

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ciencias

Escuela Profesional de Química

"Evaluación de los Niveles de Contaminación
Atmosférica con Dióxido de Azufre en la Ciudad
de Lima"



Tesis para Optar el Título de:

Licenciado en Química

Autor: José Eduardo Holguín Meneses

Lima - Perú

1993

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. CONSIDERACIONES GENERALES	3
2.1. Propiedades Químicas del Dióxido de Azufre	4
2.2. Efectos de la Contaminación por SO ₂	7
2.3. Efecto Sinérgico y Efecto Antagónico	9
2.4. El Smog	10
2.4.1. Smog Acido o Reductor	13
2.4.2. Smog Fotoquímico u Oxidante	14
2.5. Antecedentes de Contaminación por SO ₂ en el País	15
2.6. Fuentes Generadoras de SO ₂	16
2.6.1. Instalaciones Minero-Metalúrgicas	16
2.6.2. Transporte Automotor	18
2.7. Principales Episodios de Contaminación por SO ₂ Producidos en el Mundo	19
2.7.1. Episodio de Meuse Valley, 1930	20
2.7.2. Episodio de Donora, 1948	21
2.7.3. Episodio de Londres, 1952	22
2.8. Episodios de Contaminación por SO ₂ Producidos en el Perú	23
2.8.1. Valle de Ilo	23
2.8.2. Valle de Tambo	24

3. PLANEAMIENTO Y EJECUCIÓN DEL TRABAJO	25
3.1. Selección de las Zonas de Muestreo	26
3.2. Ubicación y Características de las Estaciones de Muestreo	27
3.2.1. Estación de Muestreo N°1	28
3.2.2. Estación de Muestreo N°2	29
3.2.3. Estación de Muestreo N°3	30
3.2.4. Estación de Muestreo N°4	31
3.3. Periodos de Muestreo	36
3.4. Programa de Captación de Muestras	37
3.5. Método de Muestreo	38
3.5.1. Preparación de las Bujías Reactivas	41
3.5.1.1. Materiales y Reactivos	42
3.5.1.2. Procedimiento	43
3.5.2. Tratamiento Químico de las Bujías Expuestas	44
3.6. Análisis Químico de las Muestras	45
3.6.1. Materiales Reactivos e Instrumentos	46
3.6.2. Procedimiento	46
3.7. Procesamiento Analítico de las Muestras	47
3.8. Resultados	59
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
5. CONCLUSIONES	73
6. RECOMENDACIONES	75

7. ANEXO	77
7.1. Determinación de Sulfato por el Método Turbidimétrico	77
7.1.1. Reactivos Materiales e Instrumentos	77
7.1.2. Preparación de Soluciones	78
7.1.3. Preparación de la Curva de Calibración	78
7.1.4. Datos Para la Curva de Calibración	79
7.1.5. Curvas de Calibración y Tratamiento Estadístico	82
7.1.6. Variación de la Absorbancia con el Tiempo y la Longitud de Onda	89
7.2. Sistema de Muestreo	93
7.2.1. Factor de Correlación	93
7.2.2. Generador de SO ₂	95
7.2.3. Reactivos y Materiales Para el Generador de SO ₂	96
7.2.4. Procedimiento para Generar SO ₂	97
7.2.5. Resultados de la Generación de SO ₂	100
7.2.6. Pruebas con las bujías reactivas	100
7.3. Programa Elaborado Para Calcular el Factor de Correlación	104
8. BIBLIOGRAFÍA	107
APÉNDICES:	
APÉNDICE A: Lecturas de %T de los Análisis Químicos de las Bujías	110
APÉNDICE B: Peso de SO ₄ ⁼ (como mg de SO ₃) Encontrado en los Análisis Químicos de las Bujías	112

APÉNDICE C: Tiempo de Exposición de las Bujías por	
Muestreo en las 4 Estaciones de Muestreo	113
APÉNDICE D: Algunos Valores de Contaminación por SO₂	
Obtenidos por el ISO	114
APÉNDICE E: Concentraciones de SO₂ (ppm) Obtenidas	
en la Ciudad de Ilo en el Periodo	
Febrero/Agosto de 1988	116
APÉNDICE F: Documento del Instituto de Investigación de	
la UNI solicitando el uso de las Estaciones	
Meteorológicas del SENAMHI	118

LISTA DE CUADROS

Cuadro N°1: Datos Meteorológicos de la Estación de Muestreo N°1 (Estación Meteorológica SENAMHI "Cahuipe")	51
Cuadro N°2: Datos Meteorológicos de la Estación de Muestreo N°2 (Estación Meteorológica PUC "Hipólito Unanue")	52
Cuadro N°3: Datos Meteorológicos de la Estación de Muestreo N°3 (Estación Meteorológica SENAMHI "San Marcos")	53
Cuadro N°4: Datos Meteorológicos de la Estación de Muestreo N°4 (Estación Meteorológica UNA "A. Von Humboldt")	54
Cuadro N°5: Indices de Sulfatación ($\text{mgSO}_3/100\text{cm}^2\text{PbO}_2/\text{día}$)	55
Cuadro N°6: Factores de Correlación (Fc)	58
Cuadro N°7: Concentraciones de SO_2 en ppm Obtenidas en el Monitoreo	60
Cuadro N°8: Concentración Promedio de SO_2 en cada Estación de Muestreo	61
Cuadro N°9: Factor de Correlación Promedio en cada Estación	71
Cuadro N°10: Absorbancia Promedio de 9 Pruebas Realizadas para la Determinación Turbidimétrica de Sulfatos	82
Cuadro N°11: Desviación Estándar y Error en la Determinación Turbidimétrica de Sulfatos	83
Cuadro N°12: Absorbancia en Función del Tiempo de una Muestra de Sulfato	89

