvia ácida	45
4.6. Efectos de la lluvia ácida	45
4.7. Monitoreo de lluvia ácida	46
4.7.1. Variables físicas y químicas	47
4.7.1.1. pH.	47
4.7.1.2. Alcalinidad	48
4.7.1.3. Conductividad	49
4.7.1.4. Temperatura	49
4.7.1.5. Sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$)	49
4.7.1.6 Cloro	50
4.7.1.6.1 Ciclo del cloro	50
4.7.1.6.2 El cloro en la atmósfera	51
4.7.1.6. 3 Cloruros (Cl^-)	52
4.7.2. Variables climáticas	52
4.7.2.1. Orientación y velocidad de los vientos	53
4.7.2.2. Humedad	53
4.7.2.3. Precipitación	54
4.7.3. Variables geomorfológicos	54
4.7.3.1. Dirección y forma de la pendiente	54
4.7.3.1.1. 0-10% Plano ligeramente ondulado	54

4.7.3.1.2. 11-20% Ondulado	54
4.7.3.1.3. 21-30% Ondulado-Quebrado	55
4.7.3.1.4. 31-40% Quebrado	55
4.7.3.1.5. 41-50% Escarpado	55
4.7.3.1.6. >50% Fuertemente escarpado	55
5. ANTECEDENTES	56
6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	62
6.1. Características	63
6.1.1. Localización geográfica	63
6.1.2. Climatología	63
6.1.2.1. Temperatura	64
6.1.2.2. Precipitación	64
6.1.3. Geología	65
6.1.4. Hidrografía	65
6.1.5. Franja Altoandina – Andina	65
6.2. Vías de acceso	65
6.3 Actividades desarrolladas en la zona	66
7. METODOLOGÍA	68
7.1 Ubicación de los puntos de muestreo	68
7.2. Procedimiento de muestreo	71
7.2. Metodología de laboratorio	73
7.3. Análisis de los datos	76

7.3.1. Análisis estadístico	76
7.3.1.1. Gráficos	77
7.3.1.1.1. Diagrama de caja	77
7.3.2 Comportamiento espacial	77
7.3.3 Comportamiento temporal	78
7.3.4 Mapas de distribución espacial de las variables y áreas de influencia	78
7.3.5 Calculo del deposito total	78
8. RESULTADO Y DISCUSIÓN	79
9. 1 PRECIPITACIÓN	79
8.1.1 VOLUMEN DE CAPTACION	79
8.2. PLUVIOMETRIA PROMEDIO	84
8.3 RELACION DE LA PRECIPITACION CON LA TEMPERATURA	89
8.4 ALTURA	90
8.4.1 Relación altura-conductividad	90
8.4.2 Relación altura- temperatura	92
8.4.3 Relación altura- alcalinidad	93
8.5 ALCALINIDAD	94
8.6 pH	98
8.6.1. Relación pH- pluviometria	101
8.6.2. Relación pH-temperatura	103
8.7 CONDUCTIVIDAD	104
8.7.1. Relación precipitación conductividad	104

8.7.2. Relación conductividad- temperatura	108
8.8 APORTES DE IONES EN PRECIPITACION	111
8.8.1 Sulfatos	115
8.8.2 Nitratos	123
8.8.2.1 Relación nitratos-altura.	126
8.8.2.2 Relación nitratos- alcalinidad	127
8.8.2.3. Relación de ion nitrato con los demás iones.	128
8.8.2.4 Relacion nitrato-pH	130
8.8.3 Cloruros	131
8.9 COMPARACIÓN TEMPORAL DE LAS VARIABLES	134
9 CONCLUSIONES	147
10 RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFÍA	151
ANEXOS	153

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dinámica del agua en el ecosistema	25
Figura 2. Algunos de los elementos principalmente contaminantes aportados por la precipitación al ecosistema.	34
Figura 3. Ciclo Biogeoquímico del Azufre	35
Figura 4. Ciclo del Nitrógeno	38
Figura 5. Contenido de iones en la atmósfera	41
Figura 6. Formación de la lluvia ácida.	43
Figura 7. Ciclo del cloro	50
Figura 8. Polivinilclorado	52
Figura 9. Reporte del comportamiento del pH para el agua lluvia entre los años 1998 y 2000, en las ciudades Colombianas de Cali y Bogotá.	60
Figura 10. Medias mensuales de las variables climáticas para la ventana de estudio	64
Figura 11. Quema en un bosque Colombiano	67
Figura 12. Actividad ganadera en la zona	67
Figura 13. Instrumentos usados para la ubicación en campo	69
Figura 14. Colector de muestras de precipitación.	71
Figura 15. Montaje de colectores de precipitación en campo	72
Figura 16. Diagrama de flujo para la metodología de laboratorio.	73
Figura 17. Representación de un diagrama de caja	77
Figura 18. Volúmenes de captación mensual promedio para la ventana de estudio	80
Figura 19. Volúmenes de captación promedio por estacion de muestreo	81
Figura 20. Volúmenes de captación promedio por estacion de muestreo	82
Figura 21. Volúmenes medios de captación meses septiembre de 2002- febrero 2003	83
Figura 22. Volúmenes de captación promedio por estaciones de muestreo	83
Figura 23. Comparaciones de las pluviometrias mensuales promedio	85
Figura 24. Comparaciones de las pluviometrias mensuales promedio por sitio de muestreo	86
Figura 25. Comparacion de las pluviometrias mensuales promedio por sitio de muestreo	87
Figura 26. Comportamiento de la pluviometria en la ventana de estudio	88
Figura 27. Comportamiento mensual de la precipitación	88
Figura 28. Relación precipitación-temperatura	90
Figura 29. Relación conductividad- altura	96
Figura 30. Relación altura- temperatura	92
Figura 31. Relación altura-alcalinidad	93
Figura 32. Comportamiento temporal de la alcalinidad	96

Figura 33. Comparación espacial de la alcalinidad	97
Figura 34. Comparación de los valores de pH en los meses de estudio	99
Figura 35. Evaluación del pH mediante el diagrama de caja	101
Figura 36. Relación pH-pluviometría	102
Figura 37. Relación pH- pluviometría entre sitios	102
Figura 38. Relación pH- temperatura	103
Figura 39. Evaluación temporal de la relación medios rangos de conductividad-pluviometría.	105
Figura 40. Comportamiento de la conductividad con respecto a la precipitación	106
Figura 41. Comportamiento temporal de la relación conductividad-temperatura	108
Figura 42. Comportamiento espacial de la relación conductividad-temperatura	109
Figura 43. Mina de azufre “El vinagre”	110
Figura 44. Entrada de los iones con respecto a la precipitación	113
Figura 46. Comparación de las concentraciones medias del ion sulfato	117
Figura 47. Fumarola del Volcán Puracé	118
Figura 48. Fuentes termales de San Juan	118
Figura 49. Yacimiento de azufre el vinagre	122
Figura 50. Evaluación del ion sulfato mediante el diagrama de caja.	123
Figura 51. Comparación de las concentraciones medias del ion nitrato	124
Figura 52. Evaluación del ion nitrato mediante el diagrama de caja.	125
Figura 53. Relación altura- nitratos	127
Figura 54. Relación nitratos-alcalinidad	128
Figura 55. Relación precipitación-nitratos	130
Figura 56. Comparación de las concentraciones medias del ion cloruro	132
Figura 57. Evaluación del ion cloruro mediante el diagrama de caja	132

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Algunos fertilizantes nitrogenados usados en agricultura	40
Tabla 2. Monitoreo para la calidad de lluvia en Colombia, hecho por el IDEAM	59
Tabla 3. Ubicación de las estaciones de precipitación en la ventana de estudio.	62
Tabla 4. ventana zona norte Parque nacional Natural Purace, limites fisicos.	63
Tabla 5. Geoposición de los puntos de muestreo	69
Tabla 6. Evaluación temporal de las variables mediante la prueba Kruskal Wallis	80
Tabla 7. Variación interanual de las estaciones climáticas de alta montaña	85
Tabla 8. Pluviometria promedio, para los sitios de muestreo en el tiempo total de estudio	85
Tabla 9. Evaluación del comportamiento temporal de las variables mediante la prueba de Kruskal Wallis	96
Tabla 10. Evaluación espacial de las variables mediante la prueba Kruskal Wallis	100
Tabla 11. Evaluación de las variables mediante la prueba de Spearman	100
Tabla 12. Evaluación de la conductividad por época mediante la prueba de Kruskal Wallis	107
Tabla 13. Evaluación de la conductividad mediante la prueba de Kruskal Wallis	108
Tabla 14. Evaluación de las variables mediante la prueba de Pearson.	112
Tabla 15. Deposito total de iones Ton/ha/año en el agua de precipitación	114
Tabla 16. Deposito medio ponderado de iones por estación de muestreo	115
Tabla 17. Evaluación de la variable sulfato mediante Kruskal Wallis	119
Tabla 18. Evaluación temporal y espacial del ion sulfato mediante la prueba Kruskal wallis	120
Tabla 19. Análisis de correlación del sulfato con las demás variables mediante la prueba de Spearman	120
Tabla 20. Evaluación espacial y temporal del ion nitrato mediante la prueba Kruskal Wallis	126
Tabla 21. Análisis de la correlación del nitrato con las demás variables mediante la prueba de Spearman	130
Tabla 22. Evaluación espacial y temporal del ion cloruro mediante Kruskal Wallis	133
Tabla 23. Comparación por épocas de las variables mediante Kruskal Wallis	136
Tabla 24. Comparación espacial y temporal de las variables mediante la prueba de Kruskal Wallis.	138

LISTADO DE MAPAS

	Pág.
Mapa 1. Localización de estaciones de muestreo.	70
Mapa 2. Mapa de acidificación del agua - pH	140
Mapa 3. Mapa de acidificación del agua - Conductividad	141
Mapa 4. Mapa de acidificación del agua - Alcalinidad	142
Mapa 5. Mapa de acidificación del agua - Sulfatos	143
Mapa 6. Mapa de acidificación del agua - Cloruros	144
Mapa 7. Mapa de acidificación del agua - Nitratos	145
Mapa 8. Mapa de acidificación del agua - Precipitación	146

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Datos físico- químicos para los meses de Septiembre de 2002 a febrero de 2003 en una franja de la región alto- andina del Parque nacional Natural Puracè.	166
Anexo 2. Registros de los datos físico-químicos de las muestra de agua colectadas	169
Anexo 3. Registro de las variables climáticas y geomorfológicas para las muestras colectadas	170
Anexo 4. Descriptivos de las variables.	172
Anexo 5. Análisis de los resultados mediante la prueba de Duncan	172
Anexo 6. Test de homogeneidad de varianza	173
Anexo 7. Análisis espacial de las variables	174
Anexo 8. Análisis temporal y espacial univariable	176
Anexo 9. Descriptivos espaciales de las variables	177
Anexo 10. Análisis temporal de comparaciones múltiples.	177
Anexo 11. Análisis espacial de comparaciones múltiples.	179
Anexo 12. Comparación de los medios rangos de las variables.	179

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

Acidez: contenido de iones hidrógeno de una solución, que se expresa por un valor en la escala del pH. Una solución es ácida si la concentración de hidrogeniones (H^+) es mayor que la de iones hidroxilo (OH^-).

Acidificación: es el incremento de los iones de hidrógeno, comúnmente expresado como pH en un medio del ambiente.

Antrópico: debido al hombre.

Ciclos: en la naturaleza, reciben el nombre de ciclos, las relaciones entre la materia orgánica e inorgánica. La tierra no recibe cantidades de materia de otros cuerpos del Universo, tampoco pierde cantidades significativas, todo se transforma y aprovecha. Cada elemento es tomado del ambiente, pasando a formar parte del protoplasma vivo y finalmente es devuelto al medio ambiente para ser utilizado.

Contaminación: 1. la presencia y/o introducción al ambiente de elementos nocivos a la vida, la flora o a la fauna, o que degrade la calidad de la atmósfera, del agua, del suelo o de los bienes y recursos naturales en general.

2. la presencia de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente (Ley de Bases del Medio Ambiente).

3. la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ecosistemas:

Contaminante: toda materia, elemento, compuesto, sustancias, derivados químicos o biológicos, energía, radiación, vibración, ruido o una combinación de ellos en cualquiera de sus estados físicos que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier otro elemento del ambiente, altere o modifique su composición natural y degrade su calidad, poniendo en riesgo la salud de las personas y preservación y conservación del ambiente.

Convección: Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección.

Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este

tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural.

La convección determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie.

Las corrientes de convección dentro del manto de la Tierra trasladan la mayor parte de su energía térmica desde la profundidad de la Tierra a la superficie y son la fuerza conductora de la deriva de los continentes.

Ecosistemas: 1. la unidad básica de interacción de los organismos vivos entre sí y su relación con el ambiente. 2. sistema ecológico. 3. unidad natural con modelo propio de estructura, funcionamiento y organización de la materia viva dentro de los flujos definidos de energía y materia, consistentes en los organismos vivos que coexisten en un lugar y en un tiempo determinado, y las variables ambientales, fisicoquímicas donde habitan.

Efecto invernadero: Calentamiento de la atmósfera producido por la alteración del balance térmico debido al aumento de la concentración de gases que no transmiten en onda larga (gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, CO₂ y metano, CH₄). El balance térmico de la atmósfera depende del equilibrio entre entradas y salidas de energía radiante. La mayor parte del calentamiento del aire se debe a la energía solar que los materiales de la superficie del planeta absorben y después remiten a mayor longitud de onda, por lo que el aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero altera el balance térmico al disminuir las salidas de energía de la atmósfera.

Emisión: liberación o pérdida de material hacia el medio ambiente. La emisión incluye todas las descargas hacia el aire, agua o tierra. Se aplica estrictamente a sustancias potencialmente contaminantes

Emisiones: liberación de contaminantes (partículas sólidas, líquidas o gases) al medio, procedentes de una fuente productora. El nivel de emisión de una fuente se mide por las cantidades emitidas por unidad de tiempo (aquí en toneladas/año). En el caso de las emisiones acústicas se miden características del ruido como la intensidad

Geomorfología: estudio de las formas terrestres y su evolución, las cuales se deben en mucho a la acción del agua en los ríos y glaciares.

IDEAM: instituto de estudios ambientales y meteorológicos.

MINAMBIENTE: ministerio del medio ambiente.

Microelementos: elementos que ocurren en los organismos, en muy pequeñas cantidades tales como Pb, Ag, Zn, Ni, Co y Mn. Algunos microelementos son esenciales para los procesos de la vida y otros son perjudiciales. Sin embargo, aún los elementos benéficos se vuelven tóxicos según se incrementen sus niveles en el cuerpo

Monitoreo: proceso programado de muestreo o medición y registro, señalización, o ambos, de varias características del medio ambiente, frecuentemente con el fin de hacer una estimación conforme a objetivos especificados.

Oxido de nitrógeno (NOx): se forma por la oxigenación del nitrógeno atmosférico y en menor grado a partir del nitrógeno orgánico contenido en los combustibles. Estudios de salud ocupacional han demostrado que este contaminante puede ser fatal en concentraciones elevadas, mientras que a niveles medios puede irritar los pulmones, causar bronquitis y neumonía, entre otros daños.

Ozono (O₃): se encuentra en dos capas de la atmósfera, la estratosfera y la troposfera. En la estratosfera (capa atmosférica entre 7 y 10 millas o más sobre la superficie de la tierra), el ozono es una forma natural de oxígeno que proporciona una capa que rodea a la tierra y la protege de la radiación ultravioleta. En la troposfera (capa que se extiende arriba de 7 a 10 millas de la superficie de la tierra) , el ozono es un oxidante químico y el mayor componente del humo fotoquímico. El ozono en la troposfera es resultante de reacciones químicas complejas de nitrógeno y óxidos, los cuales están entre los contaminantes primarios emitidos por fuentes de combustión; hidrocarbano, lanzados a la atmósfera a través de la combustión. En la reacción química interviene la luz solar.

Parques nacionales (Reservas): son áreas donde la naturaleza es protegida por medio de reglamentos regulatorios expedidos por los gobiernos. Los parques ayudan a la investigación científica y al mejoramiento del paisaje y el ambiente.

SIG: GIS en inglés. Herramienta informática que permite la relación de distintos conjuntos de datos que provee cada disciplina involucrada en una misma área de estudio.

Estos datos se incorporan independientemente al sistema que puede ligarlos entre sí de acuerdo con los objetivos y las necesidades del operador. Como resultado, se obtiene un mapa completo del área de estudio, en el que se visualizan los principales aspectos de la problemática en cuestión.

Se utiliza para manejar recursos naturales, planificar áreas de vida silvestre, agrícola, ganadera y forestal, y para la evaluación del impacto ambiental. También se emplean en la planificación urbana y rural.

Smog: termino (en inglés) que significa: neblumo, este gas se deriva de una combinación de humo y niebla y se describe como un atmósfera contaminada en el

cual ocurren productos de la combustión tales como hidrocarburos, materias particuladas y óxidos de azufre y nitrógeno en concentraciones tales que resultan peligrosas para los seres humanos y para otros organismos, especialmente durante épocas nubladas.

Smog fotoquímico: palabra generada por dos vocablos de la lengua inglesa; "smoke": humo, y "fog": niebla. Es una niebla espesada y oscurecida por los humos y vapores provenientes de productos químicos. Es una neblina fotoquímica causada por la acción de la radiación solar ultravioleta sobre la atmósfera contaminada con hidrocarburos y óxidos de nitrógeno provenientes de fuentes fijas y móviles.

Throughfall: agua que pasa a través del follaje.

VOCs: compuestos orgánicos volátiles (**COV**). Se generan por la combustión de gas, combustóleo y principalmente gasolinas; su contribución a las emisiones es baja en volumen, como lo es también su baja toxicidad, aunque son dañinos a la salud en altas concentraciones. Los COV contribuyen a la formación del ozono.

RESUMEN

En el Parque Nacional Natural Puracé se incluyen ecosistemas estratégicos, en ellos, se encuentran contenidas reservas de agua que cobran una gran importancia en cuanto a conservación se refiere, debido que la mayor parte el abastecimiento hídrico de todo el país depende de ellos.

El agua esencial para toda forma de vida; tiene características especiales que le confieren el poder de amortiguar cambios físico-químicos dentro del ecosistema cuando este se encuentra bajo algún nivel de perturbación, siendo una de las mejores fuentes de información acerca de las condiciones ambientales en los ecosistemas estratégicos de este recurso.

Este trabajo plantea como punto focal el estudio físico-químico del agua que se precipita dentro de una ventana del Parque Nacional Natural Puracé, permitiendo identificar cambios o tensores que afectan al ecosistema y que expresan la interacción mediante los aportes por precipitación que llegan al ecosistema.

Por ello, se realiza la evaluación conductimétrica de la alcalinidad para valorar la capacidad buffer (amortiguadora) del agua de precipitación comparándola con estándares de acidez y determinar si esta entra al ecosistema con un carácter ácido.

La metodología empleada para el proceso de colección de las muestras fue tomada de Likens y Borman¹ y el análisis conductimétrico posterior fue realizado según sugiere el APHA², con los resultados se obtuvieron mapas de acidez con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Los resultados encontrados podrán ser empleados en el desarrollo de planes de manejo ambiental, proyectos de mejoramiento de calidad de agua y aire a nivel comunitario, mejoramiento de los procesos de explotación minera en la región y el posterior desarrollo de tecnologías más limpias en dicha explotación.

¹ LIKENS, E. y BORMAN, F. forested ecosystem. New York, 1977.

² APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados: Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos, 1992. p. 1 – 73

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Parque Nacional Natural Puracé es un ecosistema estratégico Donde la explotación de azufre en La Mina de Azufre “El Vinagre” y la emisión de gases volcánicos podrian facilitar procesos de acidificación del agua de precipitación, por emision a la atmósfera de gases precursores de lluvia los cuales alteran la capacidad buffer del agua contribuyendo a procesos de acidificación del suelo y el agua generando consecuencias en la flora, la fauna e incluso en la salud humana.

Por lo mencionado se hace necesario un estudio físico-químico del agua de lluvia y muestre el nivel de acidificación del agua de lluvia, debido a la presencia de la cadena volcánica de los coconucos y el yacimiento minero de azufre en la región.

La falta de información con respecto al nivel de acidificación de las aguas de precipitación que pueden afectar los ecosistemas andinos del Panque Nacional Natural Purace dificulta el desarrollo de planes de manejo adecuados y los procesos de gestión de este sistema natural.

La información sobre acidificación del agua, es una herramienta vital para el desarrollo de posteriores investigaciones orientadas a evaluar la sensibilidad a la acidificación de otros componentes de este ecosistema, tales como suelo, flora y fauna que pueden verse alterados por estos aportes.

INTRODUCCIÓN

XX

El agua es el componente más importante para el ecosistema y le aporta oxígeno, nitrógeno además de otros compuestos. Ella participa de muchos procesos al interior de los ecosistemas incorporando a través de la precipitación los compuestos que se hayan suspendidos en la atmósfera (Davigneaud, 1978)³ y que son requeridos por otros componentes del ecosistema.

A la atmósfera no solo son emitidos elementos que sirven de nutrientes como el Nitrógeno, sino también agentes polucionantes: SO₂, HF, HCl, óxidos de nitrógeno, metales pesados tóxicos y materias orgánicas diversas (Davigneaud, 1978)⁴, que proceden especialmente de dos tipos de fuentes:

1. Actividades antrópicas: tales como la combustión industrial, actividades mineras, emisiones de los automóviles.
2. Naturales: como erupciones volcánicas y gases, que al reaccionar con el agua en su estado gaseoso forman compuestos (Chang,1999)⁵ que dan origen a precipitaciones ácidas y la integración de ellas en la dinámica del ecosistema alterando su funcionamiento.

A pesar que gran parte de las precipitaciones ácidas son provocadas por agentes polucionantes de origen antrópico, existen datos que sugieren que este tipo de precipitaciones también pueden ser propiciadas por las reservas de gases principalmente sulfúricos de los volcanes y que son liberados por la actividad volcánica (Hendry, 1984)⁶.

En la ventana de estudio se ubica la cadena volcánica de los Coconucos, la cual puede contribuir en la emisión de gases como N₂, CO₂, HCl, HF, H₂S y vapor de

³ DUVIGNEAUD, P. La Síntesis Ecológica. España, 1978.

⁴ Ibid., pag 20.

⁵ CHANG, Raymond. Química. Mexico: Mc Graw-Hill, 1999.

⁶ HENDRY, Charles. Precipitation chemistry at Turrialba. Costa Rica. Water recourses research. Noviembre, 1984.

agua (Chang, 1999)⁷, precursores de la lluvia ácida y en estudios realizados por Bravo y Giraldo en el 2001 en suelos de algunos sectores del departamento del Cauca sugieren que al caer sobre el suelo estos gases en solución son responsables de su acidificación debido a que libera AL^{+3} (Bravo y Giraldo, 2001)⁸, causando daños a los ecosistemas terrestres, disminuyendo la cantidad de nutrientes, movilizándolo metales tóxicos, eliminando importantes sustancias del suelo y cambiando su composición⁹, además, produciendo efectos tóxicos sobre plantas y animales; causando graves consecuencias sobre el ecosistema Alto-andino presente en esta región muy sensible a las alteraciones y cuya capacidad de recuperación es limitada (Sarmiento, 2001)¹⁰.

En respuesta a los hechos descritos anteriormente, se realizó un estudio que permitió la evaluación de la sensibilidad a la acidificación del agua, por medio del análisis de variables físico-químicas como conductividad, pH, alcalinidad e iones disueltos (fundamentalmente sulfatos, nitratos y cloruros), originando a través de los resultados obtenidos mapas de susceptibilidad a la acidificación y distribución espacial de estos aportes.

⁷ CHANG, Op. Cit., pag 20.

⁸ BRAVO, Isabell y GIRALDO, Efrén. Modulo de sistemas ecológicos y contaminación. Popayán 2001.

⁹ ECOSITIO. Lluvia ácida: [online]Uruguay. Disponible en internet www.revistadelsur.org.uy/revista092/Ambiente1.html

¹⁰ SARMIENTO, J. Estudio de Ecosistemas Altoandinos en América del Sur. 1999.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar la sensibilidad a la acidificación del agua de precipitación valorando la conductividad, alcalinidad, pH, SO_4^- , NO_3^- , Cl^- , determinando los aportes totales netos y mensuales en Kg/ha/mes de estos iones en una ventana del ecosistema alto-andino del Parque Nacional Natural Puracé.

Objetivos específicos

- Elaborar mapas de sensibilidad a la acidificación para un sector del ecosistema alto-andino del Parque Nacional Natural de Puracé.

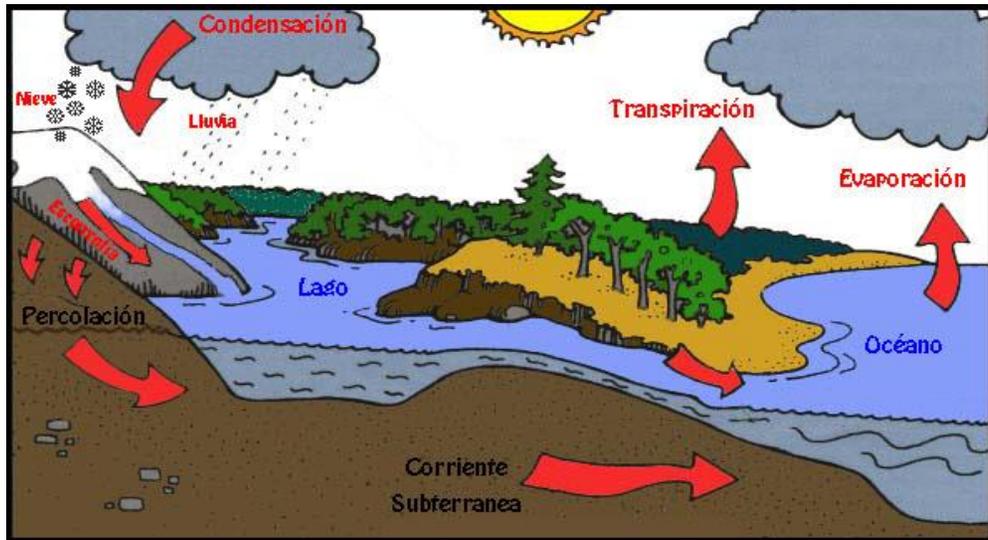
3. HIPÓTESIS

Los iones como SO_4^- , NO_3^- así como Cl^- emitidos por la actividad volcánica y minera en el Parque Nacional Natural de Puracé, contribuyen a la acidificación del agua por lo que se espera encontrar concentraciones de estos iones más altas que lo normal, pH, alcalinidad bajos y conductividades altas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Dinámica del agua.

Figura 1. Dinámica del Agua en el ecosistema.



Fuente: la tierra un planeta de agua [online] libro de actividades semana nacional de ciencia y tecnología del programa explora con cyt, disponible [http:// www.explora . cl/otros/agua/ inicio.html](http://www.explora.cl/otros/agua/inicio.html), chile octubre 1997.

El agua es un componente esencial en la dinámica del ecosistema, de ella dependen muchos de los procesos al interior de éste. El agua mantiene y conecta a los ecosistemas del planeta por medio de su continuo movimiento arriba y debajo de la superficie (Burbano, 2003)¹¹.

Los grandes desplazamientos del agua en la superficie terrestre son bien conocidos: evaporación, por la energía solar, del agua de los acuíferos, lo que produce *humedad atmosférica*; condensación de este vapor en forma de nubes arrastradas por el viento; enfriamiento de las nubes hasta precipitar en forma de lluvia o de nieve;

¹¹ BURBANO, Martha; Análisis biogeoquímico de los nutrientes del agua lluvia y agua que pasa a través del follaje en un ecosistema subandino antropizado. Popayán, 2003.

absorción de las precipitaciones por el suelo, o deslizamiento por la superficie del mismo; retorno a los acuíferos (Duvigneaud,1978)¹².

En este ciclo dinámico el agua contribuye a la incorporación de elementos y compuestos que se encuentran suspendidos en la atmósfera como cationes y aniones K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , y Na^+ (Duvigneaud,1978)¹³, que sirven como nutrientes al sistema; y algunos otros como: SO_4^- , NH_4^+ , SO_2 que pueden ser agentes polucionantes (Chang, 1999)¹⁴, o causar alteraciones al sistema natural, si se encuentran en concentraciones más altas a las normales.

A su vez, el agua actúa como un regulador de los balances químicos dentro de éste, pues además de ser un disolvente único, posee propiedades especiales como su capacidad para actuar como ácido o base (Chang,1999)¹⁵, que le confieren facultad neutralizadora o *Buffer* dentro del ecosistema, lo que hace que este sea capaz de neutralizar algunas de las perturbaciones que se presenten por adición o carencia de los iones y compuestos antes mencionados o en su defecto disminuir sus efectos sobre el ambiente.

4.1.1. Comportamiento químico del agua

4.1.1.1 Estabilidad de la molécula de agua: El agua pura es un compuesto muy estable, es decir, requiere de mucha energía para descomponerse en sus elementos químicos (para romper un mol de enlaces H-O se necesitan 110 kcal). Es tan estable que se requiere de una temperatura de 2700 °C a una presión de una atmósfera para que se descomponga. La estabilidad de la molécula de agua es evidencia de la fuerza de los enlaces covalentes entre los átomos de hidrógeno y oxígeno que la forman.

a) Comportamiento con los metales.

El agua reacciona con diferentes elementos químicos produciendo hidrógeno.

Reacciones típicas de metales alcalinos con el agua:



proceso de oxidación: $2(Li^0 \rightarrow Li^{+1} + e^-)$ el litio se oxida.

¹² DUVIGNEAUD., Op. cit., pag 20.

¹³ Ibid., pag 24.

¹⁴ CHANG, Op. cit., pag 20.

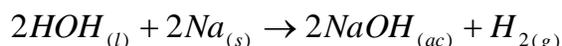
¹⁵ Ibid., pag 26.

proceso de reducción: $2H^{1+} + 2e^{-} \rightarrow H_2^0$ el hidrógeno se reduce.

Como el litio se oxida entonces actúa como agente reductor y como el hidrógeno se reduce entonces actúa como agente oxidante (como un hidrógeno de la molécula H_2O se reduce entonces se dice que el agua actúa como agente oxidante)¹⁶.

Los metales muy reactivos como el sodio y el potasio reaccionan violentamente con el agua fría, liberando hidrógeno y formando la solución de hidróxido correspondiente.

La reacción química entre el sodio y el agua se representa mediante la ecuación química siguiente:



La reacción química entre el potasio y el agua se representa mediante la ecuación química siguiente:

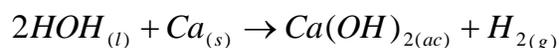


El sodio, el potasio, el rubidio y el cesio reaccionan con el agua a temperatura ambiente tan rápidamente que el hidrógeno se inflama por la energía liberada, produciendo agua con el oxígeno del aire de acuerdo a la ecuación química siguiente:



$$\Delta G = +118kcal/mol$$

El calcio y el litio reaccionan más lentamente con el agua que el sodio, el potasio, el rubidio y el cesio. La reacción del calcio con el agua a temperatura ambiente se representa mediante la ecuación química siguiente:



El agua se usa en la producción comercial del hidrógeno, haciendo circular mezclas de hidrocarburo y vapor de agua sobre un catalizador de níquel a temperaturas elevadas. La reacción del hidrocarburo más sencillo, el metano, se representa mediante la ecuación química siguiente (Energía y cambios de pH)¹⁷:

¹⁶ Energía y cambios de pH. Comportamiento químico del agua [online] disponible en la página de Internet http://www.sagan-gea.org/hojaredagua/paginas/34_agua.html. Miami 2003.

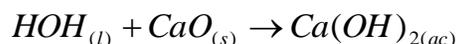
¹⁷ Energía y cambios de pH Op cit., Pag 26



b) Comportamiento del agua con los óxidos metálicos.

Los óxidos de muchos metales son insolubles en el agua y el agua tiene poco o ningún efecto sobre ellos. Pero el agua sí reacciona con los óxidos de los metales muy activos. Los óxidos de sodio, potasio, calcio y bario reaccionan con el agua produciendo el hidróxido correspondiente y son solubles.

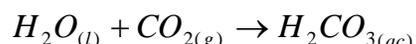
La reacción química entre el agua y el óxido de calcio se representa mediante la ecuación química siguiente:



c) Comportamiento del agua con los óxidos no metálicos.

Los óxidos de no metales como el carbono, el azufre y el fósforo forman compuestos moleculares con enlaces covalentes polares reaccionan con el agua produciendo el ácido correspondiente¹⁸.

La reacción química entre el agua y el dióxido de carbono se representa mediante la ecuación química siguiente:



La ionización del agua pura y la escala de pH

La diferencia del comportamiento físico-químico, de las propiedades de los compuestos electrovalentes y los compuestos covalentes es el resultado de las diferencias en las estructuras químicas de sus moléculas. La conductividad eléctrica es una de esas propiedades y se puede probar fácilmente mediante un circuito eléctrico y una solución acuosa de un compuesto de estos tipos. En general, a todos los compuestos químicos que en solución acuosa conducen una corriente eléctrica se les llama electrolitos.

El agua pura conduce poca corriente eléctrica y puede considerarse como no conductora de la electricidad. Se ioniza en una proporción de aproximadamente dos moléculas en mil millones.

¹⁸ Energía y cambios de pH. Opcit. Pp 27.

Probablemente, la ionización de la molécula de agua (óxido de hidrógeno) comience con la formación de un enlace por puente de hidrógeno entre dos moléculas y produce la formación de los iones hidronio e hidroxilo (oxidrilo). Se representa mediante la ecuación química:

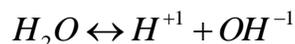


El ion H_3O^+ es un protón hidratado (H^+H_2O) y se conoce como ion hidronio. En cualquier reacción química en que intervenga el ion hidronio, la molécula de agua se considera como reactivo y por comodidad, se escribe el ion hidronio como H^+ o $H^+_{(ac)}$. En todos estos casos se entiende que este ion existe en forma hidratada en solución acuosa.

El agua se ioniza muy poco por autoionización, se le conoce como proceso de autoprotólisis. Las mediciones de la conductividad eléctrica del agua pura a 25°C y una presión de una atmósfera muestran que las concentraciones de iones hidronio e hidroxilo son: 1 mol H_3O^+ /10⁷ litros de H_2O = 10⁻⁷ mol de H_3O^+ /L de H_2O y de 1 mol OH^- /10⁷ litros de H_2O = 10⁻⁷ mol de OH^- /L de H_2O .

El grado de ionización del agua puede expresarse en %, calculando la concentración de los iones hidronio y de los iones hidroxilo, en moles de iones/mol de H_2O . Es aproximadamente de 0.0000002 % a 25°C y una presión de una atmósfera.

En 1887, Svante August Arrhenius (1859-1927)¹⁹ introdujo la teoría de la ionización en las soluciones de electrolitos, postuló la formación de iones en soluciones acuosas y definió a un ácido como un compuesto que al entrar en solución acuosa produce el ion hidrógeno (H^+), y una base como un hidróxido que al disociarse en agua produce el ion oxhidrilo (OH^-).



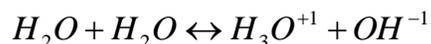
En 1923, según la teoría de Bronsted (1879-1947)-Lowry (1847-1936)²⁰ una reacción ácido-base es una competencia entre dos especies químicas por un ion hidrógeno (H^+), el ganador se llama base y el perdedor ácido. Una base es un aceptor del ion hidrógeno y un ácido un donador del ion hidrógeno. Como el isótopo más estable del hidrógeno es el hidrógeno 1 y su ion es un protón, se define ácido como el donador (perdedor) de protones y una base como un aceptor (ganador) de protones.

¹⁹ Svante August Arrhenius en shakhashir, bassam, demonstrations in chemistry. Universidad de wisconsin, wisconsin 1989. vol 3, pp 3-26

²⁰ Bronsted-Lowry. Acids and Bases [online] disponible en Internet en la pagina web [www.nqu.edu/classes/tuckerman/honors.Chem/lectures/lectures 21 / node 3. html](http://www.nqu.edu/classes/tuckerman/honors.Chem/lectures/lectures%2011/node%203.html). Marck Tuckerman 2003 11 20. pp 3.

El agua puede comportarse como ácido o como base (álcali, hidróxido) dependiendo de la sustancia con la que reaccione.

El agua muestra características tanto de ácido como de base cuando reacciona consigo misma y se establece un equilibrio dinámico, que se representa mediante la ecuación química de la disociación o ionización del agua químicamente pura²¹:



Su constante de equilibrio es: $K_e = [H_3O^{+1}] [OH^{-1}]/[H_2O]^2$, de donde $K_e[H_2O]^2 = K_w = [H_3O^{+1}][OH^{-1}]$, donde [] representa la concentración molar. A K_w se le llama producto iónico del agua. Como la reacción de disociación del agua es una reacción endotérmica, de acuerdo al principio de Le Chatelier, K_w se incrementa al aumenta la temperatura²².

El valor de K_w se puede determinar mediante varios métodos experimentales diferentes, entre los que está la conductividad. La conductividad del agua químicamente pura es de $5.5 \times 10^{-8} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ a 25 °C.

Como el grado de disociación del agua pura a 25 °C es $\alpha = 1.81 \times 10^{-9}$, las concentraciones molares (moles/litro que se representa por M) en el equilibrio de los iones hidronio (H_3O^{+1}) y oxhidrilo (OH^{-1}) son a 25 °C:

$$[H_3O^{+1}] = [OH^{-1}] = (1000 \text{ g/L})/18 \text{ g/mol}(1.8 \times 10^{-9}) = 1.0 \times 10^{-7} \text{ M.}$$

Al sustituir estos valores para k_w

$$K_w = [H_3O^{+1}] [OH^{-1}] = (1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/L}) (1.0 \times 10^{-7} \text{ mol/L}) = 1.0 \times 10^{-14} (\text{mol/L})^2 \text{ }^{23}.$$

Se dice que una solución acuosa cuando tiene $[H_3O^{+1}] = [OH^{-1}]$ es neutra; mientras que cuando tiene $[H_3O^{+1}] > [OH^{-1}]$ la solución es ácida y cuando tiene $[H_3O^{+1}] < [OH^{-1}]$ la solución es alcalina.

El producto iónico del agua siempre es constante en solución acuosa, a una temperatura determinada, con independencia de la concentración de iones H_3O^{+1} o de OH^{-1}

La expresión $pX = 1/\log X$, se usa para definir algunas cantidades que se utilizan en química como: el potencial de hidrógeno (pH).

²¹ Energía y cambios de pH., Op cit pag 26,27,28.

²² Ibid

²³ Energía y cambios de pH., Op cit, pag 26,27,28,29

$$\text{pH} = 1/\log [\text{H}_3\text{O}^{+1}] = \log 1 - \log [\text{H}_3\text{O}^{+1}] = -\log [\text{H}_3\text{O}^{+1}]$$

Y el potencial de hidroxilo (pOH).

$$\text{pOH} = -\log \{\text{OH}^0\} \text{ y el } \text{pKw} = -\log \text{Kw}.$$

Por lo tanto, una solución acuosa neutra tiene un pH = 7, una ácida tiene un pH < 7 y una alcalina tiene un pH > 7 a 25 °C. Cuanto más bajo sea el valor del potencial de hidrógeno tanto más ácida será la solución y cuanto más grande sea el valor del pH tanto más alcalina es la solución²⁴.

Como la concentración molar del ion hidronio es de 10^{-7} mol de $\text{H}_3\text{O}^+/\text{L}$ de H_2O , entonces el potencial de hidrógeno del agua pura es:

$$\text{pH} = \log 1/0.0000001 = \log 1/10^{-7} = \log 10^7 = 7$$

Como $\text{Kw} = [\text{H}_3\text{O}^{+1}] [\text{OH}^{-1}]$, entonces $\text{pKw} = \text{pH} + \text{pOH} = 14$, por lo que la escala del potencial de hidrógeno varía de cero a catorce.

La determinación de un ácido o de una base (álcali) se hace por el procedimiento conocido como titulación ácido-base con el auxilio de un indicador químico (compuesto orgánico que se usa para determinar el punto de equivalencia en las reacciones de neutralización) adecuado para el caso y con base en el proceso de neutralización ácido-base (formación de sal y agua) o con un aparato electrónico conocido como potenciómetro o peachímetro²⁵.

4.1.1.2 Capacidad amortiguadora del agua.

4.1.1.2.1 Disolución amortiguadora o reguladora. Es es una disolución de un ácido débil o una base débil y su sal. La disolución tiene capacidad para resistir los cambios de pH cuando se agregan pequeñas cantidades tanto de ácidos como de bases. Estas disoluciones son muy importantes tanto en los sistemas químicos como biológicos.

Una disolución reguladora debe contener una concentración relativamente grande de ácido para reaccionar con los iones OH^- que se le añadan; y también debe tener una concentración semejante de base para que reaccione con la cantidad de iones H^+ que se le añadan. Además, los componentes ácidos y básicos del amortiguador no deben consumirse el uno al otro en una reacción de neutralización²⁶.

Estas soluciones en cierta forma tienen la capacidad de mantener una composición estable estable cuando se agregan o se eliminan varios componentes.

²⁴ Ibid.

²⁵ Energía y cambios de pH, Op cit, pag 30.

²⁶ CHANG, Reymond. Química. Mexico 1998.

4.1.1.2.2 Agua como regulador. La composición mineral de muchas aguas naturales esta regulada por un sistema en el que intervienen silicatos. El pH del 95% de las aguas naturales se encuentra en un intervalo de 6 a 9, en la mayoría de las guas los desechos casi siempre estan bien regulados en el intervalo de pH de 6 a 6.6 gracias al sistema carbonato.

Lo mismo que que la amortiguación del agua da como resultado la resistencia a la disminución del ph cuando se adiciona un acido fuerte, puede demostrarse que resiste la elevación del pH cuando se adiciona una base fuerte (Jenkins, 1990)²⁷.

4.2 Precipitación

El ciclo hidrológico comprende tres fases generales que son la evaporación, la precipitación, la escorrentía, estando determinado por la unidad solar y la gravedad (Burbano, 2003)²⁸. El agua superficial de los océanos, ríos, lagos, mares, quebradas, etc. es evaporada por acción del calor del sol formando las nubes, el vapor de agua atmosférico producido de esta forma puede condensar alrededor de partículas giroscópicas presentes en la atmósfera. Las gotas de agua que se forman son lo suficientemente pesadas para caer como precipitación por influencia de la gravedad (Carvajal, et al,1985)²⁹.

Las masas de aire adquieren humedad al pasar sobre masas de agua cálida o sobre superficies de tierra mojada. La humedad, o vapor de agua, es elevada entre las masas de aire por turbulencia y convección. Este transporte necesario para enfriar y condensar el vapor es el resultado de varios procesos, y su estudio suministra una clave para la comprensión de la distribución de las lluvias en las distintas partes del mundo.

Se diferencian dos procesos de precipitación: 1) Precipitación seca: granizo, nieve y aerosoles que se da por evaporación de gotas de agua a temperaturas menores a la de congelación en pequeños cristales de hielo que más tarde caen a capas más cálidas y se funden, y 2) Precipitación líquida: lluvia, lloviznas, chubascos dada por la unión de pequeñas gotitas en gotas mayores que caen a velocidades superiores (Inzusa 2003)³⁰.

El agua se encuentra en el aire como vapor de agua, como gotas de agua o como cristales de hielo, de acuerdo con la temperatura del aire. Esta también determina el tipo de precipitación que pueda caer de la nube (lluvia, nieve, granizo o aguanieve).

²⁷ JENKINS, David. Química del agua. Mexico, 1990.

²⁸ BURBANO, Op cit., pag 24.

²⁹ CARVAJAL, et al,1985

³⁰ INZUSA Juan. Meteorología descriptiva . Nubes y precipitación [online] disponible en internet en la pagina web [www. Ude.cl /Zjinzunsa/meteo/ cap 6pdf](http://www.Ude.cl/Zjinzunsa/meteo/cap6pdf). Departamento de fisica de la atmosfera y del océano Concepción chile. Chile 2003. p 160.

- Algunas áreas como las tropicales, donde la temperatura es superior a 0°C, la lluvia se forma por un proceso llamado *coalescencia*. Las nubes están formadas por millones de gotitas de agua, que al chocar entre sí se unen, formando gotas más grandes. Gradualmente van aumentando de tamaño hasta que son demasiado pesadas para ser sostenidas por las corrientes de aire y caen como lluvia.
- En áreas más frías, las nubes pueden extenderse hasta donde la temperatura del aire es inferior al punto de congelamiento. Entonces, estas nubes son una mezcla de gotas de agua y cristales de hielo abajo y cristales de hielo y gotas superfrías (permanecen como gotas aún cuando la temperatura es inferior a 0°C) arriba. Aquí, además de la *coalescencia*, se da otro proceso llamado *acrecencia*. Los cristales de hielo (llamados entonces, "gérmenes de precipitación") atraen a esas gotas superfrías, que se congelan sobre ellos. Al crecer y unirse entre sí, esos cristales forman los copos de nieve. Donde la temperatura cerca de la superficie es superior a 0°C, la nieve se derrite antes de llegar al suelo y se precipita en forma de lluvia. El agua nieve es una mezcla de copos de nieve y gotas de lluvia.

El granizo se forma en los cumulonimbos (nubes de tormenta), que tienen dentro fuertes corrientes de aire ascendentes y descendentes. La temperatura en la parte superior de esas nubes es muy inferior a 0°C. Cuando los cristales de hielo (gérmenes de precipitación) corren en su interior, chocan con las gotas superfrías de agua y se recubren de capas de hielo. Más capas de hielo se agregan cuando esas "piedras" son empujadas arriba y abajo dentro de la nube. Finalmente se hacen demasiado pesadas para ser sostenidas por las corrientes de aire dentro de la nube y caen. Si la temperatura en la superficie es muy elevada, puede derretirse antes de llegar al suelo, cayendo entonces en forma de lluvia de grandes gotas.

Esta precipitación es recibida por la cobertura vegetal que se comporta como un filtro que retrasa la llegada de las aguas de precipitación a los ríos (Likens, et al., 1977)³¹. Frecuentemente la vegetación modifica la intensidad y distribución de la precipitación que cae sobre y a través de todas sus estructuras y puede interceptar hasta 50% de la lluvia que cae sobre sus hojas. La distribución de las lluvias es muy irregular, apreciándose fuertes contrastes de unas zonas a otras. La distribución anual de lluvia en la Tierra refleja la influencia de la distribución de las tierras, de los mares y de la altura del terreno (Universidad de San Miguel, 2004)³².

³¹ LIKENS, E. y BORMAN, F. forested ecosystem. New York, 1977.

³² Distribución de las lluvias en Colombia. Universidad de San Miguel. Colombia en movimiento. Culiacán Sinaloa. Marzo 2004.

4.3 Deposición de partículas secas (DPS).

4.3.1 Partículas y aerosoles

- Aerosoles primarios
- Aerosoles secundarios
- Impacto sobre el clima

En la atmósfera permanecen suspendidas sustancias muy distintas como partículas de polvo, polen, hollín (carbón), metales (plomo, cadmio), asbesto, sales, pequeñas gotas de ácido sulfúrico, dioxinas, pesticidas, etc. Se suele usar la palabra aerosol para referirse a los materiales muy pequeños, sólidos o líquidos. Partículas se suele llamar a los sólidos que forman parte del aerosol, mientras que se suele llamar polvo a la materia sólida de tamaño un poco mayor (de 20 micras o más). El polvo suele ser un problema de interés local, mientras que los aerosoles pueden ser transportados muy largas distancias.

Según su tamaño pueden permanecer suspendidas en la atmósfera desde uno o dos días, las de 10 micrómetros o más, hasta varios días o semanas, las más pequeñas. Algunas de estas partículas son especialmente tóxicas para los humanos y, en la práctica, los principales riesgos para la salud humana por la contaminación del aire provienen de este tipo de polución, especialmente abundante en las ciudades³³.

Aerosoles primarios

Los aerosoles emitidos a la atmósfera directamente desde la superficie del planeta proceden principalmente, de los volcanes, la superficie oceánica, los incendios forestales, polvo del suelo, origen biológico (polen, hongos y bacterias) y actividades humanas.