Cuadro N°13: Absorbancia en Función de la Longitud de de Onda en la Determinación Turbidimétrica de Sufato	90
Cuadro N°14: Rendimiento en la Generación de SO ₂	100
Cuadro N°15: Pruebas con las Bujías Reactivas	101
Cuadro N°16: Resultados de las Pruebas con las Bujías de Plomo	103

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico N°1: Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación N°1	62
Gráfico N°2: Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación N°2	63
Gráfico N°3: Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación N°3	64
Gráfico N°4: Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación N°4	65
Gráfico N°5: Concentración de Dióxido de Azufre en las 4 Estaciones de Muestreo	66
Gráfico N°6: Determinación Turbidimétrica de Sulfato - Curvas Absorbancia vs Concentración (9 Pruebas)	85
Gráfico N°7: Determinación Turbidimétrica de Sulfato Curva Absorbancia vs Concentración (Promedio de 9 Pruebas)	86
Gráfico N°8: Determinación Turbidimétrica de Sulfato Curva Absorbancia vs Concentración (de 9 Pruebas y Curva Promedio)	87
Gráfico N°9: Determinación Turbidimétrica de Sulfato Curva Absorbancia vs Concentración (Curvas Estadísticas)	88

Gráfico N°10: Variación de la Absorbancia de una Muestra con el Tiempo en la Determinación Turbidimétrica de Sulfato	91
Gráfico N°11: Variación de la Absorbancia de una Muestra con la Longitud de Onda en la Determinación Turbidimétrica de Sulfato	92

LISTA DE MAPAS

Mapa N°1: Area de Estudio y Ubicación de las Estaciones Meteorológicas de Lima Metropolitana	32
Mapa N°2: Lineas de Flujo 07:00 Hrs	33
Mapa N°3: Lineas de Flujo 13:00 Hrs	34
Mapa N°4: Lineas de Flujo 19:00 Hrs	35

RESUMEN

La evaluación de los niveles de contaminación por SO_2 en la ciudad de Lima, se efectuó realizando un monitoreo de este contaminante por un periodo de un año (entre el 13/08/90 y el 27/08/91) y con una frecuencia de dos semanas entre cada muestreo. Para esto se instalaron cuatro estaciones de muestreo en respectivas estaciones meteorológicas de diferentes instituciones tales como el SENAMHI, la Universidad Agraria y la Universidad Católica; con las cuales se entró en contacto para la realización de este trabajo.

Era necesario la instalación de las estaciones de muestreo en estas estaciones meteorológicas, ya que para determinar los valores de concentración del contaminante en el ambiente de la estación, se necesita conocer los valores de la velocidad del viento, presión atmosférica y temperatura durante el muestreo.

El método de muestreo utilizado fue el de las Bujías Reactivas de Peróxido de Plomo y las muestras se analizaron mediante el método turbidimétrico. En este trabajo también se realizó un estudio tanto del método de muestreo como del método de análisis utilizado.

Las estaciones de muestreo instaladas fueron las siguientes:

- Estación N°1: Ubicada en la estación meteorológica del SENAMHI "Cahuide", en la Av. Salaverry (zona comercial).
- Estación N°2: Ubicada en la estación Meteorológica "Hipólito Unanue" de la Universidad Católica (zona residencial).
- Estación N°3: Ubicada en la estación Meteorológica del SENAMHI "San Marcos" en la Universidad San Marcos (zona semicomercial).
- Estación N°4: Ubicada en la estación Meteorológica de la Universidad Agraria "A. Von Humboldt" en la misma universidad (zona rural).

La concentración promedio anual de SO_2 , más alta, se obtuvo en la estación de muestreo N°1 y la más baja se obtuvo en la estación N°2. Los valores de estas concentraciones son respectivamente: 0,01856 y 0,00888 ppm. El valor más bajo esperaba encontrarse en la estación de muestreo N°4 (zona rural), pero esto no fue así, ya que el comportamiento de los vientos y la topografía del terreno tienen un efecto importante en la presencia y acumulación del contaminante en esta zona.

La concentración más alta de SO_2 se obtuvo durante el 9° muestreo (entre el 11/12/90 y el 08/01/91) y su valor fue 0,03076 ppm. Esta concentración relativamente alta se debe al abuso que se comete en la fiesta de año nuevo, al quemar indiscriminadamente una gran cantidad de neumáticos. Tanto este valor como los mencionados anteriormente, están por debajo del límite permisible, el cual es 0,057 ppm para 24 horas de exposición.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire en las grandes ciudades constituye un problema que va en aumento, originado principalmente por el elevado número de vehículos automotores que ordinariamente circulan por ellas.

En lo que se refiere al dióxido de azufre (SO_2), uno de los contaminantes más nocivos que existe, descargándose con los gases de los motores de combustión interna. Como es evidente, los niveles de contaminación tienen una tendencia a aumentar, conforme aumente el parque automotor en las ciudades, conforme el tránsito vehicular genere congestiones y ————— las ————— de transportes cada vez más obsoletas. De esto, surge la necesidad de realizar controles de las variaciones en el tiempo de los niveles de contaminación (en este caso por SO_2) en las diferentes zonas de las ciudades, lo que constituye un monitoreo de la contaminación por dicho contaminante.

La importancia del monitoreo radica no sólo en conocer la concentración del contaminante en las diversas zonas de la ciudad, sino en estudiar las variaciones de los valores de contaminación que tienen lugar en las diferentes zonas y en las diferentes condiciones en que se realizan mediciones; para poder alertar en caso se observe un aumento peligroso de la contaminación cercano a los límites permisibles, identificar las fuentes de contaminación locales y sobre todo, crear conciencia de los efectos que acarrea el respirar aire contaminado con SO_2 , así como su poder corrosivo sobre diferentes tipos de materiales.

Las políticas de protección ambiental aconsejan tomar acciones preventivas antes que se alcancen niveles altos de contaminación; ya que si se llegaran a suceder, se presentarían daños a la población y a la propiedad haciendo mucho más difícil controlar el problema.

En el presente trabajo se ha desarrollado la evaluación química de los niveles de contaminación por SO_2 en la ciudad de Lima, estableciéndose para ello cuatro estaciones de muestreo ubicadas en las estaciones meteorológicas normalizadas por el SENAMHI, localizadas en diferentes zonas de la ciudad. Se han realizado muestreos periódicos y consecutivos utilizando el método de las bujías de peróxido de plomo, determinando la concentración de dióxido de azufre por un método turbidimétrico.

2. CONSIDERACIONES GENERALES

La contaminación es la presencia de algún material extraño en la atmósfera que tiene un efecto perjudicial en los seres vivos.

La constante emisión de contaminantes constituye una grave amenaza para la vida normal, agravándose el problema por el incremento en número y cantidad de estos. Este problema surge principalmente por una industrialización creciente, necesaria en el desarrollo de los pueblos, pero que puede agravar el problema a menos que se desarrollen y empleen formas de disminuir los efluentes generados.

Ordinariamente el problema de la contaminación del aire se toma en cuenta sólo cuando empieza a interferir seriamente en la vida; sólo entonces se emplean las leyes y la tecnología para intentar una solución al problema.

El transporte automotor aporta un 60% de la contaminación del aire en el mundo, las industrias (emisiones por consumo industrial de combustible) 20%, las centrales termoeléctricas 10% y la incineración de desechos 5%.

La naturaleza constituye una fuente menos importante de contaminación. Las principales fuentes naturales de contaminación están constituidas por los volcanes, los cuales arrojan en actividad ingentes cantidades de gases sulfurosos y cenizas; los incendios forestales (iniciados por causas naturales), que generan gran cantidad de monóxido y dióxido de carbono, y cenizas; los desechos animales, las aguas estancadas, la descomposición de animales y vegetales e incluso las fuertes polvaredas levantadas por los vientos sobre las ciudades.

Los contaminantes del aire se pueden clasificar en cinco grupos principales: monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y partículas.

La mayoría del monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno proceden del motor de combustión interna. La mayor parte de los óxidos de azufre (dióxido de azufre SO_2 y trióxido de azufre SO_3) se originan principalmente en las plantas termoeléctricas y en la industria minero metalúrgica. El mayor porcentaje de emisión de hidrocarburos también procede del motor de combustión interna, procesos de fabricación y operaciones industriales. La emisión de partículas proviene principalmente de la combustión de derivados del petróleo, de reacciones químicas de procesos industriales y algunas industrias como la de la harina de pescado.

2.1. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL DIÓXIDO DE AZUFRE

El Dióxido de Azufre (SO_2) en condiciones normales es un gas incoloro, de olor picante, inflamable, soluble en agua un 18% a 0°C y 85% a 25°C , soluble también en ácido sulfúrico, acético y metanol. Su punto de fusión es -75.5°C y el de ebullición es -10°C .

El dióxido de azufre es un óxido covalente de un no metal, clasificándose como un anhídrido ácido (por lo cual también se le denomina anhídrido sulfuroso). En solución acuosa posee un carácter ácido y un moderado carácter reductor.

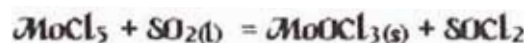
La molécula de SO_2 es esencialmente covalente, simétrica y angular; la distancia S-O es corta e indica la existencia de enlaces

múltiples (enlaces $p\pi-p\pi$) deslocalizados. Las estructuras de resonancia de esta molécula son las siguientes:



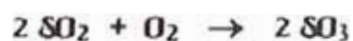
El SO_2 encuentra su aplicación más importante en la fabricación del ácido sulfúrico. También se le emplea como agente reductor, a pesar de no ser muy energético, salvo en solución alcalina donde se forma el ion sulfito. Por ser un reductor suave se le utiliza para blanquear la pulpa de madera (para papel) paja y otras fibras.

estado líquido se le emplea como solvente no acuoso y como reactivo para la preparación de ciertos oxohalogenuros metálicos; por ejemplo:

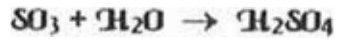


El primer paso en reacciones de este tipo probablemente sea la solvatación, pudiendo actuar el SO_2 como base de Lewis por poseer pares de electrones libres.

El dióxido de azufre reacciona con el oxígeno molecular para formar el trióxido de azufre (SO_3):



reacción que es termodinámicamente favorable pero muy lenta en ausencia de catalizadores tales como el platino, el V_2O_5 o el NO . Este gas (trioxido de azufre) reacciona muy energicamente con el agua para producir el ácido sulfúrico:



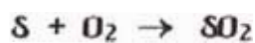
El SO_3 se emplea para la preparación de aceites sulfonados y detergentes alquilarilsulfonados. También es un agente oxidante muy poderoso.

Una de las características saltantes del SO_2 es el hecho de formar clatratos. Los clatratos⁽⁴⁾ son sustancias formadas por la combinación de un compuesto estable con otro (o con un elemento atómico o molecular), sin que exista ninguna clase de unión química entre ambos componentes. Esto tiene lugar si uno de los compuestos puede cristalizar en una estructura muy abierta, que contiene cavidades, agujeros o canales en los cuales pueden quedar atrapados átomos o moléculas del otro componente.