Aerosoles secundarios

Los aerosoles secundarios se forman en la atmósfera por diversas reacciones químicas que afectan a gases, otros aerosoles, humedad, etc. Suelen crecer rápidamente a partir de un núcleo inicial.

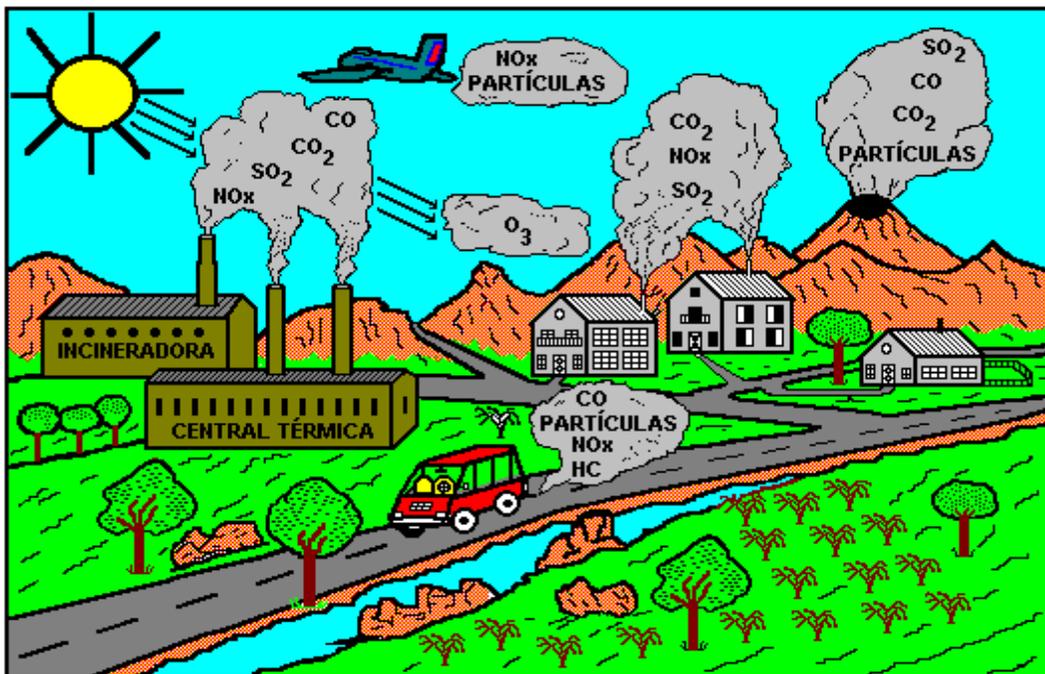
³³ ECOSUR. Sustancias que contaminan la atmósfera. Recolección, Transporte y Disposición final de Residuos Industriales, Patológicos, Especiales y Peligrosos Escuela Superior de Ing. Universidad de Navarra Octubre 2002.

Entre los aerosoles secundarios más abundantes están los iones sulfato alrededor de la mitad de los cuales tienen su origen en emisiones producidas por la actividad humana. Otro componente importante de la fracción de aerosoles secundarios son los iones nitrato.

La mayor parte de los aerosoles emitidos por la actividad humana se forman en el hemisferio Norte y como no se expanden por toda la atmósfera tan rápido como los gases, sobre todo porque su tiempo de permanencia medio en la atmósfera no suele ser mayor de tres días, tienden a permanecer cerca de sus lugares de producción³⁴.

4.4 Elementos aportados por la precipitación al ecosistema.

Figura 2. Algunos de los elementos contaminantes aportados por la precipitación al ecosistema.



Fuente: Sustancias que contaminan la atmósfera. Ciencias de la tierra y del medio ambiente [online] disponible en la página de Internet <http://www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/10CAtm1/200Conta.htm> libro electrónico, actualizado 2 de Noviembre del 2004.

³⁴ Ibid.

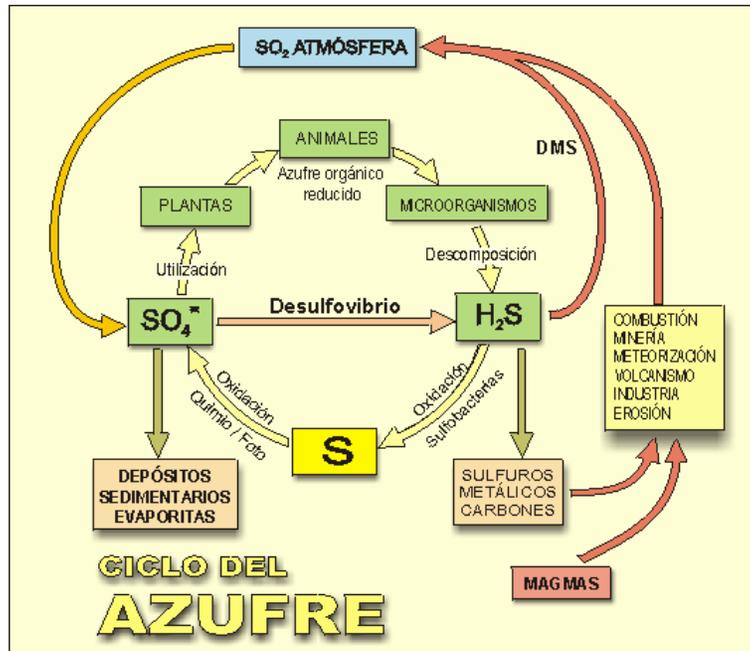
La entrada y salida de los nutrientes está directamente relacionada con las cantidades de agua que se mueven dentro y fuera de un ecosistema. La adquisición de los nutrientes por parte de las plantas y la liberación de estos por su descomposición biológica, se relaciona estrechamente con los patrones de aprovechamiento del agua y con las características del agua que se precipita (Bormann,1967)³⁵.

La precipitación en zonas tropicales contribuye a la entrada de cationes (H^+ , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-), típicamente asociados con el agua de lluvia (Hendry, 1984)³⁶. La concentración química de la precipitación es dominada por iones H^+ los cuales constituyen un 70% del total de la fuerza catiónica, el 30% restante es compartido por NH_4^+ , Ca^{2+} , Na^+ , y K^+ (Likens, 1977)³⁷.

Uno de los iones más importantes y representativos para esta estudio es el SO_4^- y se puede considerar como indicador de la incidencia de la actividad volcánica en la formación de lluvia ácida y cuyo comportamiento se explica a continuación.

4.4.1 Azufre.

Figura 3. Ciclo biogeoquímico del azufre.



³⁵BORMAN, F. The esport of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation of Hurbbarnd Brook. In: Ecology Monogr. Vol 44 (1967)

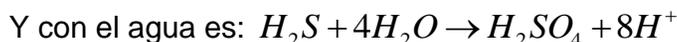
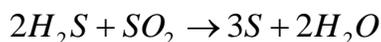
³⁶ HENDRY, Op cit., pag 20.

³⁷ LIKENS, Op cit., pag 20.

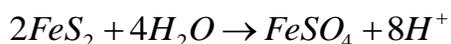
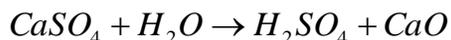
Fuente: Ciclos biogeoquímicos. Ciencias de la tierra y del medioambiente. Disponible en la pagina de Internet [http:// platea. Pntic.mec.es/ Cmarti/ CTMA /biosfera/n.htm](http://platea.pntic.mec.es/Cmarti/CTMA/biosfera/n.htm). Agosto de 2004.

El azufre aunque no es muy abundante se encuentra fácilmente disponible en grandes depósitos de tipo volcánico y manantiales minerales (Restrepo y Vargas.,1951)³⁸, combinado se encuentra en minas o minerales metálicos, sobre todo en forma de sulfatos y sulfuros; en forma de H₂S (ácido sulfhídrico) en las aguas minerales y en las materias orgánicas; en forma de SO₂ (dióxido de azufre) en las fumarolas de los volcanes y en otras combinaciones en los compuestos orgánicos (Felix, et al.,1958)³⁹.

El azufre encontrado en regiones volcánicas se debe a esta reacción (Burbano, 2000):



Los sulfatos se constituyen en la forma más común de encontrar el azufre en el agua y se incorporan al ecosistema por medio de la lluvia y por la solución de rocas que están formadas por compuestos como CaSO₄ y FeS₂, así:



El azufre que acompaña a los combustibles ya sea como parte de las moléculas de combustible o como sulfuro inorgánico casi en su totalidad se oxida a óxido de azufre (SO₂) constituyéndose en uno de los componentes importantes de las emisiones de combustión en fuentes estacionarias.

El SO₂ se oxida lentamente en la atmósfera a trióxido de azufre (SO₃) y ambos se pueden hidrolizar para formar ácidos convirtiéndose en lluvia ácida la cual causa clorosis o pérdida de clorofila, y plasmosis, o daño al material de las hojas en las plantas, estos efectos pueden ocurrir por exposiciones cortas a altas concentraciones o exposiciones largas a bajas concentraciones. En los humanos el SO₂ es soluble y rápidamente es absorbido por el tracto respiratorio superior irritando la mucosa, los animales son un poco menos sensibles a este contaminante.

4.4.1.1. Azufre como contaminante. Los contaminantes están clasificados en dos categorías: contaminantes primarios y secundarios. Los primarios son los

³⁸ RESTREPO, F y VARGAS, L Química Básica: los principios fundamentales de la química general. Colombia, 1951.

³⁹ FELIX, C. Et al. Tratado de química mineral. Bogotá, 1958.

contaminantes inyectados directamente al medio ambiente. Por ejemplo, el monóxido de carbono inyectado por los automóviles. En la atmósfera estos contaminantes pueden reaccionar con otros elementos y, cuando esto ocurre, se produce otros contaminantes denominados secundarios. Es importante aclarar que la lluvia ácida es un contaminante secundario debido a que para poder resolver los problemas generados por ella se tiene que adoptar medidas para reducir las emisiones de los contaminantes primarios que la originan. Muchos factores están involucrados en la problemática de la deposición ácida. De todos estos, los dos contaminantes principales que causan este tipo de precipitación: los compuestos de azufre y los compuestos de nitrógeno⁴⁰.

Dentro de dichos compuestos sulfurados el SO₂ es el principal contaminante y se produce en la combustión de carbón y del petróleo crudo.

El dióxido de azufre (SO₂) es una molécula conformada por un átomo de azufre y dos de oxígeno. Ya en la atmósfera el SO₂ reacciona con el oxígeno dando como resultado una molécula de trióxido de azufre (SO₃). Esta molécula es inestable; por lo tanto, ella reacciona fácilmente con la humedad del aire y así se produce el ácido sulfúrico (H₂SO₄). Este ácido se disuelve en las nubes y, cuando estas se condensan, se precipita como partículas sólidas, lluvia, granizo, nieve, neblina, etc. Algo muy parecido ocurre con los óxidos de nitrógeno. Los óxidos de azufre y nitrógeno son las principales causas de la acidificación tanto del suelo como de las aguas⁴¹.

Los compuestos de azufre son responsables de dos tercios del total de la lluvia ácida y los compuestos de nitrógeno no producen acidificación si los mismos son absorbidos por las plantas. Por dicha razón la polución real producida por los compuestos sulfurados es mayor a los dos tercios antes mencionados (Arboleda et al, 2004)⁴².

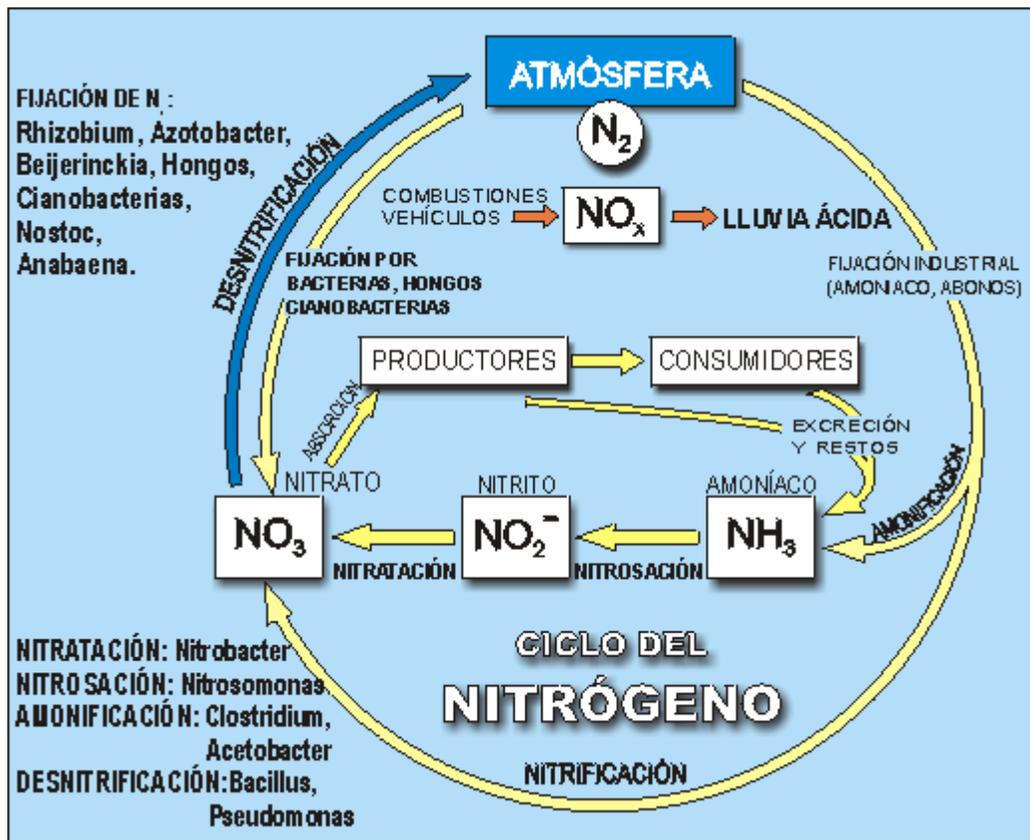
⁴⁰ ⁴⁰ LOS EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA EN EL BALANCE ECOLÓGICO Y SUS IMPLICACIONES ECONÓMICAS [online]. Disponible en la página electrónica: http://usuarios.lycos.es/planeta_verde/lluviaacida.htm. Actualización 27 de diciembre 2004.

⁴¹ Ibid.

⁴² ARBOLEDA Juan, FERNANDEZ Alejandro, LEON Julia. Aspectos sanitarios de los óxidos de azufre como contaminantes atmosféricos. Higiene y sanidad ambiental. Universidad de Granada. España, 2004.pp106-113.

4.4.1.2 Nitrógeno

Figura 4. Ciclo del nitrógeno



Fuente: Ciclos biogeoquímicos. Ciencias de la tierra y del medioambiente. Disponible en la página de Internet <http://platea.pntic.mec.es/Cmarti/CTMA/biosfera/n.htm>. Agosto de 2004.

Aproximadamente el 78% en volumen del aire de la atmósfera es nitrógeno. Una de las fuentes minerales más importantes es el salitre (KNO_3). El nitrógeno es un elemento esencial para la vida y un componente de las proteínas y de los ácidos nucleicos (Chang, 1999)⁴³.

Los óxidos NO_x contribuyen al smog, afectan las plantas y animales y pueden afectar la salud humana, además contribuyen a la lluvia ácida y reaccionan con los

⁴³ CHANG, Op cit., pag 20.

Contaminantes Volátiles Orgánicos o VOCs (definidos como hidrocarburos de 2 a 12 átomos de carbono)⁴⁴ para formar oxidantes fotoquímicos. Las altas concentraciones en el aire parecen como nubes marrones pues el gas absorbe la luz visible preferiblemente en el área azul-verde (MINAMBIENTE, 1997)⁴⁵.

4.4.1.2.1 Nitrógeno como contaminante. Los principales compuestos nitrogenados que contaminan la atmósfera son el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) que son agrupados con la denominación NO_x.⁴⁶

Óxidos de nitrógeno. Dichos óxidos son formados durante todo tipo de combustiones y a diferencia del azufre que proviene en su mayoría del aire necesario para que la misma se efectuó. Incluyen el óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el óxido nitroso (N₂O).

NO_x (conjunto de NO y NO₂). El óxido nítrico (NO) y el óxido de nitrógeno (NO₂) se suelen considerar en conjunto con la denominación de NO_x. Son contaminantes primarios de mucha trascendencia en los problemas de contaminación.

El emitido en mayor cantidad es el NO, pero sufre una rápida oxidación a NO₂, siendo éste el que predomina en la atmósfera. NO_x tiene una vida corta y se oxida rápidamente a NO₃⁻ en forma de aerosol o a HNO₃ (ácido nítrico). Tiene una gran trascendencia en la formación de smog fotoquímico, el nitrato de peroxiacetilo (PAN) e influye en las reacciones de formación y destrucción del ozono, tanto troposférico como estratosférico, así como en el fenómeno de lluvia ácida. En concentraciones altas produce daños a la salud, a las plantas y corroe tejidos y materiales diversos.

Óxido nitroso (N₂O). En la tropósfera es inerte y su vida media es de 170 años va desapareciendo en la estratósfera en reacciones fotoquímicas que pueden tener influencia en la destrucción de la capa de ozono. También tiene efecto invernadero, procede fundamentalmente de emisiones naturales (procesos microbiológicos en el suelo y los océanos) y menos de actividades agrícolas y ganaderas (10% del total).

Otros. Algunos otros gases como el amoníaco (NH₃) son contaminantes primarios, pero normalmente sus bajos niveles de emisión hacen que no alcancen concentraciones dañinas, el amoníaco se emite a la atmósfera y se origina principalmente en el sector agrícola y ganadero⁴⁷.

⁴⁴ SÁNCHEZ Gabriela. Distribución de fuentes de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la ciudad de México. México 2001. pp 10.

⁴⁵ MINAMBIENTE. Plan de manejo ambiental: Parque Nacional Natural de Puracé. Colombia, 1998.

⁴⁶ Acidificación atmosférica, contaminación del aire, nitrógeno como contaminante. En ecología y medio ambiente [online]. Disponible en la dirección electrónica www.rincón.del.vago.com. Salamanca España 2003.

⁴⁷ Ibid.

Debido a que las emisiones de óxidos de azufre están siendo controladas, las emisiones de óxidos de nitrógeno son cada día más importantes como acidificantes del medio ambiente. También ciertos tipos de fertilizantes como los que se observa en la tabla 1, son fuente de compuestos nitrogenados contaminantes (Sustancias contaminantes de la atmosfera, 2004)⁴⁸ liberando cantidades importantes de amoníaco el cual causa un aumento en el pH de las lluvias.

Tabla 1. Algunos fertilizantes Nitrogenados usados en agricultura.

Producto	Tipo de Producto	Composición	Usos en:
Hakaphos amarillo (Polvo)	Fertiriego	Nitrógeno: 17% Fósforo(P ₂ O ₅): 5%Potasio: 19%Magnesio y microelementos	Fórmula para la nutrición balanceada durante floración.
Hakaphos Base (Polvo)	Fertiriego	Nitrógeno: 7 %Fósforo (P ₂ O ₅): 12 %Potasio (K ₂ O): 40 %Magnesio y microelementos	Para las diferentes etapas del cultivo
Hakaphos naranja (Polvo)	Fertiriego	Nitrógeno: 15%Fósforo(P ₂ O ₅): 5%Potasio (K ₂ O): 30%Magnesio y microelementos	Para la etapa final del cultivo
Hakaphos verde (Polvo)	Fertiriego	Nitrógeno: 15%; Fósforo (P ₂ O ₅):10%;Potasio:15%Magnesio y microelementos	Etapla inicial del cultivo
Sulfonitrato de Amonio (Granulado)	Fertilizante para suelo	Nitrógeno: 26% Azufre: 14 % (Sulfato)	Cereales (mejora la calidad panadera), frutales, hortícolas, algodón, papa, maíz, tabaco, vid
Nitrato de Magnesio	Fertilizante		Cultivos con requerimiento de magnesio y nitrógeno.

Fuente: Agro información sobre preparación de terrenos para cultivo [online]. Disponible en la pagina de Internet [http:// www. Agroinformacion.com](http://www.Agroinformacion.com). Perú. Actualización Noviembre de 2004.

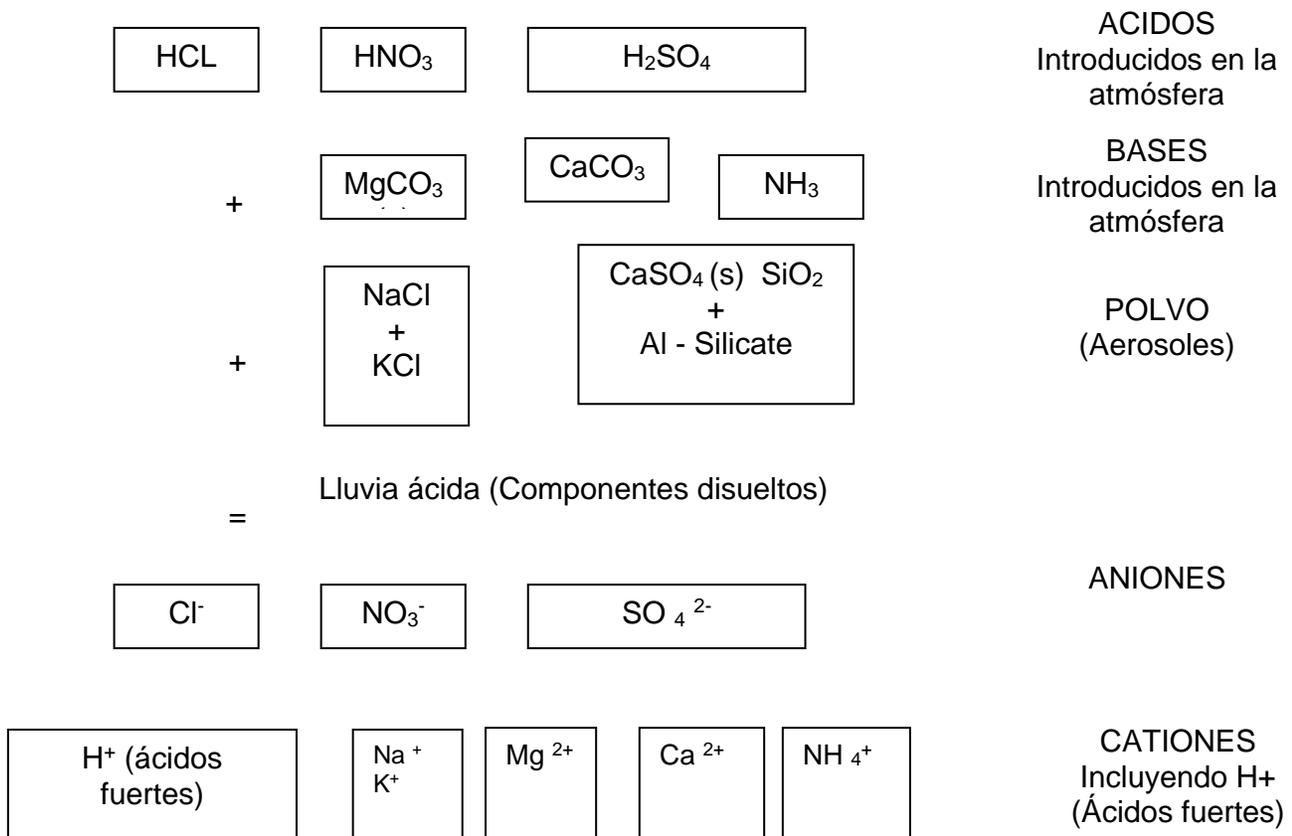
Las grandes cantidades de contaminantes nitrogenados provocan una sobre fertilización de los suelos. La mayoría de las plantas se adaptan a una deficiencia de nitrógeno pero cuando se produce el fenómeno opuesto, aparecen daños a la vegetación y se causa problemas secundarios como en la potabilidad de las aguas y los fenómenos de eutroficación de los cuerpos de agua.

⁴⁸ Sustancias que contaminan la atmosfera. Ciencias de la tierra y del medio ambiente [online]. Libro electronico, disponible en Internet en la pagina [www1. ceit. Es/ asignaturas/ecologia/Hipertexto](http://www1.ceit.es/ asignaturas/ecologia/Hipertexto). España Noviembre de 2004.

Además, la acidificación de los suelos producida por la reacción de nitratos provoca la liberación de sustancias peligrosas como el aluminio que ataca las raíces de los árboles y que al pasar a las aguas subterráneas llega a los lagos causando daño a las colonias de peces presentes en este ecosistema.

4.4.2 Origen de los iones en precipitación

Figura 5. Contenido de iones en la atmósfera



Fuente: adaptado de Stumm, W. & Morgan, J

Los ecosistemas terrestres participan en los ciclos biogeoquímicos de la tierra a través de las entradas y salidas del sistema. La entrada biogeoquímica de elementos a los ecosistemas (Figura 5), puede ser el resultado de tres importantes fuentes: La geológica, la meteorológica y la biológica. La entrada geológica se define como la disolución o transporte de materia particulada dentro del sistema por movimiento de agua o acción coluvial o ambas.

La entrada meteorológica al ecosistema es a través de la atmósfera y está compuesta de adiciones de materiales gaseosos y de materia particulada o disuelta en la precipitación, partículas en suspensión y otros materiales arrastrados por el viento. La entrada biológica resulta de la actividad animal y del hombre, (Bormann; Likens, 1967)⁴⁹

La solubilidad de los gases atmosféricos, sean de origen natural o actividad antrópica en el agua atmosférica es muy conocida (Borman, 1977) ⁵⁰., pero el origen de compuestos no volátiles como metales pesados que se encuentran como coloides, partículas minerales (sólidos en suspensión), o fases disueltas (cationes o iones complejos), partículas sólidas que incluyen una gran variedad de minerales, fases disueltas que pueden a su vez ser capturadas por adsorción o absorción en arcillas o hidróxidos presentes en el agua que se precipita no lo es. Adicionalmente, los compuestos orgánicos pueden constituir fases con gran capacidad de captura de cationes metálicos, que en ocasiones dan lugar a fases extremadamente tóxicas (p.ej., metilmercurio: CH₃Hg) (R. Oyarzun & P. Higuera 2004)⁵¹. La dispersión de las sales oceánicas tales como: NaCl y MgSO₄, en aerosoles atmosféricos es un proceso altamente conocido (Manahan.S, 1993)⁵². Una parte del Calcio y potasio en precipitación puede ser atribuida a los recursos marinos (Cogbill; Likens, 1974)⁵³.

Los cationes y aniones en precipitación pueden tener su origen en la variedad de los recursos, incluyendo el spray oceánico, polvo terrestre, gases polucionantes partículas de suelo aerosoles en la atmósfera (que pueden ser alterados químicamente para producir cationes) y emisiones volcánicas (Likens; Borman, 1977)⁵⁴.

Algunos casos de nitratos y sulfuros encontrados en el agua de precipitación pueden ser generados por actividad biogénica o por la combustión de combustibles fósiles.

4.4.3 Precipitación ácida. La lluvia ácida o precipitación ácida cada año causa pérdidas por cientos de millones de dólares por daños a la infraestructura en todas partes del mundo (Chang., 1999)⁵⁵. También es perjudicial para la vegetación y la vida

⁴⁹ BORMAN, F Y LIKENS, G. Nutrient Cycling In: Science. Vol. 155 (1967).

⁵⁰ BORMAN, Op cit., pag 38.

⁵¹ OYARZUN R. & HIGUERAS P. Minerales, metales, compuestos químicos, y seres vivos: una difícil pero inevitable convivencia [online] disponible en la pagina de Internet http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia_Minera/Mineria_toxicidad.htm .Actualización 25 de Diciembre de 2004.

⁵² MANAHAN, S. Fundamental environmental chemistry. Lewis Publisher. New York, 1993.

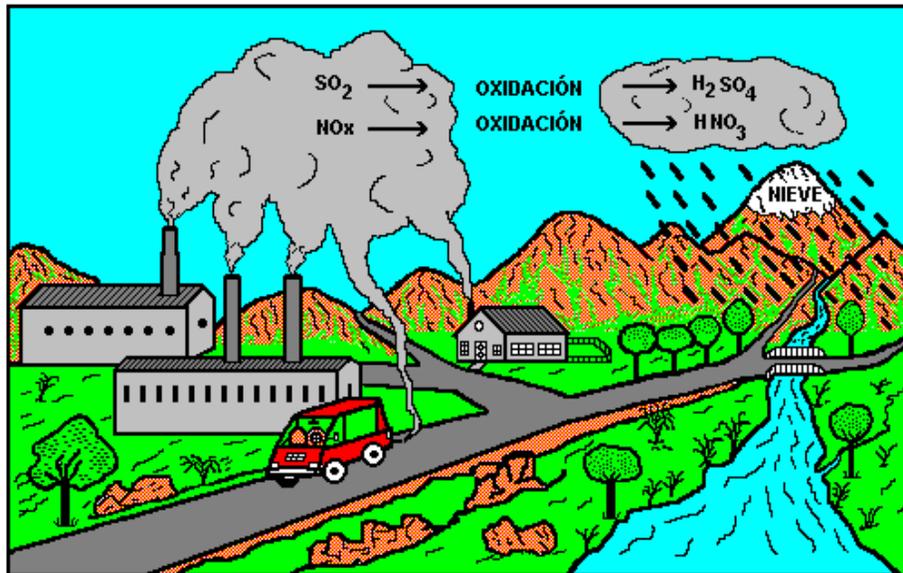
⁵³ COGBILL y LIKENS, G. The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hubbard Brook In: Ecology monogr. Vol 44, 1977.

⁵⁴ LIKENS, E. y BORMAN, F. forested ecosystem. New York, 1977.

⁵⁵ CHANG, Op cit., pag 20.

acuática, acidifica los suelos debido fundamentalmente a la liberación de Al^{+++} (Bravo; Giraldo, 2001)⁵⁶ y es tóxica para los seres humanos.

Figura 6. Formación de la lluvia ácida.



Fuente: Higiene, Seguridad y Protección Ambiental Universidad Católica de Argentina [online] tomado de Lars O. y Likens, Gene E. "Polvo atmosférico y lluvia ácida". Investigación y Ciencia. Febrero, 1997. Barcelona. Prensa Científica.

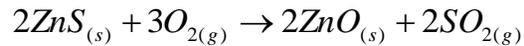
Este es un evento físico-químico de deterioro ambiental, que se inicia con emisiones de dióxido de azufre y óxido de nitrógeno a la atmósfera, gases precursores liberados por automóviles, chimeneas de fábricas, industrias como fundidoras, refinerías y plantas de energía eléctrica, siderúrgicas que queman combustibles fósiles como carbón y petróleo; así como por fuentes naturales como la actividad volcánica. Por reacciones químicas, estos gases se transforman y se combinan con el vapor de agua en las nubes para formar ácido sulfúrico y nítrico. Cuando cae la precipitación de estas nubes es altamente ácida, con el valor del pH de 5.6 o más bajo (Kamss, 2001)⁵⁷.

Como el CO_2 atmosférico está en equilibrio con el agua lluvia, no se esperaría que estuviera a un pH menor que 5.5. El dióxido de azufre y en menor grado los óxidos de nitrógeno de las emisiones, son los responsables de una acidez mayor en el agua lluvia. Los óxidos ácidos como el SO_2 , reaccionan con el agua y forman los correspondientes ácidos; por otra parte existen muchos metales combinados con el

⁵⁶ BRAVO y GIRALDO, Op cit., pag33.

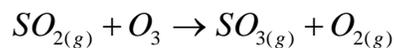
⁵⁷ KAMSS, Lijja. Efectos de la lluvia ácida. México. Estaciones Meteorológicas de la ENP, 2001.

azufre en forma natural. Por ejemplo para la extracción de metales, es necesario calentar el sulfuro metálico en aire para formar el óxido del metal y SO₂.

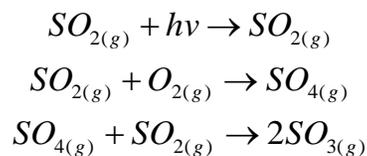


Aunque la fundición de los metales es una fuente muy importante de SO₂, la mayor parte del SO₂ que contamina la atmósfera proviene de la quema de combustibles fósiles en la industria, las plantas generadoras de electricidad, la combustión de automóviles diesel y gasoil, el uso de gases domésticos en los hogares y las emisiones volcánicas.

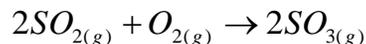
En total entre 50 y 60 millones de toneladas de SO₂ se liberan a la atmósfera cada año. Una parte se oxida a SO₃ al reaccionar con ozono en la troposfera:



Las moléculas de SO₂ también pueden ser foto excitadas por la luz del sol:



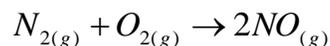
En otra serie de reacciones, las partículas sólidas de la atmósfera pueden actuar como catalizadores heterogéneos de la reacción.



El SO₃ se transforma en H₂SO₄ con el agua de lluvia (Chang., 1999)⁵⁸.

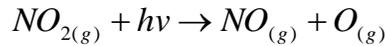


El óxido nítrico se produce por la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno atmosféricos a temperaturas elevadas ej: en el interior de los motores de los automóviles.

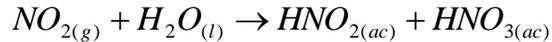


El óxido nítrico se libera a la atmósfera y rápidamente se oxida a dióxido de nitrógeno:

⁵⁸ CHANG, Op cit., 20

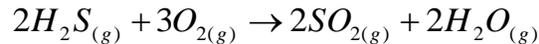


Los óxidos de nitrógeno reaccionan con el agua como en la ecuación siguiente (GARRITZ, J y CHAMIZO, A, 1986)⁵⁹:

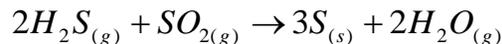


4.5 Los volcanes y la lluvia ácida

Las erupciones volcánicas son las más espectaculares manifestaciones naturales de energía, un volcán activo emite gases, líquidos y sólidos. Los principales gases que emanan a la atmósfera N₂, CO₂, HCl, HF, H₂S y vapor de agua. Se estima que dos tercios del azufre que hay en el aire proviene de los volcanes. A temperaturas elevadas, el sulfuro de hidrógeno gaseoso emitido por un volcán se oxida en el aire:



Parte del SO₂ se reduce con más H₂S del volcán a azufre elemental y agua



El resto de SO₂ se libera a la atmósfera, donde reacciona con agua y forma la lluvia ácida (Chang., 1999)⁶⁰.

4.6 Efectos de la lluvia ácida

Las partículas de azufre y nitrógeno actúan como núcleos de condensación y junto con el agua forman gotas.

En este proceso también se hacen importantes los metales tóxicos, sobre todo plomo y cadmio que forman parte de estas nubes contaminantes. Así como amonio, trazas de otros metales y otros micropolucionantes orgánicos.

El impacto de la lluvia ácida es muy corrosivo. Los ácidos pueden combinarse con los materiales y producir otro compuesto que no tenga la misma consistencia.

Los efectos de la lluvia ácida se pueden sintetizar en los siguientes puntos:

⁵⁹ GARRITZ, J y CHAMIZO, A. Química. Iberoamericana, 1986.

⁶⁰CHANG, Op cit., pag 20.

- Las estructuras metálicas se corroen (se llegan a deteriorar severamente los metales como el plomo y el cobre)
- El suelo se desmineraliza y se degradan las aguas subterráneas.
- Afecta la fotosíntesis, haciéndola más lenta y provocando un grave peligro de muerte a la flora.
- Se reduce la productividad de bosques y cultivos.
- Lagos y ríos ácidos son incapaces de sostener su población de peces, se ha demostrado que el límite de tolerancia de muchos organismos acuáticos es a un pH ácido de 4 unidades de pH.
- Los suelos pobres en caliza y recubiertos de capas de tierra poco profunda son presa fácil de los efectos de la lluvia ácida.
- Los óxidos de nitrógeno reducen la eficacia de las defensas pulmonares propiciando infecciones respiratorias en el hombre.
- El dióxido de azufre irrita la mucosa respiratoria: puede aumentar los síntomas de los bronquíticos y asmáticos e incrementan las enfermedades en la red de agua potable.

La lluvia ácida ocasiona el crecimiento retardado, el daño o la muerte de los bosques. La lluvia ácida ha estado implicada en la degradación de bosques y suelos de muchas regiones. Por lo general no mata directamente a los árboles, es más probable que los debilite al dañarles las hojas, limitar los nutrientes que reciben, o exponerlos a sustancias tóxicas que escapan lentamente del suelo. Con mucha frecuencia, los daños que sufren los árboles o su muerte son la consecuencia de efectos de la lluvia ácida combinados con uno o más factores agresores. El agua ácida disuelve los nutrientes y minerales útiles del suelo y luego los arrastra consigo antes de que los árboles y otras plantas puedan usarlos para su desarrollo. Al mismo tiempo, la lluvia ácida permite que escapen al suelo sustancias que son tóxicas para los árboles y las plantas, tales como el aluminio. Los bosques de las regiones montañosas elevadas con frecuencia se hallan expuestos a una mayor acidez que otros bosques porque tienden a estar rodeados de nubes y niebla ácidas, cuyo grado de acidez es superior al de la lluvia. Se considera que cuando las hojas están frecuentemente cubiertas por la niebla ácida, los nutrientes de sus hojas y agujas se disuelven. Esta pérdida de nutrientes en su follaje disminuye la resistencia de los árboles a los daños producidos por otros factores ambientales, particularmente el frío del invierno.

4.7 Monitoreo de lluvia ácida.

Hace más de dos décadas el hombre ha ido tomando conciencia del impacto creciente de los poluentes atmosféricos sobre los ecosistemas terrestres y acuáticos; en particular el potencial de alteración de las propiedades químicas y biológicas en el suelo y el agua (VanBremen et al, 1984)⁶¹. Esta preocupación naciente guió a los investigadores en el desarrollo de estrategias que hoy en día

⁶¹ VANBREEMEN, N y DRISCOLL. Acid deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters In: Nature. Vol 307, 1984.

permiten el entendimiento de muchos de los temas antes desconocidos o poco explorados; una de las estrategias más comunes en estudio de tipo ambiental es el monitoreo. En Colombia existen estudios de monitoreo para lluvia ácida realizados en algunas de las principales ciudades que nos muestran variables importantes en el desarrollo de las investigaciones, sobre precipitaciones ácidas; variables físico-químicas, climáticas y geomorfológicas.

4.7.1 Variables físicas y químicas.

Tomando en cuenta los estudios realizados sobre el tema de la lluvia ácida se ha destacado la importancia de las siguientes variables como indicadoras de acidificación del agua:

- ⇒ pH
- ⇒ Alcalinidad
- ⇒ Conductividad
- ⇒ Temperatura
- ⇒ SO_4^-
- ⇒ NO_3^-
- ⇒ Cl^-

4.7.1.1 pH. La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua.

Prácticamente todas las fases de tratamiento usado para el agua de suministro o residual como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión dependen del pH. El pH se utiliza para las determinaciones de alcalinidad, dióxido de carbono y muchos otros equilibrios ácido-base a una temperatura determinada⁶²:

El pH de una disolución se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrogeno.

$$pH = -\log[H^+]$$

El logaritmo negativo proporciona un número positivo para el pH, el cual de otra manera, sería negativo debido al pequeño valor de $[H^+]$. El término $[H^+]$ corresponde solamente a la parte numérica de la expresión para la concentración del ion hidrogeno. El pH de una disolución es una cantidad adimensional (Chang, 1998)⁶³.

⁶² SORENSON, J CAMPBELL, Tepper. Aluminium in the environment and Human health. In: environment Health. 1974.

⁶³ CHANG, Raymond. Química. Mexico, 1998.

Debido a que el pH es solo una manera de expresar las concentraciones del ion hidrogeno, las disoluciones acidas y basicas a 25°C, pueden identificarse por sus valores de pH, de la siguiente forma:

Disoluciones acidas: $[H^+] > 1.0 \times 10^{-7} M, pH < 7.00$

Disoluciones basicas: $[H^+] < 1.0 \times 10^{-7} M, pH > 7.00$

Disoluciones neutras: $[H^+] = 1.0 \times 10^{-7} M, pH = 7.00$

Con el logaritmo negativo de la concentración de los iones hidroxido de una disolución se puede obtener una escala de pOH, analoga a la del pH. Asi el pOH se define como⁶⁴:

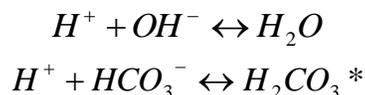
$$pOH = -\log[OH^-]$$

4.7.1.2 Alcalinidad y acidez. Es una medida de la capacidad del agua para neutralizar un acido fuerte. En las aguas naturales esta capacidad se puede atribuir a bases como HCO_3^- , CO_3^{2-} y OH^- lo mismo que a las especies presentes con frecuencia en pequeñas concentraciones como los silicatos, boratos, amoniaco, fosfatos y bases organicas.

Acidez la medida de la capacidad del agua para neutralizar una base fuerte. En las aguas naturales por lo general se atribuye a acidos como H_2CO_3 y HCO_3^- y algunas veces a acidos fuertes, en general H^+ .

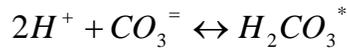
La alcalinidad y acidez se definen en funcion de las bases y acidos constituyentes, respectivamente, que contribuyen a la alcalinidad y acidez. Las diversas medidas de alcalinidad y acidez se definen en terminos de las condiciones de protones de los puntos de equivalencia. La alcalinidad requiere la adición de acido fuerte (H^+). Asi, la presencia de alcalinidad respecto a un punto final en particular indica un exeso de especies que contienen menos protones que las especies de referencia. La acidez requiere la adición de base fuerte (OH^-), que es importante en la eliminacion de protones. Asi pues la presencia de acidez respecto a un punto final en particular indica un exeso de especies que contienen mas protones que las especies de referencia (Jenkins, 1990)⁶⁵.

En la determinación de la alcalinidad total el H^+ es la cantidad estequiometrica que se requiere para las siguientes reacciones:

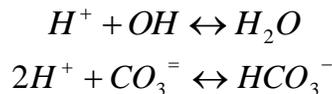


⁶⁴ CHANG, Op cit, pag 49.

⁶⁵ JENKINS, David. Quimica del Agua. Mexico 1990.



Para el sistema de carbonatos teóricamente pueden identificarse los valores adicionales significativos del pH que se presentan durante el curso de una titulación de alcalinidad y representan el pH de la solución a la que se ha agregado la cantidad estequiométrica de H⁺ requerida para contemplar las siguientes reacciones:



Y el pH de una solución a la que se ha agregado la cantidad estequiométrica de H⁺ que se requiere para la siguiente reacción (Jenkins, 1990)⁶⁶:



Debido a su estrecha relación con el pH aguas muy alcalinas, es decir pH mayor, afectan la ecología del cuerpo receptor (Mogollón, 1997)⁶⁷.

La alcalinidad puede generarse por hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, magnesio, sodio, potasio o amonio.

Algunos ácidos orgánicos poco resistentes a la oxidación biológica forman sales que aumentan la alcalinidad del cuerpo de agua (MINAMBIENTE, 1997)⁶⁸.

4.7.1.3 Conductividad. Indica la capacidad del agua para transferir una corriente eléctrica y se incrementa principalmente con el contenido de iones y la temperatura. Se expresa como microSiemens por centímetro ($\mu S/cm$) o microhoms por centímetro ($\mu h/cm$). Su relación con los sólidos disueltos se define como: Sólidos disueltos: (0.54 a 0.96) por conductividad (Ramírez, 1998)⁶⁹.

La conductividad es un parámetro importante para establecer el grado de mineralización y estimar los efectos de la concentración total de los iones sobre los equilibrios químicos, efectos fisiológicos en plantas o animales. Para evaluar las variaciones en la concentración de mineral disuelto en aguas naturales (Mogollón, 1997)⁷⁰.

⁶⁶ JENKINS, Op cit, pag 50.

⁶⁷MOGOLLÓN, José et al. Evaluación y manejo de la contaminación urbana. MMA – ICFES. Bucaramanga, 1997.

⁶⁸ MINAMBIENTE, Op cit., pag 36.

⁶⁹ RAMÍREZ, Op cit., pag 45.

⁷⁰ MOGOLLON, Op cit., pag 45.

4.7.1.4 Temperatura. Los cambios periódicos de temperatura se deben básicamente al calentamiento por la radiación del Sol de las zonas terrestres del planeta, que a su vez calientan el aire situado por encima. Como resultado de este fenómeno, la temperatura disminuye con la altura, desde un nivel de referencia de 15 °C en el nivel del mar (en latitudes templadas) hasta unos -55 °C a 11.000 m aproximadamente. Por encima de esta altura, la temperatura permanece casi constante hasta unos 34.000 m. En cuanto al índice de temperaturas próximas al cero absoluto, muchos materiales presentan características sorprendentemente diferentes.

A temperaturas elevadas, los materiales sólidos se licuan o se convierten en gases; los compuestos químicos se separan en sus componentes (Instituto Nacional de Meteorología, 2004)⁷¹

4.7.1.5 Sulfatos (SO₄²⁻). Los sulfatos se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza. El contenido de sulfatos en las aguas está relacionado con elementos alcalinos y alcalinotérreos de la mineralización (Mogollón, 1997)⁷².

Esta variable es utilizada como parte importante del estudio de iones disueltos en el agua ya que su incorporación en el agua puede ser producto de:

1. Combustión antropogénica de combustibles fósiles que contienen sulfuros.
2. Emisiones biogénicas de sulfuro.
3. Recursos volcánicos.

Teniendo en cuenta que la actividad de las fumarolas puede contribuir con los excesos de SO₂²⁻ presentes en el área de estudio debido a volcanes activos que se encuentran en ella (Hendry, C., 1984)⁷³.

4.7.1.6 Cloro

4.5.1.6.1 Ciclo natural. El cloro es muy abundante en la naturaleza (0.19%). Casi todo se encuentra combinado en la forma de cloruros simples [NaCl y KCl] o cloruros dobles (MgCl₂·6H₂O). Cantidades enormes, en pequeñas concentraciones de cloro combinado (NaCl y HCl) se desplazan con el viento del mar a la tierra. En la tierra se encuentra cloro por todas partes, en el aire y en el suelo⁷⁴ (Figura 7).

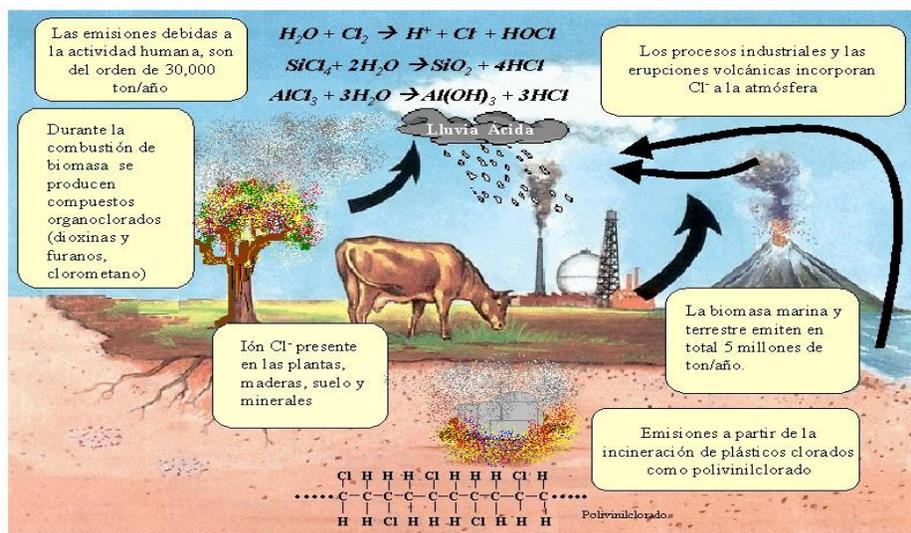
⁷¹ Instituto Nacional de Meteorología. Fenómenos meteorológicos [online]. Disponible en la página web: <http://www.inm.es/>. España Diciembre 2004.

⁷² MOGOLLON, Op cit., pag 45.

⁷³ HENDRY, Op cit., pag 20.

⁷⁴ MANAHAN. Op cit, pag 39.

Figura 7. Ciclo del Cloro



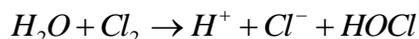
Fuente: MANAHAN, S., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

La presencia del ion cloruro en las plantas, madera, suelo y minerales hace que durante la combustión se produzcan principalmente compuestos organoclorados (incluyendo dioxinas y furanos). Por consiguiente los incendios forestales, la quema de matorrales y vegetación, así como los volcanes, producen cantidades significativas y en algunos casos, masivas de clorometano. Las biomasa marina y terrestre emiten en total, unas 5 millones de toneladas anuales de dicho compuesto, sobrepasando las emisiones debidas a la actividad humana, que son solamente del orden de 30.000 t/año (La presencia del ion cloruro en las plantas, madera, suelo y minerales hace que su combustión produzca inevitablemente compuestos organoclorados (incluyendo dioxinas y furanos). El cloro como componente de la sal, se encuentra presente en la sangre y tejidos de los mamíferos. Los leucocitos del sistema inmunológico humano usan cloro para destruir a los microorganismos invasores, mediante un mecanismo enzimático (mieloperoxidasa) en el que tiene lugar la liberación de hipoclorito. También forma parte de la molécula del ácido clorhídrico, el cual tiene un papel vital en el proceso digestivo de los mismos (destruye los gérmenes de la comida y asegura que la pepsina rompa las proteínas)⁷⁵.

Los océanos constituyen la mayor fuente de compuestos organoclorados. Estos juegan un papel esencial en la supervivencia de los organismos vivos, cuya capacidad para sintetizar dichas sustancias ha evolucionado con el tiempo bajo la presión de la selección natural.

⁷⁵ MANAHAN.Op cit, pag 39, 50.

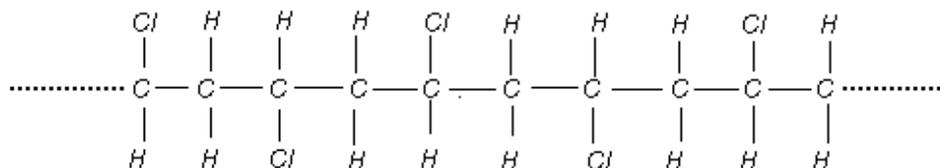
4.7.1.6.2 *El cloro en la atmósfera:* En cuanto a este elemento Manahan⁷⁶ habla ampliamente. El Cl₂, no es considerado como un contaminante a gran escala, pero puede serlo a escala local. Es ampliamente utilizado en la industria química y en la fabricación de plásticos, por lo tanto, existe la posibilidad de ser emitido. El cloro es tóxico e irritante de la membrana mucosa. Además, es muy reactivo y un poderoso agente oxidante. El cloro se disuelve en las gotas de agua atmosférica, generando ácido clorhídrico y ácido hipocloroso, un agente oxidante. El ácido clorhídrico, HCl, es emitido desde un número determinado de fuentes:



Por otra parte, los derrames de gas cloro han causado fatalidades entre las personas expuestas:

La incineración de los plásticos clorados, como polivinilclorado⁷⁷ (Figura 8), liberan HCl como un producto de la combustión.

Figura 8. Polivinilclorado



Fuente: MANAHAN, S., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

Algunos compuestos liberados a la atmósfera como contaminantes del aire hidrolizan a la forma HCl. Por ejemplo, un incidente tal ocurrió en abril 26 de 1974, cuando un tanque cargado que contenía 750.000 galones de tetracloruro de silicio líquido, SiCl₄, se derramó en el Sur de Chicago, Illinois. Este compuesto reaccionó con el agua de la atmósfera y formó una nube sofocante de gotas de HCl. Mucha gente se enfermó al inhalar el vapor⁷⁸.

4.7.1.6.3 Cloruros (Cl⁻). El cloruro en forma de ion (Cl⁻), es uno de los iones inorgánicos principales en el agua natural y residual.

⁷⁶ Empresas Asociadas clorosur. Op cit. pag

⁷⁷ Manahan, Op. cit. pag 39,50,51

⁷⁸ Ibid.

Un contenido elevado de cloruro puede dañar las conducciones y estructuras metálicas y perjudicar el crecimiento vegetal (APHA,1992)⁷⁹.

4.7.2. Variables climáticas.

- ⇒ Orientación y velocidad de los vientos
- ⇒ Humedad
- ⇒ Precipitación

4.7.2.1 Orientación y velocidad de los vientos. El viento es el aire en movimiento, el aire se mueve por la diferencia de presión atmosférica entre dos puntos.

Los vientos producen el movimiento de grandes masas de aire de distintas temperaturas y humedad, de modo que son un factor muy importante en la determinación del clima en una región. La velocidad del viento es muy variable. Existen vientos suaves, las brisas, y vientos muy fuertes cuya velocidad excede los 100 km/h, los huracanes que producen perturbaciones catastróficas en los ecosistemas. El régimen de velocidad del viento depende de la diferencia de presión entre el centro de alta y baja presión.

A parte de los efectos generales del viento sobre el clima afecta a la biota de varias maneras. Por un lado influye sobre el movimiento de los gases, y por otro lado tiene una acción mecánica. Además el viento arrastra partículas que tiene un efecto abrasivo sobre los seres vivos. Cuando el viento se desplaza sobre un área desnuda y más aún si el sustrato no está consolidado, erosiona el suelo, arrastrando las partículas superficiales, que luego deposita en otro lugar cuando su velocidad disminuye o cuando encuentra un obstáculo (Lewis,J., 1995)⁸⁰.

Los compuestos sulfurosos y, los óxidos de nitrógeno y otros compuestos emitidos inciden en la atmósfera, cuando hay vientos dominantes de dirección ascendente, y forman nubes que pueden quedar estacionadas encima de los focos de emisión o pueden correr varios kilómetros circulando con las grandes masas de aire que forman el sistema general de vientos. En estos trayectos las moléculas de anhídrido sulfuroso (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) reaccionan químicamente con otras partículas, en presencia de la luz solar, se transforman en otros compuestos de azufre y nitrógeno.

Las nubes cargadas con los compuestos de azufre y nitrógeno pueden depositarse en el campo y al reaccionar con la humedad del aire o con el rocío originan compuestos de carácter ácido, las nubes que no se depositan pueden ser capturadas por

⁷⁹ APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados: Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos, 1992. p. I – 73

⁸⁰ LEWIS,J. La biosfera y sus ecosistemas: Una introducción a la ecología. Argentina, 1995.

tormentas de lluvia o nieve y de esta manera originar precipitaciones ácidas (Secretaría del medio ambiente)⁸¹.

4.7.2.2. Humedad. Se define como la medida del contenido de agua en la atmósfera. La atmósfera contiene siempre algo de agua en forma de vapor. La cantidad máxima depende de la temperatura; crece al aumentar ésta: a 4,4 °C, 1.000 kg de aire húmedo contienen un máximo de 5 kg de vapor; a 37,8 °C 1.000 kg de aire contienen 18 kg de vapor. Cuando la atmósfera está saturada de agua, el nivel o grado de incomodidad es alto debido a la transpiración (evaporación de sudor corporal con resultado refrescante) se hace imposible.

El peso del vapor de agua contenido en un volumen de aire se conoce como humedad absoluta y se expresa en kg de agua por kg de aire seco. Los científicos se refieren a estas medidas con gramos de vapor de agua por metro cúbico. La humedad relativa, dada en los informes meteorológicos, es la razón entre el contenido efectivo de vapor en la atmósfera y la cantidad de vapor que saturaría el aire a la misma temperatura. Si la temperatura atmosférica aumenta y no se producen cambios en el contenido de vapor, la humedad absoluta no varía mientras que la relativa disminuye. Una caída de la temperatura incrementa la humedad relativa produciendo rocío. La humedad se mide con un higrómetro. El índice de temperatura-humedad (índice T-H, también llamado índice de incomodidad) expresa con un valor numérico la relación entre la temperatura y la humedad como medida de la comodidad o de la incomodidad. Se calcula sumando 40 al 72% de la suma de las temperaturas en un termómetro seco y en otro húmedo.

4.7.2.2 Precipitación. El agua evaporada y liberada a la atmósfera por la respiración y combustiones, se condensa en la atmósfera y se precipita bajo la forma de lluvia, nieve, niebla o granizo hacia la superficie de la tierra. Como los aportes por precipitación varían a lo largo del año y de acuerdo al régimen de lluvias, existen periodos en que los aportes de agua son grandes y rápidos, y otros en que los aportes son menores y lentos o nulos (Lewis,1995)⁸².

4.7.3 Variables geomorfológicas

- ⇒ Dirección y forma de la pendiente
- ⇒ Exposición

⁸¹ Lluvia ácida. Secretaría del medioambiente. [online]. Disponible en la dirección electrónica. secretaria del ambiente.mx. Diciembre de 2004. Ciudad de la Esperanza- México.

⁸² LEWIS, Op cit., pag 51.

4.7.3.1 Dirección y forma de la pendiente. Las pendientes del Parque Nacional natural de Puracé se dividen en los siguientes rangos de pendientes:

4.7.3.1.1 0-10% Plano ligeramente ondulado. Se encuentra en los alrededores de la laguna de San Rafael y en la parte alta del río Mazamorras, ocupando una extensión de 13.470 ha que corresponde al 16.21% de su totalidad.

4.7.3.1.2 11-20% Ondulado. Se encuentra en los alrededores de Cerro Negro, atraviesa el parque a lo ancho desde Pilimbalá hasta el alto de las flautas, a los alrededores de la laguna de Río Negro, en la parte alta de la quebrada de Sotará, toda la parte del páramo de Sotará y el Páramo de las papas, ocupando una extensión de 41.450ha que corresponde al 49.93% del área total del parque.

4.7.3.1.3 21-30% Ondulado-Quebrado. Se encuentra en los alrededores del volcán Sucubún en la parte alta de la quebrada oscura, ocupando una extensión 12.700 ha que corresponden al 15.32% del Parque Nacional Natural Puracé.

4.7.3.1.4 31-40% Quebrado. Se encuentra en los alrededores del volcán Puracé, en la parte alta de la quebrada de minas, en el Volcán Sotará ocupando una extensión de 8.230 ha, que corresponden al 9.93% del área del parque.

4.7.3.1.5 41-50% Escarpado. Se encuentra a los alrededores del cerro Nevado del Pan de Azúcar y al lado del Volcán Sotará, con 6.240 ha que corresponden al 7.52% del área total del parque.

4.7.3.1.6 > 50% Fuertemente escarpado. Se encuentra en los alrededores del sector de San Nicolás, a lo largo del río Bedón, cubre un área de 910ha que corresponden al 1.09% de la totalidad del área del parque (Parques Nacionales, 1998)⁸³.

⁸³ PARQUE NACIONAL NATURAL PURACE. Amerian online. copyright, 1999.

5. ANTECEDENTES

Los primeros estudios de lluvia ácida se derivaron de la preocupación de los científicos al intensificarse las pruebas de las armas nucleares.

Se observó que durante las primeras explosiones, los vientos podrían llevarse las partículas radiactivas y depositarlas en lugares más alejados. Descubrieron que la humedad del aire se iba condensando sobre esas partículas hasta formar gotas, que al llegar a tener una cierta dimensión y peso se precipitan. Los estudios realizados sobre contaminación atmosférica y química fundamental, identificaron compuestos como sulfatos, nitratos y cloruros entre las sustancias ligadas a la acidez.

Kamss (2001)⁸⁴, reporta que en la mayoría de las grandes urbes como en la ciudad de México y zona metropolitana se ha incrementado la contaminación atmosférica, producto de escapes de millones de vehículos de combustión interna y mala calidad de gasolina.

Hendry (1984)⁸⁵, Presenta los resultados de dos años de estudios químicos en volúmenes de precipitación en la zona de Turrialba (Costa Rica), para la determinación de la precipitación ácida y principales ácidos responsables de ella; en el cual reporta que en general los resultados indican extrema dilución de los minerales y nutrientes contenidos en la precipitación, valores de pH significativamente bajos (5.6), pero que todavía predicen el equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico; además de excesos en los niveles de SO_4^- en el agua de precipitación; que es principalmente atribuido a la actividad volcánica, debido a su cercanía al volcán Turrialba y al volcán Irazú, ambos con fumarolas activas, aunque no descarta que también pudo originarse por el transporte de polucionantes y derivados de las emisiones biogénicas de sulfuros. En los análisis de precipitación en áreas de Turrialba,. De igual manera, en los estudios realizados por Kellman, Hudson y Sanmugadas⁸⁶ en Siguatepeque, Honduras, concluyeron que la explicación más probable para el gran flujo de cationes registrados en la estación lluviosa, fue debido a la actividad volcánica de la zona.

Por su parte Borman (1977)⁸⁷, destaca que los iones inorgánicos más representativos en los volúmenes de precipitación obtenidos en Hubbard Brook son el sulfato y el hidrógeno, esencialmente la precipitación de este lugar se caracterizo por soluciones de ácidos sulfúrico y nítrico con un pH de 4.1.

⁸⁴ KAMSS, Op cit., pag 40.

⁸⁵ HENRY, Op cit., pag 20.

⁸⁶ KELLMAN, M., J. HUDSON & K. SANMUGADAS. Temporal Variability in Atmospheric Nutrient Influx to a Tropical Ecosystem. En: Biotropica. Vol. 14, No.1. (1982); p. 1 - 9

⁸⁷ BORMAN, Op cit., pag 38.

Encontrando que el sulfato contribuye a la formación de lluvia ácida con un 65% en la acidificación en la precipitación a lo largo de toda una década, que el incremento en la entrada del ión hidrógeno esta altamente relacionado con el incremento en la entrada del nitrato lo cual da un poderoso argumento para el incremento en el ácido nítrico.

Kellman⁸⁸ y colaboradores en 1982 observaron que el aporte anual de macronutrientes para honduras era bajo con respecto a los reportados para otros sitios del trópico, atribuyendo esto a la baja precipitación del área, su elevación y a lo distante del mar.

Para Colombia se han realizado estudios de monitoreo para la lluvia ácida observando las variaciones en el pH , conductividad, NO_3^+ , SO_4^- , en diferentes ciudades del país.

Veneklaas (1990)⁸⁹, realizó una investigación sobre el flujo de nutrientes en volúmenes de precipitación y throughfall en cercanías al Nevado del Ruíz, en ella reportó el incremento de ciertos elementos debido a la actividad volcánica, excesos de sulfato en volúmenes de precipitación para los sitios de muestreo, siendo la acidificación significativa correlacionada con las concentraciones de sulfato. Respecto a los valores de pH reportó un valor promedio de 4.40 para las 43 semanas de muestreo. Veneklaas, investigó sobre las diferencias en la composición de la precipitación a dos altitudes diferentes (2550 y 3370 msnm), en el volcán Nevado del Ruiz. La acidez en ambos sitios, estuvo significativamente correlacionada con los excesos de SO_x , los que representaron el 97% del volumen de precipitación y fueron vinculado con la presencia del volcán activo Nevado del Ruiz, emisor de grandes cantidades de SO_x durante el estudio.

El IDEAM en el año 2000, realiza un monitoreo para la calidad de lluvia en Colombia encontrando que en ciudades como Cali, Villavicencio y Medellín se presentan valores de pH muy bajos entre 3,5 y 5,5 lo que indica la elevada acidez en el agua de precipitación, concentraciones de entre 0,09 mg/l hasta 0,55 mg/l de NO_3^- en todo el país (ver cuadro 1 y figura 9).

Figueroa y Valverde (2000)⁹⁰, en su estudio realizado en la microcuenca Arrayanales ubicada dentro de la cuenca del río Piedras en el municipio de Popayán departamento del Cauca. Reportaron que existe diferencia entre los volúmenes de precipitación y los volúmenes de lluvia que pasa por el follaje y que los aportes totales de nutrientes

⁸⁸ KELLMAN, HUDSON Y SANMUGADAS, Op cit., pag 53.

⁸⁹ VENEKLAAS, E. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests. Colombia. Journal of Ecological, 1990.

⁹⁰ FIGUEROA, Apolinar y VALVERDE, Antonio. Análisis del aporte de Nutrientes por Precipitación y a través del Follaje en un Ecosistema Alto andino. Colombia, 2000.

por precipitación para SO_2^- en los 36 meses de muestreo corresponde a $7,646 \times 10^{-5}$ Ton/ha/año y estas contribuciones se dan en los meses de Noviembre, Mayo y Junio.

Entre los meses de Julio y Agosto los autores destacan que se favorecen procesos de depositación seca por la interacción de aerosoles. Polvo y otras emisiones lo que explicaría el incremento en la concentración de SO_4^- , la existencia de este ión la relacionan fundamentalmente con las emisiones generadas por la cadena volcánica de los Coconucos y la dirección de los vientos que durante esta época tiene dirección Este-Oeste.

Posteriormente Figueroa, Valverde y Alegría (2001)⁹¹. En un estudio posterior afirman que en algunos sectores del Parque nacional Natural Puracé se presentan pH con valores extremos asociados a las emisiones gaseosas de la mina debido a su proximidad con ella y que en sectores alejados los valores se estabilizan.

El estudio más reciente fue el realizado por Burbano en la ciudad de Popayán (2003)⁹² quien reporto que los valores de pH permanecieron dentro del rango de 5.6 y 4.5 unidades de pH conductividades de entre $75.10 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $2.80 \mu\text{S}/\text{cm}$ y sulfatos entre $7.32 \text{ mgSO}_4^-/\text{L}$ y $6.08 \text{ mgSO}_4^-/\text{L}$.

⁹¹ FIGUEROA, Apolinar, VALVERDE, Antonio y ALEGRÍA, Carlos. Análisis de la sensibilidad a la acidificación de un ecosistema altoandino como un instrumento de gestión. Popayán, 2001

⁹² BURBANO, Op cit., pag 25.

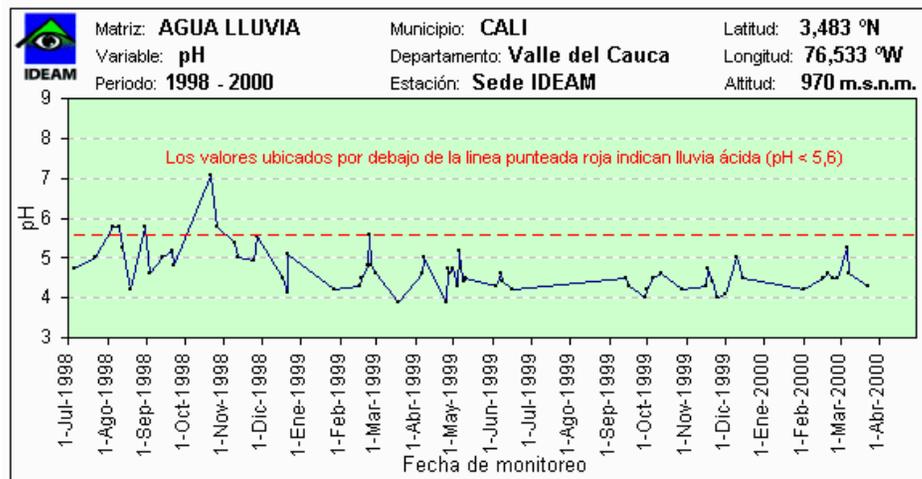
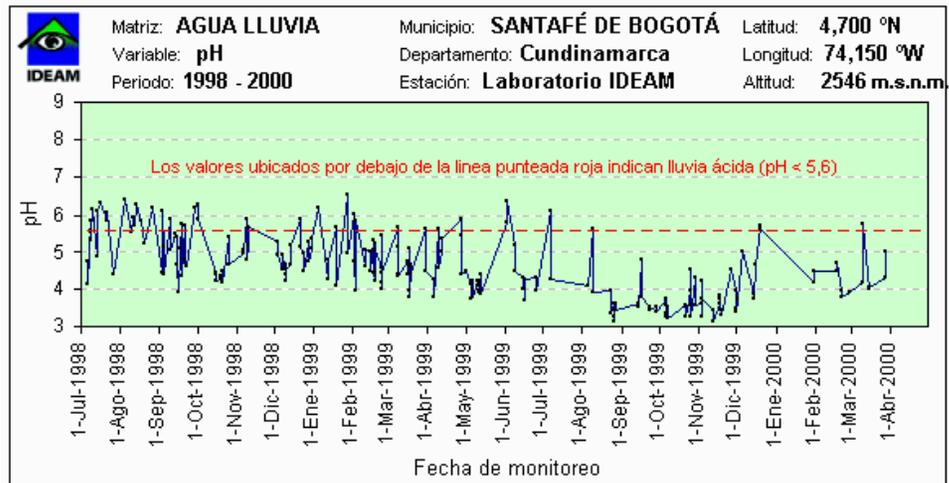
Cuadro 1. Monitoreo para la calidad de lluvia en Colombia.

Departamento	Municipio	Estación	PH promedio ácido	Conductividad Eléctrica (S/cm)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁼ (mg/l)
Amazonas	Leticia	Aeropuerto Vásquez Cobo	-	-	-	-
Antioquia	Medellin	Sede IDEAM	3.5-5.5	15-20	0.33	-
Atlántico	Barranquilla	Sede IDEAM	5.7-6.8	15-20	0.31	-
	Soledad	Aeropuerto Ernesto Cortisoz	-	-	-	-
Cundinamarca	Bogotá	Laboratorio	5.1	15-20	0.19	3.0
Cundinamarca	Bogotá	Barrio Americas	6.4-6.7	15-20	-	3.0
Cundinamarca	Bogotá	Barrio Bella Suiza	6.4-6.7	15-20	-	3.0
Cundinamarca	Bogotá	Barrio la Coruña	6.4-6.7	15-20	-	3.0
Guajira	Riohacha	Aeropuerto Almirante Padilla	5.7-6.8	5-10	0.09	-
Huila	Neiva	Aeropuerto Benito Salas	5.7-6.8	5-10	0.09	-
Meta	Villavicencio	Unillanos	3.5-5.5	5-10	0.23	-
		Apiay	3.5-5.5	5-10	0.21	-
		Cantarrana	3.5-5.5	5-10	0.55	-
		Aeropuerto Vanguardia	3.5-5.5	5-10	0.25	-
Norte de Santander	Cucuta	Aeropuerto Camilo Daza	-	-	-	-
Santander	Bucaramanga	Sede IDEAM	3.5-5.5	5-10	0.09	-
	Lebrija	Aeropuerto Palo Negro	-	-	-	-
Tolima	Ibagué	Interlaken	3.5-5.5	5-10	0.09	-
Valle	Calí	Sede IDEAM	3.5-5.5	15-20	0.42	-

Fuente: Monitoreo sobre la calidad de lluvia en Colombia IDEAM (2000).⁹³

* Tomado del estudio de monitoreo para la calidad del agua en Colombia realizado por el IDEAM.

Figura 9. Reporte del comportamiento del pH para el agua lluvia entre los años 1998 y 2000, en las ciudades Colombianas de Cali y Bogotá



Fuente: Monitoreo para la calidad de la lluvia en Colombia entre (1998 y 2000).

Dado que en Colombia muchos de los estudios de monitoreo como el realizado por el IDEAM no reportan datos para algunos departamentos entre ellos el departamento del Cauca, se hace necesario la realización de monitoreos con este fin en el departamento, que den continuación a las investigaciones efectuadas por Figueroa y Valverde (2000)⁹⁴ y Burbano (2003)⁹⁵.

⁹⁴ FIGUEROA y VALVERDE, Op cit., pag 56.

⁹⁵ BURBANO, Op cit., pag 25.

6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ventana determinada para el desarrollo del presente estudio se encuentra ubicada en El Parque Nacional Natural de Puracé situado entre los departamentos del Cauca y Huila que comprende los municipios de Almaguer, Puracé, San Sebastián y Sotará (Cauca) y los municipios de La Argentina, La Plata, San José de Isnos, Saladoblando, y San Agustín (Huila).

En el se encuentran bosques montañosos generalmente caracterizados por árboles de baja estatura, de suelos ácidos y con un alto contenido de materia orgánica (Grubb 1977)⁹⁶

Es rico en reservas hídricas, en sus valles de origen glacial que forman más de 50 lagunas entre las que destacan, San Rafael, Santiago y Cusiyaco además nacen los más importantes ríos de Colombia: Magdalena, Cauca, Caquetá y Patía.

Su relieve lo conforma la cadena volcánica de los Coconucos compuesta por ocho volcanes entre ellos el Puracé, el cual se encuentra ubicado a 30 Km al SE de la ciudad de Popayán en 2°22' de altitud N y 76°23' de longitud sur.

Las veredas y poblaciones ubicadas en lugares cercanos al volcán son Puracé, Coconuco, Paletara, Santa Leticia, Popayán, Tabio, Pululo, el Crucero, Campamento, el sitio turístico de las termas de Pilimbalá y el complejo de la mina de azufre de "El vinagre" (Monsalve M y Pulgarin B 1993)⁹⁷. Pilimbalá, Campamento, La mina de azufre, El Crucero y Puracé para el presente estudio (Ver Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de precipitación en la ventana de estudio y su altura en metros sobre el nivel del mar.

PUNTO	GEOPOSICION		ALTURA
	NORTE	ESTE	
1Pilimbala	02°21.989	076°24.34	3478
2 Minas	02°21.24	076°24.48	3529
3Campamento	02°02.27	076°25.56	3010
4 Purace	02°23.070	076°26.87	2800
5 San Rafael	02°22.00	076°21.155	3428
6 San Juan	02°20.722	076°18.668	3150
7 Crucero	02°22.247	076°24.247	3307

⁹⁶ GRUBB, P. A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador: the forest structure physiognomy and floristic. In Ecology 1993.

⁹⁷ MONSALVE María, PULGARIN Bernardo. Amenaza volcánica potencial del volcán Puracé En: Revista Ingeominas : Una publicación sobre las ciencias y tecnología de la tierra. 1993.

El área comprendida dentro de la ventana de estudio se encuentra delimitada por las coordenadas planas y geográficas que se observan en la tabla 2, ubicada entre el primer y cuarto cuadrante del parque nacional natural puracè como se muestra en el mapa 1.

Tabla 2. Ventana zona norte Parque Nacional Natural Puracé, límites físicos.

Coordenadas geográficas		Coordenadas planas	
N	W	Norte	Este
02°21.24	076°24.48	740000	1085000
02°23.27	076°25.56	755000	1085000
02°23.07	076°26.87	755000	1065000
02°22.247	076°24.24	740000	1065000

6.1 Características

6.1.1 Localización geográfica. El estudio se realizó en la ventana de la franja altoandina del Parque Nacional Natural Puracé, cuyos límites físicos se mencionan en la Tabla 1.

6.1.2 Climatología. El parque tiene alturas que van desde 2310 m.s.n.m a los 5000 m.s.n.m. Las épocas de mayor precipitación se presentan entre los meses de Abril y Agosto. Y las épocas de sequía entre los meses de Diciembre y Febrero; la temperatura promedio es de 10 a 12 °C y su precipitación oscila entre 1200mm y 2500mm, además existen variaciones importantes debido a la topografía, disminución de vientos y microclimas existentes.

La ventana escogida para el estudio tiene alturas que van desde los 2800 y los 3529 m.s.n.m. con una temperatura promedio de 14.85°C (ver figura 10), los volúmenes de captación para precipitación obtenidos en campo en esta ventana se encuentran entre los 500ml y 2000ml (ver figura 10).

La nubosidad del parque es alta, el brillo solar es bajo y la evaporación es por debajo de 66mm (datos suministrados por el IDEAM)⁹⁸.

Aunque es poca la información sobre los aspectos climáticos es poca, Rangel y Aguilar (1997)⁹⁹ nos presentan la siguiente aproximación a la climatología para la zona del cráter del volcán Puracé.

⁹⁸ IDEAM. Monitoreo de lluvia ácida en Colombia. Colombia. 1997.

⁹⁹ Rangel y Aguilar. El paramo ecosistema a proteger 1995.

6.1.2.1 *Temperatura.* Las temperaturas máximas y mínimas son mayores en los meses mas calientes Enero, Febrero, Octubre y Noviembre (8.4-8.7 °C) y menores en los meses menos calientes junio y julio (7.6 y 7.4).

La fluctuación es del orden de 3.2 °C, la curva de temperatura mínima muestra un descenso característico en la segunda mitad del año, desde julio hasta octubre. Se recupera en noviembre y diciembre. Desde febrero hasta junio el comportamiento es uniforme.

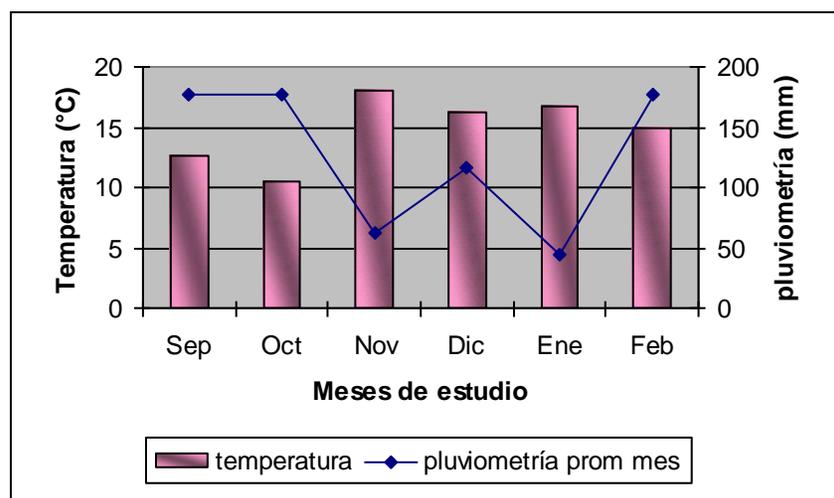
Las temperaturas extremas varían entre 30,09 y 13,4°C, es decir que hay oscilación térmica anual de 17,5 °C.

6.1.2.2 *Precipitación.* En la región andina, los últimos meses del año octubre y noviembre figuran como húmedos, pero no así los primeros (enero y febrero). El mes más seco es enero y el más húmedo mayo. En la región paramuna el mes más seco es enero y el mes más húmedo Julio.

En éurace y Pilimbalá en la misma región de vida, los regimenes de lluvias son bimodales –tetraestacionales.

En la ventana los meses más secos se encuentran entre noviembre y enero, meses en los que también se presentan las temperaturas más altas (entre 16 y 18 °C), los meses más húmedos son septiembre, octubre y febrero, con temperaturas entre 10°C y 15 °C , según lo demuestran los datos obtenidos en campo (ver figura 10) . Los meses de enero y noviembre en cuanto a temperatura y los meses de octubre y enero en cuanto a precipitación respaldan la información de Rangel y Aguilar (1997).

Figura 10. Medias mensuales de las variables climáticas para la ventana de estudio.



6.1.3 Geología. La cadena volcánica de los Coconucos ha sido construida sobre basamento de rocas volcánicas neogénicas de composición intermedia a ácida y localmente sobre rocas volcánicas básicas del cretácico, a lo largo de una fractura de dirección N39°W, transversal a la dirección de la cordillera andina.

Se presentan dos rocas muy parecidas en su composición. En el lecho del río Vinagre se encuentra una zona aparentemente de dasita blanca y en la mina hacia el sur – oeste, aparece andesita gris oscura con poca o ninguna manifestación de azufre. Visiblemente estas últimas rocas de la cima magnifican el arrastre de dasita (Monsalve y Pulgarin, 1993)¹⁰⁰

6.1.4 Hidrografía. Compuesta por numerosos ojos de agua, que dan origen a importantes arroyos, quebradas y ríos que drenan sus aguas a las grandes cuencas del Cauca y Magdalena, y las subcuencas Bedon, San Francisco y Vinagre (MINAMBIENTE, 1998)¹⁰¹.

6.1.5 Franja Altoandina – Andina. Entre 2600 y 3080 m.s.n.m, se encuentra ubicada entre la zona de Isnos, paletará hasta 3400 m.s.n.m en la zona de Valencia al sur del Parque, además de lograr mayor altitud presenta una mayor mezcla con elementos de matorral y frailejón.

Se halla entre 2.500 - 3.300 m; la topografía de esta formación es de montañosa a escarpada. Su vegetación se conserva inalterada. Se observa en ciertas áreas el pastoreo, a pesar que por su alta humedad y baja temperatura es impropia para labores agropecuarias y el Paramo (P) cuyo carácter distintivo es su vegetación de tipo pajonal donde las especies dominantes son las gramíneas (Clasificación según Holdridge), generalmente con árboles de baja estatura y suelos ácidos con un alto contenido de materia orgánica (Grubb 1977)¹⁰². La destrucción de las especies animales es inminente por la desarticulación y seccionamiento de los nichos de vida, por lo que las especies de mamíferos como trigrillos, dantas y venados están desapareciendo¹⁰³. Se distribuye ampliamente en lomas suaves hasta pendientes mayores de 20°, siempre en zonas inclinadas y quebradas como en las laderas del río Mazamorra en el sector de Isnos. El suelo de este bosque es blando y a menudo saturado por agua (MINANBIENTE, 1998)¹⁰⁴.

¹⁰⁰ MONSALVE y PULGARIN, Mapa preliminar de amenaza volcánica del volcán Puracé. En: revista INGEOMINAS N°2, 1993.

¹⁰¹ MINAMBIENTE, Op cit., pag 36.

¹⁰² GRUBB, Op cit., pag 60.

¹⁰³ Departamento de Desarrollo Regional y Medio ambiente. Secretaria ejecutiva para asuntos economicos y sociales secretaria general de la organizacion de los estados americanos. washington d.c., 1994

¹⁰⁴ Ibit., pag 56.

6.2 VÍAS DE ACCESO.

El acceso más propicio al Parque se hace desde la carretera Popayán- Puracé - la Plata; de allí sigue el desvío a la mina de azufre El vinagre y los termales de Pilimbalá.

6.3 ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN LA ZONA.

Las comunidades de la zona desarrollan actividades agrícolas dentro de las cuales se efectúa el proceso de quema. El uso del fuego ligado a un sistema de producción es una práctica reciente en algunas formas de agricultura itinerante y ganadería extensiva en los paramos andinos de Colombia (figura 12) (Fundación Ecosistemas Andinos, 1996)¹⁰⁵.

En los paramos andinos las quemas han aumentado su frecuencia ligadas a un sistema de producción agropecuaria el cual se caracteriza, en el caso de la agricultura, por su sistema de quema- cultivo- becheo, y en el caso de la ganadería por quemas y pastoreo extensivo. Estas actividades traen consigo la contaminación por cenizas, gases y humo, producida por la quema de cualquier tipo de vegetación, y que bajo condiciones de lapse-rate; es decir, cuando en las condiciones atmosféricas imperantes se presenta una temperatura decreciente con la altura, pueden tener un marcado efecto de contaminación debido a que estas cenizas van acompañadas de una serie de gases no visibles y humo que agravan los problemas. Así, tenemos que esta combustión produce gases como monóxido de nitrógeno, el cual tiene efectos tóxicos sobre los humanos; anhídrido sulfuroso, que al unirse con el agua de la atmósfera forma las llamadas lluvias ácidas y tiene efectos irritantes a la vista y en concentración de 0,5 ppm elimina la vegetación; el anhídrido carbónico en reacción fotoquímica produce irritación en los ojos y afecta las vías respiratorias¹⁰⁶. La tala y quema del bosque húmedo genera efectos globales al incorporar al medio ambiente dióxido de carbono (CO₂), que es un gas que contribuye a incrementar el efecto invernadero. En la figura 11 se observa la quema de un bosque primario, con lo cual se aumenta el número de especies animales y vegetales en peligro de extinción¹⁰⁷. Por otra parte, se producen cenizas que contienen potasio en altas cantidades y en presencia del agua tienen un alto poder corrosivo sobre diversas superficies (autos, casa, estantes, etc.), además de manchar la ropa y crear contaminación de tipo estético (basura) que resulta costoso eliminarla.

Además, la creciente colonización de la zona es un potencial para producir variaciones en la condición del aire y la temperatura. Aumentando los niveles de CO₂ (dióxido carbónico) debido a la quema de combustibles fósiles como los derivados del

¹⁰⁵ Fundación Ecosistemas Andinos. El páramo ecosistema a proteger, Editorial CODICE LTDA. Santafé de Bogotá 1996.

¹⁰⁶ GARCÍA Rómulo; Espinoza José; Marcano José. La contaminación ambiental causada por la quema de la caña de azúcar, al momento de la cosecha Investigadores. FONAIAP - Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Yaracuy. Estación Experimental Yaritagua. Yaritagua

¹⁰⁷ Ministerio de Defensa Nacional. Destrozos ambientales del narcotráfico. Bogota Abril 2002.

petróleo y su relación con el factor temperatura, causado por las variaciones del albedo (término que significa porcentaje de luz reflejada por un cuerpo)¹⁰⁸.

Figura 11. Quema de un bosque Colombiano.



Foto fuente: Dirección Antinarcóticos¹⁰⁹ - **Policía Nacional**.

Figura 12. Actividad ganadera en la zona.



¹⁰⁸ Ibid.

¹⁰⁹ Ministerio de defensa nacional. Op cit, pp 66.

7. METODOLOGÍA

La obtención de las muestras de agua de precipitación se realizó en 5 sitios de fácil acceso para el investigador, ubicados en una ventana de la franja alto-andina del Parque Nacional Natural de Puracé. Los cuales fueron previamente delimitados y georeferenciados.

Debido a que el estudio se enfoca en la comparación de dos fuentes puntuales de emisión de gases pulucionantes a la atmósfera (el volcán purace y el complejo minero “el vinagre” en la localización de los puntos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios (Ver Mapa 2):

- a) Zonas de emisión de gases por explotación minera.
- b) Zonas de influencia directa por actividad minera.
- c) Zonas influencias de actividades antrópicas tales como quemas y cultivos.
- d) Zonas donde hay presencias de aguas termales y fumarolas.
- e) Dirección de los vientos, (NE) dominante.
- f) Sitios de fácil acceso y control.

7.1 UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.

El área de estudio se dividió en siete sectores para una mayor facilidad de muestreo así:

Sector 1 Pilimbala: ubicada a menos de 10 Km del Volcán Puracé comprende el área del complejo habitacional de Pilimbala y sus alrededores.

Sector 2 Minas (Mina de Azufre): área que comprende el complejo minero de la mina de azufre y sus alrededores ubicada a 4,5 Km al NW del Volcán Puracé.

Sector 3 Campamento: comprende la vereda que lleva el mismo nombre, hasta los límites con el pueblo de Puracé.

Sector 4 Puracé: abarca el pueblo de Puracé ubicado a 10 Km al NW del Volcán, hasta sus limites con la vereda Campamento.

Sector 5 San Rafael: comprende las antiguas cabañas de la laguna de San Rafael, la laguna de San Rafael y las áreas aledañas.

Sector 6 San Juan: área que comprende al complejo habitacional de San Juan, las termales de San Juan y las áreas aledañas.

Sector 7 Crucero: comprende el caserío el Crucero, hasta sus límites con el sector de Campamento.

Los puntos de muestreo fueron ubicados en lugares de fácil acceso y vigilancia por parte del investigador en siete sectores del Parque Nacional Natural Puracè, aunque cabe anotar que en los sectores de San Rafael y San Juan los colectores fueron

retirados debido a que fueron dañados o robados y por problemas de orden público no pudieron ser reubicados.

La ubicación geográfica y altura de cada uno de los puntos (ver tabla 3 y mapa de localización estaciones de muestreo) se realizó con la ayuda de un GPS marca Magellan MAP 330 (ver figura 13) y se muestra en la tabla 3.

Figura 13. Instrumentos usados para la ubicación en campo.



Tabla 3. Geoposición de los puntos de muestreo y su altura en metros sobre el nivel del mar.

PUNTO	GEOPOSICION		ALTURA
	NORTE	ESTE	
1 Pilimbala	02°21.989	076°24.434	3478
2 Minas	02°21.24	076°24.48	3529
3 Campamento	02°02.27	076°25.56	3010
4 Puracé	02°23.070	076°26.87	2800
5 San Rafael	02°22.00	076°21.155	3428
6 San Juan	02°20.722	076°18.668	3150
7 Crucero	02°22.247	076°24.247	3307

(MAPA LOCALIZACIÓN AESTACIONES DE MUESTREO)

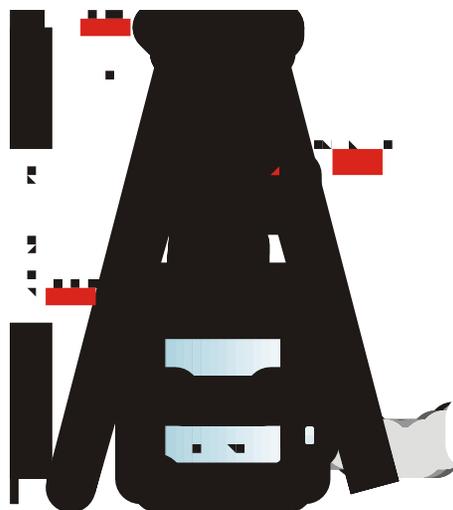
7.2 PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

En las siete zonas de muestreo para precipitación se ubicaron tres colectores de precipitación abiertos a la atmósfera (Likens, et al,1977¹¹⁰; Burbano, 2003)¹¹¹. Cada colector conformado por un embudo de polietileno, conectado a un reservorio de polipropileno con capacidad para 2L, por medio de una manguera organizada en forma de trampa de vapor, para prevenir la evaporación del reservorio y el intercambio de gas entre la atmósfera y la muestra, con un filtro de lana teflón en el orificio menor del embudo para prevenir contaminación de la muestra (Likens et al, 1997,;Hendry, et al1984¹¹²;Figueroa, Valverde 2000; Burbano, M., 2003)¹¹³, (Ver figuras 14 y 15).

Los colectores ubicados en trípodes de madera enclavados al suelo según y a 50 cm de suelo según Figueroa, Valverde (2000)¹¹⁴ y Burbano (2003)¹¹⁵.

Las muestras de agua de precipitación se colectaron cada treinta días durante seis meses teniendo en cuenta que este tiempo incluyera los periodos de lluvia y sequía, se almacenaron en refrigeración a 4°C para los posteriores análisis de alcalinidad, conductividad, pH, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁼. Análisis que fueron efectuados por el método argentométrico en el caso del Cloruro, espectrométrico selectivo para el caso de los nitratos, y método turbidimétrico para el sulfato.

Figura 14. Colector de muestras de precipitación.



¹¹⁰ LIKENS, Op cit., pag 31.

¹¹¹ BURBANO, Op cit., pag 25.

¹¹² HENDRY, Op cit., pag 20.

¹¹³ BURBANO, Op cit., pag 25.

¹¹⁴ FIGUEROA y VALVERDE, Op cit., pag 56.

¹¹⁵ Ibit., pag 66.

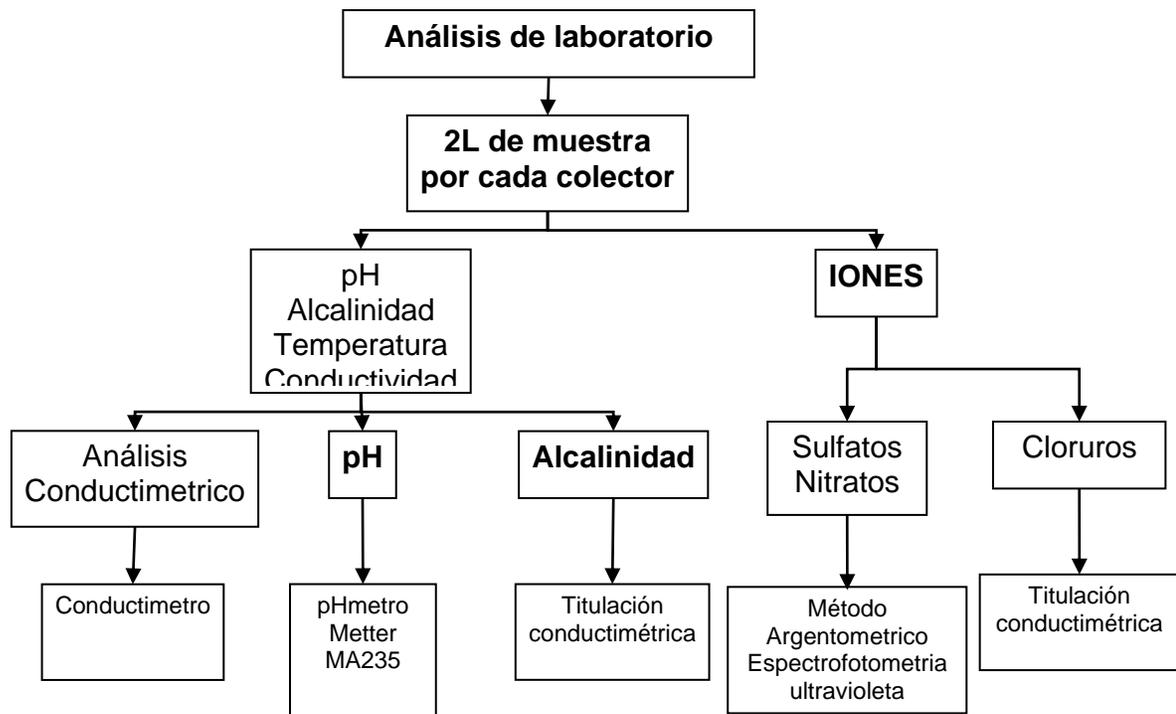
El volumen de captación para el presente estudio fue tomado como el volumen medio colectado por el investigador en los reservorios de captación durante el periodo de muestreo, siendo, el volumen colectado el resultado del promedio de tres colectores por cada punto dentro de la estación de muestreo con una periodicidad mensual, durante seis meses tiempo total del trabajo de campo. En la figura 15 se muestra la disposición de los muestreadores en campo.

Figura 15. Montaje de colectores de precipitación en campo.



7.3 METODOLOGÍA DE LABORATORIO

Figura 16. Diagrama de flujo para la metodología de laboratorio



En el presente estudio se tuvo en cuenta el cálculo de las concentraciones medias de los iones; ya que las concentraciones de estos son inversamente proporcionales a la cantidad de lluvia que cae durante las precipitaciones, para evitar las variaciones generadas por ello se calcularon las concentraciones medias de volumen, lo que normaliza los promedios entre las lluvias suaves donde se tiene concentraciones altas y las lluvias fuertes en las cuales los constituyentes son más diluidos. La ecuación empleada para ello es:

$$C_j = \left(\sum C_{ji} V_i \right) \times \left(\sum V_i \right)^{-1}$$

C_{ij}: concentración (mg/L) para el constituyente jth en una muestra de lluvia.

V_i: Cantidad de lluvia (cm³) en un periodo de muestreo (Hendry, et al., 1984)¹¹⁶.

También se calcularan las concentraciones ponderadas por volumen para cada ion.

$$F_p = \frac{[]_1 V_1 + []_2 V_2 + \dots + []_n V_n}{V_T}$$

Donde:

F_p = Concentración promedio de nutrientes por volumen.

[]_n = Concentración de l nutriente en cada muestra.

V_n = Volumen de agua de precipitación en cada muestra.

V_T = Sumatoria del volumen de todas las muestras.

La pluviometría promedio de las muestras se determinó de la siguiente manera:

$$P_i = V/A$$

Donde:

V= volumen de captación promedio del sitio de muestreo (L)

A = Área de la superficie de captación.

¹¹⁶ HENDRY, Op cit., pag 20.

Para conocer la pluviometría promedio del período considerado se recurrió a la equivalencia:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n V/A}{5}$$

Donde:

V= Volumen de captación

A= Área de la superficie de captación

5, correspondiente al número total de sitios de muestreo.

Se tuvo en cuenta el radio de los reservorios de captación, el cual fue de 0.06 m. A partir de este valor se calculó el área de la superficie de captación:

$$A = \Pi * \Gamma^2$$

Donde,

A = área de la superficie de captación

$\Pi = 3.1416$

Γ = radio del reservorio de captación

La ponderación del volumen de agua de lluvia precipitada en cada muestra, compensa la correlación inversa que existe entre este volumen con los valores de los iones analizados. Generalmente, las muestras de baja pluviometría son más concentradas al paso de las lluvias intensas por efecto de la dilución.

El valor medio ponderado (VMP) obtenido para cada uno de los iones analizados, fue entonces multiplicado por la pluviometría promedio del periodo de estudio y de esta manera se calculó el depósito total para SO_4^- y Cl^- :

$$D = VMP \times P$$

Donde,

D = Depósito total del ión (Kg/Ha/mes)

VMP= Valor Medio Ponderado

P = Pluviometría promedio (L/m^2).