Si se solidifica agua en presencia de ciertos gases atómicos o moleculares o en presencia de líquidos volátiles a temperatura ambiente, forma uno de varios tipos de estructura sumamente abierta, en la cual existen cavidades ocupadas por el gas o por la molécula visitante. Estas estructuras son mucho menos densas que la forma normal del hielo y son inestables con respecto a este, en ausencia de las moléculas visitantes. Una de las estructuras de hidratos gaseosos de forma cúbica, contiene 46 moléculas de agua conectadas entre sí para formar seis cavidades de tamaño mediano y dos cavidades pequeñas; estructura que resulta con moléculas relativamente pequeñas como el Cl_2 , SO_2 y CHCl_3 a presiones que en el caso de los gases son generalmente mayores de una atmósfera. Generalmente nunca se llenan todas las cavidades, por tanto, las fórmulas que se puedan deducir son sólo fórmulas límite, diferentes a las observadas.

Las soluciones acuosas de SO_2 que poseen propiedades ácidas fueron consideradas durante mucho tiempo como soluciones de ácido sulfuroso, H_2SO_3 . Mediante métodos físicos modernos se demostró que el H_2SO_3 o no existe en absoluto o sólo se halla presente en estas soluciones en cantidades extremadamente pequeñas. El hidrato $\text{H}_2\text{SO}_3 \cdot \sim 6\text{H}_2\text{O}$, que es equivalente al $\text{SO}_2 \cdot \sim 7\text{H}_2\text{O}$ no contiene H_2SO_3 sino que se trata de un clatrato del tipo de los hidratos de gases.

El dióxido de azufre se obtiene industrialmente por el calentamiento en el aire de numerosos sulfuros (minerales sulfurados) y por la combustión del azufre en el aire; aunque por esta vía también se obtiene una pequeña cantidad de trióxido de azufre.



2.2. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN POR SO_2

El Instituto de Salud Ocupacional ha adoptado el valor máximo permitido de 150 microgramos de SO_2 por metro cúbico (0,057 ppm) como promedio para 24 horas de exposición⁽⁸⁾.

La presencia del SO_2 en el ambiente produce irritación a los ojos, irritación del sistema respiratorio, mengua de la función respiratoria, bronquitis, enfisema y otros males respiratorios.

El umbral para causar sensación desagradable en el paladar es aproximadamente 0,3 ppm de SO_2 ; con una concentración de 1 ppm resulta una experiencia muy desagradable por la sensación de ardor en el

tracto respiratorio superior. Esto se debe a que el SO_2 es altamente soluble en agua y por ello, absorbido en los conductos húmedos del tracto respiratorio superior. A dicha concentración se produce constricción de las vías respiratorias y cambios en la frecuencia del pulso.

Se ha determinado que el SO_2 es percibido organolépticamente desde niveles de 0,3 ppm.

A concentraciones tan bajas como 0,5 ppm el olor de este gas es ya desagradable aunque parece no ser todavía irritante.

A una concentración de 5 ppm de SO_2 se presentan irritaciones en el aparato respiratorio e incluso reacciones espasmódicas en algunos individuos sensibles. En el nivel de las 10 ppm aparecen daños diversos inclusive manifestaciones de su acción sinérgica en presencia de partículas

Al oxidarse el SO_2 en la atmósfera para dar SO_3 , el cual en presencia de agua produce el H_2SO_4 , se pueden producir severos espasmos bronquiales aun a niveles de concentración relativamente bajos.

Un efecto notable del SO_2 es el que ejerce sobre las plantas (acción fitotóxica), provocando lesiones sobre hojas y frutos y disminución temporaria de la fotosíntesis. En estas, el daño puede ser agudo cuando el SO_2 es absorbido rápidamente por la planta, o crónico cuando la absorción es lenta y prolongada, aunque sea a niveles bajos de concentración.

La sensibilidad de las plantas es muy variable; algunos árboles y arbustos se tornan amarillos al estar expuestos durante varias horas de 0,3 a 0,5 ppm, pudiendo a concentraciones inferiores pero en periodos más largos, ocasionar la caída de las hojas y causar daño a la cosecha;

concentraciones menores de SO_2 pueden también producir daño en los rendimientos agrícolas por efecto del retardo en el crecimiento de las plantas.

Cuando el SO_2 es oxidado a SO_3 y este se convierte en ácido sulfúrico al reaccionar con la humedad del medio ambiente, se produce la corrosión de diversos materiales tales como edificaciones, monumentos, etc., así como la acidificación de recursos hidráulicos al ser arrastrado por las lluvias repercutiendo negativamente en la flora y fauna por la variación del pH del medio.

Desde el punto de vista químico, la acción dañina del SO_2 se debe a sus propiedades oxidoreductoras y a su carácter ácido.

2.3. EFECTO SINERGÉTICO Y EFECTO ANTAGÓNICO

El efecto sinérgico es un fenómeno que agrava el problema de la contaminación. Este fenómeno consiste en un aumento potencial de la capacidad contaminadora de una sustancia por la presencia o reacción con otra, aun en concentraciones relativamente bajas, o sea, los efectos son mucho mayores que si estas sustancias actuasen aisladamente.

Por ejemplo, el dióxido de azufre en presencia de flúor se hace diez veces más nocivo. En presencia del oxígeno del aire, el SO_2 se oxida generando con la humedad ambiental nieblas de ácido sulfúrico que son mucho más destructivas que el propio SO_2 . El proceso que es iniciado por reacción fotoquímica es el siguiente:





Ogualmente, la mezcla de partículas y dióxido de azufre presenta un efecto sinérgico dañino para los pulmones; y las mezclas $\text{SO}_2 + \text{NO}_2$, $\text{SO}_2 + \text{NO}_2 + \text{O}_3$ y $\text{SO}_2 + \text{O}_3$ son extremadamente dañinas para la salud de animales y plantas.