Se emplearon los métodos de espectrometría ultravioleta selectivos para NO_3^- , método de análisis argentométrico para el Cl^- , método turbidimétrico para análisis

correspondientes al Ion SO_4^- , método electrométrico para pH con la ayuda de pHmetro y soluciones buffer (Mogollón et al, 1997)¹¹⁷, método de titulación conductimétrica para los análisis de alcalinidad, y métodos conductimétricos para la determinación de la conductividad, con la ayuda de una célula de conductividad o conductímetro.

Aspectos como variables climáticas o geomorfológicas fueron tomados de fuentes secundarias (suministrados por el IDEAM)¹¹⁸, exceptuando la temperatura y precipitación que fueron tomados de fuentes primarias; para el caso de la temperatura esta se tomó con la ayuda de un termómetro con precisión de una décima de grado celsius.

Todos los sitios de muestreo fueron debidamente georeferenciados con la ayuda de un GPS, y los resultados obtenidos fueron registrados en bases de datos vinculadas al Sistema de Información Geográfica, para su posterior modelamiento.

7.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para su procesamiento los datos obtenidos tanto en campo como en laboratorio, fueron registrados en tablas (Ver anexo), que permitieron su óptimo manejo y posterior análisis. Las muestras tanto en campo como en laboratorio llevaron etiquetas debidamente codificadas y fueron colectadas cada treinta días (debido a que este fue el tiempo estimado para llegar al umbral de colección de 2L después de pruebas preliminares) por un periodo de seis meses entre los cuales se tuvo cuidado de incluir periodos húmedos y secos. En cada recolección de muestras, se encontró en los recipientes un volumen determinado, el cual se midió como un indicativo del grado de disolución de los iones analizados según Burbano 2003¹¹⁹.

7.3.1 Análisis Estadístico. Mediante la prueba de ajuste a la distribución normal (Kolmogorov-Smirnov) y de la igualdad de varianza (Levene) se identifica si los datos en diferentes grupos o muestras se agrupan con la asunción para analizarlos mediante pruebas paramétricas como es ANOVA, el análisis de regresión y correlación; sino cumple con tales asunciones los datos se analizan con pruebas no para métricas como Kruskal Wallis.

Los valores obtenidos de pH, conductividad, volumen de captación de la lluvia SO_4^- , NO_3^- y Cl^- presentes en el agua de lluvia, a nivel espacial y temporal fueron procesados mediante el Programa Estadístico SPSS 7.5 para Window¹²⁰. Mediante

¹¹⁷ MOGOLLON, Op cit., pag pag 46.

¹¹⁸ IDEAM, Op cit., pag 57.

¹¹⁹ BURBANO, Op cit., pag 25.

¹²⁰ SPSS para Window [CD – ROM]. Release 7.5, Standard Version. Noviembre 14 de 1996. Copyright© SPSS Inc., 1989 – 1996.

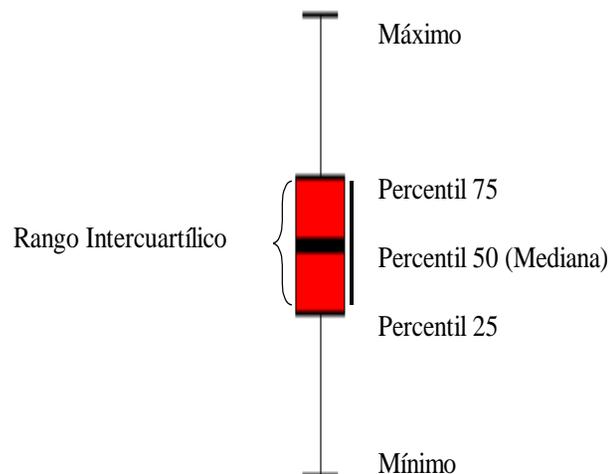
éste se calcularon los estadísticos descriptivos, Análisis de Varianza Multifactorial y correlaciones. Los valores medios de las variables se graficaron con el programa Microsoft Excel 2000.

7.3.1.1 Gráficos. Se generaron con el programa SPSS y Excel, dos clases de gráficos:

- *Gráficos para representar variables discretas o categóricas.* Se generaron Histogramas, empleados para la comparación entre dos de los parámetros.
- *Gráficos para representar variables continuas.* Se produjeron Diagramas de Caja (Figura 15) para realizar comparaciones tanto del comportamiento espacial como temporal de los parámetros analizados:

7.3.1.1.1 Diagrama de caja. Permite tener una idea visual de la distribución de los datos. Osea, determinar si hay simetría, ver el grado de variabilidad existente y detectar “outliers”.

Figura 17. Representación de un Diagrama de Caja



7.3.2 Comportamiento Espacial. Se refiere a la variación de la concentración media de los parámetros analizados en cada uno de las 5 estaciones de muestreo dentro de la ventana de estudio en el Parque Nacional Natural Puracé. Esto permitió identificar las posibles fuentes de precursores de lluvia ácida y la generación de mapas de iso – contaminación.

7.3.3 Comportamiento Temporal. Se entiende como la variación de la concentración media de los parámetros analizados durante el período de muestreo comprendido entre Septiembre de 2002 a Febrero de 2003 en toda la ventana de estudio, sin discriminar sitios de muestreo.

7.3.4 Mapas de Distribución Espacial de las Variables y Áreas de Influencia. Se generaron mediante el Software ArcView, versión 3.1¹²¹. Este programa de computador generó los mapas de distribución espacial de las variables por interpolación con los valores de los puntos mediante el método de vecindad (“*neighborhood*”) o vecino más cercano, también llamado Polígonos de Thiessen. Para obtener el mapa de áreas de influencia se utilizó la *función de distancia* del mismo software. La cartografía y Sistemas de Información Geográfica (SIG), fueron llevados a cabo en el Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca.

7.3.5 Cálculo del Depósito total. Se utilizó para disminuir la influencia de factores meteorológicos, topográficos, climatológicos, distribución de las fuentes de emisión en el área de influencia, y para normalizar los promedios de lluvias debido a que las concentraciones de los solutos son inversamente proporcionales a la cantidad de lluvia que cae durante un aguacero.

El cálculo del depósito total de SO_4^- y Cl^- para la ventana de estudio en el Parque Nacional Natural Puracé, se obtuvo de acuerdo a la metodología propuesta por Moreira y otros investigadores¹²².

¹²¹ ArcView GIS [CD –ROM]. Versión 3.1. 26 de Febrero de 2003. Licencia autorizada a: Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca.

¹²² MOREIRA L.. –NORDEMANN M., GIRARD P & RÉ POPPI N. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. En: Rev. Bras. Geof. Vol. 15, No.1, 1997.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 PRECIPITACIÓN.

8.1.1 VOLUMEN DE CAPTACIÓN. En cada recolección de muestras, se encontró en los recipientes un volumen determinado que fue el resultado del promedio de los tres volúmenes colectados por cada punto, el cual se midió como un indicativo del grado de disolución de los iones analizados. Para esta variable se presentarán únicamente los resultados de la estadística descriptiva, dado que es una variable independiente. En la ventana de estudio planteada para este proyecto ubicado en la franja Altoandina del Parque Nacional Natural Puracé se encuentran volúmenes de captación de 2000 ml de agua lluvia para los meses de septiembre, octubre y febrero, lo que les confiere a estos meses la cualidad de húmedos teniendo en cuenta que en ellos se presentaron lluvias frecuentes.

Según Figueroa y Valverde “para el área de estudio se pueden identificar los meses de Noviembre y Diciembre como los más húmedos, febrero, marzo, abril y mayo, meses con precipitaciones medias y septiembre, octubre, meses con precipitaciones escasas”. Los datos suministrados por el IDEAM ¹²³ para esta región muestran la época de lluvias entre los meses de abril a agosto, Rangel y Aguilar reportan los meses de febrero-marzo, mayo, julio-septiembre y noviembre como las épocas lluviosas y diciembre-enero, abril, junio y octubre como las épocas secas.

Los 1120 ml de agua para el mes de diciembre coincide con el periodo semiseco o de precipitaciones medias expuesto por Figueroa y Valverde (2001¹²⁴) y los 500 ml de agua para el mes de enero de 2003, sumados a los 700 ml para el mes de noviembre (Figura 18) representan en periodo seco caracterizado por fuertes vientos, aumento en la temperatura que concuerda con lo expuesto por Rangel (1997) para la región paramuna de la zona andina.

El nivel de captación fue evaluado mediante las pruebas de Kolmogorov, Smirnov y Levene encontrándose que no cumple con las asunciones de distribución normal e igualdad de varianza, empleándose en consecuencia para su análisis pruebas no paramétricas (tabla 4).

Estadísticamente si se compara en el tiempo de muestreo el nivel de captación tiene una diferencia significativa entre los meses cercana al 1% (Tabla 4).

¹²³ IDEAM, OP cit., pag 57.

¹²⁴ FIGUEROA y VALVERDE, Op cit., pag 56..

Figura 18. Volumen de captación mensual promedio para la ventana de estudio.

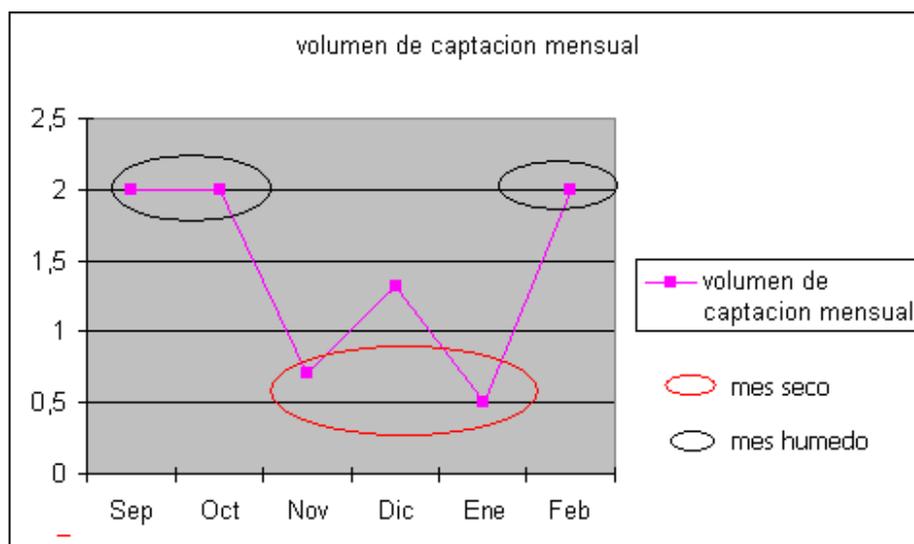


Tabla 4. Evaluación temporal de las variables mediante Kruskal-Wallis Test.

Test Statistics^{a,b}

	Nivel de captación (mm)	pH	Conductividad	Alcalinidad (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Nitrogeno absorbancia	Sulfatos (mg/L)	Nitrogeno (mg/L)	Nitratos (mg/L)
Chi-Square	78,088	7,702	31,082	11,093	63,436	41,850	10,670	41,850	41,850
df	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Asymp. Sig.	,000	,173	,000	,050	,000	,000	,058	,000	,000

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Mes

La figura 19 muestra los volúmenes de captación por estación de muestreo, donde se destacan los meses de septiembre, octubre y noviembre como los meses más húmedos en todas las estaciones con un volumen cercano a 2L, los meses de noviembre y enero como meses secos con un volumen de captación que oscila entre 0,3 y 0,6 L en las estaciones de Pilimbala, Campamento y Crucero; diciembre como mes semiseco en los sectores de Minas, Campamento Crucero y Puracé, con un volumen de captación promedio que oscila entre 0,8 y 1 L, aunque en el sector de Pilimbala este mes aparece como mes húmedo con un volumen de captación cercano a 2 L

El volumen de captación mensual promedio refleja que los meses más húmedos en todos los sitios son septiembre, octubre y febrero; los mas secos noviembre y enero y diciembre como el mes semiseco en todo el estudio (figura 19).

Figura 19. Volumen de captación mensual promedio por estación de muestreo.

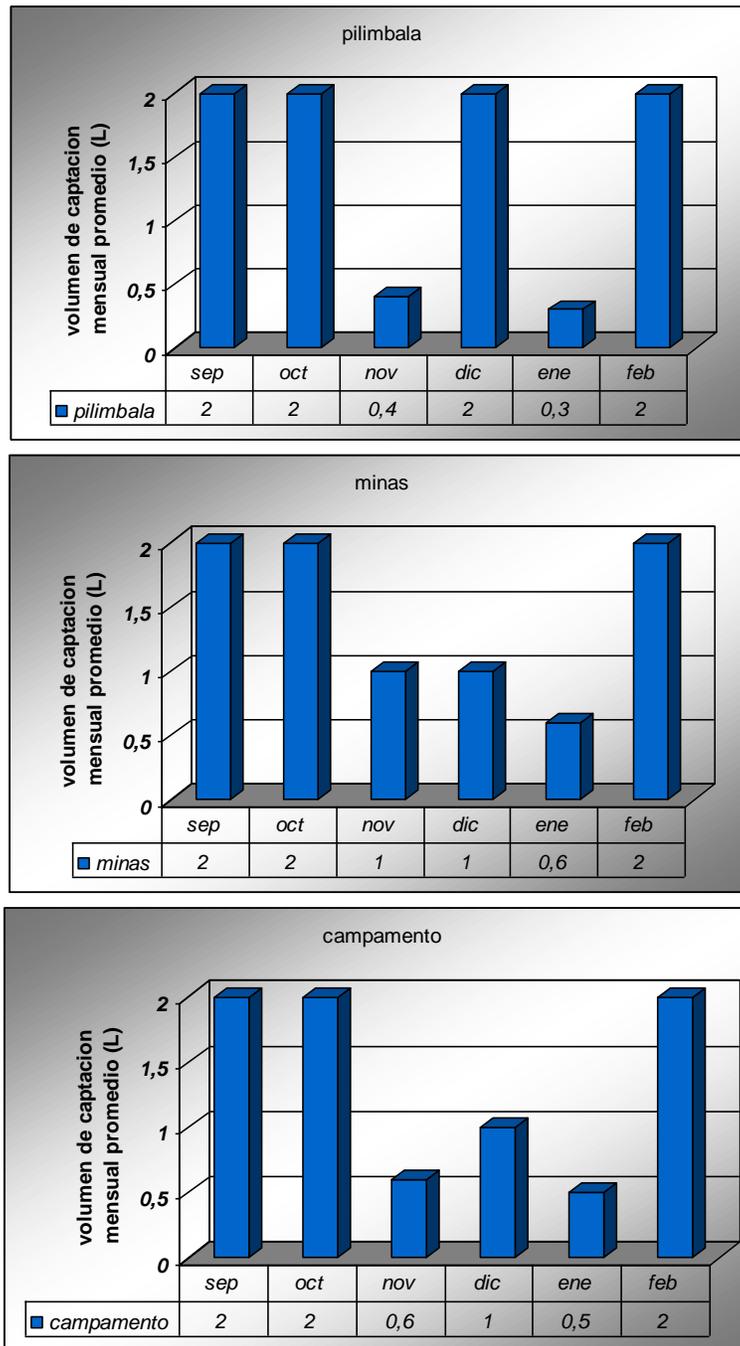
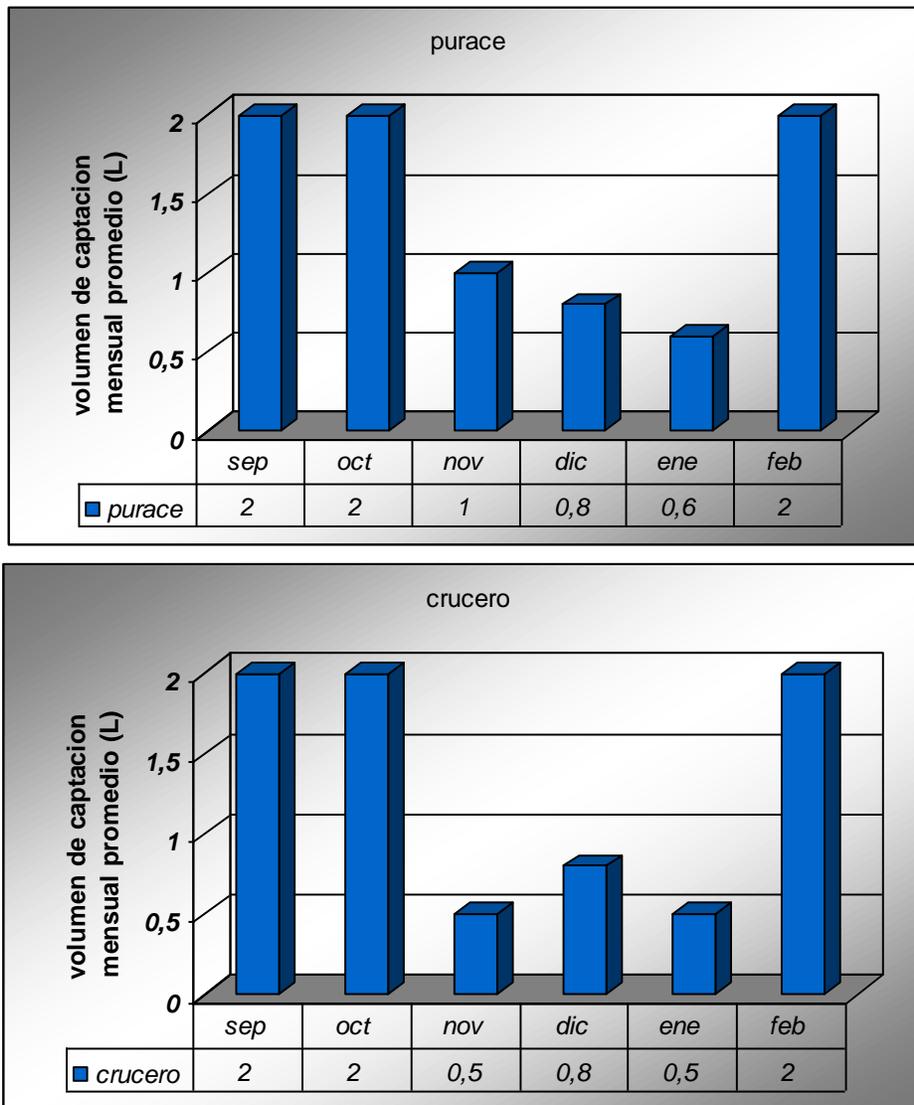
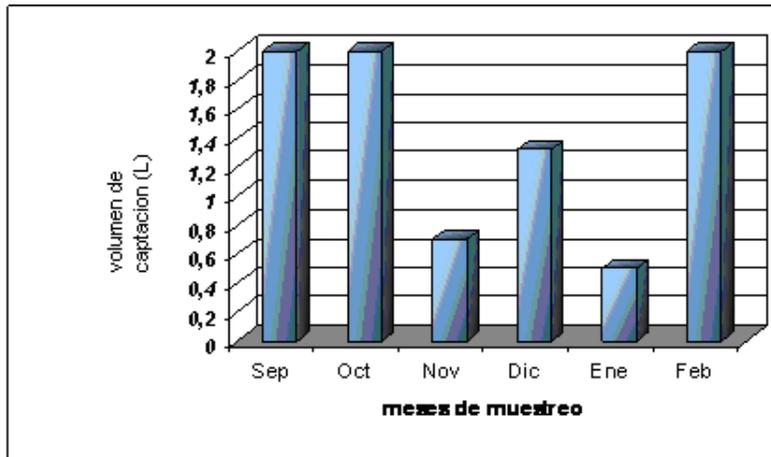


Figura 20. Volumen de captación mensual promedio por estación de muestreo.



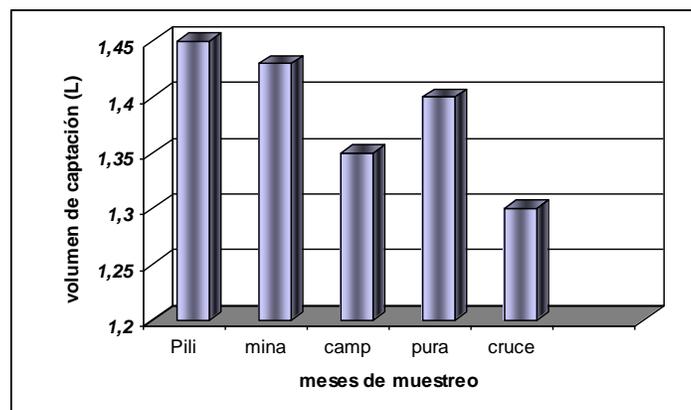
En los meses de septiembre, octubre y febrero las lluvias aumentan considerablemente en todos los sectores llegando hasta el nivel máximo de captación de 2000 ml, por lo que estos meses fueron considerados para esta investigación como el periodo húmedo (Figura 21).

Figura 21. Volúmenes medios de captación para los meses de Septiembre de 2002 a Febrero de 2003.



Para los meses de noviembre y enero se encuentra una distribución similar de los eventos de lluvias entre los puntos de muestreo; mientras en los sectores de Campamento y Crucero bajan los niveles de captación llegando hasta un volumen de 300 ml, en los sectores de Pilimbalá, Minas y Puracé aumentan estos niveles hasta 1000 ml de volumen (figura22). En general podría decirse que para el mes de Diciembre el comportamiento del nivel de captación solo varía en el sector de Pilimbalá donde en lugar de disminuir, aumenta hasta un nivel de 2000 ml. La distribución espacial para la precipitación en el tiempo total del estudio muestra los sectores de Minas, Pilimbala y Puracé como los de mayores precipitaciones y Campamento y Crucero como los de menores precipitaciones (ver mapa de distribución pluviométrica).

Figura 22. Volumen de captación promedio por sitio de muestreo



8.2 PLUVIOMETRÍA PROMEDIO

En el macizo Colombiano, el promedio de precipitación mensual es 108,96 mm; para la vertiente occidental, el promedio es 83,3 mm (Rangel y Aguilar, 1997), la ventana de estudio presentó un promedio mensual que oscila entre 114.94 mm de la estación Crucero y 128,21 mm de la estación Pilimbalá, la mina de azufre El Vinagre tuvo una precipitación promedio de 126,46 mm (tabla 6), comparando estos valores con los obtenidos por Rangel para las estaciones de Pilimbalá y El Vinagre en 1995, se puede concluir que los valores obtenidos se encuentran en un rango medio entre un año húmedo y un año seco, por lo que se podría decir según se observa en la tabla 5, que el año en el que se efectuó el muestreo para el presente estudio fue un año semiseco.

El promedio mensual de la precipitación en la estación de Pilimbalá de 128,1 mm en el presente estudio comparado con los 145,7 mm obtenidos por Rangel en 1995 para un año seco en esta misma zona (Tabla 5), refleja una disminución en la entrada de precipitación para la zona.

Tabla 5. Valores de la variación interanual de las estaciones climáticas de alta montaña.

Cordillera	Estación	Promedio años	Año húmedo				Año seco		
			Promedio (mm)	Variación (mm)	Nº meses húmedos	Exceso de agua (mm-%)	Promedio (mm)	Meses húmedos	Variación (mm)
Central	Coconuco	secos	278	1314	2	2931-87.8	33.8	5	100
	Termales de Pilimbala	húmedos	199.4	243		1480.5-61	76		170
	Laguna San Rafael	húmedos	242.2	512.5	4	1157.5-39	145.7	4	268.5
	Pan de azúcar	húmedos	193.9	220	6	1617.2-69	59.1	3	189

Fuente: El páramo ecosistema a proteger, Aguilar y Rangel 1995.¹²⁵

La media de los valores de volumen en cada uno de los meses de muestreo se observa en la tabla 6 y se relaciona el comportamiento mensual de la precipitación en la ventana de estudio, donde se muestra que el comportamiento de la pluviometría siguió el mismo patrón de distribución del volumen medio mensual en la mencionada zona.

Igualmente en la tabla 6 se presenta el promedio mensual del volumen de captación por estación que hace referencia al promedio de colección mensual de los tres

¹²⁵ Rangel y Aguilar. El paramo ecosistema a proteger 1995.

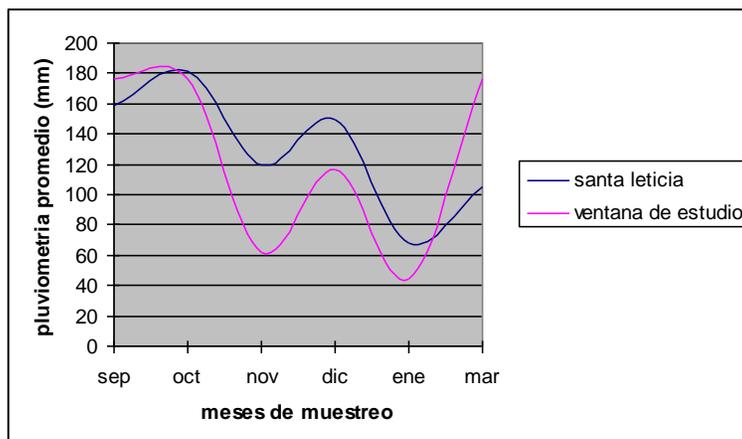
colectores ubicados en cada estación de muestreo durante los seis meses de estudio.

Tabla 6. Pluviometría promedio para los sitios de muestreo en el tiempo total de estudio.

Sitos de colección	Volumen de captación mensual promedio (ml)	Pluviometria Mensual Promedio por estación (mm)
Pilimbalá	1450	128.21
Minas	1430	126.43
Campamento	1350	119.36
Puracé	1400	123.78
Crucero	1300	114.94

En la figura 23 se observa el comportamiento de la pluviometría promedio en la zona de estudio con relación al reportado por Rangel (1995) para Santa Leticia en la misma zona de vida, donde se muestra que la pluviometría mensual promedio en ventana de estudio sigue el mismo patrón de distribución que el reportado por Rangel para la zona de vida andina en el Parque Nacional Natural Puracé, en la estación Santa Leticia; destacando que, los meses de septiembre, diciembre y marzo presentan un mayor aporte por precipitación y los meses de noviembre y enero disminución de los aportes por precipitación.

Figura 23. Comparación de las pluviometrias mensuales promedio.



La comparación de la pluviometría mensual promedio por sitio de muestro entre las estaciones de la ventana de estudio y la estación Santa Leticia tomada por Rangel como punto de referencia para la zona del Parque Nacional Natural Purace (figura 23), muestra que los meses de febrero, septiembre y octubre presentan en todos los puntos de muestreo una alta precipitación cercana a los 180 mm, y los meses de noviembre y enero una baja precipitación entre 20 y 80 (mm) para la ventana de estudio, teniendo septiembre y octubre un comportamiento pluviométrico similar al reportado por Rangel (1995) para la estación de Santa Leticia (entre 160 y 180 mm) y bajas en el nivel de pluviometría en los meses de noviembre y enero en los puntos Crucero, Campamento y Pilimbala.

Las figuras 24 y 25 muestran que el comportamiento de la pluviometría en cada estación de muestreo sigue la tendencia del comportamiento pluviométrico en la estación santa Leticia.

La pluviometría media mensual en la ventana de estudio muestra a las estaciones de la Mina de azufre, Pilimbala y Purace como zonas con mayores niveles de precipitación (figuras 24 y 25) y las estaciones de Campamento y Crucero como zonas con menores niveles de precipitación información que se comprueba con el mapa de distribución de la pluviometría.

Figura 24. Comparación de la pluviometría mensual promedio por sitio de muestreo.

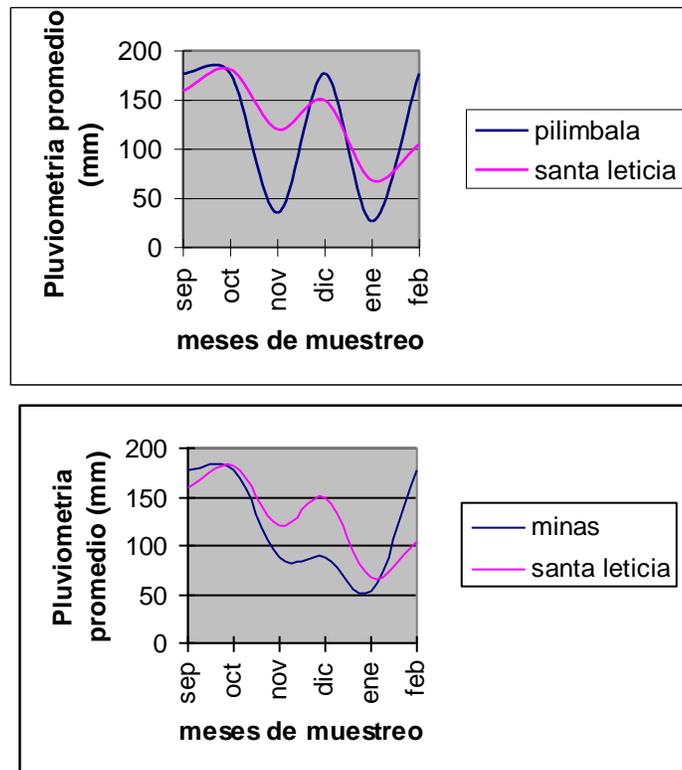
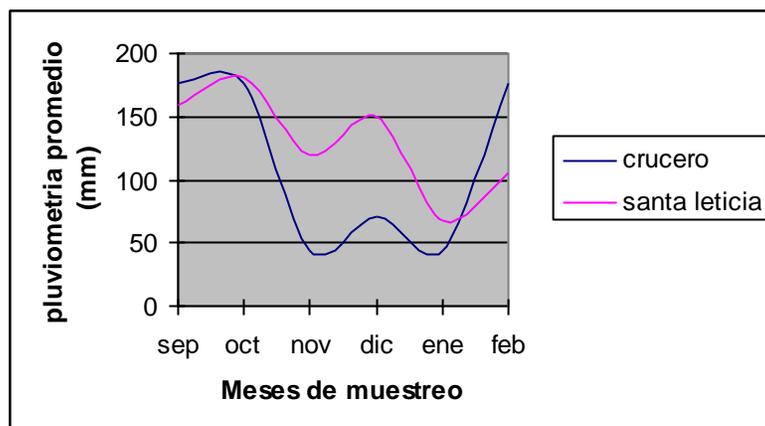
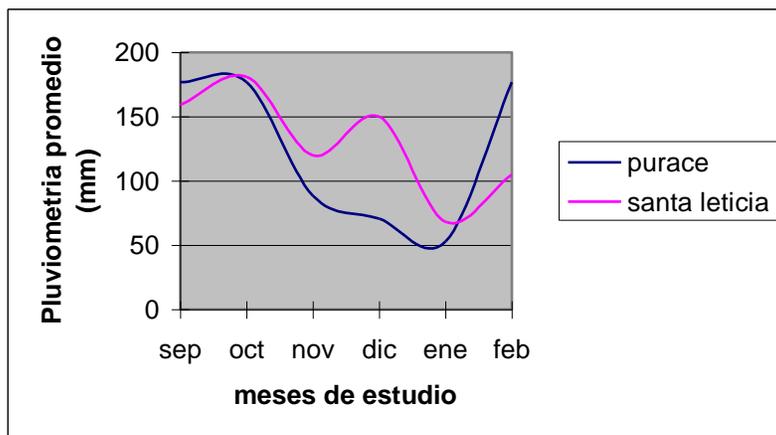
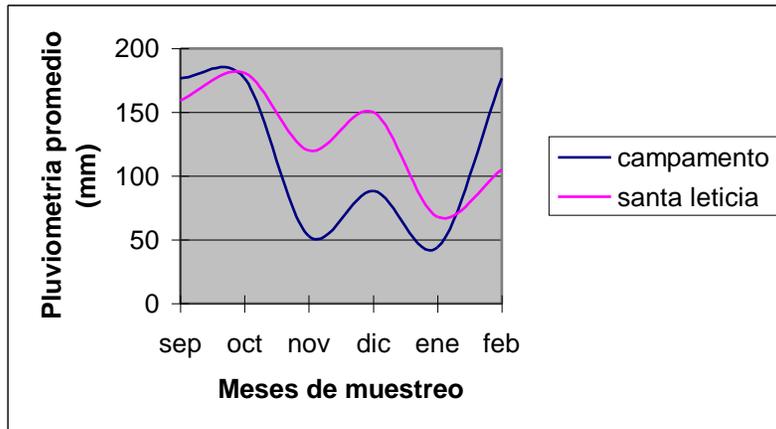
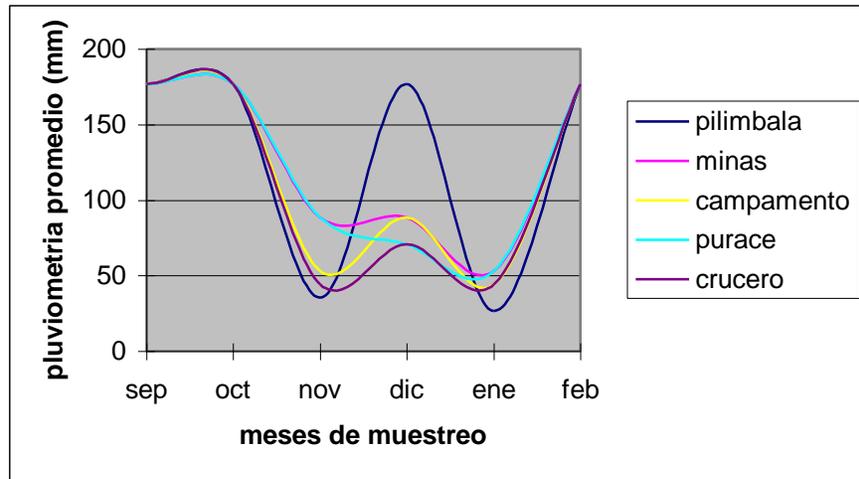


Figura 25. Continuación de la comparación de la pluviometría mensual promedio por sitio de muestreo.



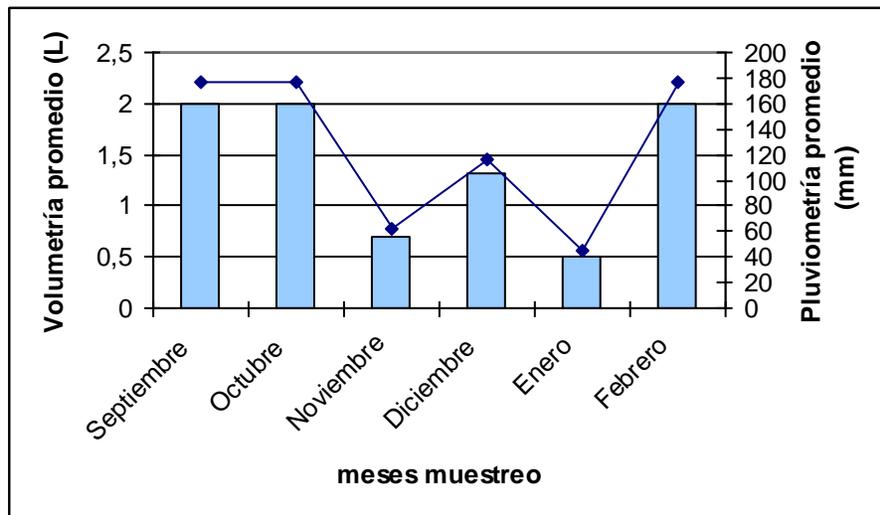
La distribución mensual de la pluviosidad en la figura 26 sugiere a septiembre, octubre y febrero como meses con mayores niveles pluviométricos; noviembre y enero como meses de menores niveles pluviométricos.

Figura 26. Comportamiento de la pluviosidad en la ventana de estudio.



La figura 27 muestra el comportamiento mensual de la precipitación en cuanto a volumen de captación (L) y pluviosidad promedio mensual (mm), ratificando la tendencia de meses húmedos y secos presentada en la figura 21.

Figura 27. Comportamiento mensual de la precipitación.



8.3 RELACION DE LA PRECIPITACION CON LA TEMPERATURA

En la ventana de estudio se presentan nubes bajas que tienen importante efecto en el curso diurno de la temperatura (Veneklas y Van Ek)¹²⁶ debido a que la temperatura depende directamente de la energía que irradie el Sol y estas nubes no permiten el paso directo de la radiación solar disminuyéndola (SGC, 1948)¹²⁷. Las nubes presentes están formadas de agua o cristales de hielo que al precipitarse, saturan el aire circundante de humedad y pueden ejercer un decremento en la temperatura del aire, cualquier enfriamiento, aumenta la humedad relativa de todas sus capas y los valores altos de humedad producen la ocurrencia de eventos frecuentes de lluvias fuertes en las épocas húmedas, posibilitando la disminución de la temperatura como se observa en la figura 21. En la parte andina del sur del país las temperaturas más altas se registran entre los meses de Julio y agosto cuando el brillo solar aumenta, incidiendo en la temperatura del aire (SGC, 1948)¹²⁸. A su vez, el aire se calienta por absorción de temperatura debido a los gases e irradiación de la energía solar absorbida por el suelo, hecho que relaciona la temperatura con la conductividad térmica del aire debido a que cuanto más alta sea la temperatura del aire más vapor de agua puede contener y mayor cantidad de gases y partículas pueden ser incorporados al vapor de agua y agua de precipitación, debido a que esta es el reflejo de los iones presentes en estos componentes (Instituto Nacional de meteorología)¹²⁹. Una constante en las temperaturas, modificadas por la altura, lo cual genera una excelente correlación lineal entre la altura del terreno y la temperatura media anual. En las zonas montañosas se pueden producir variaciones que dependen de la posición de los Valles respecto a los vientos dominantes portadores de la humedad atmosférica los que, a su vez, determinan la duración e intensidad de la lluvia (Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales, 1987)¹³⁰.

¹²⁶ VENEKLAS Y VAN EK, Opcit., pag 55.

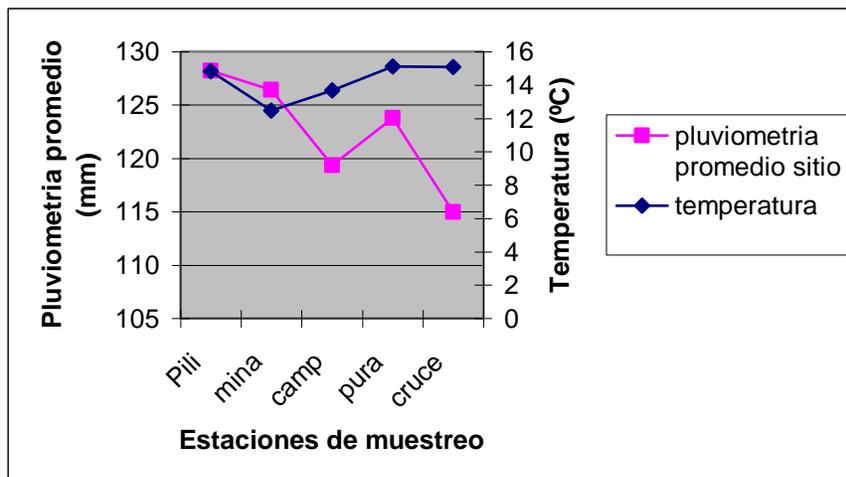
¹²⁷ SOCIEDAD GEOGRAFICA COLOMBIANA. Climatología colombiana. En : Revista climatologica colombiana. Bogotá 1948.

¹²⁸ Ibit., pag 82.

¹²⁹ INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA. Fenomanos meteorologicos [online]. Disponible en la pagina de internet. www mail x mail. Com . Mexico noviembre de 2004.

¹³⁰ SECRETARIA EJECUTIVA PARA ASUNTOS ECONOMICOS Y SOCIALES. Comisión Mixta de Cooperación Amazónica - Ecuatoriano - Colombiana - Plan de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas de los Ríos San Miguel y Putumayo. Departamento de Desarrollo Regional. Washington, D.C. 1987.

Figura 28. Relación precipitación-temperatura



8.4 ALTURA (m.s.n.m)

Al realizar el análisis estadístico mediante la prueba de Spearman se encontró que la altura tiene una correlación con las demás variables analizadas. Este análisis arrojó como resultado la correlación positiva conductividad-altura y nitrato- altura

8.4.1 Relación altura- conductividad.

En general, entre la altura y la conductividad existe una relación positiva (Figura 29), dado que a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar aumenta la conductividad aunque no muy considerablemente (figura 29), lo que puede ser explicado por la variación vertical de temperaturas, debido a que una fuente de emisión puntual como el volcán Puracé ubicado a 4750 m.s.n.m y la influencia directa de los demás volcanes pertenecientes a la cadena volcánica de los Coconucos que puede depositar a través de sus fumarolas gases, material particulado y aerosoles que son incorporados en la atmósfera (Ecosur, 2004)¹³¹, el grado de difusión vertical explica como los contaminantes pueden ser difundidos en la atmósfera debido a los siguientes factores:

- Si en la capa de aire la temperatura desciende con la altura bastante menos de 1°C cada 100 metros, los movimientos verticales del aire se limitan por lo que hay poca o nula dispersión vertical de contaminantes, con lo cual, la clase de estabilidad atmosférica es del *tipo estable*.

¹³¹ ECOSUR. Recolección, Transporte y Disposición final de Residuos Industriales, Patológicos, Especiales y Peligrosos. In Contaminación atmosférica [online]. Disponible en la página de internet [www. contaminacion atmosferica .com](http://www.contaminacionatmosferica.com) [Actualizado Noviembre 2004]

- Cuando la temperatura del estrato desciende con la altura más de 1°C cada 100 metros de altura, la estabilidad atmosférica es del *tipo inestable* y los movimientos verticales del aire están muy favorecidos difundiéndose los contaminantes verticalmente hasta donde alcance la inestabilidad.
- En la *estratificación indiferente o nula*, la variación de temperatura del estrato coincide con el gradiente vertical adiabático. Bajo estas condiciones la dispersión vertical de contaminantes no está limitada (Marcano 2001)¹³².

La clara inestabilidad atmosférica en la ventana de estudio, especialmente en sitios como Minas y Pilimbala, debido a la disminución de la temperatura con la altitud (figura 30), hace que la cercanía de las fuentes de emisión de los contaminantes que se atribuyen a la actividad de las fumarolas y emisiones biogénicas de sulfuro (Hendry et al 1984)¹³³, presencia de termales y actividad minera, pueda ser una fuente concentrada, localizada y efectiva de todo tipo de gases y partículas (Glynn 1999)¹³⁴, en el caso de la zona de estudio y por consiguiente surja un aumento en la conductividad del agua de precipitación, lo que se puede apreciar con mayor claridad en los mapas de distribución espacial de la conductividad, sulfatos, nitratos, cloruros y pluviometría (páginas 130 a la 134) y en la figura 29.

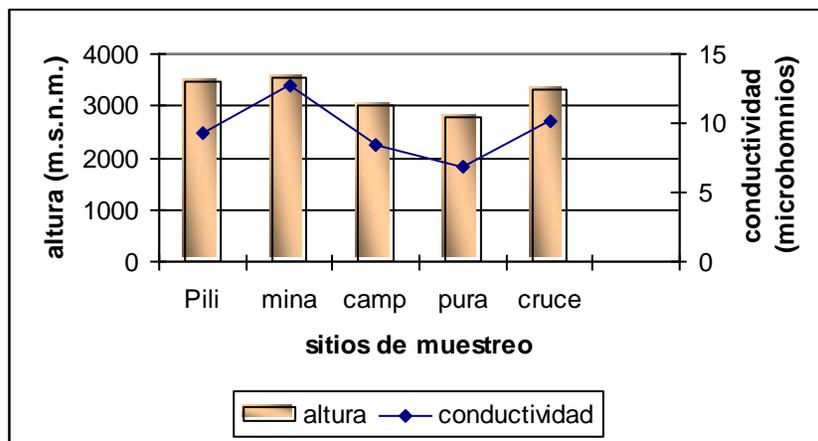
Además, en la figura 29 se puede observar una tendencia al aumento en los valores de conductividad (de 5 a 17 $\mu\text{S}/\text{cm}$), aunque cabe anotar que la dispersión de estos valores es muy alta, en general, los valores referentes a la conductividad para la zona altoandina pueden tener rangos de variación extremadamente grandes entre los valores máximos y mínimos. Sin embargo, la literatura existente, advierte que las aguas de la amazonia en general, sus tributarios y afluentes de altas montañas andinas, son muy pobres en nutrientes, y poseen bajas conductividades (Roldan, 1992).

¹³² MARCANO, José. La Contaminación Atmosférica [Online]. Netscape. República Dominicana: República Dominicana, 17 de mayo de 2001 [Actualizado en Mayo de 2001]. Disponible en internet: <<http://jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf.html>>

¹³³ HENDRY et al. Op cit., pag 20.

¹³⁴ GLYNN, Henry. Ingeniería Ambiental, Printice Hall. México. 1999. pag 800.

Figura 29. Relación conductividad- altura.



8.4.2 Relación altura – temperatura. Como se expresa en el acápite 8.3 (relación de la precipitación con la temperatura) la altura se relaciona con la temperatura, debido a que la temperatura desciende 1°C cada que se haciende 10 m sobre el nivel del mar (meteorología al alcance de todos)¹³⁵, la figura 30 muestra la relación inversa de la altura y la temperatura para la zona de estudio.

La temperatura desciende con la altura 1°C cada 100 m, valor denominado gradiente adiabático seco. Como se enfría al ascender, puede llegar a saturarse de vapor de agua. Si habiendo alcanzado la saturación continúa el ascenso comienza la condensación del vapor en agua líquida, proceso que libera calor que, por supuesto, pasa a la burbuja ascendente, con lo que ésta se enfría menos rápidamente, medio grado cada 100 metros. Al irse quedando sin vapor de agua que pueda desprender calor al condensarse, vuelve a acercarse al gradiente adiabático (Meteorología al alcance de todos, 2005)¹³⁶, es por esto que en sitios con mayor altitud como minas y pilimbala con una altura de 3529 y 3478 m.s.n.m respectivamente (ver tabla 3, figura 28 y mapa 7) disminuye la temperatura mientras que aumenta el nivel de pluviometria promedio. Las precipitaciones siguen un aumento hasta determinada faja de altitud (1 000 a 1 200 mm), para después comenzar a descender con la altura (Secretaria ejecutiva para asuntos Economicos y Sociales, Op cit, pag 91)¹³⁷. En sectores como Puracé que se encuentra a una altura inferior (2800 m.s.n.m) pero que teniendo en

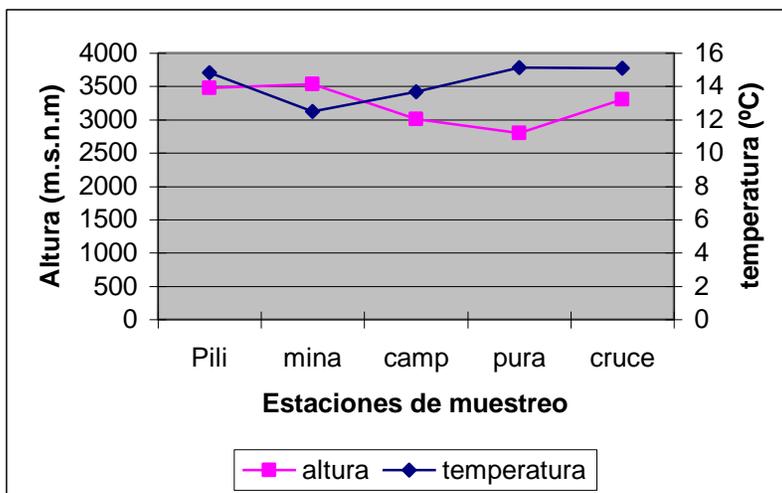
¹³⁵ Meteorología al alcance de todos. Masas de Aire - Estabilidad e Inestabilidad [online]. Disponible en Internet en la direccion electronoca http://www.geocities.com/silvia_larocca/Temas/Met28.htm obtenida el 3 Ene 2005 04:48:06 GMT.

¹³⁶ Meteorología al alcance de todos. Masas de Aire - Estabilidad e Inestabilidad [online]. Disponible en Internet en la direccion electronoca http://www.geocities.com/silvia_larocca/Temas/Met28.htm obtenida el 3 Ene 2005 04:48:06 GMT.