Existe otro fenómeno denominado efecto antagónico en el cual los contaminantes tienden a formar otras sustancias generalmente más benignas que los reactantes, aunque no necesariamente. Un ejemplo de este fenómeno es la presencia de ácido sulfúrico conjuntamente con amoníaco (NH_3) en el ambiente; los cuales se neutralizan formando la sal correspondiente, sulfato de amonio.

2.4. EL SMOG

El término smog viene de las palabras inglesas: smoke (humo) y fog (niebla).

El smog es una manifestación de los fenómenos químicos que ocurren en la atmósfera, debido a la contaminación y es el causante de la opacidad atmosférica impidiendo el calentamiento de la atmósfera por los rayos solares, contribuyendo a mantener las inversiones atmosféricas.

El fenómeno de inversión, se presenta cuando una capa de aire caliente se sitúa sobre otra de aire frío, impidiendo que esta ascienda. De este modo el aire se estanca ocurriendo un aumento anormal de la concentración de contaminantes. Así, las sustancias contaminantes no

Se pueden reconocer dos tipos importantes de smog con características propias pero de incidencia análoga sobre la salud, teniendo además ambos un origen similar (reacciones fotoquímicas). Estos tipos son:

- Smog ácido, reductor o catalítico, como el de Londres.
- Smog oxidante, fotoquímico o blanco, como el de Los Angeles.

2.4.1. SMOG ACIDO O REDUCTOR

Está constituido por aerosoles de ácido sulfúrico formado a partir del SO_2 por acción catalítica principalmente de la luz o partículas de óxidos metálicos. Se origina por la combustión de diversos tipos de carbón y otros combustibles fósiles. Se produce en presencia de niebla, grado de humedad relativa alta y temperatura baja (alrededor de 0°C), por lo que generalmente aparece en invierno. La luz solar no es necesaria.

Su comportamiento químico es reductor, debido a las altas concentraciones de SO_2 .

Produce irritación en los ojos, nariz y garganta. Puede producir accesos asmáticos y enfermedades pulmonares crónicas. Niveles elevados han causado muertes.

Este smog, característico de la ciudad de Londres, contiene pequeñas gotitas de ácido sulfúrico encerradas en la niebla a las que se les atribuye su capacidad dañina a la salud y su acción fitotóxica que provoca una merma en el crecimiento de las plantas de hojas permanentes.

2.5. ANTECEDENTES DE CONTAMINACIÓN POR SO₂ EN EL PAIS

La contaminación por SO₂ en el país comienza básicamente con las actividades minero-metalúrgicas del complejo minero del centro, ubicado en la ciudad de La Oroya. Este complejo fue operado por la Cerro de Pasco Corporation desde 1902, montándose en ese entonces la fundición de Tiyahuarco. Las instalaciones de fundición y refinación de La Oroya iniciaron sus actividades en 1922.

Esta refinaria descarga humos que contaminan el ambiente principalmente con gases sulfurosos, vapores metálicos y material particulado. Los efectos de la contaminación producida por esta fundición fueron inmediatos sobre la escasa flora y fauna y la capacidad productiva de los suelos. Cerca de 4000 Ha de terrenos de cultivo y 117000 Ha de pastos naturales fueron afectados principalmente por el SO₂.

Posteriormente, en 1959 empezó a operar la fundición del litoral sur, ubicada en Ilo, que procesa los concentrados de Toquepala (1200 TM de concentrado por día en 1977), que contienen entre 30 y 35% de azufre. En 1977 se inició la explotación de Cuajone por lo cual la fundición amplió su capacidad en aproximadamente un 130%.

A apenas 2 meses de la inauguración de la fundición de Ilo (Febrero de 1960) los sembradores del valle de Ilo a 16 Km al sur, formulaban denuncias por sentirse afectados por los efluentes de la fundición.

Por otro lado, en las ciudades circulan cada vez un número mayor de vehículos automotores, sobre todo en la capital. Si tomamos en cuenta

el parque automotor existente (el cual consta de un alto porcentaje de vehículos en mal estado), el desordenado tránsito vehicular y los continuos congestionamientos; tendremos en estos una fuente importante de contaminación.

Si bien, la contaminación producida por los vehículos automotores de combustión interna es principalmente por monóxido y dióxido de carbono, constituyen también una fuente importante de contaminación por SO_2 .

2.6. FUENTES GENERADORAS DE SO_2

Las fuentes importantes de contaminación por SO_2 en el país son básicamente dos:

- Instalaciones Minero-Metalúrgicas.
- Transporte Automotor.

2.6.1. INSTALACIONES MINERO-METALÚRGICAS

En el país existen 3 plantas de tratamiento (refinerías) que generan una gran cantidad de SO_2

- i) Complejo Minero del Centro, ubicado en la Oroya, provincia de Yauli, departamento de Junín, trata minerales de cobre, plomo y zinc básicamente, obteniéndose 11 metales refinados: cobre, plomo, zinc, bismuto, cadmio, indio, plata, selenio, tungsteno, telurio y oro. También se fabrican compuestos químicos tales como ácido sulfúrico, sulfato de sodio, zinc y cobre y se obtienen subproductos como arsénico y

antimonio. Este complejo genera 119'919,440 m³/día de gases, humo y vapores de metales pesados (Fe, Cd, Zn, Pb, Ag, Cu, Hg) y metaloides (As, S, Sb).

ii) Fundición de Oro, ubicada en la ciudad de Oro; trata los concentrados de cobre de Toquepala y Cuaque, produciéndose entre 1400-1500 Tm SO₂/año.

iii) Refinería de Zinc de Cajamarquilla, situada a 22 Km al NE del centro de Lima; está diseñada para tratar 200,000 TMS/año. Los gases resultantes de la tostación de los minerales que contienen entre 8 y 10% de SO₂ son tratados previa separación de impurezas para convertirlos en H₂SO₄; para alcanzar recuperaciones altas de SO₂ se usa un sistema de doble catálisis y doble absorción donde la captación del SO₂ es de un 98%. Los gases remanentes son forzados a otro sistema catalizador y absorbedor incrementando la recuperación del SO₂ hasta en 99,5%. Los gases agotados son descartados por una chimenea principal.

En estos centros metalúrgicos, los minerales de plomo, cobre y zinc, principalmente, son sometidos a altas temperaturas en los procesos de sinterización (entre 900 y 1000 °C) y tostación (temperaturas mayores de 450 °C), eliminando gran cantidad de gases sulfurosos (SO₂), vapores metálicos y material particulado.

Para la obtención del plomo, el material tostado que contiene un 40% del metal se carga a los hornos de manga (alto horno) donde los óxidos y sulfuros de plomo se reducen a Pb metálico. Este proceso origina contaminantes particularmente sulfurosos como el SO₂.

En la obtención del cobre, la calcina producto de la tostación se carga a los hornos reverberos para producir la mata de Cu y la escoria residual; proceso en el cual los reverberos generan partículas y gases con alto contenido de SO_2 . La mata (Cu, Au, Ag, Bi fundidos) fluye por canales hasta los recipientes que la transportan a los hornos convertidores. Esta etapa de manipulación de materiales líquidos a temperatura elevada ($1100\text{ }^\circ\text{C}$), origina vapores que contienen As, Pb, Zn, Sb y gases sulfurosos. La mata es alimentada a los hornos convertidores para producir cobre impuro y escoria. Las impurezas son oxidadas mediante aireación mecánica a través del baño de mata fundida, eliminándose estas en forma de gases.

En el proceso para obtener el Zn, el concentrado se pasa por el tostador de lecho turbulento y previa paletización (perdigonación), por el tostador de lecho fluidizado. En esta etapa se desprenden grandes cantidades de SO_2 . En la Oroya se usa un 45% de estos gases para fabricar ácido sulfúrico, mientras que en Cajamarquilla se usa el 99,5% del SO_2 para obtener ácido sulfúrico.

2.6.2 TRANSPORTE AUTOMOTOR

El transporte automotor comprende a todo vehículo que es capaz de moverse por su propio sistema de impulso. Incluye a los automóviles, omnibuses, motocicletas, ferrocarriles, barcos, aviones, etc.

Los barcos y aviones causan una contaminación local en los puertos y aeropuertos respectivamente.

Los ferrocarriles, generalmente para transporte de minerales y carga, generan SO_2 por el contenido de azufre en el combustible para la

máquina diesel. Aunque el contenido de azufre y por ende la cantidad de SO_2 generado no es muy significativo, son contaminadores regulares ya que atraviesan tramos urbanos a la misma hora cotidianamente.

En lo concerniente a automotores urbanos, los contaminantes principales son el CO, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos. El dióxido de azufre está presente en menor cantidad, debido a que el combustible utilizado en nuestro medio contiene menos de 1% de azufre. Considerando el número elevado de vehículos que circulan en nuestro medio y las frecuentes congestiones vehiculares que se suscitan en las principales avenidas y sobre todo en el centro de Lima, se tendrá una concentración de SO_2 apreciable que podría generar una contaminación con niveles alarmantes.

2.7. PRINCIPALES EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN POR SO_2 PRODUCIDOS EN EL MUNDO

Junto a los beneficios que trajo consigo la industria a la humanidad, trajo consigo también el problema de la contaminación; no sólo del aire, sino también del agua y del suelo.

Refiriéndonos sólo a la contaminación del aire, existen episodios de contaminación que han sucedido en importantes ciudades del mundo y que han tenido como causa principal la concentración elevada de SO_2 , caracterizándose por haber producido elevaciones en la mortalidad y múltiples complicaciones por enfermedades respiratorias en hombres y animales.

Existen diversos episodios que no han tenido una magnitud como para ser considerados importantes; tales como los ocurridos en Nueva York (1953 y 1966), Rotterdam (1962), Japón (1972), Hamburgo (1962); en los cuales el número de decesos asociados al suceso no fue elevado y en algunos casos estos se determinaron observando el crecimiento de la tasa de mortalidad durante el episodio al compararla con la de años anteriores y posteriores. En estos episodios los principales efectos producidos fueron afecciones respiratorias, digestivas y alérgicas en la población.

Algunos de los principales episodios de contaminación por SO₂ considerados como desastre se detallan a continuación.

2.7.1 EPISODIO DE MEUSE VALLEY, 1930

El 01 de diciembre de 1930, un valle que se sitúa en los alrededores del río Meuse en Bélgica fue azotado por un inusual y difuso cambio de las condiciones atmosféricas que persistió en el resto de la semana. Este valle de unas 15 millas de largo y rodeado de cerros de unos 300 pies (140 m) de altura fue agravado por una prolongada inversión térmica, esto por cuanto el valle es una zona altamente industrializada (plantas de H₂SO₄, fábricas de vidrio, fábricas de acero, presencia de altos hornos, etc.). Al tercer día de este hecho empezaron los problemas al tracto respiratorio; y antes que culmine la semana hubieron 60 decesos y más de 6000 personas enfermas. Entre las víctimas se encontraban ancianos y personas con problemas cardíacos y pulmonares, y a estos se unió también la muerte de ganado vacuno.

La sustancia química principal responsable de esta calamidad, según un primer reporte del episodio fue el SO_2 que se estimaba entre 25 y 100 mg/m^3 (9,6 y 38,4 ppm).