¹³⁷ SECRETARIA EJECUTIVA PARA ASUNTOS ECONOMICOS Y SOCIALES, Op cit, pag 89.

cuenta la distribución espacial de la pluviometría (mapa 7 y figura 30) y a pesar del aumento en la temperatura se observan núcleos de fuertes precipitaciones.

Figura 30. Relación altura- temperatura.



8.4.3 Relación altura-alcalinidad.

En la figura 31 se encuentra aunque poco marcada una relación negativa entre la altura y la alcalinidad, debido a que a medida que se avanza en metros sobre el nivel del mar disminuye la alcalinidad para este estudio. Kellman, Hudson y Sanmugadas¹³⁸ expusieron que la cantidad de iones presentes en el agua de precipitación puede tener relación a la elevación.

Esta disminución en la alcalinidad puede ser reflejo del aumento en la conductividad causado por las emisiones puntuales de iones acidificantes del agua producidas por la mina de azufre el Vinagre debido a que en la ventana de estudio se encuentra ubicado dicho complejo minero; por la presencia de fuentes termales en las cuales el azufre se puede oler y ver sus depósitos amarillos en las orillas de los lagos y que además contienen H_2S , HS^- y SO_4^- íntimamente relacionado con el pH ácido del agua o por las emisiones del volcán Puracé y la cadena de Volcánica de los Coconucos (Fundación Ecosistemas Andinos 1996)¹³⁹, produciéndose una variación de la concentración de iones y un posterior cambio en el pH, los cuales, en un medio estable, serían amortiguados por la capacidad buffer del agua; pero cuando el medio está alterado, por procesos productivos como las actividades mineras, agrícolas y

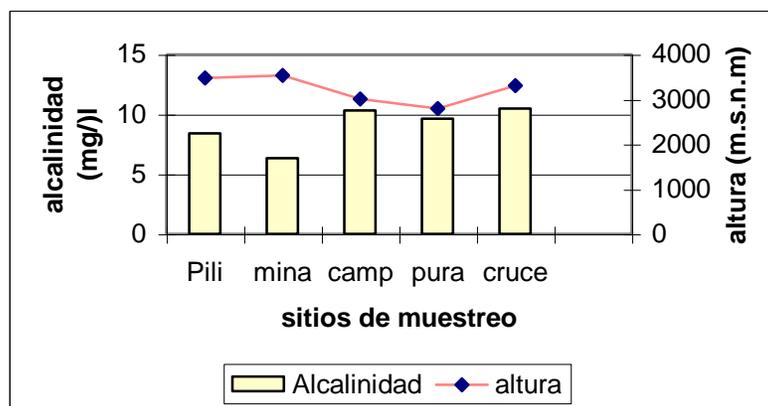
¹³⁸ KELLMAN, HUDSON, SAMUGADAS, Op cit., pag 53.

¹³⁹ FUNDACION ECOSISTEMAS ANDINOS. Op cit., pag 62.

ganaderas que se llevan acabo en la actualidad en la zona, los cambios pueden ser limitantes (Roldan, 1992)¹⁴⁰.

Además, la disminución de la alcalinidad ocurre en sitios como Minas, Crucero y Pilimbalá donde las alturas oscilan entre 3529 y 3307 m.s.n.m (Figura 31) y se encuentran ubicadas fuentes puntuales de emisión como el complejo minero en el caso de Minas, en cercanías al volcán Puracé e influencia de aguas termales en el caso de Pilimbalá o ligados a procesos de producción agrícola como es el caso de Crucero.

Figura 31. Relación alcalinidad-altura



8.5 ALCALINIDAD

En la figura 32 se muestra la alcalinidad para los meses de septiembre de 2002 a octubre de 2002, notándose que en ninguno de los meses de muestreo su valor es superior a 10 mg/l CaCO_3 con excepción del mes de septiembre en el cual se encuentra un valor de 10,28 mg/l, lo que indica, que esta región es moderadamente sensible a la lluvia ácida. Según Shaw y Ninphius (1984)¹⁴¹ que señalan que aguas con alcalinidades menores de 2mg/l de CaCO_3 son consideradas extremadamente sensibles a la lluvia ácida, de 2 a 10 mg/l de CaCO_3 tienen moderada sensibilidad a la lluvia ácida y de 10mg/L en adelante no son consideradas sensibles.

En el caso de la alcalinidad para el mes de septiembre de 2002 (10,28mg/l) se encuentra dentro de la amplitud de 10 a 500 mg/l de CaCO_3 , hecho que demuestra que esta alcalinidad se debe enteramente a carbonatos y bicarbonatos, el valor ligeramente mayor pudo verse aumentado por las entradas de protones por precipitación que pueden afectar la alcalinidad si estos actúan como un ácido en un

¹⁴⁰ ROLDAN, Gabriel. Fundamentos de limnología tropical. Universidad de Antioquia. Medellín Colombia 1992. 529 pag.

¹⁴¹ SHAW YNINPHIUS, Op cit., pag 85.

proceso de valoración ácida (Henriksen 1980)¹⁴², otro factor que pudo afectar el contenido de carbonatos y bicarbonatos en el agua muestreada pudo ser la actividad de la vegetación que afecta la alcalinidad a través de la transpiración y de los procesos de absorción selectiva (Vistousek 1977¹⁴³, Ulrich 1983¹⁴⁴). Los valores restantes son debidos a alcalinidad de carbonato debido a que para ellos la alcalinidad de la fenolftaleína es menor de la alcalinidad total según indica el “APHA” 1992¹⁴⁵.

La alcalinidad depende esencialmente de las concentraciones de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, acorde con las siguientes reacciones (Ramírez, 1998)¹⁴⁶:



Debido a su estrecha relación con el pH aguas muy alcalinas, afectan la ecología del cuerpo receptor (Mogollón, 1997)¹⁴⁷, si este disminuye denota condición ácida, que se produce por incorporación de sales ácidas (base débil y ácido fuerte) o bajo condiciones de oxidación de materia orgánica con la liberación de CO₂ (ej: lluvia ácida) debido a que la zona muestreada es zona de turberas con abundante materia orgánica en descomposición y en ellas se encuentran bosque humedo-montano: (bh-M)

Tomando en cuenta que la principal contribución a la acidificación se realiza por el SO₄⁼, con solo una pequeña posible contribución de los excesos de Cl⁻ y NO₃⁼, cabe resaltar que debido a la emisión de estos iones desde sus fuentes puntuales ubicadas dentro de la zona de estudio, ellos pueden ser los responsables de la tendencia ácida del agua y su baja alcalinidad, pero con la caída esporádica de ceniza volcánica causada por la actividad del volcán Puracé, cuya última emisión de cenizas ocurrió en el mes de septiembre época en la que la zona del parque Nacional se mantuvo en alerta amarilla, se pudo incorporar al ambiente cantidades considerables de calcio y magnesio contribuyendo al balance iónico evita que la alcalinidad alcance rangos mas bajos (E.J. Veneklaas)¹⁴⁸.

Aunque en el presente estudio se tuvo cuidado de no incluir sitios con actividades antrópicas, la zona en mención a lo largo de los años ha sido objeto de una creciente colonización acompañada de tala y quema indiscriminadas de los bosques para su

¹⁴² HENRIKSEN 1980.

¹⁴³ VITOUSEK, P. The regulation of element concentration in mountain streams in the northeastern united states. Ecologist monograph, 1977.

¹⁴⁴ ULRICH, B, MAYER and KHANNA. Chemical changes due to acid precipitaion in a loess-derived soil in central Europe, 1980

¹⁴⁵APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados: Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos, 1992. p. I – 73

¹⁴⁶ RAMÍREZ ,A. Limnología colombiana. Colombia 1998.

¹⁴⁷ MOGOLLON, Op cit., pag 46.

¹⁴⁸ VENEKLAS. Op cit., pag 55.

aprovechamiento agrícola, lo que pudo contribuir progresivamente a un aumento en las cantidades de CO₂ emitidas a la atmósfera y la posterior disminución de la tasa de absorción de éste por la vegetación.

La valoración estadística de esta variable se realizó mediante pruebas no paramétricas debido a que no cumplió con las asunciones de igualdad de varianzas obteniéndose que la diferencia de la alcalinidad en los meses de muestreo llega al 5% en la prueba de Kruskal Wallis como se observa en la tabla 7 y por lo tanto no es significativa.

Tabla 7. Evaluación del comportamiento temporal de las variables mediante la prueba de kruskal Wallis.

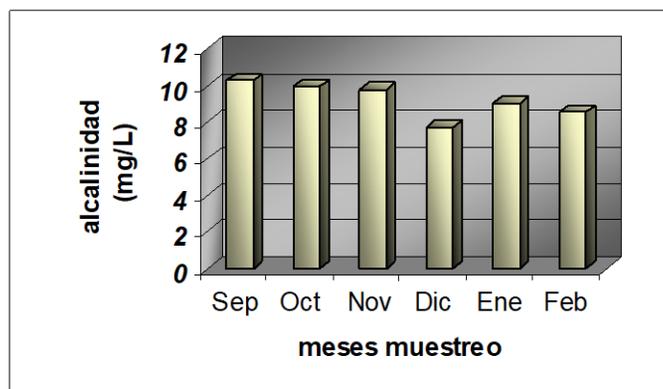
Test Statistics ^{a,b}						
	PH	CONDUCTI	ALCALINI	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Chi-Square	11.879	31.082	11.093	63.436	10.670	10.670
df	5	5	5	5	5	5
Asymp. Sig.	.036	.000	.050	.000	.058	.053

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: mes

En los meses de septiembre y octubre el comportamiento de la alcalinidad es similar en todos los puntos de muestreo, observándose que su valor va en asenso hasta alcanzar 12,1 mg /l de CaCO₃ en el mes de Septiembre y 9,84 mg/l de CaCO₃ en el mes de octubre en el sector Crucero, con excepción del sector puracé en el mes de octubre que baja su valor de alcalinidad hasta 8,17 mg/l de CaCO₃ (ver figura 32).

Figura 32. Comparación temporal de la alcalinidad



En los meses de noviembre y enero ocurre un evento similar al de los meses anteriores donde el comportamiento de la alcalinidad fue parecido para cada sector teniendo que para los sectores de Pilimbalá, Campamento y Crucero se obtuvieron alcalinidades altas hasta de 13,76 y 13,34 mg/l de CaCO₃ para cada mes respectivamente y que para los sectores de Minas y Puracé los valores de la alcalinidad fueron bajos hasta de 6 y 7,68 mg/l de CaCO₃ (ver figura 33) lo que pudo deberse a que la temperatura es prácticamente constante, especialmente en las regiones tropicales contribuyendo posiblemente a la aceleración de los procesos químicos que permiten la formación de compuestos ácidos en el aire (MARTÍNEZ-IGEA-SCIAN, 2004)¹⁴⁹.

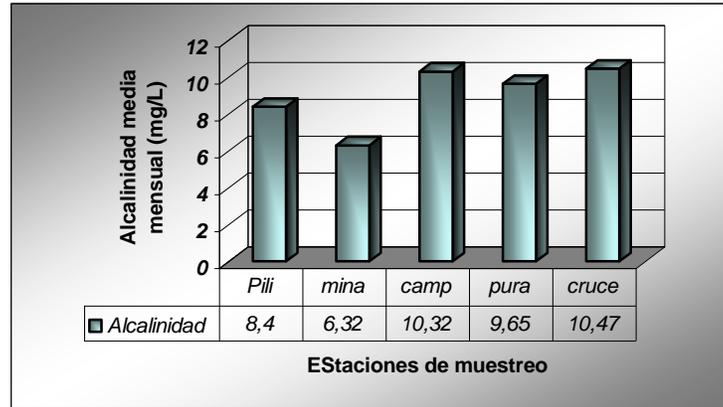
En los meses de diciembre y febrero el comportamiento de la alcalinidad también es similar teniendo un descenso de los valores en el sector minas hasta alcanzar un valor de 4,84 y 2,17 mg/l de CaCO₃ respectivamente y un ascenso de ellos en los sectores Campamento, Puracé y Crucero hasta un valor de 12, 93 en el mes de febrero para el sector de Puracé (ver tabla 8).

Tabla 8. Valores medios mensuales de la alcalinidad por estación de muestreo.

Valores medios mensuales de alcalinidad por estación (mg/L)					
meses	Pilimbala	Minas	Campamento	Purace	Crucero
sep	9,42	8,93	9,92	11,09	12,01
oct	8,26	8,26	9,51	8,18	9,84
nov	9,51	6,01	13,76	8,18	11,51
dic	6,84	4,84	8,68	9,67	8,68
ene	9,67	7,68	11,34	7,84	8,76
feb	6,71	2,17	9,01	12,93	12,01

¹⁴⁹ MARTÍNEZ-IGEA-SCIAN Nociones elementales de Química Universitaria. Formación de compuestos ácidos.[online]. Disponible en internet en la dirección electrónica http://www.fcv.unlp.edu.ar/ingreso2005/programa_de_contenidos_quimica.doc

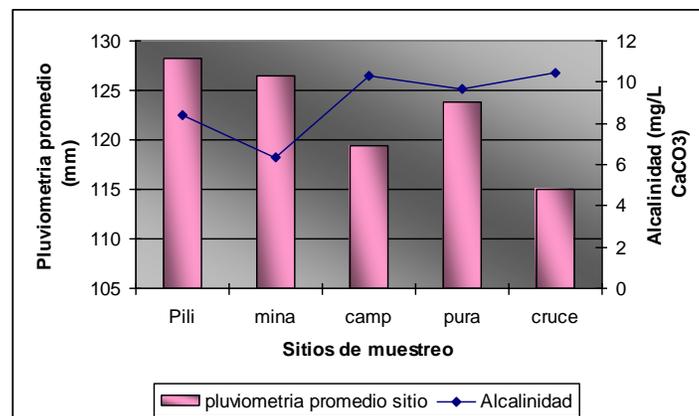
Figura 33. Comparación espacial de la alcalinidad.



8.6 Alcalinidad- precipitación.

En la relación alcalinidad – precipitación (Figura 34) se muestra que la distribución espacial de la pluviometría influye en los niveles de alcalinidad. La relación inversa es evidente en todos los sitios, encontrando que la alcalinidad aumenta a medida que la pluviometría disminuye. Esto puede ser causado por la dilución de los iones presentes en el agua en los sectores de mayor precipitación, hecho que varía en el sector de Minas, en donde, a pesar del alto nivel pluviométrico la alcalinidad es muy baja, posiblemente por la alta concentración de iones procedentes del complejo minero “El Vinagre”.

Figura 34. Relación Alcalinidad- precipitación.



8.7 pH.

La figura 35 muestra que el valor del pH es inferior a 5,5 en todos los meses con excepción del mes de enero de 2003 lo que puede estar muy relacionado con la intensidad, duración y frecuencia de los eventos de lluvia, debido a que por lo general, durante los meses de menos lluvias como el mes de enero, estas duran poco, son de baja intensidad y escasas, dando como resultado menos lavado atmosférico de los iones, baja concentración de estos en el agua de lluvia y un pH dentro de lo normal (Burbano 2003)¹⁵⁰ o deberse a un equilibrio del agua con el CO₂ atmosférico (Barret y Brodin, 1995)¹⁵¹, debido a que esta presenta para este mes menor concentración de iones Cl⁻ y NO₃⁻ y una concentración intermedia del ion SO₄⁼.

El valor inferior a 5,5 para el pH de los meses de septiembre, octubre, noviembre, diciembre y febrero demuestra que esta agua es ácida, debido a que el pH natural del agua acida es 5.6 lo cual puede llegar a ser mas alto o más bajo porque está relacionado con sustancias que se encuentran dentro del aire como resultado de las emisiones naturales generadas por el volcán Puracé, erosión por el viento, depositación seca, polvos, aerosoles, emisiones biogénicas o actividades antropicas. El agua cae a través del aire contaminado con dióxido de sulfuro y óxidos de nitrógeno, estos ácidos fuertes se ionizan fácilmente y causan que el pH de la lluvia sea menor de 5.6, la lluvia con este valor de pH puede causar daños ambientales para lagos, riachuelos y bosques (Shaw y Ninphius 1984)¹⁵².

Como el CO₂ atmosférico está en equilibrio con el agua lluvia, no se esperaría que el agua de precipitación estuviera a un pH menor que 5.5. El dióxido de azufre y en menor grado los óxidos de nitrógeno de las emisiones volcánicas, son los responsables de una acidez mayor en el agua lluvia muestreada debido a que se combinan con el vapor de agua en las nubes para formar ácido sulfúrico y nítrico en consecuencia cuando cae la precipitación de estas nubes es altamente ácida, con el valor del pH de 5.6 o más bajo (Kamss, 2001)¹⁵³.

En el mes de octubre se presentan los valores más bajos de pH la explicación es que en los eventos de lluvia de este mes se dio el lavado de iones acumulados en la atmósfera durante la temporada de menos lluvias coincidiendo con los valores de pH obtenidos para este mismo mes en la ciudad de Popayán en el estudio realizado por Burbano en el año 2001 que observa en el mes octubre valores de pH por debajo del límite inferior del rango normal, posiblemente, por una mayor acumulación de

¹⁵⁰ BURBANO, Op cit., pag 25.

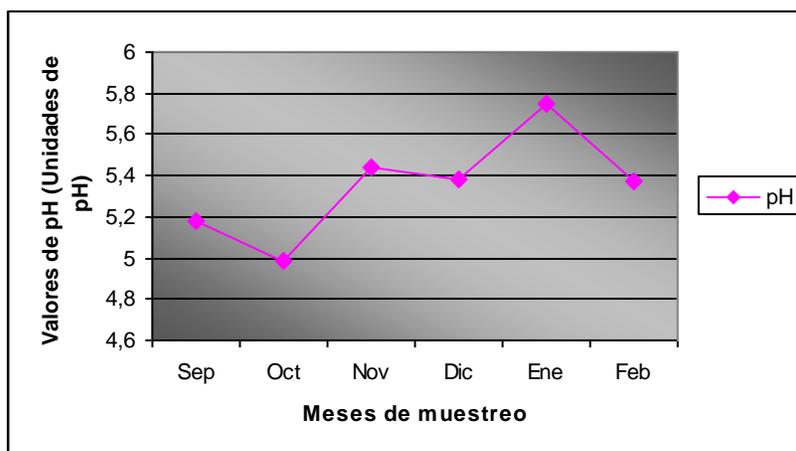
¹⁵¹ BARRET y BRODIN. the acidity of scandinavian precipitation. Tellus, 1995.

¹⁵² SHAW & N. NIMPHIUS. Acid Rain Measurement: What they mean. [Online]. Acrobat PDF Writer 3.0 para Windows. Wisconsin, United States: Department of Agricultural Journalism, University of Wisconsin-Madison, Junio 16 de 1997 [Mayo 12 de 1998]. Disponible en internet: <http://cecommerce.uwex.edu/pdfs/G3305_2.PDF>

¹⁵³ KAMSS, Op cit., pag 40.

hidrogeniones en el agua de lluvia. Los iones precursores de acidez en el agua de lluvia, pueden haber sido arrastrados principalmente de fuentes naturales como el océano Pacífico, por acción de los vientos predominantes del SW y la Cadena Volcánica de los Coconucos (Burbano 2003)¹⁵⁴, debido a que los precursores de acidificación pueden ser arrastrados por los vientos predominantes a grandes distancias, fenómeno conocido como *transporte de largo alcance de contaminantes aéreos (TLACA)* según Henry y Heinke¹⁵⁵.

Figura 35. Comparación de los valores de pH entre los meses Septiembre de 2002 a Febrero de 2003.



La distribución espacial del pH refleja en todos los sectores de la ventana de estudio valores de pH desde 4,99 Unidades de pH en el sector de la Mina, hasta valores aproximados a 5,64 Unidades de pH en sectores como Puracé, Campamento y Crucero (Ver mapa de distribución de pH). Los valores mas bajos se encontraron en las estaciones de Pilimbalá y la Mina de azufre, debido a que estas son fuentes puntuales de emisión de iones.

La evaluación estadística del pH se realizó mediante la prueba de Kruskal Wallis obteniéndose una diferencia significativa al 1% (Tabla 9), además, no se encontró correlación del pH con las demás variables (Tabla 10).

¹⁵⁴ BURBANO, Op cit., pag 25.

¹⁵⁵ HENRY y HEINKE, Ingeniería ambiental. 2a ed. Mexico, 1999. 505 p.

Tabla 9. Evaluación espacial de las variables mediante la prueba de Kruskal Wallis.

Test Statistics ^{a,b}						
	PH	CONDUCTI	ALCALINI	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Chi-Square	33.313	10.210	31.715	2.233	15.962	15.962
df	4	4	4	4	4	4
Asymp. Sig.	.000	.037	.000	.693	.003	.003

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Localizaciones

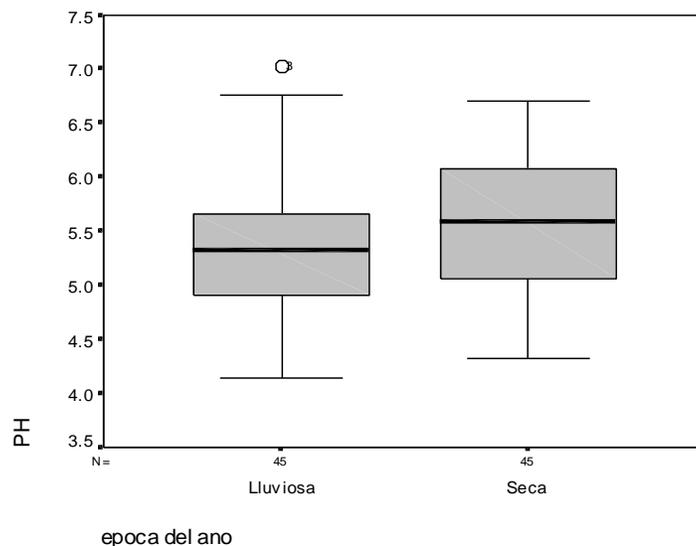
Tabla 10. Evaluación de las variables mediante la prueba de Spearman.

Correlations						
			PH	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Spearman's rho	PH	Correlation Coefficient	1.000	.021	.117	.117
		Sig. (2-tailed)	.	.841	.271	.271
		N	90	90	90	90
	CLORUROS	Correlation Coefficient	.021	1.000	.271*	.271*
		Sig. (2-tailed)	.841	.	.010	.010
		N	90	90	90	90
	SULFATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000	1.000*
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90
	NITRATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000*	1.000
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90

** . Correlation is significant at the .01 level (2-tailed).

En el diagrama de caja de la figura 36 se compara el pH en las épocas de lluvia y sequía, donde se observa una marcada simetría en ambas (lluviosa y seca), pero una alta variabilidad en la época lluviosa debido a la presencia de un out lier extremo que pudo deberse a la manipulación de las muestras en el laboratorio.

Figura 36. Evaluación del pH mediante el diagrama de caja.



8.7.1 Relación pH-pluviometría.

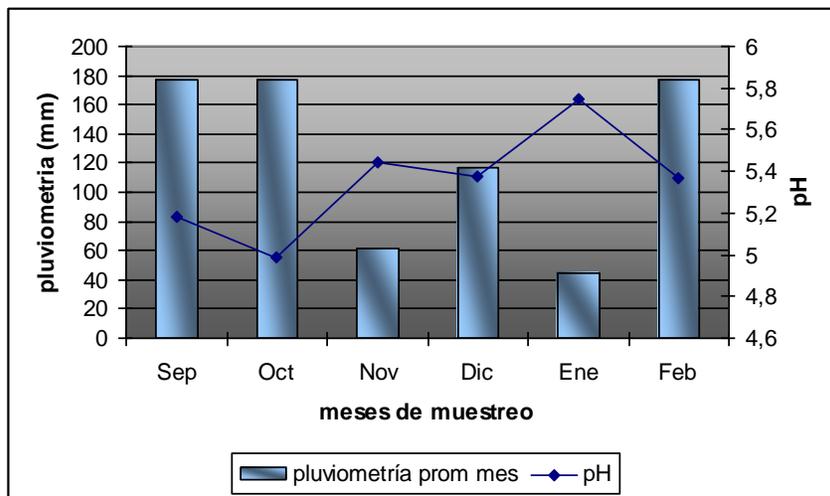
El análisis muestra una relación inversa entre el pH y la pluviometría casi en el total de los meses con excepción del mes de febrero en el cual la relación resulta ser directa, en el primer caso puede atribuirse la relación negativa a que a medida que entran en el sistema ácidos como el sulfúrico y el nítrico, el lavado también contiene sulfatos y nitratos primariamente neutros así como calcio, sodio, magnesio y aluminio que también son cationes muy importantes en la precipitación y con un equivalente básico, los cuales tienden a concentrarse en pequeños volúmenes de agua y terminan aumentando así el valor del pH (Johnson, 1977)¹⁵⁶. De una manera natural, algunos compuestos como el bióxido de carbono, al disolverse en el agua de la atmósfera, produce una solución ligeramente ácida que disuelve con facilidad algunos minerales. Sin embargo, esta acidez natural de la lluvia es muy baja en relación con la que le imparten actualmente los ácidos fuertes como el sulfúrico y el nítrico, sobre todo a la lluvia que se origina cerca de las zonas con actividades antrópicas marcadas como las mineras (Ecositio, 2004)¹⁵⁷ y entra en el sistema comúnmente como depositación seca ocurrida por la ausencia de precipitación y causada por la difusión y absorción de la superficie, la cual no es suficientemente muestreada por el método utilizado en

¹⁵⁶JONSON. D, RICHET. Lovett. The effects of atmosferic deposition on potassium, calcium and magnesium cycling in two deciduous forest. Canadian journal of forest research. 1985

¹⁵⁷Lluvia ácida. Educación Ambiental [online]. Ecositio. México 2003. disponible en internet: http://www.eco-sitio.com.ar/lluvia_acida.htm ECISITIO 2004.

la investigación, factor que se debe tener en cuenta y que afecta la concentración de los iones ácidos presentes en la muestra (ver figura 37) (Shaw 1983)¹⁵⁸.

Figura 37. Relación pH- pluviometría.

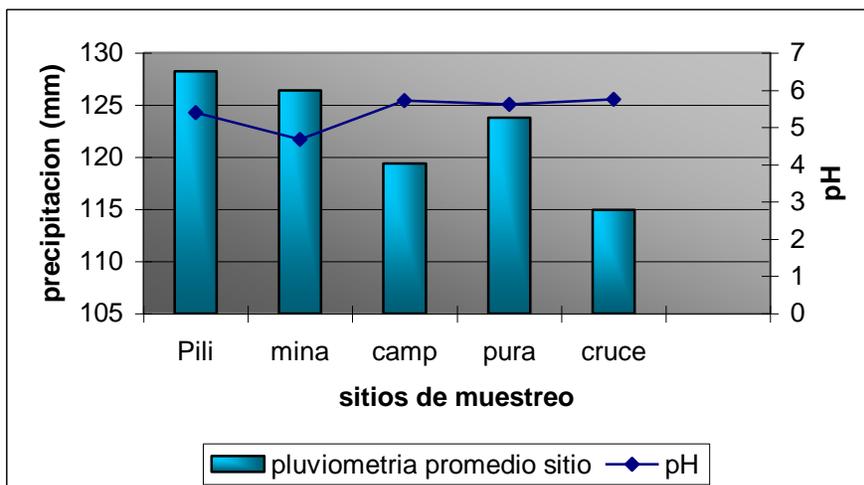


Entre los sitios de muestreo se encuentra que Minas y Pilimbalá obtuvieron los valores más bajos en cuanto al pH se refiere, a pesar de que estos sitios también presentaron las mayores entradas por aportes de lluvias, lo cual muestra la influencia de las fuentes puntuales de emisión de iones debido a que estos sitios se encuentran más próximos al volcán o como en el caso de la Mina bajo la influencia de la actividad de extracción del azufre, Campamento, Puracé y Crucero exhiben rangos de pH similares, aunque cabe destacar que el valor disminuye en el sector de puracé, debido posiblemente a la mayor contribución de aportes en la lluvia, por el aumento en la precipitación (figura 38, mapas 1 y 7).

En el mapa de distribución de pH podemos observar claramente la influencia de las actividades mineras en la disminución de los valores de pH y la relación que tienen estos valores con la disminución de la alcalinidad (mapa 2) y el aumento de la conductividad (mapa 3).

¹⁵⁸ SHAW y NINPHUS Op cit., pag 92.

Figura 38. Relación pH- pluviometría entre sitios.



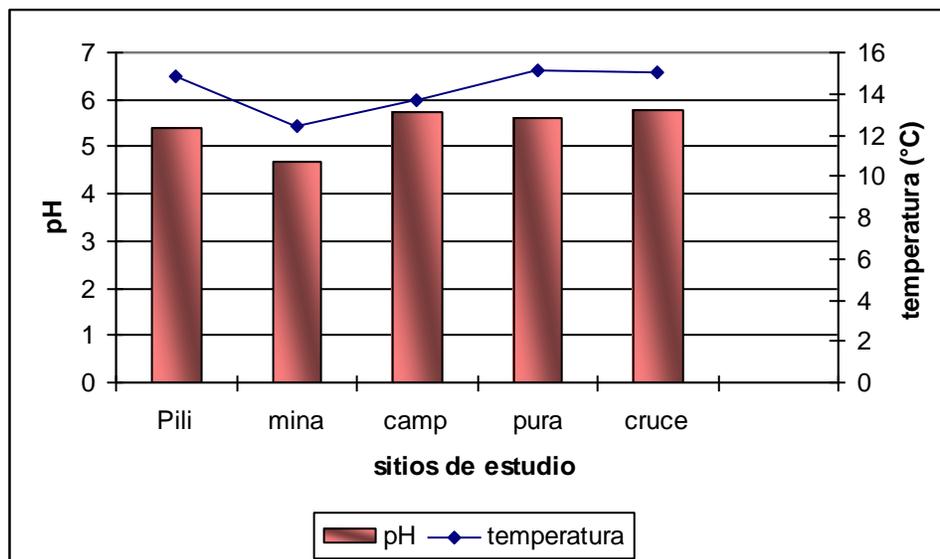
8.7.2 Relacion pH-temperatura.

Lo anterior también ocurre en la relación directa presente entre la temperatura y el pH debido a que la difusión de las partículas depende de factores meteorológicos como la velocidad del viento y la temperatura de la superficie por la irradiación solar, un decrecimiento en estos factores puede originar un incremento en la resistencia atmosférica o decrecimiento en el flujo de iones hacia la superficie (Husar et al 1978)¹⁵⁹, en un estudio relacionado Husar en 1978¹⁶⁰ encontró que este decrecimiento en los rangos de difusión arrastra considerables distancias los iones antes de que ocurran los procesos químicos de transformación y deposición ácida, explicando así que en sitios con mayores alturas como Minas, Puracé y Pilimbalá se presenten correlaciones positivas entre temperatura y pH (figura 39), debido al aumento en el contenido de iones en la superficie que puede generar una mayor alcalinidad si tenemos en cuenta lo expuesto para la relación entre la pluviometría y el pH.

¹⁵⁹ HUSAR, R. And GILLANI. Sulfur budget of power plant plume. In: Environment, 1978.

¹⁶⁰ Ibit., pag 95.

Figura 39. Relación pH- temperatura.



8.7 CONDUCTIVIDAD.

Los valores de conductividad en todos los meses de estudio son relativamente bajos si se comparan con los obtenidos por Burbano 2003 en la ciudad de Popayán a 30 Km al NW del sitio de estudio con valores tan altos como 75.10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. puesto que en el sitio de estudio los valores no exceden 24,86 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y se presentan valores tan bajos como 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores de conductividad pueden atribuirse a la presencia de partículas provenientes de fuentes de emisión natural como la Cadena Volcánica de los Coconucos y el Océano Pacífico (Burbano 2003)¹⁶¹ debido a que el agua de lluvia normalmente refleja la contribución de sales marinas (Erickson 1960)¹⁶² que pueden sufrir procesos de dilución tanto horizontal como vertical debido a que las nubes con los agentes poluentes no viajan en línea recta con volumen constante, sino que comienzan a diluirse continuamente por turbulencia atmosférica, mezclando el poluyente con el aire circundante (Chaw, 1984)¹⁶³, también podrían estar asociados con las partículas que pueden ser arrastradas desde las laderas desprotegidas y erosionadas en sitios como Campamento, Crucero y Puracé donde se ha presentado una creciente antropización, que son lavadas y diluidas intensamente por los eventos

¹⁶¹ BURBANO, Op cit., pag 25.

¹⁶² ERICKSON, R. The reaction of sulfur dioxide with ozone in water and its possible atmospheric significance. In: atmospheric environment, 1977.

¹⁶³ SHAW, Op cit., pag 87

de lluvias presentes en la región o arrastradas grandes trayectos desde su origen hasta sitios lejanos al sitio de colección de las muestras.

8.7.1 Precipitación – conductividad.

Debido a que la mayor conductividad se presenta en el mes de enero (Figura 40) puede ser atribuida al período de sequía que durante este mes fue acentuado facilitando la poca dilución de los iones presentes en el agua de lluvia haciendo que las sales presentes en la precipitación tengan a su vez poca dilución, dado que en la mayoría de las soluciones acuosas, cuanto mayor es la concentración de las sales disueltas, mayor es su conductividad eléctrica. Este efecto continúa hasta el punto de saturación de la sal o hasta que la solución se halla tan concentrada en iones, que la restricción del movimiento causada por un aumento posterior en la concentración, disminuye la conductividad eléctrica del sistema (Uindustrial 2004)¹⁶⁴. Para el mes de octubre al igual que en el mes de enero se presenta una elevada conductividad y pocas precipitaciones siendo este un mes semiseco, los eventos de lluvias poco frecuentes contribuyen al aumento de la conductividad debido a que la dilución de los iones presentes en el agua es escasa, en los meses restantes se presentan eventos de lluvias continuos lo cual se ve representado en el aumento de la pluviometría, la consecuente mayor dilución de los iones y posterior disminución de la conductividad (figura 40).

La conductividad es un reflejo del contenido iónico de cualquier solución. En el agua los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad por lo que se ha considerado a esta variable como indicador de los iones presentes en el agua de precipitación

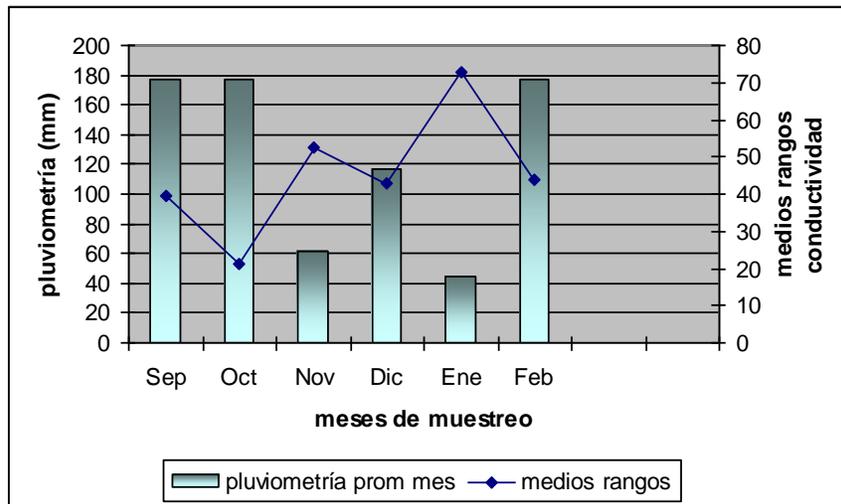
Debido a que a través de la conductividad se puede conocer la magnitud de la concentración iónica (Roldan, 1992)¹⁶⁵; los flujos de nutrientes mensuales generalmente exhiben una relación inversa entre el volumen de agua que cae y la concentración de iones (Hendry, 1984)¹⁶⁶, la relación negativa entre la conductividad y el volumen de precipitación (Figura 40) es un claro reflejo de este comportamiento. Cabe anotar que en la relación precipitación- nitratos se presenta aumento de la concentración con respecto al volumen de precipitación, por lo que el aumento en la conductividad podría ser debido a la poca dilución de este ion en el agua de lluvia en las épocas lluviosas y verse aumentado por los demás iones en las épocas secas.

¹⁶⁴ UINDUSTRIAL 2004.

¹⁶⁵ ROLDAN, Gabriel. Fundamentos de limnología tropical. Universidad de Antioquia. Medellín Colombia 1992. 529 pag.

¹⁶⁶ HENDRY et al. Op cit., pag 20.

Figura 40. Evaluación temporal de la relación medios rangos de conductividad la pluviometría.



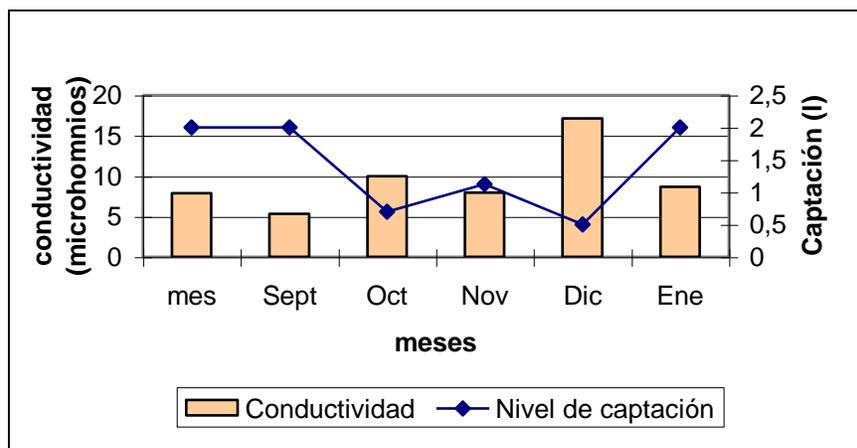
En la Figura 41, se aprecia la relación que existe entre el comportamiento de la conductividad y el volumen de precipitación durante los meses de septiembre de 2002 y febrero de 2003. Los fuertes vientos que son comunes en el sitio de muestreo posiblemente ayudaron a la acumulación de partículas en el aire durante la época de lluvias escasas, poco intensas y de corta duración, la concentración que precipitó con ésta pudo ser escasa, pero por efecto de la depositación seca, dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire, con un diámetro inferior a 100 μm . (Entre las que se cuentan núcleos de partículas medias en suspensión, partículas sedimentables, polvos, humos industriales, humos de combustión) pudo verse aumentada, debido a que el período seco favorece los procesos de depositación seca, se incrementa el flujo de nutrientes minerales y la acidificación aumenta por el incremento de la agricultura que aunque no muy practicada es reciente en la región y marcada por la época (comenzando en la época de sequía) (Fundación Ecosistemas Andinos, 1996)¹⁶⁷

Los aerosoles tienen propiedades que afectan los procesos de contaminación atmosférica: su forma, composición química y el tamaño de sus partículas (dado que establece su tiempo de permanencia en la atmósfera y la facilidad con que se introducen en las vías respiratorias profundas), estos aerosoles depositados sobre el embudo, al llover posiblemente fueron lavados hacia el interior del reservorio, aumentando la conductividad en este (Burbano 2003)¹⁶⁸.

¹⁶⁷ Fundación Ecosistemas Andinos. Páramo ecosistema a proteger. Editorial CODICE LTDA. Santafé de Bogotá, 1996.

¹⁶⁸ BURBANO, Op cit., pag 25.

Figura 41. Comportamiento de la conductividad respecto a la precipitación.



La conductividad también pudo verse aumentada a consecuencia del lavado de iones atmosféricos debido al inicio de la temporada de lluvias abundantes. Teniendo en cuenta que durante algunos meses se registraron valores bajos de pH, es probable que la conductividad se deba a una mayor acumulación de aquellos iones que le confirieron el carácter ácido al agua de lluvia. A medida que aumenta el volumen de captación dado el lavado iónico en la atmósfera por el aumento de la precipitación, la conductividad disminuye, favoreciendo la dilución de iones, debido a que en general el agua tiene la capacidad de disolver más sustancias, particularmente concentraciones de magnesio, sulfato, cloruro y calcio (Likens, et al 1984)¹⁶⁹.

Las anteriores observaciones se verifican en los mapas (1,2, 3 y 7) donde se presenta la distribución espacial para las variables pH, alcalinidad, conductividad y precipitación, que observan un comportamiento similar en cuanto a distribución espacial en la estación de la mina de azufre “El vinagre”, donde, el pH ácido, contribuye al aumento de la conductividad (mapas 1 y 3) y en consecuencia a la disminución de la alcalinidad (mapa 2) a pesar de la mayor dilución de sulfatos y cloruros (mapas 5 y 6) debido al aumento en los niveles de precipitación en la estación “El vinagre” (mapa 7), el incremento de las concentraciones de Ion nitrato en esta zona (mapa 4) pudo facilitar el aumento en los niveles de de acidificación del agua de precipitación.

Los datos de conductividad obtenidos no se ajustan a las presunciones de distribución normal e igualdad de varianza evaluados mediante las pruebas de Kolmogorov, Sminov y Levene por lo cual para su análisis se emplearon pruebas no paramétricas (ver tabla 12) en las que se observan similitudes en los comportamientos de esta variable para los meses de febrero, septiembre, noviembre y diciembre (Tabla 11), debido posiblemente a los eventos de vientos y lluvias del periodo semiseco para el

¹⁶⁹ LIKENS et al. Op cit., pag 39.

primer mes referido y los eventos de lluvias fuertes para el segundo mes por lo general todos los meses de muestreo se enmarcan en un rango de 5 a 17,12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una variabilidad relativamente baja, con la excepción del punto Crucero en el mes de septiembre y los puntos Pilimbalá, Minas y Campamento en el mes de enero cuya variabilidad es alta aunque no excede el límite de confianza del 95%.

Tabla 11. Evaluación de la conductividad mediante la prueba de Kruskal Wallis

mes	N	Mean Rank
Enero	15	72.60
Febrero	15	43.80
Septiembre	15	39.73
Octubre	15	21.33
Noviembre	15	52.73
Diciembre	15	42.80
Total	90	

Tabla 12. Evaluación de la conductividad por época mediante las prueba Kruskal Wallis.

Test Statistics ^{a,b}						
	PH	CONDUCTI	ALCALINI	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Chi-Square	2.110	14.662	1.665	1.240	3.084	3.084
df	1	1	1	1	1	1
Asymp. Sig.	.146	.000	.197	.265	.079	.079

a. Kruskal Wallis Test

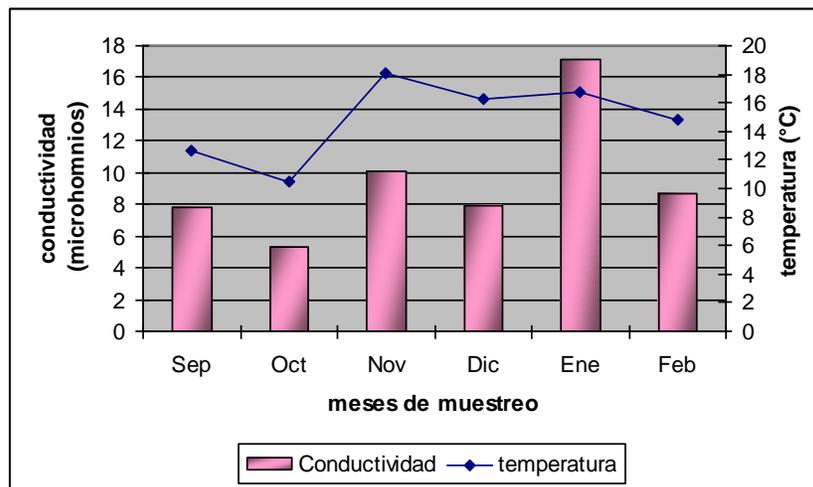
b. Grouping Variable: época del año

8.7.2 Relación conductividad – temperatura.

La relación positiva entre el aumento en la temperatura y el aumento de la conductividad que se observa en la figura 42, es debida, a la variación de la conductividad en las épocas de lluvia y sequía, dado que la temperatura referida es la temperatura promedio del sitio, más no del agua, el período seco favorece los

procesos de depositación seca, por la interacción de aerosoles, polvo y otras emisiones, que contribuye al aumento de la conductividad puesto que el flujo de iones se incrementa con la temperatura (Roldan, 1992)¹⁷⁰, además al aumentar la cantidad de iones presentes en el aire, la actividad de estos incrementa la temperatura (Burbano, 2003)¹⁷¹.

Figura 42. Comportamiento temporal de la relación conductividad- temperatura.



Existe una cierta relación positiva de la conductividad con la temperatura en los puntos Pilimbalá y Crucero (ver figura 43), lo que nos reitera la influencia de la temperatura de los sitios de muestreo en los resultados encontrados para la conductividad puesto que la conductividad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga o valencia y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura. Debido a que a mayor temperatura menor viscosidad y a menor viscosidad, mayor libertad de movimiento, la temperatura también tiene una marcada influencia sobre la conductividad eléctrica de un sistema acuoso. Aunque el incremento de la conductividad eléctrica con la temperatura puede variar de un ión a otro, en general, se acepta que esta aumenta en promedio, en un 3 % por cada grado centígrado que aumente la temperatura (Uindustrial 2004)¹⁷² Un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ion, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, la conductividad varía de 1 a 4 % por cada ° C. Conociendo estos factores, la medición de la conductividad nos permite tener una

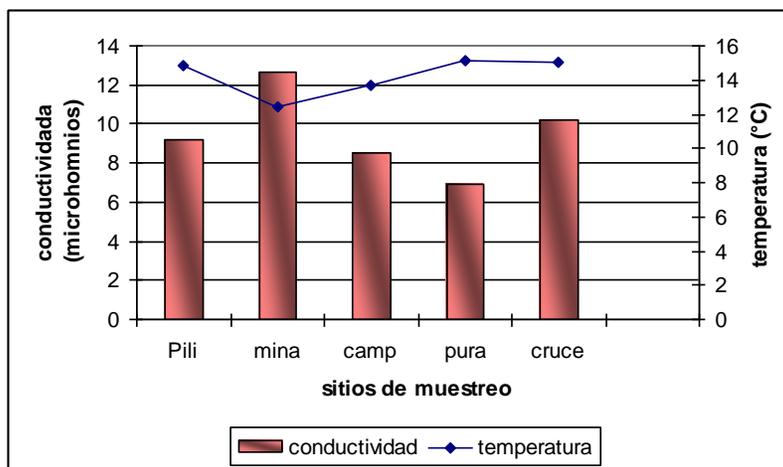
¹⁷⁰ ROLDAN, Op cit., pag 83

¹⁷¹ BURBANO. Opcit., pag 25.

¹⁷² UINDUSTRIAL. Op cit., pag 97.

idea muy aproximada de la cantidad de sales disueltas (Society for testing and Materials. Annual book of Standards 1994).¹⁷³

Figura 43. Comportamiento espacial de la relación conductividad-temperatura.



La temperatura contribuye al aumento del flujo iónico hacia la superficie y los factores meteorológicos influyen directamente los rangos de depositación, durante la precipitación se renuevan los poluentes por causa de la temperatura y estos pueden ser capturados en depositación húmeda por la transformación de nieve y granizo, atrapando gases y partículas poluentes separadamente (Slinn, 1977)¹⁷⁴, sumado esto a el hecho de que se genera depositación seca que aumenta el contenido de iones presentes y por consiguiente la conductividad, puesto que la atmósfera a través de la temperatura actúa como un reactor químico que acelera los procesos y las reacciones contribuyendo a la solubilización de compuestos.

Sin embargo, lo expuesto anteriormente no explica la relación negativa del comportamiento de la conductividad respecto a la temperatura en el caso de Minas, debido a que mientras la temperatura desciende en el punto Minas la conductividad en este mismo punto aumenta, esto puede deberse a que en este punto específicamente se encuentra ubicado el complejo de explotación minera “El vinagre” que como puede observarse en la figura 44, es una fuente puntual de material particulado que contribuye al aumento de la conductividad en este sector.

Además la variación relativamente pequeña de la temperatura puede atribuirse al viento que baja del volcan purace, debido a la conformacion geomórfica del sector

¹⁷³ Determinación de la Conductividad Eléctrica American Society for testing and Materials. Annual book of Standards 1994.

¹⁷⁴ SLINN, W. Et al. Wet and dry deposition and resuspension of AFCT/TFCT fuel procesing radionucleides, final report, Air Resources Center. Oregon state university Corvallis, 1979.

estos vientos dominantes pueden generar una pequeña variación en la temperatura y depositar en la zona gases y partículas provenientes de la cadena volcánica, hecho que se observa con claridad en el mapa de distribución de la conductividad en la zona.