Era evidente la presencia del SO_2 , y muy probable que esta sustancia se haya disuelto o combinado con gotas de agua y ante la presencia de una gran variedad de agentes polutantes fuera oxidado a ácido sulfúrico cuya concentración debió ser alta, formando neblinas con partículas de H_2SO_4 suficientemente pequeñas como para penetrar por las fosas nasales y llegar a los pulmones.

2.7.2. EPISODIO DE DONORA, 1948

Este episodio empezó un martes 26 de octubre de 1948 en Donora, Pennsylvania (E.U.). Esta ciudad contaba con una fábrica de ácido sulfúrico, fundición de Cinc, fundición de acero, además de otras industrias. Por estar este valle rodeado de cerros que se elevan algunos cientos de pies, fue fácil la producción de una inversión térmica, acumulándose la niebla durante este día y el siguiente e intensificándose el desagradable gusto que deja el SO_2 en el paladar. Aparecieron los clásicos síntomas de tos e irritación de nariz y garganta al nivel del segundo día, sin embargo no se dio la voz de alarma y las fábricas siguieron funcionando a ritmo normal. En la tarde del jueves la niebla negra se fue espesando resultando difícil ver a través de la calle mientras las chimeneas seguían descargando contaminantes al aire.

Como consecuencia de esto, de las 14000 personas que allí vivían, 6000 resultaron afectadas, de las cuales 20 personas murieron ese día. Así mismo fueron víctimas de esta intoxicación un apreciable número de

animales entre perros, canarios y aves de corral. El ganado vacuno, ovino, caballar y cerdos no fueron afectados significativamente.

Cabe mencionar que las mediciones no fueron efectuadas durante el episodio, pero se supone la presencia del SO_2 en un rango de 1,4 a 5,5 mg/m^3 (0,5 a 2,0 ppm), asociados a H_2SO_4 y polvo en suspensión.

2.7.3. EPISODIO DE LONDRES, 1952

En el periodo del 5 al 9 de Diciembre de 1952, muchas de las islas británicas fueron cubiertas por una niebla y una inversión térmica. Una de las ciudades mayormente afectadas fue Londres especialmente en el valle del Támesis. En el tercer y cuarto día de iniciado el fenómeno, se presentaron deficiencias en la respiración, cianosis, fiebre y exceso de fluidos en los pulmones. Las personas mayormente afectadas fueron gente de edad avanzada, sobre los cuales recayó un alto índice de mortalidad.

Como conclusión, los decesos fueron descritos como causados por bronquitis crónica, bronco neumonía y enfermedades del corazón. Durante esta tragedia se reportaron entre 3 500 a 4000 decesos.

Debido a la fuerte inversión térmica, se produjo un incremento de SO_2 hasta una concentración de 3,75 mg/m^3 (1,34 ppm) y 4,46 mg/m^3 de material particulado.

Este desastre fue motivado por el smog al igual que en el invierno de 1948, del 26 de Noviembre al 01 de Diciembre donde se registraron entre 700 y 800 decesos.

Otros sucesos parecidos ocurrieron en Enero de 1956 (1000 decesos), Diciembre de 1957 (700 - 800 decesos), Enero de 1959 (200 - 250

decesos), Diciembre de 1962 (700 decesos); sin embargo en ninguno de estos episodios ocurrió un elevado número de defunciones como en 1952.

2.8. EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN POR SO₂ PRODUCIDOS EN EL PERÚ

En nuestro medio, afortunadamente aún no se han producido episodios por contaminación con SO₂ significativos, debido a que en la ciudad no se han presentado concentraciones altas de SO₂ para provocarlos.

Se conocen casos aislados de afecciones por la contaminación con SO₂ que se pueden considerar como accidentes, debido a que han existido circunstancias que han favorecido estos efectos negativos, como son el régimen de vida, alimentación, susceptibilidad orgánica pronunciada, ingestión de medicinas que pueden haber magnificado los efectos, etc.

Dentro de los problemas, se pueden incluir a los surgidos en el sur con la puesta en funcionamiento de la fundición de Ilo:

2.8.1. VALLE DE ILO

El ataque de los olivos del valle de Ilo por el SO₂ generado en la fundición de Ilo, se hizo evidente en el limbo de las hojas, en la producción de frutos arrugados y detenidos en su crecimiento. Al ingresar el SO₂ a la planta, se produce una necrosis de esta, debido al intercambio gaseoso en las plantas, causando también corrosiones o quemaduras en las hojas y frutos.

Si bien es cierto que este episodio no causó pérdidas o afecciones de vidas humanas, generó una pérdida de la cosecha, con las consiguientes consecuencias que se introdujeron, como la denuncia y demanda de indemnización por parte de los productores del valle.

2.8.2. VALLE DE TAMBO

En este valle se produjeron daños 50 veces mayores que en el Valle de Olo (en 1964) con el cultivo de la caña de azúcar. Este valle se encuentra ubicado a 60 Km al norte de la fundición de Olo.

Las demandas aducían bajo rendimiento en los cultivos de caña con pérdidas del 30% por acción de los humos (indirecta) debido a que empañaban la atmósfera, disminuyendo las horas de sol. Esta interferencia disminuía la acción fotosintética de las plantas y por consiguiente la producción. Estudios realizados no encontraron una acción fitotóxica evidente.

3. PLANEAMIENTO Y EJECUCIÓN DEL TRABAJO

Para la evaluación del SO_2 en la ciudad se requiere instalar estaciones de muestreo en lugares característicos de la ciudad y en donde se puedan conocer además los valores de parámetros meteorológicos tales como la velocidad del viento, presión y temperatura durante el desarrollo del trabajo. Para esto, se entró en contacto con instituciones que poseen este servicio meteorológico y se gestionó el uso de 4 diferentes estaciones meteorológicas para la instalación en ellas de las estaciones de muestreo y la recolección de los datos meteorológicos durante el muestreo.