Figura 44. Mina de azufre “El vinagre”.



8.8 APORTES DE IONES EN PRECIPITACIÓN.

Henry y Heinke¹⁷⁵ exponen que el agua de lluvia en regiones remotas del mundo depende de factores físicos y químicos, que determinan la variabilidad de su composición, debido a que la depositación de nutrientes está relacionada con los volúmenes de precipitación que se registren y son aportes directos a los ecosistemas naturales (Likens et al 1984)¹⁷⁶, de esa manera, el comportamiento de la precipitación tiene gran incidencia en los aportes de nutrientes generados por el agua lluvia, y aunque el ciclo del Nitrógeno es más rápido en los bosques montañosos lluviosos (Vitousek y Sanford, 1986¹⁷⁷) en el verano cuando los flujos son más efectivos en

¹⁷⁵ HENRY, J. Glynn., & HEINKE, Gary W. Op. Cit. 778 p.

¹⁷⁶ LIKENS .Op cit., pag 39.

¹⁷⁷ VISTOUSEK Y SAMFORD

cuanto a exportación del material particulado, las bajas precipitaciones dan como resultado relativamente bajas depositaciones (Likens et, al 1984)¹⁷⁸

Se diferencian dos procesos de precipitación: precipitación seca (granizo y nieve) y precipitación líquida (lluvia, lloviznas y chubascos), estos procesos van acompañados por procesos de depositación de partículas secas (DPS) como aerosoles y partículas sólidas, algunas de cuales son especialmente tóxicas para los humanos y, en la práctica, los principales riesgos para la salud humana por la contaminación del aire provienen de este tipo de polución, debido a que son incorporadas al ecosistemas mediante las precipitaciones. De esta manera las precipitaciones integran al ecosistema iones como NO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y Cl^- y otros iones determinantes en la acidificación del agua y muy importantes para el presente estudio.

La emisión de NO_3^- , $\text{SO}_4^{=}$ y Cl^- es constante desde las fuentes presentes en la zona y su posterior dilución por la lluvia también se realiza constantemente. Aunque se entiende que a mayor volumen de precipitación mayor dilución de nutrientes, en la zona se presentan fuentes puntuales que emiten constantemente y en gran cantidad sustancias poluyentes, que pueden ser incorporadas al agua lluvia o depositadas como partículas sólidas presentándose que a mayor volumen de precipitación se encuentren mayores aportes de iones en las muestras colectadas. Fuentes como el volcán Purace por ejemplo puede emitir ácido clorhídrico, óxidos de sulfuro que se convierten posteriormente en ácido sulfúrico y otros ácidos fuertes que son depositados en los alrededores como lo reporta Botín en 1939 para el volcán Vesubio y Huctchinson en 1979 para el Smoking Hills en Canada.

Existe una correlación entre la entrada de sulfatos y nitratos en el agua de precipitación (tabla 13) debido a la competencia de estos iones por el radical OH; la reducción de emisiones de NO_x llevan al incremento en las concentraciones de HO_2 , el cual a su vez incrementa las concentraciones de H_2O_2 un importante oxidante del sulfato. Por lo tanto, la variación de las emisiones de nitratos puede afectar directamente la concentración de sulfatos en el agua de precipitación (Shaw Roderick, 1984)¹⁷⁹.

¹⁷⁸ ibit., pag 79.

¹⁷⁹ SHAW, Roderick. The atmosphere as delivery vehicle and reaction chamber for acid precipitation. Estados Unidos de America 1984.

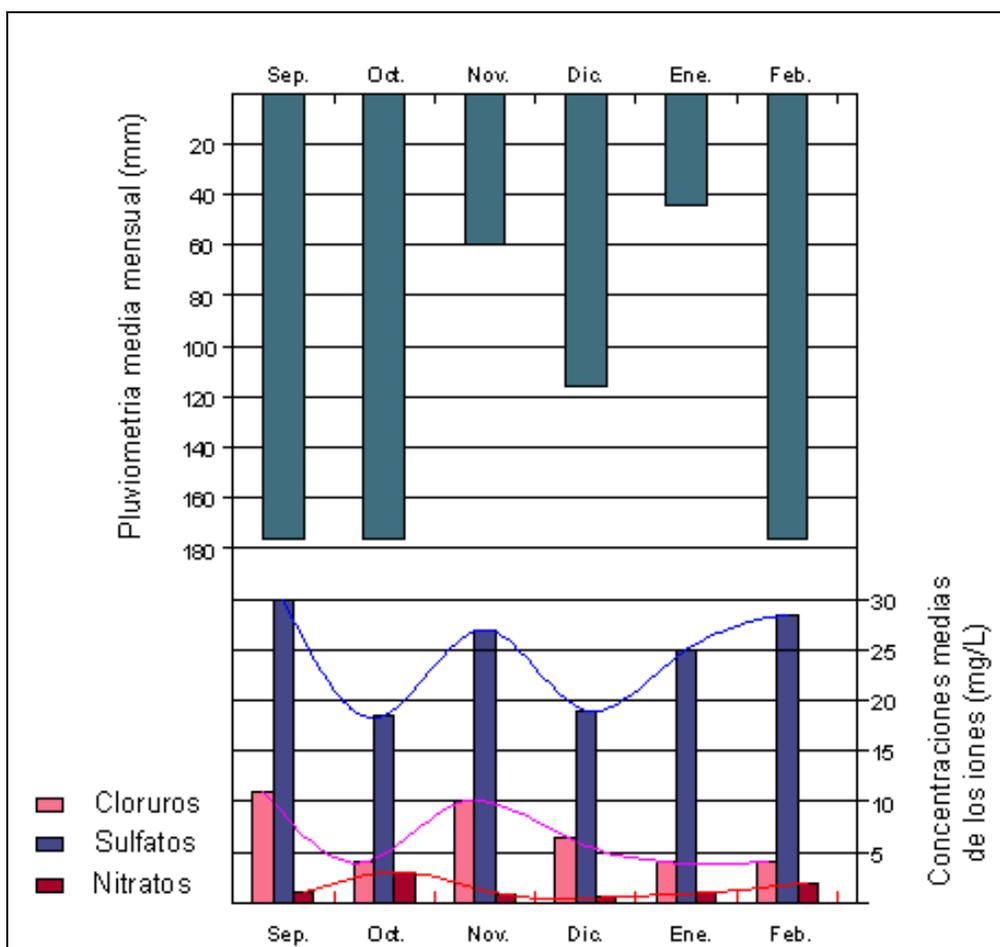
Tabla 13. Evaluación de las variables mediante la prueba de pearson.

		Correlations				
			PH	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Spearman's rho	PH	Correlation Coefficient	1.000	.021	.117	.117
		Sig. (2-tailed)	.	.841	.271	.271
		N	90	90	90	90
	CLORUROS	Correlation Coefficient	.021	1.000	.271*	.271*
		Sig. (2-tailed)	.841	.	.010	.010
		N	90	90	90	90
	SULFATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000	1.000*
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90
	NITRATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000*	1.000
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90

**. Correlation is significant at the .01 level (2-tailed).

La entrada de iones en las épocas húmedas (en los meses de Septiembre, Octubre y Febrero) observa relación con el volumen de precipitación existente (figura 45), a pesar de las mayores concentraciones de iones encontradas en los meses de septiembre, noviembre y febrero que coinciden con las temporadas de lluvias, aunque en los meses secos también se presenta un importante aporte de iones sobre todo en los meses de noviembre y enero.

Figura 45. Entrada de iones con respecto a la precipitación.



En la tabla 14 se muestran en Ton/Ha/mes los aportes de iones en el agua de precipitación calculados según la metodología planteada para el cálculo de las concentraciones medias de los iones (paginas 70 y 71), entre los cuales se observa que los mayores aportes se presentan con el ion Sulfato (entre 24,30 Ton/Ha/mes y 467,79 Ton/Ha/mes) lo cual concuerda con la hipótesis planteada en la investigación, el segundo ion en importancia es el Cloruro con valores que van de 4,55 a 180,01Ton/Ha/mes y finalmente el nitrato posee los valores más bajos en aportes que van de 0,82 a 44,85 Ton/Ha/mes, las grandes diferencias en el depósito mensual de iones se pueden explicar con la variación en los niveles de precipitación, debido a que los mayores depósitos de iones ocurren en los meses mas húmedos (septiembre,

octubre y febrero) y los depósitos menores se encuentran en los meses de menores precipitaciones (tabla 14).

Se presenta los valores de aportes medios mensuales de los iones en mención en la figura 45, debido a que la importancia de estos tres iones es notoria, aunque, en el agua de precipitación se presentan aportes de otros iones que no se tomaron en cuenta en el presente estudio y que se sugiere sean evaluados en investigaciones futuras.

Tabla 14. Depósito total de iones Ton/Ha/mes en el agua de precipitación.

DEPOSITO TOTAL IONES TON/HA/MES			
Meses	Cloruro	Sulfato	Nitrato
Septiembre	180,01	467,79	13,58
Octubre	76,23	291,91	44,85
Noviembre	20,21	51,64	1,28
Diciembre	35,91	94,28	2,11
Enero	4,55	24,30	0,82
Febrero	72,86	436,26	23,27

El depósito medio ponderado de los iones o DMP (tabla 15) muestra como a nivel general los mayores aportes de iones en Kg/ha/año se presentan en las estaciones de Pilimbalá, Minas y Campamento, lo que puede ser corroborado en los mapas de distribución de los respectivos iones. El mayor aporte por estación se presenta para el ion sulfato en el sector de campamento (ver mapa de distribución espacial para el ion sulfato) que puede deberse a las actividades agrícolas y ganaderas presentes en esta zona. Carlos E. Oyarzún, Roberto Godoy & Sergio Leiva en un estudio similar encontraron que los niveles de iones en el agua de lluvia de las áreas agrícolas-ganaderas presentaron diferencias altamente significativas ($P < 0,01$) con los sitios boscosos, especialmente durante la época de verano (LEIVAGODOY, OYARZÚN 2002)¹⁸⁰

¹⁸⁰ OYARZÚN Carlos E, GODOY Roberto & LEIVA Sergio: Depositación atmosférica de nitrógeno en un transecto valle longitudinal-cordillera de Los Andes, centro-sur de Chile Atmospheric deposition of nitrogen in a transect from the Central Valley to Cordillera de Los Andes, south-central Chile. Santiago mar. 2002

Tabla 15. Deposito medio ponderado de iones por estación de muestreo.

Estación	DMP (Kg/ha/año) sulfato	DMP (Kg/ha/año) nitrato	DMP (Kg/ha/año) Cloruro
Pilimbala	2456,5036	215,3928	1053,8862
mina	3129,1425	208,6095	888,8029
campamento	4059,4336	120,5536	914,2976
purace	2283,741	116,3532	820,6614
crucero	3360,8456	95,4002	813,7752

8.8.1 Sulfatos.

Las concentraciones del ion sulfato para el área de estudio en los seis meses de muestreo fueron las más altas entre las concentraciones de los iones estudiados (Tabla 16), lo cual se esperaba debido a que esta es un área de influencia volcánica donde la actividad de las fumarolas puede contribuir con los excesos de SO_4^- presentes (Hendry, C.,1984)¹⁸¹; pues en ella, se encuentran volcanes activos como el volcán Puracé (ver figura 47) y también presenta la influencia de la explotación minera del azufre lo que genera emisión de gases poluentes a la atmósfera.

Este sulfato encontrado en el área de muestreo esta fácilmente disponible en grandes depósitos de tipo volcánico y manantiales minerales (Restrepo y Vargas.,1951)¹⁸², como las termales de San Juan (ver figura 48), combinado se encuentra en minas o minerales metálicos, sobre todo en forma de sulfatos y sulfuros; en forma de H_2S (ácido sulfhídrico) en las aguas minerales y en las materias orgánicas; en forma de SO_2 (dióxido de azufre) en las fumarolas de los volcanes y en otras combinaciones en los compuestos orgánicos (Felix, et al.,1958)¹⁸³.

La concentración media del ion Sulfato para los meses de septiembre a Noviembre de 2002 en el punto de muestreo 3 correspondiente a campamento (ver figura 46) es muy alta con respecto a la concentración media de los demás iones, esto puede

¹⁸¹ HENDRY, Op cit., pag 20.

¹⁸² RESTRPO Y VARGAS Química Básica: los principios fundamentales de la química general. Colombia, 1951.

¹⁸³ FELIX, C. Et al. Tratado de química mineral. Bogotá, 1958

deberse a la acción de los vientos que tienen una orientación Este- Oeste (Figuroa y Valverde 2001)¹⁸⁴, que transportan en esta época de lluvias materia y gases entre el sitio de emisión y el sitio muestreado, por otra parte también puede atribuirse al transporte de poluentes marinos y localmente derivarse de emisiones biogénicas de sulfuros (Hendry et. Al, 1984)¹⁸⁵. Para los meses de Diciembre a Enero correspondientes a la época de sequía se encontraron concentraciones altas de este mismo ion en el punto Crucero, lo que no ocurre en sitios más cercanos al Volcán o a la influencia de la actividad minera debido esto posiblemente a que los poluentes emitidos desde sus orígenes pueden viajar tan lejos como 2000 Km o más a través de la atmósfera (Shaw 1984)¹⁸⁶, por acción de los vientos en forma de deposición seca, polvo y aerosoles (Figuroa y Valverde 2001)¹⁸⁷. En el mes de Febrero de 2003 la mas alta concentración de este ion se encuentra en el punto 2 correspondiente al complejo minero con un valor de 75 mg/L y es el segundo valor más alto de concentración de este ion en los seis meses de muestreo después de Noviembre de 2002 en el sector Campamento cuyo valor es de 77,7 mg/L, estos valores extremos están asociados a las emanaciones gaseosas de la mina, valores que se van estabilizando a medida que los puntos de muestreo se alejan del complejo minero (Figuroa, et al 2001)¹⁸⁸, también se puede atribuir este comportamiento a que en el mes de febrero se presentan precipitaciones correspondientes al periodo semiseco que va de enero a abril según señalan Figuroa y Valverde (2001)¹⁸⁹ debido a que la precipitación en zonas tropicales contribuye a la entrada de cationes (H^+ , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-), típicamente asociados con el agua de lluvia (Hendry, 1984)¹⁹⁰ y que generalmente las partículas de azufre y nitrógeno actúan como núcleos de condensación y junto con el agua forman gotas. Las menores concentraciones fueron encontradas entre los meses de octubre de 2002 a enero de 2003 en el complejo minero. Esto debido posiblemente a la acción de los fuertes vientos a grandes velocidades que durante la época de sequía se presentan en esta región llevándose los iones lejos de su origen, debido a que la concentración de estos iones es inversamente proporcional a la velocidad del viento porque cuando la velocidad del viento se incrementa los poluentes emitidos desde su origen son diluidos en grandes volúmenes de aire dando como resultado bajas concentraciones (Shaw, R 1984)¹⁹¹.

¹⁸⁴ FIGUEROA Y VALVERDE, Op cit., pag 56.

¹⁸⁵ HENDRY, Op cit., pag 21.

¹⁸⁶ SHAW, Op cit., pag 87.

¹⁸⁷ FIGUEROA, Apolinar, VALVERDE, Antonio y ALEGRÍA, Carlos. Análisis de la sensibilidad a la acidificación de un ecosistema altoandino como un instrumento de gestión. Popayán, 2001.

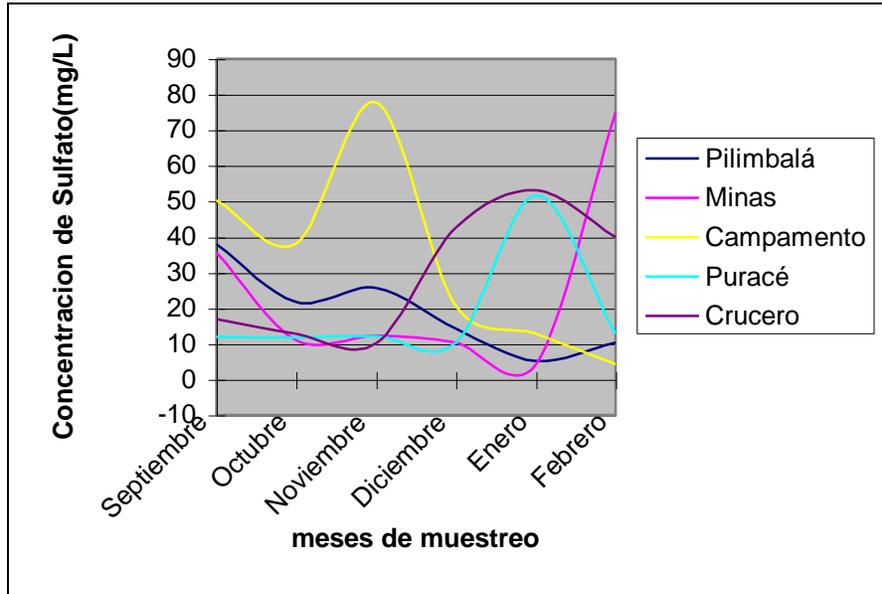
¹⁸⁸ Ibit., pag 104.

¹⁸⁹ Ibit., pag 104.

¹⁹⁰ HENDRY, Op cit., Pag 20.

¹⁹¹ SHAW, Op cit., pag 87.

Figura 46. Comparación de las concentraciones medias del ion sulfato.



El ion sulfato es uno de los iones más importantes en el estudio de la lluvia ácida y el principal ion en el presente estudio, en cuanto a concentración se refiere, como se indica en la tabla 16, este ion presenta elevadas concentraciones en todas las estaciones de colección, por lo que puede ser un factor primordial en la acidificación del agua en la zona.

Su distribución espacial indica que los sitios con mayores concentraciones de sulfato son las estaciones de Campamento y Crucero (ver mapa de distribución espacial de sulfatos), mientras que en las estaciones de Pilimbalá y La Mina de azufre las concentraciones se encuentran en un rango medio, esto puede deberse a las actividades antropogénicas desarrolladas en la zona que permiten un incremento en las concentraciones de sulfatos en los sectores de campamento y crucero y a la influencia de los vientos que transportan este ion desde fuentes cercanas como la mina y el volcán hasta estos lugares, debido a la geomorfometría del terreno. Los valores intermedios del ion en zonas cercanas a las fuentes puntuales de emisión pueden también deberse a una mayor dilución de este ion debido a los altos niveles en la precipitación para estas zonas (Ver mapa de distribución espacial de la pluviometría).

Figura 47. Fumarola del volcán Puracé.



Figura 48. Fuentes Termales de San Juan.



Los datos obtenidos para el ión sulfato en general no se acomodan a la distribución normal e igualdad de varianza evaluados mediante las pruebas de Kolmogorov, Smirnov y Levene, en consecuencia para su análisis se empleo la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Tabla 16) obteniéndose que para los meses de septiembre y enero se encuentra la diferencia más significativa del ión sulfato los demás meses exhibieron similares características.

Tabla 16. Evaluación del sulfato mediante la prueba de Kruskal Wallis.

Test Statistics^{a,b}

	Nivel de captación (mm)	pH	Conductividad	Alcalinidad (mg/L)	Cloruros (mg/L)	Nitrogeno absorbancia	Sulfatos (mg/L)	Nitrogeno (mg/L)	Nitratos (mg/L)
Chi-Square	,957	25,985	10,210	31,715	2,233	13,119	15,962	13,119	13,119
df	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Asymp. Sig.	,916	,000	,037	,000	,693	,011	,003	,011	,011

a. Kruskal Wallis Test

b. Grouping Variable: Geopocision (Grados)

En los sectores de Campamento y Crucero se observa una gran similitud, mientras que en los sectores de Minas y Puracé se encuentra una marcada diferencia de estos con los demás sectores (ver Tabla 17), para los meses de octubre a diciembre de 2002 se presentan tendencias similares en la distribución de este ion aumentando su valor en el sector de Campamento, siendo esto más notorio para el mes de noviembre, en el último mes de muestreo (febrero de 2003) se encuentran los mayores valores para este ion en el sector de Minas y los menores en los sectores de Pilimbalá, Puracé y Campamento (figura 46).

La tabla 17 muestra en los sitios de colección encontramos diferencia significativa entre Pilimbala y Crucero (Ver mapas de distribución sulfato y pH) en el primero se encuentra en el ion sulfato y el pH, indicando que a medida que disminuye la concentración del sulfato aumenta el pH, lo cual, es apenas lógico debido a que si se disminuye la concentración de iones con cargas negativas el pH tiende a estabilizarse, puesto que el sulfato es el ion inorgánico más importante en el volumen de precipitación (Likens y Borman 1977)¹⁹² y que contribuye de forma potencial a la formación y generación de acidificación en respuesta a la depositación ácida (Wookey 1991)¹⁹³.

El análisis estadístico reporta una correlación entre los iones nitrato y sulfato (Tabla 18), la bibliografía sugiere que el nitrato incrementa marcadamente con el incremento del ion sulfato lo cual fue notado por Ineson (1983)¹⁹⁴ y Kelli, Strickland (1987)¹⁹⁵ y

¹⁹² LIKENS, E. y BORMAN, F. forested ecosystem. New York, 1977.

¹⁹³ WOOKEY, P y INESON P. Chemical changes in decomposing forest litter in response to atmospheric sulfur dioxide. Unites Estates. Journal of Soil Science, 1991.

¹⁹⁴ INESON, P. The effect of airborne sulphur pollutants upon decomposition and nutrient release in forest soil. Thesis University of Liverpool.

puede ser explicado como un simple intercambio, debido a la naturaleza de los agentes oxidantes.

Tabla 17. Evaluación temporal y espacial del ion Sulfato mediante la prueba de Kruskal Wallis.

Ranks					
Localizaciones	N	Mean Rank SO ₄ ⁼	Mes	N	Mean rank SO ₄ ⁼
Pilimbalá	18	44.75	Enero	15	29.57
Minas	18	39.28	Febrero	15	45.40
Campamento	18	57.14	Septiembre	15	60.53
Puracé	18	28.69	Octubre	15	45.07
Crucero	18	57.64	Noviembre	15	47.60
			Diciembre	15	44,83
Total	90		Total	90	

Tabla 18. Análisis de correlación del sulfato con las demás variables mediante la prueba de Spearman.

Correlations						
			PH	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Spearman's rho	PH	Correlation Coefficient	1.000	.021	.117	.117
		Sig. (2-tailed)	.	.841	.271	.271
		N	90	90	90	90
	CLORUROS	Correlation Coefficient	.021	1.000	.271*	.271*
		Sig. (2-tailed)	.841	.	.010	.010
		N	90	90	90	90
	SULFATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000	1.000*
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90
	NITRATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000*	1.000
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90

** . Correlation is significant at the .01 level (2-tailed).

Grandes concentraciones del ion sulfato de entre 4,26 y 77, 7 mg/L de SO₄⁼ son atribuidas a que durante la época de muestreo se presenta actividad volcánica que

¹⁹⁵ KELLY and STRICKLAND. Soil nutrient leaching in response to simulated acid rain treatment water. Air and soil pollution 1987.

emite altas concentraciones de dióxido de sulfuro (E, J Veneklaas)¹⁹⁶, en la región debido a la actividad del Volcán Puracé, hecho que coincide con lo reportado por Williams en 1986¹⁹⁷ para el Volcán Nevado del Ruiz.

La posible influencia volcánica, puede ser atribuida principalmente a la dispersión de compuestos azufrados provenientes de la Cadena Volcánica de los Coconucos por acción de los vientos del SE debido a que erupciones volcánicas arrastraban consigo, invariablemente, enormes cantidades de azufre; y el olor advierte la presencia de gas sulfuroso y ácido sulfhídrico. Sobre este particular podemos juzgar, no sólo por el olor específico de las emanaciones de los volcanes, las sofocantes solfataras (como las del sur de Italia, o las nubes de gas sulfuroso de las erupciones de Kamchatka)¹⁹⁸, el azufre es arrastrado también en forma de disolución, acumulándose en las fisuras y formando vetas rocosas y por el arrastre de sales marinas sulfatadas provenientes del Océano Pacífico (Burbano, 2003)¹⁹⁹. Los aportes de sales marinas sulfatadas hacia el interior de los continentes podría ser muy importante si se tienen en cuenta los datos reportados por Möller (1995)²⁰⁰.

Por otra parte en el río Vinagre que nace en el volcán Puracé, se han encontrado concentraciones de ácido sulfúrico con un contenido aproximado de 1Kg/m³, confiriéndole valores de pH alrededor de 2²⁰¹, por lo tanto, los aportes provenientes desde el volcán a partir de la emanación de compuestos azufrados desde las fumarolas, debido a que, una gran cantidad de azufre oxidado se halla en combinación con el calcio, son también de pH ácido. Esta combinación es bastante difícil de disolver en el laboratorio, pero en cambio es una combinación muy activa en la tierra. Dicha combinación, que denominamos yeso, se deposita abundantemente, formando gruesas capas en los lagos salinos y cuencas marinas y puede ser incorporada a la lluvia durante su evaporación, la extracción de azufre y como consecuencia de los vientos SE, podría constituirse en un aporte considerable (Burbano, 2003)²⁰².

Los yacimientos de azufre dentro de la ventana de estudio (ver figura 49) contribuyen en gran proporción con la emisión de sulfato hacia la atmósfera debido a que en las minas la cantidad de ácido sulfúrico desprendido durante la oxidación es tan grande

¹⁹⁶ VENEKLAAS, E. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests. Colombia. Journal of Ecological, 1990.

¹⁹⁷ WILLIAMS, S. Decomposition of litter on the soil surface. In Biology of plant litter decomposition. London.

¹⁹⁸ Oyarzun R. & Higuera P, Minerales, metales, compuestos químicos, y seres vivos: una difícil pero inevitable convivencia

¹⁹⁹ BURBANO, Op cit., pag 25.

²⁰⁰ MÖLLER, D. Sulfate Aerosols and their Atmospheric Precursors. En: Aerosol Forcing of Climate, 1995. p. 73-90

²⁰¹ Felix, 1958. Op. Cit., pag 34.

²⁰² BURBANO, Op cit., pag 25.

que no queda posibilidad alguna de protegerse contra su acción tóxica y la ropa de los trabajadores ocupados en estas minas, se deteriora con extrema rapidez, debido a los efectos corrosivos de dicho ácido (INGEOMINAS 2004)²⁰³

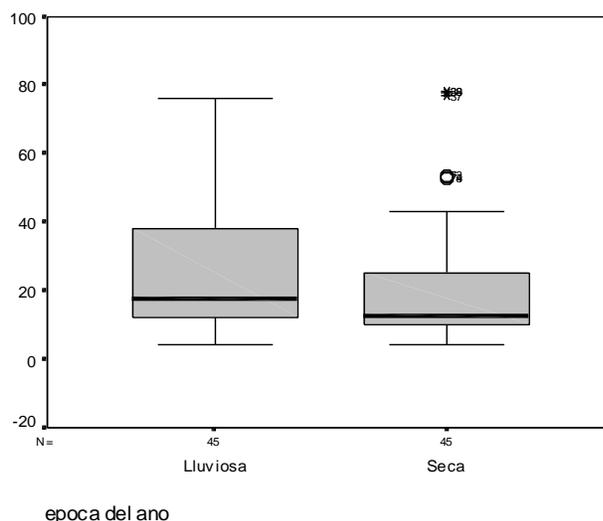
Figura 49. Yacimiento de Azufre “El vinagre”.



En todo el análisis podría destacarse que la variabilidad de los datos fue muy baja en la época seca y alta en la lluviosa debido a la presencia de datos atípicos (outliers) y que la mediana tiene una marcada asimetría hacia la izquierda en ambas épocas (Figura 50). También se encuentra la presencia de outliers en la época seca que se deben a una probable contaminación en las muestras 39 y 78 como lo muestra el diagrama de caja (#39: dato muy atípico y o78: dato atípico), por lo cual son excluidas del análisis.

²⁰³ INGEOMINAS. Amenazas geoambientales [online] investigación y zonificación de efectos geoambientales por aprovechamiento del subsuelo disponible en la página de internet <http://www.ingehominas.gov.co/web/subdirecciones/geoamenazas/proyecto%20ag5-02/>. Bogotá Colombia 2004.

Figura 50. Evaluación del ion sulfato mediante el diagrama de caja.



8.8.2 Nitratos.

La concentración de nitratos encontrados fue baja y no muy variable en los seis meses de muestreo, aunque se destaca que para el mes de octubre de 2002 se presentaron las mayores concentraciones de este ión en todos los puntos colectados lo que pudo deberse a las actividades de quema que realizan los lugareños durante esta época que pueden introducir material ácido adicional a la atmósfera como HNO_3 . La baja entrada de nitratos sobre todo en los meses de noviembre a enero (figura 51) puede ser explicada por el bajo nivel de precipitación (Jung y Werby 1958, Miller1979)²⁰⁴, en el área debido a que en estos meses se presentó una temporada de sequía, también algunas evidencias sugieren que la entrada de este ion puede decrecer con el incremento de la altitud (Ericsson, 1957)²⁰⁵.

Por otra parte, el aporte total anual de todos los elementos fue bajo en comparación con los registrados en otros sitios del trópico, lo cual, lo atribuyeron Kellman, Hudson y Sanmugadas²⁰⁶ a la baja precipitación del área, su elevación y a lo distante del mar. Debido a que el NH_4^+ y NH_3 es común en la precipitación, en los meses en los que no se presentó una precipitación significativa su concentración pudo ser menor, el NH_4^+ y NH_3 lanzado hacia la atmósfera provenientes de pantanos, suelos y sedimentos en el agua, desde animales como puercos y ganado, proveniente de fertilizantes aéreos aplicados o desde soluciones de suelos creados por plantas y microorganismos* no

²⁰⁴ JUNGE, C and WERBY. The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulphate. in rain water over the united states. In: Journal meteorological, 1958.

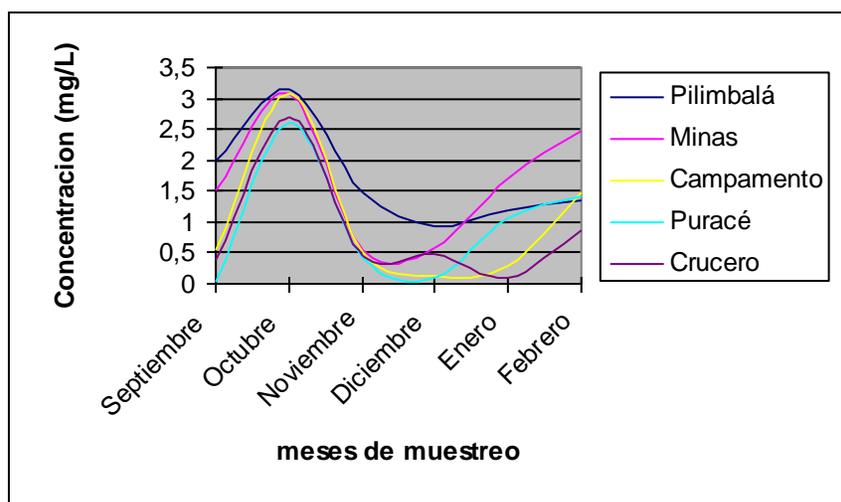
²⁰⁵ ERCKSSON, Op cit., Op cit., pag 97.

²⁰⁶ KELLMAN, HUDSON Y SANMUGADAS, Op cit., pag 54.

pudo encontrarse en su mayoría porque en la región la producción agrícola se efectúa mediante la práctica de la agricultura orgánica por lo cual los fertilizantes aéreos no se usan a gran escala, además en el estudio se evitaron las zonas de influencia antrópica como cultivos los que pueden proveer de estos iones por lo anteriormente expuesto, también a pesar de que en la región existen zonas de turbera, lagunas y zonas pantanosas el muestreo cerca de estas no fue posible debido a la incidencia del factor armado presente en la zona.

Un estudio sobre la química de las precipitaciones en áreas remotas del Hemisferio Sur registra bajas concentraciones de NH_4^+ y una marcada estacionalidad, con aumentos de los aportes en verano. Las concentraciones de nitrógeno inorgánico en las precipitaciones presentaron una marcada estacionalidad, con valores máximos de $\text{NO}_3\text{-N}$ en el período primavera - verano. Una situación diferente se registró en la ventana de estudio con valores máximos en invierno y mínimos en verano (Figura 51). La variación estacional en la concentración de compuestos nitrogenados reducidos (NH_y) ha sido documentada en áreas contaminadas, donde los valores registran un significativo incremento en verano. En el período primavera-verano con el aumento de las temperaturas es posible constatar un incremento de la depositación de nitrógeno, pero las fuentes gaseosas pueden ser diferentes y no solo provenir de actividades antropicas sino tambien de la actividad volcanica, también el incremento de procesos de denitrificación en el suelo saturado por las precipitaciones abundantes durante el invierno y que producen N_2O , aunque en el presente trabajo estos flujos no han sido estimados²⁰⁷.

Figura 51. Comparación de las concentraciones medias de nitratos.

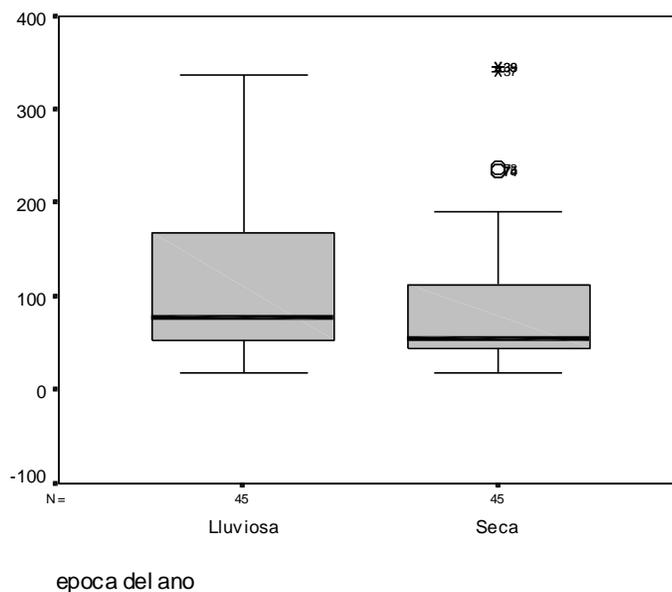


²⁰⁷ OYARZÚN Carlos E, GODOY Roberto & LEIVA Sergio, op cit pag114.

Al igual que el ion sulfato los datos obtenidos para el ión nitrato no se acomodan a la distribución normal e igualdad de varianza evaluada mediante las pruebas de Kolmogorov, Sminov y Levene, por lo que su análisis se efectuó mediante la prueba no paramétrica de Spearman.

Descubriéndose la existencia de correlación sulfato-nitrato y nitrato-cloruro (Tabla 14) y una asimetría hacia la derecha, en los datos, más marcada en la época seca que en la lluviosa, probablemente por contaminación de las muestras 39 y 78, por lo cual estas muestras son excluidas del análisis por una posible contaminación debido a que estas presentan el mismo problema en la evaluación del ión sulfato (ver figura 52).

Figura 52. Evaluación del ion nitrato mediante el diagrama de caja.



En el mes de enero se encuentra una diferencia significativa con respecto a los demás meses de muestreo y marcada con respecto al mes de septiembre, entre los sitios de muestreo se observa una similitud entre Puracé –Minas y una diferencia significativa entre estos dos sitios y los sitios restantes (ver tabla 19).

Tabla 19. Evaluación espacial y temporal del ión nitrato mediante la prueba de kruskal wallis.

RanKs					
Localizaciones	N	Mean Rank	Mes	N	Mean rank
Pilimbalá	18	44.75	Enero	15	29.57
Minas	18	39.28	Febrero	15	45.40
Campamento	18	57.14	Septiembre	15	60.53
Puracé	18	28.69	Octubre	15	45.07
Crucero	18	57.64	Noviembre	15	47.60
			Diciembre	15	44.03
Total	90		Total	90	

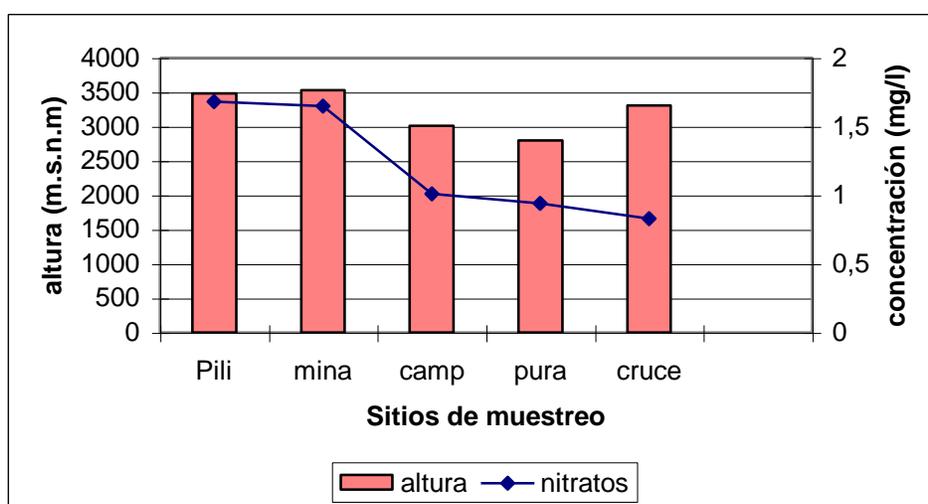
8.8.2.1 Relacion Nitratos-altura. El aumento en el contenido de nitratos y a través de la altura sobre el nivel del mar (Figura 53), contrario a lo expuesto por OYARZÚN carlos E, GODOY roberto & LEIVA sergio (2002) en un estudio de acidificación llevado a cabo en la cordillera de los andes muestra que las concentraciones promedio anual de N-NO₃ disminuyen gradualmente con la altitud, alcanzando valores de 6,9 y 11,2 µg L⁻¹, ligeramente inferiores a los documentados para la misma área en el período 1997-1998²⁰⁸, pero que puede ser relacionado con el aumento de la conductividad presente en el área (ver mapa de distribución de la conductividad) y tener su explicación en las fuentes de emisiones ubicadas en la ventana de estudio, debido, a que estas fuentes se encuentran a mayor altura debido a que el incremento en el contenido de nitrato se realiza entre los 3200 y 3400 m.s.n.m, rango en el que se encuentran situados, el complejo minero “El vinagre” y las fuentes termales de Pilimbalá; además cabe anotar que los sitios de colección en este rango de altura se encuentran bajo la influencia directa del volcán Puracé dada su cercanía.

Otra explicación posible para la relación directa (figura 53) entre la concentración de nitratos y la altura, es que al coincidir con el aumento de la conductividad debido a las condiciones meteorológicas, en éstas condiciones, los contaminantes vertidos a la atmósfera, no pueden dispersarse por quedar atrapados en la capa inferior en la que no circula verticalmente el aire, y se van acumulando, explicando el aumento de la concentración de los nitratos junto con los demás iones, cuando esta acumulación de iones, es lavada por las precipitaciones

²⁰⁸ OYARZÚN Carlos E, GODOY Roberto & LEIVA Sergio, op cit pag 123.

produciéndose un aumento en la conductividad y por consiguiente un aumento en las concentraciones de nitratos (Shaw y Ninphius, 1984)²⁰⁹. Lo que puede visualizarse mejor en los mapas de distribución para las variables conductividad, nitratos.

Figura 53. Relación altura-nitratos.



8.8.2.2 Relación Nitratos- alcalinidad. En la figura 54 se muestra la relación entre la alcalinidad y los nitratos, en la cual se observa que para el mes de diciembre donde los valores de los nitratos fueron menores la alcalinidad también disminuye notablemente, siendo este el valor más bajo de alcalinidad. En el mes de octubre se presenta la mayor concentración de nitratos que coincide con un valor alto (aunque no el mayor), para la alcalinidad, debido a que el nitrato puede entrar al sistema con otros iones de carácter básico como Mg^{+} y K^{+} que contribuyen a mantener la estabilidad del sistema (Wookey y Ineson, 1991)²¹⁰, indicando que los cationes y H^{+} pueden ser lavados manteniendo neutra la carga eléctrica (Niborg, 1978²¹¹; Lettl, 1984²¹²) y que los iones que acompañan la entrada del nitrato contribuyen a mantener estas cargas balanceadas.

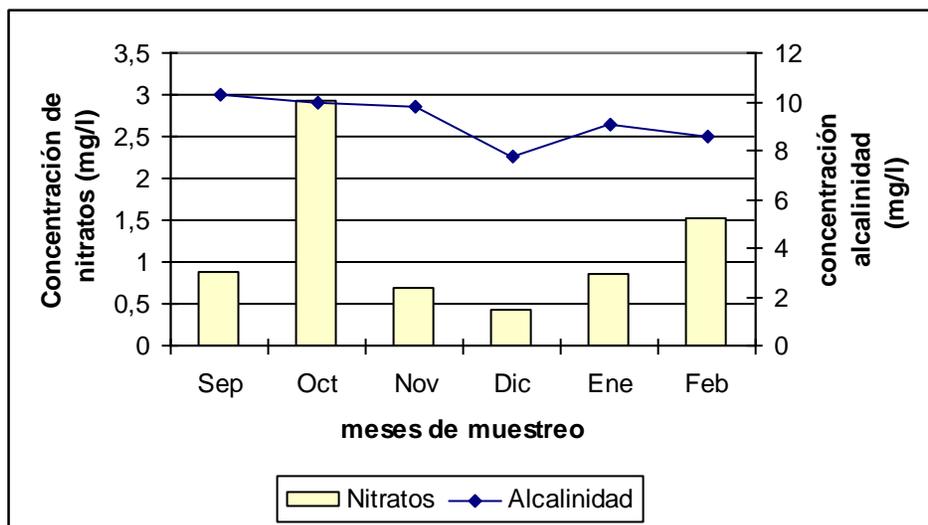
²⁰⁹ NINPHIUS and SHAW. Acid rain measurements: what they mean, 1984.

²¹⁰ WOOKWEY, INESON, Op cit., pag 109.

²¹¹ NIBORG. Sulfur pollution and soils. In: Sulfur in the environment. 1978.

²¹² LETT. The effect of atmospheric SO_2 pollution on the microflora of forest soils. In: folia microbiologica, 1984.

Figura 54. Relación Nitratos –alcalinidad.



8.8.2.3 Relación del ion nitrato con los demás iones. El análisis estadístico muestra correlación entre la conductividad y los nitratos (tabla 20) debido a que la conductividad decrece conforme los nitratos aumentan su concentración (este fenómeno se puede observar si se comparan los mapas de distribución de conductividad y nitratos). Perry (1984)²¹³ demuestra que el amonio juega un papel de neutralización de las partículas ácidas y los vapores, lo cual puede contribuir al descenso de la conductividad, la humedad produce variaciones diarias en el contenido de HNO_3 en las partículas de aerosol las cuales son muy diluídas disminuyendo así su actividad iónica (Winkler, 1984)²¹⁴.

La tabla 16 también muestra correlación entre cloruros y nitratos, lo que puede ser corroborado al analizar los datos obtenidos en los mapas de distribución de ambos iones, donde se puede apreciar que el incremento en la entrada del ion nitrato se presenta prácticamente en la misma zona donde ocurre un incremento del ion cloruro. Esta correlación de carácter positivo se presenta debido a que los cloruros pueden entrar en la precipitación seca en forma de sales como NH_4Cl , CuCl_2 , NaCl , y FeCl_3 que cuando son lavadas por el agua de precipitación se disocian en sus

²¹³ PERRY, M. solubility of atmospheric particulate matter, 1984.

²¹⁴ WINKLER, Peter. Observations on acid particles and droplets in the atmospheric. In: chemistry of particles, fogs and rain, 1984.

componentes, de esta forma el cloruro entra al sistema en compañía de compuestos nitrogenados, pero debido a que la ventana de análisis posee una gran actividad volcánica, ingresan hacia el ecosistema en la precipitación cenizas y gases como azufre y cloro, junto con varios compuestos emparentados con ellos, como ácido clorhídrico y otros ácidos, así como cloruros volátiles de hierro, lo que explica que sea mayor la entrada de cloruros que la entrada de nitratos.

Para finalizar el análisis estadístico muestra la existencia de una correlación entre el sulfato y el nitrato (tabla 20) para este estudio. Estudios realizados por Wookey y Ineson²¹⁵ en 1991 muestran que el incremento del nitrato es una respuesta al incremento en las concentraciones del ión sulfato, pero a su vez puede ser un competidor importante en el proceso de oxidación, por lo que su correlación puede ir en ambos sentidos (Shaw Roderick, 1984)²¹⁶, lo que explica el contraste entre los bajos niveles de nitratos en las estaciones de Crucero y Campamento y los altos niveles de sulfatos en el agua de precipitación para estos mismos sitios (Ver mapa de distribución para los iones sulfato y nitrato).

La entrada abundante y constante de sulfatos en el agua de precipitación (debido a que este ion es el más abundante en la ventana, durante el período de colección) también puede favorecer la entrada de nitratos debido a la correlación existente entre el ion sulfato y el ión nitrato (tabla 20).

Para comprender el punto anterior se debe analizar el dióxido de azufre (SO_2). Una molécula que en la atmósfera el SO_2 reacciona con el oxígeno dando como resultado una molécula de trióxido de azufre (SO_3). Esta molécula es inestable; por lo tanto, ella reacciona fácilmente con la humedad del aire y así se produce el ácido sulfúrico (H_2SO_4). Este ácido se disuelve en las nubes y, cuando estas se condensan, se precipita como partículas sólidas, lluvia, granizo, nieve, neblina, etc. Algo muy parecido ocurre con los óxidos de nitrógeno. Como en el caso anterior, el (NO_2) reacciona con la humedad y se produce ácido nítrico. Este ácido también se puede precipitar en un estado líquido o sólido.

Además la correlación expresa para los tres iones, puede deberse a que los compuestos de nitrato, sulfato y amonio son muy significativos en la solubilidad de los aerosoles. No solamente son los principales compuestos de los aerosoles sino que se relacionan con la lluvia ácida y la tendencia a su solubilización siendo los ácidos nítricos altamente solubles en agua y otros componentes como NH_4HSO_4 y NH_4NO_3 pueden constituir una parte significativa de la fracción soluble de los aerosoles y probablemente contribuyen a la acidificación y a la difusión de partículas combinadas con la oxidación (Perry, 1983)²¹⁷.

²¹⁵ WOOKEY E INESON, Op cit., pag 109.

²¹⁶ SHAW Roderick, 1984 Op cit., pag 112

²¹⁷ PERRY, Op cit., pag 117.

Tabla 20. Análisis de correlación del nitrato con las demás variables mediante la prueba de Spearman.

			Correlations			
			PH	CLORUROS	SULFATOS	NITRATOS
Spearman's rho	PH	Correlation Coefficient	1.000	.021	.117	.117
		Sig. (2-tailed)	.	.841	.271	.271
		N	90	90	90	90
	CLORUROS	Correlation Coefficient	.021	1.000	.271*	.271*
		Sig. (2-tailed)	.841	.	.010	.010
		N	90	90	90	90
	SULFATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	1.000	1.000*
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90
	NITRATOS	Correlation Coefficient	.117	.271*	.271*	1.000
		Sig. (2-tailed)	.271	.010	.	.
		N	90	90	90	90

** . Correlation is significant at the .01 level (2-tailed).

8.8.2.4 Relacion nitrato-pH. En la tabla 20 se observa que el pH no muestra correlación con el nitrato en ninguno de los casos, a pesar de que el incremento del nitrato es indicativo del incremento en la distribución de todos los poluentes atmosféricos y la entrada de nitrato se asocia directamente con los ecosistemas acuáticos y potencia el incremento en la acidificación de la precipitación (Likens 1972)²¹⁸, lo que puede deberse a que en el análisis de pH los iones como el nitrato pudieran verse solapado por estar presentes en compuestos que no fueron evaluados (la prueba para pH solo mide los H⁺) y por lo tanto variar el valor de la acidez causada por ellos.

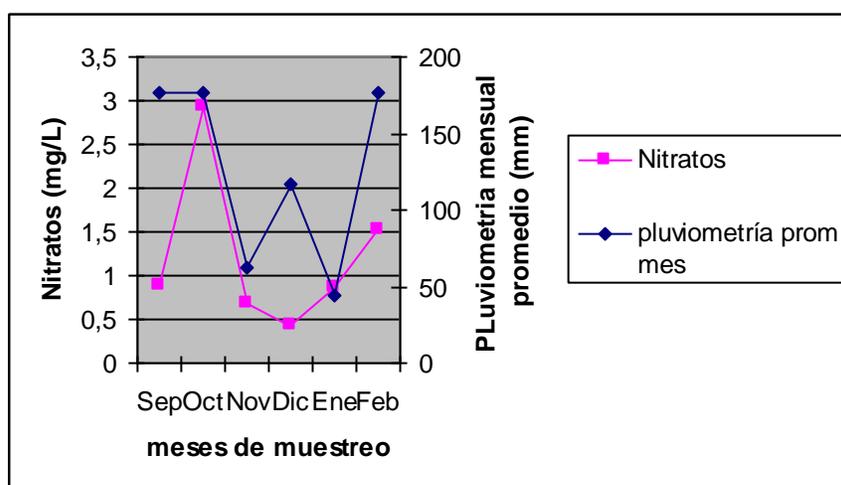
Winkler (1984)²¹⁹ muestra que los valores del pH están directamente relacionados con la entrada de compuestos como el HNO₃ los que siendo absorbidos por partículas de agua disminuyen el pH de la precipitación, pero, debido a la entrada de otros cationes de carácter básico junto con el nitrato, como se menciona anteriormente, estos puede ser neutralizados atenuando la correlación de este ion con el pH.

²¹⁸ LIKENS, Op cit., pag 39.

²¹⁹ WINKLER, Peter. Observations on acid particles and droplets in the atmospheric. In: chemistry of particles, fogs and rain, 1984.

Aunque el análisis estadístico no muestra ningún nivel de correlación entre el pH y los aportes por precipitación del ión nitrato, los mapas de distribución de este ión y el pH muestran que a nivel espacial existe una relación en la entrada de el ion nitrato y los valores de pH en los sectores de Minas, Campamento, Crucero y Puracé (Ver mapas de distribución de nitratos y pH).Ademas los niveles de precipitación en estos sectores contribuyen a la entrada del ion por lavado atmosferico como se observa comparando el mapa de distribución espacial con el mapa de la pluviometria y se muestra en los meses de octubre y febrero en la figura 55.

Figura 55. Relación precipitación-nitratos.



8.8.3 Cloruros.

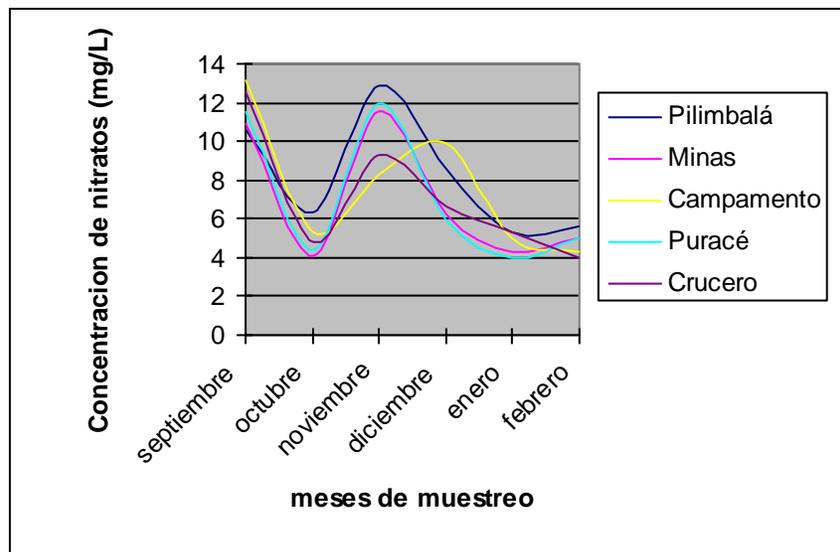
La comparación de las concentraciones del ión cloruro (figura 56) muestra que en los meses de septiembre, noviembre y diciembre se incrementa la entrada de este ion por medio de aportes en la precipitación, debido posiblemente al ingreso atmosférico vía depositación seca y húmeda, proveniente de áreas con influencia marina y sin contaminación que poseen por lo general altos valores de conductividad eléctrica (Ver relacion temporal conductividad- pluviometria) que son relacionados con elevadas concentraciones iónicas, dominadas por sales marinas en que los aerosoles con Na^+ y Cl^- , son los más importantes (BLEW R & R EDMONDS,1995)²²⁰.

²²⁰ BLEW R & R EDMONDS (1995) Precipitation chemistry along an inland transect on theOlympicPeninsula, Washington. Journal of Environmental Quality 24: 239-245.

En los meses de octubre, y febrero se observan bajas en los aportes del cloruro para la ventana de estudio (figura 56), hecho que puede ser relacionado con la disminución en los valores de la conductividad para estos mismos meses.

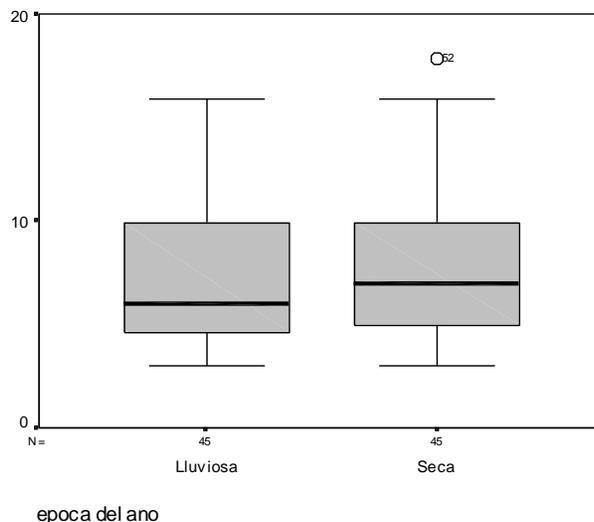
La distribución a nivel espacial del ión cloruro muestra el incremento en las concentraciones de este ion en los sectores de Pilimbalá, Campamento, La Mina y Crucero, lo que puede deberse a la correlación existente entre la entrada de sulfatos y la entrada de nitratos, ya que para estos sectores la entrada de sulfatos también sufre un incremento.

Figura 56. Comparación de las concentraciones medias del ion cloruro.



La distribución de la mediana para el ión cloruro en la época seca observa simetría, pero en la época lluviosa se encuentra una asimetría hacia la derecha (figura 57).

Figura 57. Evaluación del ion cloruro mediante el diagrama de caja.



Debido a que los datos encontrados para el ión cloruro no se acomodan a la distribución normal e igualdad de varianza evaluados mediante las pruebas de Kolmogorov, Sminov y Levene tanto para los meses como para las épocas en consecuencia para su análisis se emplearon las mismas pruebas no paramétricas que en las anteriores variables.

Para el ión cloruro no se encuentran diferencias significativas entre los sitios de muestreo, sin embargo los meses de septiembre y diciembre difieren de los meses restantes y los meses de enero, febrero y octubre presentan similitudes de distribución en la prueba de Kruskal Wallis (tabla 21).

En los meses enero, febrero y octubre el comportamiento de esta variable es similar con datos entre 0 y 10 mg/L de Cl^- y para los meses de septiembre y noviembre los datos se encuentran entre 10 y 20 mg/L de Cl^- , los datos obtenidos para todos los meses tienen una pequeña variabilidad con excepción del sector de campamento en el mes de diciembre cuya variabilidad es elevada pero no excede el límite de confiabilidad del 95%.

Tabla 21. Evaluación espacial y temporal del ion cloruro mediante la prueba de kruskal wallis.

Ranks					
Localizaciones	N	Mean Rank Ion Cloruro	Mes	N	Mean rank Ion Cloruro
Pilimbalá	18	53.22	Enero	15	23.97
Minas	18	43.47	Febrero	15	24.33
Campamento	18	45.50	Septiembre	15	75.67
Puracé	18	41.33	Octubre	15	27.37
Crucero	18	43.97	Noviembre	15	71.40
			Diciembre	15	50.27
Total	90		Total	90	

Las concentraciones del ión cloruro son bajas si se comparan con las concentraciones del ión sulfato, pero un poco más altas que las concentraciones encontradas para el ión nitrato debido a que el cloruro en forma de ión (Cl^-), es uno de los iones inorgánicos principales en el agua natural y residual (APHA, 1992)²²¹, y sigue la misma tendencia que el sulfato para los respectivos puntos y meses de muestreo. Esto puede comprobarse con la comparación de las entradas netas en Ton/ha/año de los anteriores iones, donde se observa al ion sulfato como el ión con mayores aportes por precipitación con 227,69 Ton/ha/año, lo sigue en importancia el ión cloruro con 64.96 Ton/ha/año y por último el ión nitrato con un ingreso de 14.31 Ton/ha/año.

Se destaca que en los meses de septiembre y noviembre de 2002 se presentaron los mayores valores de las concentraciones de 11,76 mg/L y 10,58 mg/L y los menores valores 4,76 mg/L se encontraron en los meses de enero y febrero de 2003.

Con respecto al Cl^- algunos enriquecimientos de la precipitación con HCl puede ser esperados como resultado de la actividad volcánica, Williams et al, 1986²²² reportó el HCl como componente de los gases fumarólicos del volcán Nevado del Ruiz, debido a que el lavado del HCl desde la atmósfera es rápido (DUQUE gonzalo, 1998)²²³ estos no pueden alcanzar la región de estudio en algunos períodos secos.

Las bajas concentraciones de los iones cloruro y nitrato con respecto a la concentración del ion sulfato pueden deberse a que la entrada y salida de los nutrientes está directamente relacionada con las cantidades de agua que se mueven dentro y fuera de un ecosistema (Bormann, 1967)²²⁴.

Por otra parte la forma convencional en la que se tomaron las muestras de precipitación pudo influir en la baja estimación de la entrada de estos iones en el

²²¹ APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados: Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos, 1992. p. I – 73

²²² WILLIAMS, Op cit., pag 111.

²²³ DUQUE Gonzalo. Manual de geología para ingenieros. Manizales Colombia 1998.

²²⁴ BORMAN, Op cit., pag 38.

ecosistema porque esta falla en la colección de materiales solubles que son interceptados por la capa vegetal o en la colección de aerosoles secos que se quedan en las superficies de las plantas y son posteriormente lavados por la lluvia (Kellman, 1982)²²⁵

8.9 COMPARACIÓN TEMPORAL DE TODAS LAS VARIABLES.

En el mes de septiembre se presentan las mayores concentraciones de sulfatos y nitratos probablemente debido a la correlación entre estas variables, aunque se esperaría que los cloruros aumentaran también durante este mes, la mayor concentración de cloruros se encuentra en el mes de octubre, el incremento en los valores de los iones sulfato y cloruro y el valor intermedio del ión nitrato hace que el pH disminuya aunque no alcance su valor más bajo (este alcanza el valor más bajo en el mes de octubre), debido a la presencia de frecuentes eventos de lluvias fuertes que facilitan la dilución de los iones y contribuyen con la entrada de cationes, aunque se debe considerar que en las estaciones húmedas (meses septiembre, octubre, febrero) los flujos de nutrientes son considerablemente ácidos para mayores volúmenes de precipitación, lo cual puede explicar la entrada considerable de estos iones para estos meses (Miller, 1999)²²⁶.

El segundo mes con una importante entrada de sulfatos y nitratos es el mes de noviembre, que como en el mes de septiembre presenta una baja entrada de cloruros, pero a diferencia de éste, precipitación baja y pH ascendente hasta 5,4, lo que refleja para este mes en particular la entrada de otros iones de carácter básico que neutralizaron la entrada de los iones ácidos analizados (tabla 22), hecho, que puede atribuirse a la incidental caída de ceniza volcánica en la zona debido a la actividad del volcán puracé que en el mes en cuestión se mantuvo en alerta amarilla.

En particular el pH más alto se encuentra en el mes de enero (mes seco), debido a la moderada entrada de sulfatos, baja entrada de nitratos y relativamente más baja entrada de cloruros, además debido a que la época de sequía favorece los procesos de depositación seca y la poca dilución por la escasa precipitación pudo favorecer el solapamiento de los valores de H^+ con el posterior aumento en los valores de pH.

En el mes de octubre se encuentra el valor más bajo en el pH a pesar de que la entrada de cloruros es moderada y el ion sulfato es menor que en los meses restantes, la concentración de los nitratos obtiene su valor más alto, lo cual muestra la poca correspondencia entre el pH y la concentración de iones, debido a que para este caso en particular el volumen de precipitación no puede explicar el aumento en el pH. Aunque en la prueba de correlaciones de spearman no se encuentra una correlación entre el pH y los iones, en general se podría decir que esto no es un indicativo de que estos iones no influyan en la acidificación del agua, si se tiene en cuenta que ellos pueden entrar en forma de compuestos a través de depositación seca, y que muchos factores atmosféricas que no se pudieron muestrear en el presente estudio, pueden influir en su concentración.

²²⁵ KELLMAN, Op cit., pag 54.

²²⁶ MILLER, P. Emission related acid deposition trends in maine and new England. Boston, 1999.

En contraposición los valores de conductividad si exhiben una concordancia con los iones presentes empezando con el mes de octubre donde se presentan bajas concentraciones de iones y una baja conductividad (la más baja), para el mes de septiembre y febrero conductividades medias y en el mes de enero donde la entrada de los iones fue abundante (aunque no tanto como en el mes de septiembre) la conductividad aumento a su máximo nivel lo que si puede ser explicado con el aumento del pH debido a que este no puede ser un gran indicador de la entrada de los iones de interés, pero su aumento, si puede indicar la presencia de otros iones (pueden ser de carácter básico) en el agua de precipitación.

En la prueba de Kruskal Wallis se encuentra una diferencia entre las medianas en la época lluviosa y seca para el pH, la conductividad, sulfatos y nitratos esta diferencia es menos marcada en alcalinidad y los cloruros, donde los rangos tienen similitud; los sulfatos y nitratos están relacionados con la época debido a que en el invierno las bajas temperaturas esparcen el frío que incrementa la concentración de nitratos, pues el frío es promotor de la nitrificación y movilización de los nitratos otra explicación posibles es que el incremento de nitratos puede estar relacionado con la biogeoquímica de l sulfato en el ecosistema (Likens, 1977)²²⁷

La mayor variación en la ventana de estudio a nivel espacial la obtuvo Minas en cuanto al pH, conductividad y alcalinidad como se observa en tabla 22 Minas posee rangos de pH bajos que no alcanzan a influir en sitios como Crucero, Puracé Campamento y Pilimbalá, donde, en sitios como Minas puede ser explicado por los altos valores de conductividad, menores alcalinidades, altos rangos de nitratos, valores medios en los cloruros, y bajos pHs.

Los rangos más contrastantes para la variable cloruro se encuentran en el sector de Pilimbalá donde este (53, 22) difiere de los demás sectores.

La comparación entre los medios rangos (tabla 18) entre sulfatos y nitratos en el sector de Puracé nos muestra que la fuente de NO_x coincide con la fuente de SO₄, pero que transportado a distancia puede diferir entre sulfatos y nitratos (Miller Paul, 1999)²²⁸, el flujo total de las emisiones de NO_x provienen del viento que disueltos pueden tener concentraciones variables bien sea por la influencia de la naturaleza en el caso de Pilimbalá y Crucero o por efectos de contaminación ejercida por el hombre (Roldan, 1992)²²⁹, en el caso de Minas, Puracé y Campamento.

Tabla 22. Comparación por épocas de las variables mediante la prueba de Kruskal Wallis.

²²⁷ LIKENS, Op cit., pag 39.

²²⁸ MILLER, Paul. Air pollutant trajectories en precipitating stroms. United states, 1984.

²²⁹ ROLDAN., Op cit., pag 83.

Ranks			
	epoca del ano	N	Mean Rank
PH	Lluviosa	45	41.50
	Seca	45	49.50
	Total	90	
CONDUCTI	Lluviosa	45	34.96
	Seca	45	56.04
	Total	90	
ALCALINI	Lluviosa	45	49.04
	Seca	45	41.96
	Total	90	
CLORUROS	Lluviosa	45	42.46
	Seca	45	48.54
	Total	90	
SULFATOS	Lluviosa	45	50.33
	Seca	45	40.67
	Total	90	
NITRATOS	Lluviosa	45	50.33
	Seca	45	40.67
	Total	90	

También esta comparación muestra que a nivel temporal el mes de octubre observa los menores rangos medios (Tabla 23) en cuanto a conductividad y pH se refiere, lo que muestra diferencia significativa de éste con los demás meses, teniendo la mayor diferencia con el mes de enero, lo que puede atribuirse al cambio sustancial en el nivel de precipitación que presentan estos dos meses debido a los flujos de nutrientes que generalmente exhiben una relación inversa entre el volumen de agua que cae y la concentración de iones; puesto que el mes de octubre es una de los meses más lluviosos y el mes de enero es el mes más seco.

En cuanto a sulfatos y nitratos se encuentra un comportamiento similar de la significancia de estas variables entre los meses húmedos y secos, siendo marcada estas diferencias entre los meses de septiembre y enero.

Los cloruros presentan tres grupos el primero lo constituyen los meses de enero, febrero y octubre; el segundo lo conforman septiembre y noviembre y el tercero diciembre, la diferencia más significativa se encuentre entre el grupo 1 y el 2, lo cual no parece estar relacionado con los volúmenes de agua captados ni ligado a las épocas de análisis.

El grado de acidificación del agua se comprueba con el nivel de alcalinidad y pH encontrado en cada uno de los de muestreo (mapas 2 y 3), donde, en cuanto al pH se observan que los niveles oscilan entre 5,59 y 5,10 el valor de 5,59 a pesar de encontrarse cercano al nivel de equilibrio de 5,6, denota una acidificación del agua en los sectores de Puracé, Campamento y Crucero, el valor de 5,47 representa un mayor nivel de acidificación en el sector de Pilimbalá y el valor de 5,10 en el sector de Minas muestra el grado de acidificación máxima para este estudio, lo que demuestra

que para el caso concreto del pH la fuente puntual encontrada en el sector de minas contribuye de forma significativa a la entrada de iones de carácter ácido en el agua de precipitación.

La alcalinidad observa el mismo comportamiento que el pH, oscilando entre 7,41 y 9,88 lo que sugiere sensibilidad a la formación de lluvia ácida, el valor de 9,88 revela mayores alcalinidades en los sectores de Puracé, Crucero y Campamento, aunque no exime a estos sectores de su marcada sensibilidad a la acidificación.

El valor de 8,03 en el sector de Pilimbalá muestra una mayor acidificación en el agua, lo que sugiere la influencia de los puntos de emisión debido a su evidente cercanía.

El valor de 7,41 muestra el nivel más bajo de alcalinidad marcado por la influencia directa de la fuente de emisión existente en el sector de minas.

La información con respecto al contenido iónico la provee el nivel de conductividad obtenido en el agua de precipitación lo que refleja el valor de 6,91 que se presenta en el sector de Puracé (Ver mapa 4) debido a que para este sector se encuentran valores bajos para los iones sulfato, nitrato y cloruro con 18,45, 0,94 y 6,63 mg/L respectivamente, los valores de conductividad de 9,16 para los sectores de Pilimbalá y Campamento revelan un alza en el nivel de los iones muestreados con valores de 7,65 y 7,39 mg/L para los cloruros en los sectores respectivamente, los niveles de sulfatos de 26,79 y 29,57 mg/L en los sectores antes mencionados puede explicarse por la acción de los vientos que a través del cañón del Río Vinagre transporta los sulfatos hacia el sector de Campamento, un bajo nivel de nitratos de 0.94 compensa los altos valores de los iones cloruro y sulfato y permite que la conductividad sea intermedia, el máximo nivel de conductividad $11,41 \mu S/cm$ para el sector de Minas, refleja la mayor cantidad de nitratos (1,53 mg/L), sulfatos (26,79 mg/L) y cloruros (7,14 mg/L); mostrando de esta manera que la explotación minera del azufre contribuye de forma directa y continua con aportes de iones a la atmósfera y revela que esta zona se encuentra más propensa a la acidificación.

Tabla 23. Comparaciones temporales y espaciales de las variables mediante la prueba de Kruskal Wallis.

Ranks			
	Localizaciones	N	Mean Rank
PH	Pilímbala	18	43.75
	Minas	18	15.72
	Campamento	18	56.83
	Puracé	18	51.08
	Crucero	18	60.11
	Total	90	
CONDUCTI	Pilímbala	18	42.42
	Minas	18	62.53
	Campamento	18	42.42
	Puracé	18	36.97
	Crucero	18	43.17
	Total	90	
ALCALINI	Pilímbala	18	38.08
	Minas	18	19.00
	Campamento	18	60.39
	Puracé	18	50.75
	Crucero	18	59.28
	Total	90	
CLORUROS	Pilímbala	18	53.22
	Minas	18	43.47
	Campamento	18	45.50
	Puracé	18	41.33
	Crucero	18	43.97
	Total	90	
SULFATOS	Pilímbala	18	44.75
	Minas	18	39.28
	Campamento	18	57.14
	Puracé	18	28.69
	Crucero	18	57.64
	Total	90	
NITRATOS	Pilímbala	18	44.75
	Minas	18	39.28
	Campamento	18	57.14
	Puracé	18	28.69
	Crucero	18	57.64
	Total	90	

Ranks			
	mes	N	Mean Rank
PH	Enero	15	58.07
	Febrero	15	45.47
	Septiembre	15	51.87
	Octubre	15	27.17
	Noviembre	15	46.90
	Diciembre	15	43.53
	Total	90	
CONDUCTI	Enero	15	72.60
	Febrero	15	43.80
	Septiembre	15	39.73
	Octubre	15	21.33
	Noviembre	15	52.73
	Diciembre	15	42.80
Total	90		
ALCALINI	Enero	15	43.57
	Febrero	15	45.03
	Septiembre	15	60.43
	Octubre	15	41.67
	Noviembre	15	51.70
	Diciembre	15	30.60
Total	90		
CLORUROS	Enero	15	23.97
	Febrero	15	24.33
	Septiembre	15	75.67
	Octubre	15	27.37
	Noviembre	15	71.40
	Diciembre	15	50.27
Total	90		
SULFATOS	Enero	15	29.57
	Febrero	15	45.40
	Septiembre	15	60.53
	Octubre	15	45.07
	Noviembre	15	47.60
	Diciembre	15	44.83
Total	90		
NITRATOS	Enero	15	29.57
	Febrero	15	45.40
	Septiembre	15	60.53
	Octubre	15	45.07
	Noviembre	15	47.60
	Diciembre	15	44.83
Total	90		

Si se comparan los sectores de estudio se encuentra que existe una relación entre la cercanía a los sitios de emisión y la sensibilidad a la acidificación del agua de precipitación, así en el sector más cercano al sitio de emisión (Minas) se presentan bajas alcalinidades, altas conductividades y bajos niveles de pH (Ver mapas de sensibilidad 2, 3, 4) debido a los altos niveles de nitratos y niveles medios de cloruros y sulfatos (ver mapas 5,6 y 7); Pilímbalá próximo en cercanía a La Mina de azufre con una marcada influencia de emisión volcánica presenta alcalinidades y

conductividades medias debido a la presencia de altas concentraciones de cloruros y nitratos y bajas concentraciones de sulfatos.

A medida que los sectores de colección se alejan del punto emisor los valores disminuyen encontrándose que en sitios como Crucero y Campamento puntos los pH y alcalinidades aumentan, posiblemente por el aumento en el nivel de cloruros y sulfatos y la disminución del nivel de nitratos. En Puracé el sector más lejano al punto de emisión de poluentes en la zona de estudio, los pHs y alcalinidades son aun mayores y las conductividades observan valores menores que en los demás sectores de colección debido a los valores extremadamente bajos en las concentraciones de los sulfatos, cloruros y nitratos lo que sugiere una influencia directa de los sitios de emisión puntual en el nivel de acidificación. Aunque este sector es el más poblado en la ventana de estudio y sufre una creciente intervención agrícola y ganadera, factores que deberían incrementar las concentraciones de poluentes y disminuir el pH generando acidificación en el agua no contribuyen significativamente a dicho proceso, lo que nos ratifica de forma definitiva la relación entre la distancia existente entre el punto emisor y el punto de colección y la concentración de iones.

(MAPA DE SENSIBILIDAD PH)

(MAPA DE SENSIBILIDAD CONDUCTIVIDAD)

(MAPA DE SENSIBILIDAD ALCALINIDAD)

(MAPA SENSIBILIADA SULFATO)

(MAPA SENSIBILIDAD NITRATO)

(MAPA SENSIBILIDAD CLORURO)

(MAPA SENCIBILIADA Precipitación)

9. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados sugieren la comprobación de la hipótesis planteada para el presente estudio en cuanto a niveles de pH, conductividad, alcalinidad y concentraciones de los iones en el agua de precipitación propuestos para la investigación.

La acidificación de aguas de precipitación se ve claramente si tenemos en cuenta que las aguas de zonas de alta montaña son oligotróficas, es decir son pobres en sales nutritivas, sales que al aumentar su concentración aumentan la capacidad del agua para conducir la electricidad, aumentando así la conductividad en el Parque Nacional Natural Puracé, disminuyendo su capacidad de neutralizar ácidos (ANC) Su aparente sensibilidad a esta acidificación se ve demostrada por los valores obtenidos para la alcalinidad que se encuentran en 9,23 mg/L de CaCO_3 en la zona de estudio, lo que muestra una moderada sensibilidad a la formación de lluvia ácida en esta zona.

La sensibilidad a la acidificación en el agua de precipitación demostrada con las bajas alcalinidades es producto de la entrada puntual de SO_4^- , Cl^- y NO_3^- , en sitios como Minas y Pilimbalá, debido a la emisión constante de estos iones en los sectores antes mencionados como se observa en los mapas de distribución de iones y alcalinidad.

La actual acidificación es producida por ácidos fuertes como sulfúrico y nítrico. El sulfato principal ión aportado por el agua de precipitación en el Parque Nacional Natural (227,69 Ton/ha/año) es la causa primordial a largo plazo. Pero tanto éste como el nitrato, pueden contribuir a la liberación de ácido.

Los mapas de distribución espacial muestran una gran influencia de la acidificación del agua en la disminución en los niveles de alcalinidad, así como un incremento en los niveles de conductividad, lo que se refleja en la tendencia de distribución para estas variables en la ventana de estudio. Además confirman los resultados arrojados por el análisis estadístico donde se muestra una correlación en la entrada de los iones SO_4^- , Cl^- y NO_3^- , al ecosistema por medio del agua de precipitación

En el Parque se encuentra un valor medio de pH de 5,35 lo que muestra la pérdida de la capacidad neutralizadora del agua debido al aumento en la conductividad que en estaciones como “La Mina y Pilimbalá”, refleja un importante incremento en las entradas de SO_4^- , Cl^- y NO_3^- , como lo demuestran los mapas de distribución espacial de estos iones.

El pH en la ventana de estudio oscila entre 4.99 en el sector de Minas y 5.64 en los sectores de Campamento, Crucero y Puracé valores que se han asociado a un cambio de hasta 1,5 unidades de pH y, en casos extremos, variaciones de 2-3 unidades de pH y que están relacionados con la entrada de los iones SO_4^- , Cl^- y NO_3^- , el aumento en la conductividad y la baja alcalinidad en todos los sitios.

La elevada conductividad en sectores como Minas muestra que la entrada de iones, se encuentra relacionado con la disminución del pH y con el aumento en la sensibilidad a la acidificación del agua de precipitación, tal como se muestra en la distribución espacial de estas variables. Los mapas de distribución espacial de pH, alcalinidad y conductividad ratifican la relación de estas variables en todos los sectores.

Las posibles fuentes principales de emisión de los precursores primarios de los iones SO_4^- , Cl^- y NO_3^- , analizados en el agua de lluvia en la ventana de estudio, fueron tanto naturales como antrópicas, de marcada procedencia volcánica y minera, si se tiene en cuenta la acción de los vientos procedentes desde el Océano Pacífico y la Cadena Volcánica de los Coconucos, la cual se encuentran relativamente cerca al área de estudio. Sin embargo, no se pueden descartar las fuentes antrópicas que implican una contaminación esporádica de SO_4^- y Cl^- , como talas, quemas, fumigaciones, las cuales pueden presentarse en menor proporción que las fuentes naturales. La explotación minera del azufre concentrada en el complejo minero ubicado dentro de la ventana de estudio puede explicar los incrementos puntuales de los iones analizados en este sitio y resulta de gran influencia en el incremento de las concentraciones de SO_4^- en todos los sectores de la ventana de estudio.

La distribución espacial de variables como el pH, conductividad, alcalinidad y entrada de iones en el agua de precipitación acentúa la marcada influencia de la explotación minera en la acidificación del agua y la consolida como la segunda fuente puntual en importancia para los aportes de iones con 3129,1425 Kg/ha/año de sulfatos 208,6095 Kg/ha/año de nitratos 888,8029 Kg/ha/año de cloruro, después del volcán Puracé con 2456,5036 Kg/ha/año de sulfato 215,3928 Kg/ha/año de nitrato 1053,8862 Kg/ha/año de cloruro y donde se genera la mayor acidificación en el agua de precipitación.

La comparación de los mapas de distribución espacial de la alcalinidad, iones y pluviometría muestra la importancia de la cercanía de las fuentes de emisión en los procesos de acidificación del agua, debido a que a medida que se aleja de las fuentes puntuales como la Mina de azufre y el volcán Puracé disminuye la sensibilidad a la acidificación del agua de precipitación.

El elevado valor de depósito total para los iones SO_4^- y Cl^- en el agua de lluvia de la ventana de estudio, con relación a otras investigaciones realizadas en Colombia, responde a la marcada influencia volcánica a la cual está sometida por encontrarse cercana al volcán Puracé, así como a la cadena volcánica de los Coconucos y en menor grado a la influencia marina. Sin embargo, los valores promedios de la concentración de esos iones, son mucho más elevados que en otros lugares incluyendo la ciudad de Popayán y esto puede estar relacionado con la pluviosidad, la cual puede estar facilitando el lavado atmosférico de los iones y por ende la dilución de los mismos, como lo demuestra la distribución de la pluviometría en sectores con elevados niveles de concentración de iones como “Minas y Pilimbalá” o con bajos niveles de entradas de cloruros y nitratos como “Crucero”.

Los mapas que se generaron a partir de la distribución espacial de los diversos parámetros, sirven como una herramienta visual que permita comprender y analizar mejor el comportamiento de los parámetros en El Parque Nacional Puracé. Además, junto con la base de datos generada, mediante el Sistema de Información Geográfica

(SIG) utilizado (ArcView), puede ser posible el solapamiento con otros mapas que contengan otro tipo de información ambiental, de manera tal que se logre ampliar, conocer y comprender cada vez más y mejor el funcionamiento de los procesos ambientales, las causas y efectos de la contaminación ambiental y buscar las maneras de contrarrestarla si resulta perjudicial para el ambiente.

Esta información resulta de vital importancia para determinar los efectos de la acidificación del agua sobre el ecosistema y sobre la salud de la población con el propósito de definir los objetivos de los programas para proteger y mejorar la calidad del recurso, así como la calidad del aire en las poblaciones aledañas, con un esfuerzo sistemático basado en un mayor conocimiento y sustento técnico. De esta manera, los programas generados a partir de la información científica, se reflejen en la capacidad para implementar planes de manejo del recurso agua que permitan prever acciones encaminadas a la protección de dicho recurso.

Los resultados del presente estudio y los que se pudiesen obtener con la continuidad de investigaciones de este tipo, serían de gran importancia para complementar el Programa de Monitoreo del recurso agua en el Parque Nacional Natural Puracé, debido a la gran importancia de este recurso para la vida y preservación de los ecosistemas que se intentan proteger en el área.

Además la aplicación de los conocimientos adquiridos podrá derivar en proyecciones que redunden en beneficio de las comunidades que habitan la zona, en materia de procesos de acidificación del suelo, acidificación de los recursos hídricos y el impacto de estos procesos sobre la biota, aportando en el desarrollo de estrategias locales de mejoramiento, explotación de recursos y capacitación de las comunidades en el uso de estos conocimientos como herramientas para el desarrollo.

10. RECOMENDACIONES

- Es preciso que en investigaciones futuras del comportamiento bigeoquímico del agua de lluvia, sean determinados además de los iones analizados en el presente estudio (SO_4^- , NO_3^- y Cl^-), los iones Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , NH_4^+ , K^+ , y HCO_3^- , con el fin de asociar el comportamiento químico del agua de lluvia de una manera mas acertada con determinadas fuentes de emisión y lograr establecer indicadores ambientales propios y aplicables al entorno.

- Las mediciones del pH y la conductividad, deberían realizarse tanto *in situ*, como en laboratorio, dado que es probable que algunas reacciones puedan alterar estas propiedades fisicoquímicas.
- Las posibles fuentes responsables del aporte de precursores de SO_4^- merecerían ser estudiadas a fondo en futuras investigaciones en sitios muy puntuales como las fuentes termales ubicadas en la zona y sitios más cercanos a al volcán Puracé complementándose con variables meteorológicas como la dirección de vientos, humedad y evaporación, para determinar el aporte real de las fuentes y tener una mejor perspectiva de la tendencia no solo de los contaminantes azufrados, sino de cada contaminante y de esta manera generar indicadores del estado de la calidad del aire y del agua para el Parque.
- Es de suma importancia para complementar investigaciones de esta índole, el estudio de los efectos de la acidificación sobre ecosistemas acuáticos estratégicos y muy susceptibles a este problema, como es el caso de las lagunas y humedales asociados al ecosistema alto andino del Parque Nacional Natural Puracé que complementen los estudios realizados por Figueroa y Valverde.
- También se podría continuar las investigaciones con un estudio detallado desde El Parque Nacional Natural Puracé hacia la ciudad de Popayán para complementar las bases del Sistema de Información Geográfica y obtener un mapa de sensibilidad a la acidificación más completo.
- Un punto clave a destacar es el vacío que deja al presente estudio la exclusión de la variable suelo que para un ecosistema de las características descritas en el Parque Nacional Puracé es de vital importancia en el posterior modelamiento fenomenológico que debe llevarse a cabo para un satisfactorio monitoreo ambiental y que puede ser evaluada en estudios posteriores dada la relación de la acidificación del agua con los procesos de lixiviación en el suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Acidificación atmosférica, contaminación del aire, nitrógeno como contaminante. En ecología y medio ambiente [online]. Disponible en la dirección electrónica [www.rincón del vago.com](http://www.rincón-del-vago.com). Salamanca España 2003.

Agro información sobre preparación de terrenos para cultivo [online]. Disponible en la pagina de Internet [http:// www. Agroinformacion.com](http://www.Agroinformacion.com). Perú. Actualización Noviembre de 2004.

AMBIENTE ITALIA. La Casa [Online]. Textinfo. Italia: Radio Popolare, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <http://www.radiopopolare.it/lindo/spa/casa.htm>

AMENAZA VOLCÁNICA POTENCIAL DEL VOLCAN PURACE. En: Revista Ingeominas una publicación sobre la ciencia y tecnología de la tierra. 1993.

AMERICAN SOCIETY for testing and materials. Annual book of standards determinations. Determinación de sulfatos por turbidimetria en agua método ASTM D 516-90, 1994.

APHA, AWWA, WPCF. Métodos Normalizados: Para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos, 1992. p. I – 73

ARBOLEDA Juan, FERNANDEZ Alejandro, LEON Julia. Aspectos sanitarios de los óxidos de azufre como contaminantes atmosféricos. Higiene y sanidad ambiental. Universidad de Granada. España, 2004.pp106-113.

ARCILA, M. M., et al. 10 años del Observatorio Vulcanológico y Sismológico Ingeominas - Centro Operativo Regional Popayán. [Online]. Acrobat PDF Writer 4,0 para Windows. Colombia: Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Primer Simposio Colombiano de Sismología "Avances de la Sismología Colombiana en os últimos 20 años", 6 de Octubre de 2002 sin fecha de actualización] Disponible en internet: <<http://ainsuca.javeriana.edu.co/geofisico/simposio2002/Instrumentacion/10%20A%D1OS%20DEL%20%20OVSP.PDF>>

ARCVIEW GIS [CD –ROM]. Versión 3.1. 26 de Febrero de 2003. Licencia autorizada a: Grupo de Estudios Ambientales de la Universidad del Cauca.

Atmosfera: En enciclopedia ENCARTA [online] 2004. Disponible en la pagina de Internet en: <http://es.encarta.msn.com/encyclopedia761559991/atm%C3%B3sfera.html>

BALBO, M. La Planificación Y Gestión Urbana Local. En: JORDAN, R. & D. SIMIONI. Ciudades Intermedias De América Latina Y El Caribe: Propuestas Para La Gestión Urbana. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ministerio degli Affari Esteri Cooperazione Italiana, 1998. p. 107 - 126.

BAEZ, A., R. BELMONT & H. PADILLA. Chemical composition at two sampling sites in México: A 7-year study. Atmospheric Environment. Vol. 31, 1997, p. 915-925.

BARRETT, E and BRODIN. The acidity of Scandinavian precipitaton. Tellus, 1995.

BEDOYA, César. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Cloro y Cáncer [Online]. Texinfo 2 el. (Madrid, España), Informes, Enero 2002 (Actualizado en Mayo de 2002) Departamento de Construcción. Web: <http://corbu.aq.upm.es/~cbedoya/webacv/informes/infclyca.htm>

BHUMRALKAR, Metereological aspects of Acid Rain. Estados Unidos de América, 1984.

BLEW R & R EDMONDS (1995) Precipitation chemistry along an inland transect on the Olympic Peninsula, Washington. Journal of Environmental Quality 24: 239-245.

BOLAÑOS, J. El impacto Biológico, Problema Ambiental Contemporáneo. México, 1990.

BOGEN, Donald. Major Ion of Atmospheric Deposition And Air Particulates at American Samoa. United States, 1984.

BORMAN, F Y LIKENS, G. Nutrient Cycling In: Science. Vol. 155 (1967).

BORMAN, F. The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation of Hubbard Brook. In: Ecology Monogr. Vol 44 (1967)

BRAVO, Isabell y GIRALDO, Efrén. Modulo de sistemas ecológicos y contaminación. Popayán 2001.

BREVER, George. El aire en peligro, Biblioteca científica salvat, Barcelona 1982.

BRONSTED-LOWRY. Acids and Bases [online] disponible en Internet en la pagina web www.nqu.edu/classes/tuckerman/honors.Chem/lectures/lectures21/node3.html. Marck Tuckerman 2003 11 20. pp 3.

BUENOS DÍAS PLANETA. Los Contaminantes Orgánicos Persistentes [Online]. Texinfo. España: Ecoespaña, Diciembre de 2000 [rev. Mayo de 2000]. Disponible en internet: <<http://www.buenosdiasplaneta.org/rm2000/i27a.htm>>

BURBANO, Martha; Análisis biogeoquímico de los nutrientes del agua lluvia y agua que pasa a través del follaje en un ecosistema subandino antropizado. Popayán, 2003.

CABEZAS, F. Modulo Tensiones Ambientales “ Deposición Ácida”. Colombia. 2000.

Cebú de La Libertad [Online]. Microsoft Word 9. Florida, USA: Animal Science Department, University of Florida, 2003 (rev. Julio de 2003). Disponible en internet:

<http://www.animal.ufl.edu/elzo/Publications%5CProceedings%5CSMCEBU-corrected.htm>

CELSI, S.A. & A. D. IACOBUCCI. Química Elemental Moderna. Buenos Aires: Kapaleuz & Cía, 1939. 366 p.

CENTRO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO. Aquatox [Online]. Mozilla/4.04. Canadá: IDRC, 21 de Octubre de 2002 [rev. Agosto de 2002]. Disponible en internet: <<http://www.idrc.ca/aquatox/sp/whatsnu/check.html>>

CENTRO DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. Preguntas Frecuente: Contaminación del Aire [Online]. Texinfo 2 el. (México D. F., México), Coordinación Técnica, 2001 (Actualizado en noviembre de 2001). Gobierno del Distrito Federal de México. Web: <http://148.243.232.98/preguntas_frecuentes/contaminacion_aire.htm>

CHIRIVI H. & VELASQUEZ, L.M. Ecobiología. Bogotá: Usta, 1984. 606 p.

COSCARELLA, Patricia. ¿Usted porqué vota? [Online]. Textinfo. Buenos Aires, Argentina: Fabio Zerpa, Marzo de 2001 [rev. Marzo de 2001]. Disponible en internet:<http://www.fabiozerpa.com/EIQuintoHombre/marzo01/UstedporqueVota_1.htm>

Conductividad eléctrica: Aspectos Teóricos disponible en <http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/grupos/fluoreciencia/calidadweb/cal08.htm>

COGBILL y LIKENS, G. The export of nutrients and recovery of stable conditions following deforestation at Hurbbard Brook In: Ecology monogr. Vol 44, 1997.

CHANG, Raymond. Química. Mexico: Mc Graw-Hill, 1999.

DANELON, O. & L. M. MOREIRA-NORDEMANN. Natural and Anthropogenic Occurrence of Cl^- , Na^+ , NO_3^- , NH_4^+ ; And SO_4^{+} in the Quilombo River Basin (Cubatão - SP). En: Revista Brasileira de Geociências. Vol. 21, No. 1. Marzo, 1991. p. 96-101.

DA SILVA FILHO, E.V., A.R. COELHO OVALLE & I.F. BROWN. Precipitacao ácida no Parque Nacional da Tijuca, Río de Janeiro. En: Ciencia e Cultura. Vol 39, 1987. p. 419-422

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA. Los contaminantes, ¿son causa natural o humana? [Online]. Macintosh. Chile: Editorial Mantra, Agosto 2002 [Actualizado el 21 de Diciembre de 2002]. Disponible en internet: <http://www.mantra.com.ar/contenido/zona1/frame_ozono4.html>

Determinación de la Conductividad, Determinación de pH, Método electrométrico Eléctrica American Society for testing and Materials. Annual book of Standards 1994. [online] disponible en linternet en :<http://www.avantel.net/~arbolag/ph.htm>

DIRECCIÓN GENERAL DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN. Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1994 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1994 [rev. 1994]. Anual. Disponible en internet: http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_94/parte1.pdf

_____ Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1994 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1994 [rev. 1994]. Anual. Disponible en internet: <http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_94/parte2.pdf>

_____ Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1994 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1995 [rev. 1995]. Anual. Disponible en internet: http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_95/parte_3.pdf

_____ Programa de Precipitación Ácida de la ZMCM informe anual 1998 [Online]. Adobe Acrobat. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 1998 [rev. 1998]. Anual. Disponible en internet: < http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/inf_pre_acd_98/capitulo04.PDF>

DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE. Informe Anual de la Calidad del Aire y Precipitación Ácida en el Valle de México 2000 [Online]. Acrobat Adobe. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 2000 [rev. 2000]. Anual. Disponible en internet: <http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/aire_lluvia00/directorio.pdf>

_____ Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001 para la ZMVM [Online]. Acrobat Adobe. México: Gobierno del Estado de México, Departamento del Distrito Federal, Secretaria del Medio Ambiente, 2001 [rev. 2001]. Anual. Disponible en internet: <http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/anal_aire2001/capitulo3.pdf>

Distribución de las lluvias en Colombia. Universidad de San Miguel. Colombia en movimiento. Culiacán Sinaloa. Marzo 2004.

DOMENECH, X. Química Ambiental: El impacto de los residuos. Madrid: Miraguano Ediciones, 1993.

DUQUE Gonzalo. Manual de geología para ingenieros. Manizales Colombia 1998.

DURHAM, Jack. Chemistry Of Particles, Fogs and Acid Rain. United states, 1984.

DUVIGNEAUD, P. La Síntesis Ecológica. España, 1978.

ECO-D. ARSÉNICO [Online]. Macintosh. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 30 de Octubre de 2000 [2000]. Disponible en internet: <http://www.jornada.unam.mx/2000/oct00/001030/eco-d.html>

ECOSITIO. Lluvia ácida. Educación Ambiental [online]. México 2003. disponible en internet: http://www.eco-sitio.com.ar/lluvia_acida.htm.

ECOSUR. Sustancias que contaminant la atmosfera. Recolección, Transporte y Disposición final de Residuos Industriales, Patológicos, Especiales y Peligrosos Escuela Superior de Ing. Universidad de Navarra Octubre 2002.

_____. Recolección, Transporte y Disposición final de Residuos Industriales, Patológicos, Especiales y Peligrosos. In Contaminación atmosférica [online]. Disponible en la pagina de internet www.contaminacionatmosferica.com [Actualizado Noviembre 2004]

ELZO, M. A., G. Martínez, F. Gonzáles, y H. Huertas. Variabilidad y Predicciones Genéticas Para Características de Carne en el Rebaño Multirracial Sanmartinero-

EMPRESAS ASOCIADAS DEL CLOROSUR. El Cloro en la Naturaleza [Online]. Textinfo. Washington, D.C.: The Bivings Group, 28 de Febrero de 2002 [rev. Enero de 2002]. Disponible en internet: <http://www.clorosur.com/espanhol/naturaleza.html>

Energía y cambios de pH. Comportamiento químico del agua [online] disponible en la pagina de Internet http://www.sagan-gea.org/hojaredagua/paginas/34_agua.html. Miami 2003.

ERICKSON, R. The reaction of sulfur dioxide with ozone in water and its possible atmospheric significance. In: atmospheric environment, 1977.

ESTELLANO, Washington. Después del Gasoducto Bolivia-Brasil [Online]. Microsoft FrontPage 2.0. Uruguay: Revista del Sur, Junio de 1999 [citado Mayo de 2001]. Mensual. Disponible en internet: <http://www.revistadelsur.org.uy/revista092/Ambiente1.html>

EXPOINDUSTRIA. Ciclo del Azufre [Online]. Textinfo. México: Expindustria. 2001 [2001]. Disponible en internet: <<http://www.expindustria.net/images/CicloAzufre.gif>>

_____ Ciclo del Nitrógeno [Online]. Textinfo. México: Expindustria. 2001 [2001]. Disponible en internet <<http://www.expindustria.net/images/CicloNitrogeno.gif>>

FACULTAD DE INGENIERÍA. Lluvia ácida [Online]. Texinfo 2 el. (Cali, Colombia): Investigación, Jul. 2001 (Actualizado 13 de Agosto de 2001). Pontificia Universidad Javeriana – Seccional Cali. Web: <<http://atlas.ujavcali.edu.co/ftp/investigacion/conf-23-10-2000.doc>>

FELIX, C. Et al. Tratado de Química Mineral. Bogotá: Editorial Bedout, 1958. 452 p

FERNÁNDEZ F. La química en la sociedad, programa de integración Docencia e investigación, UNAM, 1994.

FIGUEROA C., A. & A. VALVERDE. Análisis del Aporte de Nutrientes por Precipitación y a Través del Follaje en un Ecosistema Altoandino. Universidad del Cauca, 2000. 11 p.

FIGUEROA, Apolinar, VALVERDE, Antonio y ALEGRÍA, Carlos. Análisis de la sensibilidad a la acidificación de un ecosistema altoandino como un instrumento de gestión. Popayán, 2001.

FOWLER, D y CAPE, J. The contamination of rain samples by dry deposition on rain collectors. Atmosferic Environmet. Londres, 1984

FUENTEALBA, Maximiliano. Lluvia Acida [Online]. Netscape. Chile: Akiraswars, 1999 [1999]. Disponible en Internet: <<http://www.geocities.com/Athens/Acropolis/5759/acida.html>>

FUNDACIÓN ECOSISTEMAS ANDINOS. El páramo ecosistema a proteger, Editorial CODICE LTDA. Santafé de Bogotá 1996.

GARCÍA Rómulo; Espinoza José; Marcano José. La contaminación ambiental causada por la quema de la caña de azúcar, al momento de la cosecha Investigadores. FONAIAP - Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Yaracuy. Estación Experimental Yaritagua. Yaritagua.

GALLARDO TORRES, Alfredo y Lilia, GARCIA GALVAN. Lluvia Ácida [Online]. Adobe acrobat. México: Gobierno del Estado de México. Departamento del Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente, Junio de 1999 [rev. 1994]. Disponible en internet. <http://www.sma.df.gob.mx/publicaciones/aire/folleto_lluvia99/folleto.pdf>

GLOBAL AIR POLLUTION. Tabla de datos de contaminantes con azufre [Online]. Mozilla/4.5 en Win95. España: Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2001 [rev. 1984 y 1988]. Disponible en internet: <<http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/221DatComAz.htm>

_____ Tabla de datos de contaminantes con Nitrógeno [Online]. Mozilla/4.5 en Win95. España: Libro electrónico: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, 2001 [rev. 1984 y 1988]. Disponible en internet: <[Http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/231DatosCompN.htm](http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/231DatosCompN.htm)

GARRITZ, J y CHAMIZO, A. Química. Iberoamericana, 1986.

GENTRY, Alwyn. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. In: Annual of the Missouri botanical garden. 1988.

GLYNN, Henry. Ingeniería Ambiental, Printice Hall. México. 1999. pag 800.

GORHAM, E. Acid Rain : An Overview. Estados Unidos de América,1984.

GREENPEACE. El aire, el agua y la tierra se vuelven basureros [online], Mexico 2003. Disponible en Internet: <http://www.enbuenasmanos.com/ARTICULOS/muestra.asp?art=232>.

GRIJMA, Pieter. Producción Forestal. México 1998.

GRUBB, P. Acomparision of montane and lowland rain forest in Ecuador: the forest structure physiognomy and floristic. In Ecology 1993.

HENDRY, CH., C. BERISH & E. EDGERTON. Precipitation Chemistry at Turrialba, Costa Rica. En: Water Resource Research. Vol. 20, No. 11, 1984. p. 1677 – 1684

HENDRY, Charles. Precipitation chemistry at Turrialba. Costa Rica. Water recourses research. Noviembre, 1984.

HENRY, J. Glynn., & HEINKE, Gary W. Ingeniería Ambiental. 2a ed. México: Prentice Hall, 1999. 778 p.

HERNANDEZ, R., FERNANDEZ, C. & P. BAPTISTA. Metodología de la Investigación. Colombia: McGrawHill, 1997. 505 p.

HUSAR, R. And GILLANI. Sulfur budget of power plant plume. In: Environment, 1978.

IDEAM. Monitoreo de lluvia ácida en Colombia. Colombia. 1997.

INESON, P. The effect of airborne sulphur pollutants upon decomposition and nutrient release in forest soil. Thesis University of Liverpool.

INFOAGRO. Atmósfera, contaminación y lluvia ácida [Online]. Microsoft FrontPage 4.0. España: Infoagro, 2001 [rev. 2001]. Disponible en internet: <http://www.nortecastilla.es/canalagro/datos/agricultura_ecologica/lluvia_acida.htm>

INGEOMINAS. Amenazas geoambientales [online] investigación y zonificación de efectos geoambientales por aprovechamiento del subsuelo disponible en la pagina de internet
<http://www.ingominas.gov.co/web/subdirecciones/geoamenazas/proyecto%20ag5-02/>. Bogota Colombia 2004.

_____. Atlas de amenaza volcánica en Colombia. Colombia, 1998

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, EL CENTRO DE PERCEPCIÓN REMOTA Y EL DEPARTAMENTO DE DESARROLLO ACADÉMICO DE SECICO. Curso Geografía del Mar: Propiedades del Agua de Mar [Online]. Text/html. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h32.html>

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Condiciones e indicadores ambientales en Colombia, julio de 2002: Proyecciones en el corto, mediano y largo plazo [Online]. Adobe Acrobat. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2002 [rev. 2002] Mensual. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/informe/Info90/11%20-%2069.pdf>>

_____ Régimen anual de viento, Popayán [Online]. text/html; charset=windows-1252. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2001 [rev. 2001]. Disponible en internet: <<http://www.ideam.gov.co/sectores/aero/climat/vienpopayan.htm>>

INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI. Métodos Analíticos de Cals. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2002.

_____. Principios básicos de cartografía temática. Bogotá 1998, 230 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA. Fenómenos meteorológicos [online]. Disponible en la pagina de internet. www mail x mail. Com . Mexico noviembre de 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA. Fenómenos meteorológicos [online]. Disponible en la pagina web: <http://www.inm.es/>. España Diciembre 2004.

INTERNATIONAL CO-OPERATION. Regional Air Pollution In Developing Countries (RAPIDC) [Online]. Text/javascript. Stockholm: Department of Biology, University of York, 2002 [Actualizado 02/03/2003]. Disponible en internet: <<http://www.york.ac.uk/inst/sei/rapidc2/latin/lamerica.html>>

INZUSA Juan. Meteorología descriptiva. Nubes y precipitación [online] disponible en internet en la pagina web [www. Ude.cl /Zjinzunsa/meteo/ cap 6pdf](http://www.ude.cl/Zjinzunsa/meteo/cap6.pdf). Departamento de física de la atmosfera y del océano Concepción chile. Chile 2003. p 160.

JENKINS, David. Química del agua. Mexico, 1990.

JONSON. D, RICHEL. Lovett. The effects of atmospheric deposition on potassium, calcium and magnesium cycling in two deciduous forest. Canadian journal of forest research. 1985

JUNGE, C and WERBY. The concentration of chloride, sodium, potassium, calcium and sulphate. in rain water over the united states. In: Journal meteorological, 1958.

JUNKERMANN, W.; DIETRICH, J.; WOLF, P.; WIEPRECHT, W.; SLEMR, J.; KOLTHOFF, G.; NIEßNER, R. Investigation of the vertical distribution of trace components in the lower troposphere using a cable car. En: Proc. EUROTRAC Sympos. Eds. P. Borell et al. Den Haag: Acad. Publ., S, 1994. p.1156-1161

KAMMS PANIAGUA, Ligia. Fenómenos Atmosféricos [Online]. Adobe PageMill 2.0 Win. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 11 de agosto de 2001 [Actualizado en Julio de 2001]. Disponible en internet: <http://dgenp.unam.mx/chaac/paginas/luvia.html>

KELLMAN, M., J. HUDSON & K. SANMUGADAS. Temporal Variability in Atmospheric Nutrient Influx to a Tropical Ecosystem. En: Biotropica. Vol. 14, No.1, 1982. p. 1 - 9

KELLY and STRICKLAND. Soil nutrient leaching in response to simulated acid rain treatment water. Air and soil pollution 1987.

LARRY y CANTER. Manual de evaluación de impacto ambiental. Mcgraw Hill. España 1997, 840 p.

LAWRY, J. Soil fungal populations and soil respiration in habitats variously influenced by coal strip- mining. In: Environment, 1977.

LETT. The effect of atmospheric SO₂ pollution on the microflora of forest soils. In: folia microbiologica, 1984.

LEWIS, J. La biosfera y sus ecosistemas: Una introducción a la ecología. Argentina, 1995.

LIKENS, S.E., F.H. BORMAN, R.S. PIERCE, S. EATON & N.M. JHONSON. Biochemistry of a Forested Ecosystem Springer. New York: Verlag, 1977.

LIKENS, E. y BORMAN, F. forested ecosystem. New York, 1977.

LIKENS, G. Interaction between major biogeochemical cycles in terrestrial ecosystem. New York.

LINBERG, Sources of sulphuric in forest canopy throughfall. Nature 336: 148- 151.

_____, Field measurement of particle dry deposition rates to foliage and inert surfaces in forest canopy. Environmental Science and technology.

LINDBERG, S. Atmospheric deposition and canopy interaction of major ions in a forest: Science. 1986.

Lluvia ácida. Secretaría del medioambiente. [online]. Disponible en la dirección electrónica. secretaria del ambiente.mx. Diciembre de 2004. Ciudad de la Esperanza- México.

LOS EFECTOS DE LA LLUVIA ÁCIDA EN EL BALANCE ECOLÓGICO Y SUS IMPLICACIONES ECONÓMICAS [online]. Disponible en la página electrónica: http://usuarios.lycos.es/planeta_verde/lluviaacida.htm. Actualización 27 de diciembre 2004.

MANAHAN, S., Fundamentals Of Environmental Chemistry. New York: Lewis Publisher, 1993. 840 p.

Manual de Contaminación Ambiental. ITSEMAP Ambiental. España, 1997

MARCANO, José. La Contaminación Atmosférica [Online]. Netscape. República Dominicana: República Dominicana, 17 de mayo de 2001 [Actualizado en Mayo de 2001]. Disponible en internet: <http://jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf.html>

MARGALEF, Ramon. Ecología. Ediciones Omega. Barcelona, 1980.

MARTÍNEZ-IGEA-SCIAN Nociones elementales de Química Universitaria. Formación de compuestos ácidos. [online]. Disponible en internet en la dirección electrónica http://www.fcv.unlp.edu.ar/ingreso2005/programa_de_contenidos_quimica.doc

Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, 1989.

Meteorología al alcance de todos. Masas de Aire - Estabilidad e Inestabilidad [online]. Disponible en Internet en la dirección electrónica http://www.geocities.com/silvia_larocca/Temas/Met28.htm obtenida el 3 Ene 2005 04:48:06 GMT.

MICHEL, Paul. Air Pollutant Trajectories in Precipitating Storms. United States, 1984.

MILLER, H. Ecological impact of acid precipitation, 1980.

MINAMBIENTE. Plan de manejo ambiental: Parque Nacional Natural de Puracé. Colombia, 1998.

Ministerio de Defensa Nacional. Destrozos ambientales del narcotráfico. Bogotá Abril 2002.

MOGOLLÓN, José et al. Evaluación y manejo de la contaminación urbana. MMA – ICFES. Bucaramanga, 1997.

MONSALVE María, PULGARIN Bernardo. Amenaza volcánica potencial del volcán Puracé En: Revista Ingeominas : Una publicación sobre las ciencias y tecnología de la tierra. 1993

MOREIRA-NORDEMANN, L. M., P. GIRARD & N. RÉ POPPI. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. En: Rev. Bras. Geof. Vol.15, No.1. Marzo de 1997. p. 35-44. ISSN 0102-261X.

MANAHAN, S. Fundamental environmental chemistry. Lewis Publisher. New York, 1993.

MÖLLER, D. Sulfate Aerosols and their Atmospheric Precursors. En: Aerosol Forcing of Climate, 1995. p. 73-90

MOREIRA L.. –NORDEMANN M., GIRARD P & RÉ POPPI N. Química da precipitação atmosférica na cidade de Campo Grande – MS. En: Rev. Bras. Geof. Vol. 15, No.1, 1997.

MOSS, M. Source of sulphur in the environment; the global sulphur cycle. In Sulphur in the environment. 1978.

NIEMANN, Brand. Analysis of wind precipitation data for assessments of transboundary transport and acid deposition between Canada and United States. United States, 1984.

NIBORG. Sulfur pollution and soils. In: Sulfur in the environment. 1978.

NILSSON, J. Critical loads for nitrogen and sulphur . 1986.

NINPHIUS and SHAW. Acid rain measurements: what they mean, 1984.

NOEL DE NEVERS, Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire. McGraw-Hill. Mexico. (1997); 546 p.

Ordenación de los ecosistemas frágiles: lucha contra la desertificación y la sequía [online]. Disponible en la pagina de internet: <http://www.Rds.Org.Co/rio10/cap9-15.pdf>.

Ordenación de los ecosistemas frágiles: desarrollo sostenible de las zonas de alta montaña [online]. Disponible en la pagina de internet: <http://www.Rds.Org.Co/rio10/cap9-15.pdf>.

OYARZUN R. & HIGUERAS P. Minerales, metales, compuestos químicos, y seres vivos: una difícil pero inevitable convivencia [online] disponible en la pagina de Internet http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia_Minera/Mineria_toxicidad.htm. Actualización 25 de Diciembre de 2004.

PARQUE NACIONAL NATURAL PURACE. American online . copyright, 1999.

PARUNGO, F., C. NAGAMOTO, S. HOYT & H. BRAVO. The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of México. En: Atmospheric Environment 24(A), 1990. p.109-123.

PERRY, M. solubility of atmospheric particulate matter, 1984.

POPAYÁN. CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL CAUCA. SUBDIRECCIÓN DE GESTIÓN AMBIENTAL RECURSO AIRE. Informe Subdirección de Gestión Ambiental Recurso Aire. Popayán: CRC, 2001.

RANJIT, KUMAR, et al. A Long Term Study on Chemical Composition of Rainwater at Dayalbagh, a Suburban Site of Semiarid Region. En: Journal of Atmospheric Chemistry. Vol. 41, 2002. p. 265–279.

RAMÍREZ, Alberto y VIÑA, Gerardo. Limnología Colombiana: Aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis. Colombia 1998.

RESTREPO, F. & L. VARGAS. Química Básica: Los Principios Fundamentales De La Química General. 5ª ed. Colombia: Editorial Bedout, 1951. 477 p.

ROCHA, C. & J. BITTENCOURT DE ANDRADE. Química atmosférica do enxofre (IV): Emissões, reações em fase aquosa e impacto ambiental. En: Química Nova. Vol. 25, No. 2, 2002. p. 259-272.

RODRIGUEZ, J & M, VILLA. Distribución Espacial De La Población, Urbanización Y Ciudades Intermedias: Hechos En Su Contexto. En: JORDAN, R. & D. SIMIONI. Ciudades Intermedias De América Latina Y El Caribe: Propuestas Para La Gestión Urbana. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Ministero degli Affari Esteri Cooperazione Italiana, 1998. p. 107 - 126

ROLDAN, Gabriel. Fundamentos de limnología tropical. Universidad de Antioquia. Medellín Colombia 1992. 529 pag.

ROJAS CARVAJAL, Alpher. Economía política del riesgo: la incertidumbre fabricada [Online]. Textinfo. Colombia: Iniciativa Socialista. 2001 [2001]. Disponible en internet: <<http://www.inisoc.org/alpher2.htm>>

SÁNCHEZ, EFRAIN. Cauca [Online]. text/html; charset=windows-1252. Colombia: Museo del Oro, Banco de la República, 2011 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <http://www.banrep.gov.co/museo/esp/expo/cauca.htm>

SÁNCHEZ Gabriela. Distribución de fuentes de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera de la ciudad de México. México 2001. pp 10.

SANHUEZA, E. & M. SANTANA. Atmospheric wet deposition in Tropical America. En: Israel Journal Chemistry. No. 34, 1994. p. 327-334.

SECRETARIA EJECUTIVA PARA ASUNTOS ECONOMICOS Y SOCIALES. Comisión Mixta de Cooperación Amazónica - Ecuatoriano - Colombiana - Plan de Ordenamiento y Manejo de las Cuencas de los Ríos San Miguel y Putumayo. Departamento de Desarrollo Regional. Washington, D.C. 1987.

SERVICIO DE SALUD METROPOLITANA DEL AMBIENTE. Compuestos [Online]. Microsoft FrontPage 3.0. Santiago de Chile: Sesma, 2000 [rev. 2000]. Disponible en internet: <<http://www.sesma.cl/macam2rm/pag/p00mpccomp.htm>>

_____, N. GRATEROL & A. RONDÓN. Rainfall pH in the Venezuelan savannah. En: Tellus. Vol 39 (B), 1987. p. 329-332.

SHAW & N. NIMPHIUS. Acid Rain Measurement: What they mean. [Online]. Acrobat PDF Writer 3.0 para Windows. Wisconsin, United States: Department of Agricultural Journalism, University of Wisconsin-Madison, Junio 16 de 1997 [Mayo 12 de 1998]. Disponible en internet: <http://cecommerce.uwex.edu/pdfs/G3305_2.PDF>

SLINN, W. Et al. Wet and dry deposition and resuspension of AFCT/TFCT fuel processing radionucleides, final report, Air Resources Center. Oregon state university Corvallis, 1979

SOBREVILLA, Claudia y BATH, Paquita. Evaluación Ecológica Rápida. Estados Unidos, 1992.

SOCIEDAD GEOGRAFICA COLOMBIANA. Climatología colombiana. En : Revista climatologica colombiana. Bogotá 1948.

SORENSEN, J CAMPBELL, Tepper. Aluminium in the environment and Human health. In: environment Health. 1974.

SPSS para Window [CD – ROM]. Release 7.5, Standard Version. Noviembre 14 de 1996. Copyright© SPSS Inc., 1989 – 1996.

STUMM, W y MORGAN, J. Aquatic chemistry: And introduction emphasizing chemical equilibrium in natural water. John Wiley & Sons. United States of America. 1981; pag 780.

Sustancias que contaminan la atmosfera. Ciencias de la tierra y del medio ambiente [online]. Libro electronico, disponible en Internet en la pagina [www1. ceit. Es/ asignaturas/ecologia/Hipertexto](http://www1.ceit.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto). España Noviembre de 2004

SWAN, R. The atmosphere as delivery vehicle and reaction chamber for acid precipitation In: Meteorological aspects of acid rain, 1984.

TORRES, M. P. Aporte al Conocimiento de la Geología y la Estratigrafía de la Formación Popayán Departamento del Cauca. En: Novedades Colombianas. No. 7. Marzo, 1997. p. 4-28.

SARMIENTO, J. Estudio de Ecosistemas Altoandinos en América del Sur. 1999.

TRHOP, John. Wintertime Precipitation Chemistry in North Georgia. United States, 1984.

ULRICH, B, MAYER and KHANNA. Chemical changes due to acid precipitation in a loess- derived soil in central Europe, 1980.

VANBREEMEN, N y DRISCOLL. Acid deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters In: Nature. Vol 307, 1984.

VAN DOBBEN. Conceptos unificadores en Ecología. Barcelona, 1980.

Variables climáticas [online]. Disponible en medio magnetico. ENCARTA 98. España 1998.

VASQUEZ, Guadalupe. Ecología y formación ambiental. México,1993.

VIVAS, D. T. & E. MUÑOZ. Informe General Del Estado Actual De Los Recursos Naturales Y Del Medio Ambiente en el Municipio De Popayán. Contraloría Municipal de Popayán, 1999.

VENKLAAS, E. J. Nutrient Fluxes In Bulk Precipitation And Throughfall In Two Montane Tropical Rain Forests, Colombia. En: Journal Ecology. Vol. 78, 1990. p. 974-992

VITOUSEK, P. The regulation of element concentration in mountain streams in the northeastern united states. Ecologist monograph, 1977.

WILLIAMS,M. A preliminary assessment of the air pollution climate of the UK.

WILLIAMS;S. Decomposition of litter on the soil surface. In Biology of plant litter decomposition. London.

WINKLER, Peter. Observations on acid particles and droplets in the atmospheric. In: chemistry of particles, fogs and rain, 1984.

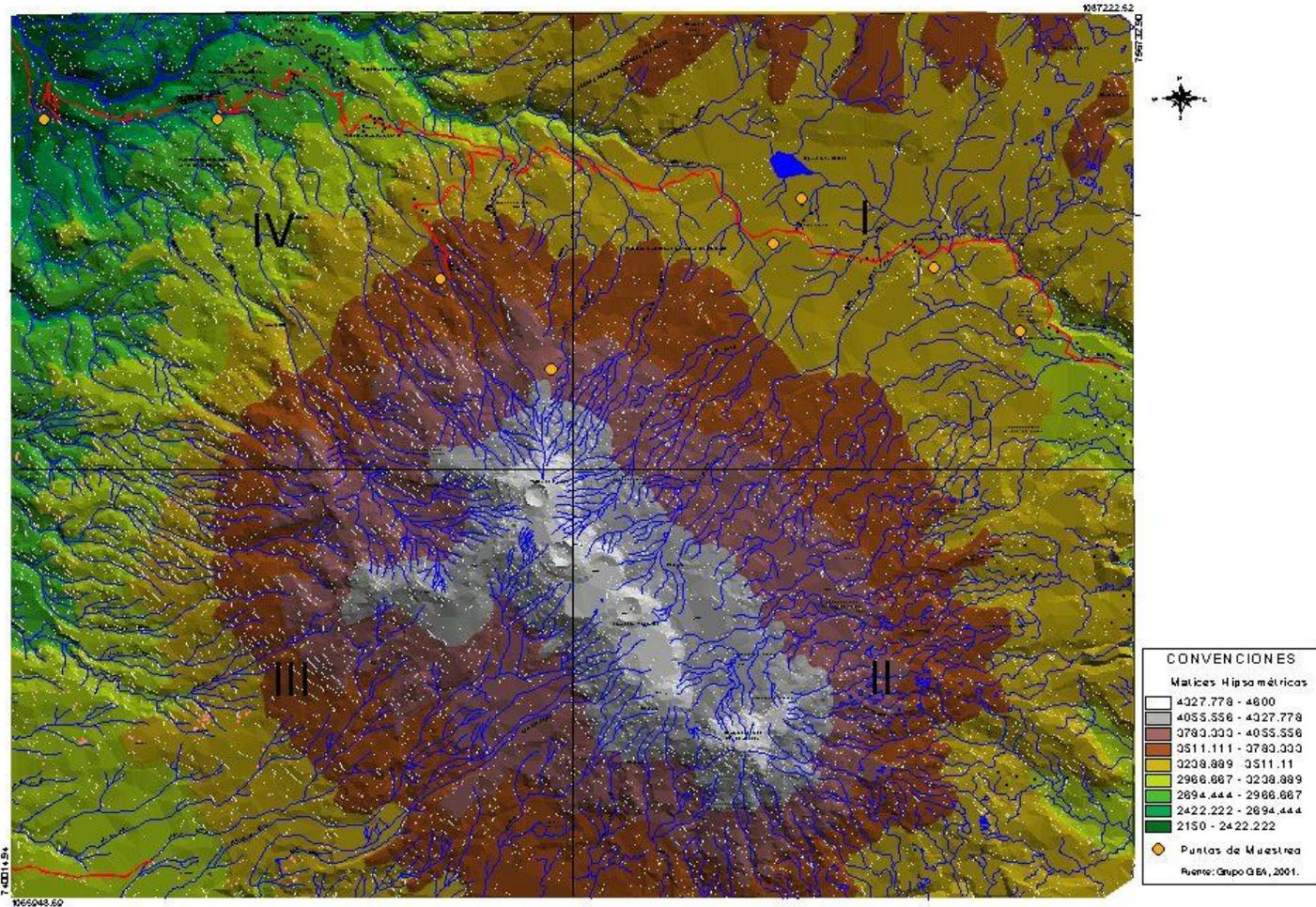
WOOKEY, P y INESON P. Chemical changes in discomposing forest litter in response to atmospheric sulfur dioxide. Unites Estates. Journal of Soil Science,1991.

ZAMBRANO RAMÍREZ, Alex Roger. Lluvia Acida [Online]. text/html; ISO-8859-1. México: Monografias.com, 2001 [Rev. 2001]. Disponible en internet: <<http://www.monografias.com/trabajos5/lluac/lluac2.shtml>>

ZAMORA, H. Niveles de Alteración de las Comunidades de Macroinvertebrados Acuáticos del Río Molino por Efecto de las Actividades Antrópicas y la Contaminación Doméstica. En: Unicauca Ciencia. Vol. 3 (Sep. 1998); p. 35 – 59.

ZANETA POLKOWSKA, et al. Studies on Intercorrelation between Ions Co-Occurring in Precipitation in the Gdańsk-Sopot-Gdynia Tricity (Poland). En: Journal of Atmospheric Chemistry. Vol. 41. 2002. p. 239–264.

Anexo A. Modelo de Ubicación Aproximada de los puntos de muestreo



Anexo 1. Datos físico-químicos para los meses de septiembre de 2002 a Febrero de 2003 en una franja de la región Alto-andina del Parque Nacional Natural Puracé.

punto	temperatura	pH	conductividad	Alcalinidad (mg/L)	cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)	Nitratos (mg/L)
1	10,2	5,87	7,02	9,43	10,58	38	1,99
2	9,8	4,66	7,54	8,92	10,89	35,66	1,50
3	13	5,61	5,8	9,92	13,21	50,33	0,53
4	14,5	6,31	7,83	11,09	11,56	12	0,04
5	13,8	5,78	11,09	12,01	12,56	16,83	0,39
1	9,2	4,81	4,24	8,26	6,29	21,66	3,16
2	11	4,38	8,19	8,26	4,13	11	3,10
3	10,5	5,15	5	9,51	5,29	38,16	3,09
4	12	5,56	5,29	8,17	4,43	11,76	2,61
5	10	4,96	4	9,84	4,76	12,76	2,70
1	21,8	5,54	10,02	9,51	12,9	25,6	1,49
2	14	4,48	19,01	6	11,58	12,26	0,54
3	15	5,87	8,16	13,76	8,27	77,7	0,53
4	18	5,13	5,79	8,18	11,91	12,6	0,41
5	21,5	6,14	7,49	11,51	9,26	10,1	0,47
1	15,7	4,96	6,36	6,84	8,603	14,26	0,92
2	14,8	4,83	9	4,84	6,29	10,3	0,59
3	16,2	6,24	10,57	8,68	9,93	20,73	0,12
4	17,6	5,42	7,27	9,67	5,956	10,33	0,09
5	17,1	5,44	6,51	8,68	6,62	42,6	0,48
1	18,3	5,57	16,39	9,67	5,29	5,1	1,18
2	15	5,11	17,8	7,68	4,303	4,26	1,69
3	16,8	6,22	16,64	11,34	4,96	12,83	0,29
4	17,3	5,45	9,9	7,84	3,97	51,66	1,06
5	16,5	6,38	24,86	8,76	5,293	53,13	0,098
1	15,5	5,65	11,35	6,71	5,626	10,33	1,34
2	13	4,53	14,58	2,17	4,963	75	2,48
3	14	5,2	4,86	9,01	4,3	4,3	1,49
4	16	5,58	5,35	12,93	4,963	12,86	1,41
5	15,8	6,09	7,15	12	3,97	40	0,88

Anexo 4. Descriptivos de las variables.

Descriptives

		N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
						Lower Bound	Upper Bound		
Nivel de captación (mm)	Septiembre	15	2000,00	,000	,000	2000,00	2000,00	2000	2000
	Octubre	15	2000,00	,000	,000	2000,00	2000,00	2000	2000
	Noviembre	15	700,00	261,861	67,612	554,99	845,01	400	1000
	Diciembre	15	1120,00	464,758	120,000	862,63	1377,37	800	2000
	Enero	15	500,00	113,389	29,277	437,21	562,79	300	600
	Febrero	15	2000,00	,000	,000	2000,00	2000,00	2000	2000
	Total	90	1386,67	678,928	71,565	1244,47	1528,87	300	2000
pH	Septiembre	15	5,6507	,77157	,19922	5,2234	6,0779	4,40	7,03
	Octubre	15	33,4207	109,98788	28,39875	-27,4886	94,3299	4,14	431,00
	Noviembre	15	5,4353	,62838	,16225	5,0874	5,7833	4,34	6,31
	Diciembre	15	5,3807	,64134	,16559	5,0255	5,7358	4,32	6,70
	Enero	15	5,7493	,68538	,17697	5,3698	6,1289	4,34	6,66
	Febrero	15	5,4120	,56633	,14623	5,0984	5,7256	4,49	6,49
	Total	90	10,1748	44,86204	4,72887	,7786	19,5710	4,14	431,00
Conductividad	Septiembre	15	7,8667	4,52242	1,16768	5,3622	10,3711	4,23	22,80
	Octubre	15	5,3473	1,68186	,43426	4,4159	6,2787	3,20	9,15
	Noviembre	15	10,0967	5,20918	1,34500	7,2119	12,9814	5,30	21,10
	Diciembre	15	7,9433	3,11929	,80540	6,2159	9,6707	3,23	13,08
	Enero	15	17,1233	7,24776	1,87136	13,1097	21,1370	4,07	25,10
	Febrero	15	8,6587	4,39138	1,13385	6,2268	11,0905	3,91	16,26
	Total	90	9,5060	5,87335	,61911	8,2759	10,7361	3,20	25,10
Alcalinidad (mg/L)	Septiembre	15	10,2753	2,15621	,55673	9,0813	11,4694	8,76	17,27
	Octubre	15	8,8100	1,30999	,33824	8,0846	9,5354	6,01	11,01
	Noviembre	15	9,7920	2,84347	,73418	8,2173	11,3667	5,25	14,01
	Diciembre	15	7,7413	1,93534	,49970	6,6696	8,8131	3,00	10,00
	Enero	15	9,0587	1,58649	,40963	8,1801	9,9372	7,01	12,51
	Febrero	15	8,5653	4,16119	1,07441	6,2609	10,8697	2,01	14,26
	Total	90	9,0404	2,58181	,27215	8,4997	9,5812	2,01	17,27
Cloruros (mg/L)	Septiembre	15	11,7640	2,40232	,62028	10,4336	13,0944	7,94	15,88
	Octubre	15	5,0820	1,19133	,30760	4,4223	5,7417	3,97	7,94
	Noviembre	15	10,7860	2,72681	,70406	9,2759	12,2961	6,95	15,88
	Diciembre	15	7,4800	3,20240	,82686	5,7066	9,2534	3,97	17,87
	Enero	15	4,7647	1,25610	,32432	4,0691	5,4603	2,98	6,95
	Febrero	15	4,7647	,93536	,24151	4,2467	5,2827	2,98	5,96
	Total	90	7,4402	3,56199	,37547	6,6942	8,1863	2,98	17,87
Nitrogeno absorbancia	Septiembre	15	,0623	,07030	,01815	,0234	,1013	,00	,20
	Octubre	15	,1976	,03490	,00901	,1783	,2169	,10	,22
	Noviembre	15	,0489	,04680	,01208	,0229	,0748	,03	,22
	Diciembre	15	,0326	,02962	,00765	,0162	,0490	,00	,12
	Enero	15	,0607	,04861	,01255	,0338	,0877	,01	,13
	Febrero	15	,1043	,04313	,01113	,0805	,1282	,01	,22
	Total	90	,0844	,07200	,00759	,0693	,0995	,00	,22
Sulfatos (mg/L)	Septiembre	15	30,5667	14,73197	3,80378	22,4084	38,7250	11,00	53,00
	Octubre	15	19,0733	10,68025	2,75763	13,1588	24,9879	10,00	39,00
	Noviembre	15	27,5467	26,58052	6,86306	12,8269	42,2665	9,80	78,10
	Diciembre	15	19,6467	12,52568	3,23412	12,7102	26,5832	10,00	43,00
	Enero	15	16,1000	19,43594	5,01834	5,3367	26,8633	4,10	53,60
	Febrero	15	28,5000	27,21399	7,02662	13,4294	43,5706	4,20	76,00
	Total	90	23,5722	19,85552	2,09296	19,4136	27,7309	4,10	78,10
Nitrogeno (mg/L)	Septiembre	15	,2007	,23953	,06185	,0680	,3333	-,01	,67
	Octubre	15	,6617	,11886	,03069	,5958	,7275	,34	,73
	Noviembre	15	,1547	,15940	,04116	,0665	,2430	,08	,72
	Diciembre	15	,0993	,10104	,02609	,0433	,1552	-,01	,41
	Enero	15	,1953	,16567	,04278	,1035	,2870	,02	,44
	Febrero	15	,3437	,14695	,03794	,2624	,4251	,03	,73
	Total	90	,2759	,24536	,02586	,2245	,3273	-,01	,73
Nitratos (mg/L)	Septiembre	15	,8885	1,06112	,27398	,3009	1,4762	-,04	2,98
	Octubre	15	2,9302	5,2692	,13605	2,6384	3,2220	1,52	3,22
	Noviembre	15	,6853	,70643	,18240	,2941	1,0765	,37	3,21
	Diciembre	15	,4398	,44709	,11544	,1922	,6874	-,02	1,82
	Enero	15	,8643	,73368	,18944	,4580	1,2706	,07	1,94
	Febrero	15	1,5225	,65084	,16805	1,1621	1,8830	,13	3,24
	Total	90	1,2218	1,08675	,11455	,9942	1,4494	-,04	3,24

Descriptives

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum	
					Lower Bound	Upper Bound			
Nivel de captación (mm)	Pilimbalá	18	1450,00	800,919	188,778	1051,71	1848,29	300	2000
	Minas	18	1433,33	599,019	141,190	1135,45	1731,22	600	2000
	Puracé	18	1350,00	687,065	161,943	1008,33	1691,67	500	2000
	Campamento	18	1400,00	628,724	148,192	1087,34	1712,66	600	2000
	Crucero	18	1300,00	727,607	171,499	938,17	1661,83	500	2000
	Total	90	1386,67	678,928	71,565	1244,47	1528,87	300	2000
pH	Pilimbalá	18	5,4039	,66967	,15784	5,0709	5,7369	4,34	7,03
	Minas	18	28,3722	100,48337	23,68416	-21,5970	78,3414	4,14	431,00
	Puracé	18	5,7189	,52801	,12445	5,4563	5,9815	4,91	6,70
	Campamento	18	5,5794	,46443	,10947	5,3485	5,8104	4,86	6,76
	Crucero	18	5,7994	,58349	,13753	5,5093	6,0896	4,61	6,54
	Total	90	10,1748	44,86204	4,72887	,7786	19,5710	4,14	431,00
Conductividad	Pilimbalá	18	9,2328	6,12575	1,44385	6,1865	12,2790	3,60	25,10
	Minas	18	12,6933	5,68222	1,33931	9,8676	15,5190	3,23	24,60
	Puracé	18	8,5078	4,87193	1,14832	6,0850	10,9305	3,91	23,40
	Campamento	18	6,9111	1,93744	,45666	5,9476	7,8746	4,85	11,37
	Crucero	18	10,1850	7,98673	1,88249	6,2133	14,1567	3,20	25,10
	Total	90	9,5060	5,87335	,61911	8,2759	10,7361	3,20	25,10
Alcalinidad (mg/L)	Pilimbalá	18	8,4033	1,49106	,35145	7,6618	9,1448	5,11	10,51
	Minas	18	6,3139	2,48948	,58678	5,0759	7,5519	2,01	9,26
	Puracé	18	10,3694	1,87161	,44114	9,4387	11,3002	8,51	14,01
	Campamento	18	9,6478	2,12670	,50127	8,5902	10,7054	6,01	13,76
	Crucero	18	10,4678	2,39406	,56428	9,2772	11,6583	8,01	17,27
	Total	90	9,0404	2,58181	,27215	8,4997	9,5812	2,01	17,27
Cloruros (mg/L)	Pilimbalá	18	8,2167	3,56713	,84078	6,4428	9,9906	3,97	15,88
	Minas	18	7,1111	3,35272	,79024	5,4438	8,7784	2,98	14,89
	Puracé	18	7,6617	4,20567	,99129	5,5702	9,7531	3,97	17,87
	Campamento	18	7,1317	3,64538	,85922	5,3189	8,9445	2,98	13,89
	Crucero	18	7,0800	3,23105	,76157	5,4732	8,6868	2,98	12,90
	Total	90	7,4402	3,56199	,37547	6,6942	8,1863	2,98	17,87
Nitrogeno absorbancia	Pilimbalá	18	,1148	,07703	,01816	,0765	,1531	,01	,22
	Minas	18	,1128	,06564	,01547	,0801	,1454	,03	,22
	Puracé	18	,0703	,07337	,01729	,0338	,1068	,00	,22
	Campamento	18	,0655	,06549	,01544	,0329	,0981	,00	,22
	Crucero	18	,0587	,06409	,01511	,0269	,0906	,01	,21
	Total	90	,0844	,07200	,00759	,0693	,0995	,00	,22
Sulfatos (mg/L)	Pilimbalá	18	19,1611	11,15443	2,62912	13,6141	24,7081	5,00	39,00
	Minas	18	24,7500	25,27231	5,95674	12,1824	37,3176	4,10	76,00
	Puracé	18	34,0111	25,57034	6,02699	21,2953	46,7269	4,20	78,10
	Campamento	18	10,7000	2,69291	,63472	9,3608	12,0392	5,10	13,00
	Crucero	18	29,2389	17,11354	4,03370	20,7285	37,7492	9,80	53,60
	Total	90	23,5722	19,85552	2,09296	19,4136	27,7309	4,10	78,10
Nitrogeno (mg/L)	Pilimbalá	18	,3793	,26253	,06188	,2488	,5099	,01	,73
	Minas	18	,3726	,22376	,05274	,2613	,4838	,09	,73
	Puracé	18	,2276	,25002	,05893	,1033	,3519	-,01	,72
	Campamento	18	,2116	,22321	,05261	,1006	,3226	-,01	,73
	Crucero	18	,1883	,21836	,05147	,0797	,2969	,01	,71
	Total	90	,2759	,24536	,02586	,2245	,3273	-,01	,73
Nitratos (mg/L)	Pilimbalá	18	1,6801	1,16269	,27405	1,1019	2,2582	,05	3,22
	Minas	18	1,6500	,99056	,23348	1,1574	2,1426	,42	3,24
	Puracé	18	1,0084	1,10755	,26105	,4576	1,5592	-,04	3,21
	Campamento	18	,9364	,98849	,23299	,4448	1,4280	-,04	3,22
	Crucero	18	,8341	,96751	,22804	,3529	1,3152	,05	3,16
	Total	90	1,2218	1,08675	,11455	,9942	1,4494	-,04	3,24

Anexo 5. Test de homogeneidad de varianza.

Test of Homogeneity of Variance

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
pH	Based on Mean	,989	5	84	,430
	Based on Median	,650	5	84	,662
	Based on Median and with adjusted df	,650	5	77,177	,662
	Based on trimmed mean	,949	5	84	,454

Anexo 6. Análisis espacial de las variables.

Tests of Normality

Geopocision (Sitios)		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	Pilimbalá	,129	18	,200*	,967	18	,749
	Minas	,149	18	,200*	,886	18	,033
	Puracé	,128	18	,200*	,954	18	,489
	Campamento	,148	18	,200*	,935	18	,234
	Crucero	,115	18	,200*	,947	18	,375

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Test of Homogeneity of Variance

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
pH	Based on Mean	1,476	4	85	,217
	Based on Median	1,491	4	85	,212
	Based on Median and with adjusted df	1,491	4	74,612	,214
	Based on trimmed mean	1,509	4	85	,207

Anexo 7. Análisis temporal y especial univariable.

Univariate Analysis of Variance

Between-Subjects Factors

		Value Label	N
Mes	1	Septiembre	15
	2	Octubre	15
	3	Noviembre	15
	4	Diciembre	15
	5	Enero	15
	6	Febrero	15
Geopocision (Sitios))	1	Pilimbalá	18
	2	Minas	18
	3	Puracé	18
	4	Campamen to	18
	5	Crucero	18

Anexo 8. Descriptivos espaciales de las variables.

Descriptive Statistics

Dependent Variable: pH

Mes	Geopocision (Sitios))	Mean	Std. Deviation	N
Septiembre	Pilimbalá	5,8733	1,00530	3
	Minas	4,6633	,28148	3
	Puracé	5,6167	,42336	3
	Campamento	6,3133	,48952	3
	Crucero	5,7867	,65858	3
	Total	5,6507	,77157	15
Octubre	Pilimbalá	4,8133	,24583	3
	Minas	4,3833	,28711	3
	Puracé	5,1533	,23544	3
	Campamento	5,5667	,36226	3
	Crucero	4,9567	,33561	3
	Total	4,9747	,47506	15
Noviembre	Pilimbalá	5,5467	,17926	3
	Minas	4,4833	,22279	3
	Puracé	5,8700	,19157	3
	Campamento	5,1333	,26102	3
	Crucero	6,1433	,16503	3
	Total	5,4353	,62838	15
Diciembre	Pilimbalá	4,9667	,46608	3
	Minas	4,8300	,64133	3
	Puracé	6,2400	,44136	3
	Campamento	5,4267	,36019	3
	Crucero	5,4400	,31321	3
	Total	5,3807	,64134	15
Enero	Pilimbalá	5,5700	1,07037	3
	Minas	5,1133	,36665	3
	Puracé	6,2267	,40415	3
	Campamento	5,4567	,31005	3
	Crucero	6,3800	,16371	3
	Total	5,7493	,68538	15
Febrero	Pilimbalá	5,6533	,20008	3
	Minas	4,5300	,04583	3
	Puracé	5,2067	,15144	3
	Campamento	5,5800	,06557	3
	Crucero	6,0900	,35553	3
	Total	5,4120	,56633	15
Total	Pilimbalá	5,4039	,66967	18
	Minas	4,6672	,39067	18
	Puracé	5,7189	,52801	18
	Campamento	5,5794	,46443	18
	Crucero	5,7994	,58349	18
	Total	5,4338	,66415	90

Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variable: pH

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	28,434 ^a	29	,980	5,435	,000
Intercept	2657,335	1	2657,335	14730,781	,000
MES	5,410	5	1,082	5,999	,000
GEOPOSIC	14,845	4	3,711	20,573	,000
MES * GEOPOSIC	8,179	20	,409	2,267	,008
Error	10,824	60	,180		
Total	2696,592	90			
Corrected Total	39,258	89			

a. R Squared = ,724 (Adjusted R Squared = ,591)

Estimated Marginal Means

1. Mes

Estimates

Dependent Variable: pH

Mes	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Septiembre	5,651	,110	5,431	5,870
Octubre	4,975	,110	4,755	5,194
Noviembre	5,435	,110	5,216	5,655
Diciembre	5,381	,110	5,161	5,600
Enero	5,749	,110	5,530	5,969
Febrero	5,412	,110	5,193	5,631

Anexo 9. Análisis temporal de comparaciones múltiples.

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: pH

(I) Mes	(J) Mes	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
					Lower Bound	Upper Bound
Septiembre	Octubre	,676*	,155	,001	,202	1,150
	Noviembre	,215	,155	1,000	-,259	,689
	Diciembre	,270	,155	1,000	-,204	,744
	Enero	-9,867E-02	,155	1,000	-,573	,375
	Febrero	,239	,155	1,000	-,235	,713
Octubre	Septiembre	-,676*	,155	,001	-1,150	-,202
	Noviembre	-,461	,155	,064	-,935	1,348E-02
	Diciembre	-,406	,155	,168	-,880	6,815E-02
	Enero	-,775*	,155	,000	-1,249	-,301
	Febrero	-,437	,155	,098	-,911	3,681E-02
Noviembre	Septiembre	-,215	,155	1,000	-,689	,259
	Octubre	,461	,155	,064	-1,348E-02	,935
	Diciembre	5,467E-02	,155	1,000	-,419	,529
	Enero	-,314	,155	,710	-,788	,160
	Febrero	2,333E-02	,155	1,000	-,451	,497
Diciembre	Septiembre	-,270	,155	1,000	-,744	,204
	Octubre	,406	,155	,168	-6,815E-02	,880
	Noviembre	-5,467E-02	,155	1,000	-,529	,419
	Enero	-,369	,155	,310	-,843	,105
	Febrero	-3,133E-02	,155	1,000	-,505	,443
Enero	Septiembre	9,867E-02	,155	1,000	-,375	,573
	Octubre	,775*	,155	,000	,301	1,249
	Noviembre	,314	,155	,710	-,160	,788
	Diciembre	,369	,155	,310	-,105	,843
	Febrero	,337	,155	,504	-,137	,811
Febrero	Septiembre	-,239	,155	1,000	-,713	,235
	Octubre	,437	,155	,098	-3,681E-02	,911
	Noviembre	-2,333E-02	,155	1,000	-,497	,451
	Diciembre	3,133E-02	,155	1,000	-,443	,505
	Enero	-,337	,155	,504	-,811	,137

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Bonferroni.

Anexo 10. Análisis espacial de comparaciones múltiples.

Estimates

Dependent Variable: pH

Geopocision (Sitios))	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
Pilimbalá	5,404	,100	5,204	5,604
Minas	4,667	,100	4,467	4,867
Puracé	5,719	,100	5,519	5,919
Campamento	5,579	,100	5,379	5,780
Crucero	5,799	,100	5,599	6,000

Pairwise Comparisons

Dependent Variable: pH

(I) Geopocision (Sitios))	(J) Geopocision (Sitios))	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig. ^a	95% Confidence Interval for Difference ^a	
					Lower Bound	Upper Bound
Pilimbalá	Minas	,737*	,142	,000	,324	1,149
	Puracé	-,315	,142	,299	-,728	9,763E-02
	Campamento	-,176	,142	1,000	-,588	,237
	Crucero	-,396	,142	,070	-,808	1,707E-02
Minas	Pilimbalá	-,737*	,142	,000	-1,149	-,324
	Puracé	-1,052*	,142	,000	-1,464	-,639
	Campamento	-,912*	,142	,000	-1,325	-,500
	Crucero	-1,132*	,142	,000	-1,545	-,720
Puracé	Pilimbalá	,315	,142	,299	-9,763E-02	,728
	Minas	1,052*	,142	,000	,639	1,464
	Campamento	,139	,142	1,000	-,273	,552
	Crucero	-8,056E-02	,142	1,000	-,493	,332
Campamento	Pilimbalá	,176	,142	1,000	-,237	,588
	Minas	,912*	,142	,000	,500	1,325
	Puracé	-,139	,142	1,000	-,552	,273
	Crucero	-,220	,142	1,000	-,633	,193
Crucero	Pilimbalá	,396	,142	,070	-1,707E-02	,808
	Minas	1,132*	,142	,000	,720	1,545
	Puracé	8,056E-02	,142	1,000	-,332	,493
	Campamento	,220	,142	1,000	-,193	,633

Based on estimated marginal means

*. The mean difference is significant at the ,05 level.

a. Adjustment for multiple comparisons: Bonferroni.

3. Mes * Geopocision (Sitios)

Dependent Variable: pH

Mes	Geopocision (Sitios))	Mean	Std. Error	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
Septiembre	Pilimbalá	5,873	,245	5,383	6,364
	Minas	4,663	,245	4,173	5,154
	Puracé	5,617	,245	5,126	6,107
	Campamento	6,313	,245	5,823	6,804
	Crucero	5,787	,245	5,296	6,277
Octubre	Pilimbalá	4,813	,245	4,323	5,304
	Minas	4,383	,245	3,893	4,874
	Puracé	5,153	,245	4,663	5,644
	Campamento	5,567	,245	5,076	6,057
	Crucero	4,957	,245	4,466	5,447
Noviembre	Pilimbalá	5,547	,245	5,056	6,037
	Minas	4,483	,245	3,993	4,974
	Puracé	5,870	,245	5,379	6,361
	Campamento	5,133	,245	4,643	5,624
	Crucero	6,143	,245	5,653	6,634
Diciembre	Pilimbalá	4,967	,245	4,476	5,457
	Minas	4,830	,245	4,339	5,321
	Puracé	6,240	,245	5,749	6,731
	Campamento	5,427	,245	4,936	5,917
	Crucero	5,440	,245	4,949	5,931
Enero	Pilimbalá	5,570	,245	5,079	6,061
	Minas	5,113	,245	4,623	5,604
	Puracé	6,227	,245	5,736	6,717
	Campamento	5,457	,245	4,966	5,947
	Crucero	6,380	,245	5,889	6,871
Febrero	Pilimbalá	5,653	,245	5,163	6,144
	Minas	4,530	,245	4,039	5,021
	Puracé	5,207	,245	4,716	5,697
	Campamento	5,580	,245	5,089	6,071
	Crucero	6,090	,245	5,599	6,581

Anexo 11. Comparación de los medios rangos de las variables.

Ranks			
	mes	N	Mean Rank
PH	Enero	15	58.07
	Febrero	15	45.47
	Septiembre	15	51.87
	Octubre	15	27.17
	Noviembre	15	46.90
	Diciembre	15	43.53
	Total	90	
CONDUCTI	Enero	15	72.60
	Febrero	15	43.80
	Septiembre	15	39.73
	Octubre	15	21.33
	Noviembre	15	52.73
	Diciembre	15	42.80
	Total	90	
ALCALINI	Enero	15	43.57
	Febrero	15	45.03
	Septiembre	15	60.43
	Octubre	15	41.67
	Noviembre	15	51.70
	Diciembre	15	30.60
	Total	90	
CLORUROS	Enero	15	23.97
	Febrero	15	24.33
	Septiembre	15	75.67
	Octubre	15	27.37
	Noviembre	15	71.40
	Diciembre	15	50.27
	Total	90	
SULFATOS	Enero	15	29.57
	Febrero	15	45.40
	Septiembre	15	60.53
	Octubre	15	45.07
	Noviembre	15	47.60
	Diciembre	15	44.83
	Total	90	
NITRATOS	Enero	15	29.57
	Febrero	15	45.40
	Septiembre	15	60.53
	Octubre	15	45.07
	Noviembre	15	47.60
	Diciembre	15	44.83
	Total	90	