El muestreo del aire en las estaciones tiene como objetivo determinar el contenido de SO_2 en él. Este se efectuará usando el método de las bujías reactivas de peróxido de plomo las cuales se expondrán al ambiente de la estación, dentro de unas casetas construidas especialmente para este fin, por un tiempo determinado para luego en el laboratorio realizar el análisis químico de las mismas y determinar el grado de sulfatación de las mismas.

El grado de sulfatación o índice de sulfatación se expresa en $\text{mgSO}_3/100\text{cm}^2/\text{día}$. Este es una magnitud referencial del grado de contaminación por SO_2 existente en el ambiente de muestreo mas no informa acerca de la concentración promedio del contaminante para el periodo de muestreo.

Es posible calcular la concentración de SO_2 en partes por millón (ppm) a partir del índice de sulfatación, multiplicando este valor por un factor llamado factor de correlación. El valor que generalmente se usa para este factor (utilizado por algunas dependencias del Ministerio de

Salud) es de 0,025; pero en este trabajo se calcularán los valores del mismo para cada muestreo; ya que este no es constante sino que depende de las dimensiones de las bujías y de las condiciones climáticas durante el periodo de muestreo.

3.1. SELECCIÓN DE LAS ZONAS DE MUESTREO

El monitoreo de SO_2 en la ciudad de Lima, requiere ubicar una estación de muestreo en cada sector de la ciudad con características diferentes. Se necesitarían muchas estaciones de muestreo para cumplir este objetivo, lo cual es materialmente imposible. Por este motivo se seleccionan zonas representativas de muchas otras zonas de la ciudad con características similares. Así, los resultados obtenidos en estas zonas representativas son extensivos a los lugares de la ciudad que posean las mismas características de estas.

Para poder seleccionar las zonas de muestreo, es necesario clasificar las mismas de acuerdo a sus características urbanas, tránsito vehicular, etc. Básicamente, las zonas de la ciudad se pueden clasificar en los tres grupos siguientes:

- Zonas Residenciales,
- Zonas Comerciales y
- Zonas Rurales.

Según esta clasificación, se buscaron lugares que sean representativos de las zonas mencionadas y en los cuales se encuentren ubicadas las estaciones meteorológicas respectivas para obtener los

valores de los parámetros meteorológicos necesarios para el procesamiento de los datos obtenidos en cada muestreo.

En estas condiciones, se gestionó la utilización de 4 estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes zonas de la ciudad para instalar en ellas las unidades de muestreo; constituyéndose de este modo las 4 estaciones de muestreo utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

3.2. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO

Las estaciones meteorológicas (y las instituciones a las que pertenecen) donde se instalaron las unidades de muestreo son las siguientes:

- Estación Meteorológica Cahuide (SENAMHD).
- Estación Meteorológica Hipólito Unanue (Universidad Católica).
- Estación Meteorológica San Marcos (SENAMHD).
- Estación Meteorológica A. Von Humboldt (Universidad Agraria).

Las estaciones de muestreo (constituidas por las estaciones meteorológicas y las unidades de muestreo), serán denominadas mediante números (del 1 al 4) como se muestra a continuación:

- Estación N°1: Ubicada en la Estación Meteorológica Cahuide.
- Estación N°2: Ubicada en la Estación Meteorológica Hipólito Unanue.
- Estación N°3: Ubicada en la Estación Meteorológica San Marcos.
- Estación N°4: Ubicada en la Estación Meteorológica A. Von Humboldt.

Los tipos de zonas donde se encuentran instaladas las estaciones de muestreo son:

- Estación N° 1: Zona Comercial.
- Estación N° 2: Zona Residencial.
- Estación N° 3: Zona Semicomercial.
- Estación N° 4: Zona Rural.

Las características y ubicación de las estaciones de muestreo son las siguientes:

3.2.1. ESTACIÓN DE MUESTREO N° 1

Esta estación de muestreo está constituida en la Estación Meteorológica Cahuide, ubicada en la cuadra 14 de la Av. Salaverry, distrito de Jesús María (Mapa N° 1). Se encuentra frente a la avenida Salaverry, donde existe un elevado tránsito vehicular durante casi todo el día. Las horas en que el tránsito vehicular aumenta son de 08 a 13 hrs y de 18 a 21 hrs.

Por esta avenida transitan muchos vehículos de transporte público, los cuales como se sabe, son causantes de la mayor parte de la contaminación (por la emanación de los gases de escape, por las congestiones que generan, y por funcionar un buen porcentaje de ellos a base de petróleo).

Una característica importante de esta estación es que está rodeada por edificios, donde predominan el edificio del Ministerio de Agricultura ubicado a la espalda de la estación y el Hospital Rebagliati, ubicado frente a la estación. Por la rugosidad de este conglomerado urbano los

vientos se vuelven turbulentos y pierden dirección y fuerza, lo que ocasiona el estancamiento del aire de la zona sin permitir su regeneración. Este fenómeno origina una acumulación de los contaminantes en el ambiente de la estación y como consecuencia un aumento de la contaminación del mismo.

Las características del medio urbano que rodea a esta estación corresponden a una zona comercial.

En esta estación de muestreo, la caseta de muestreo se encuentra instalada en el techo del cuarto de instrumentos de la estación meteorológica, a una altura aproximada de 2,5 m del suelo.

3.2.2. ESTACIÓN DE MUESTREO N°2

Se encuentra instalada en la Estación Meteorológica Hipólito Unanue de la Universidad Católica del Perú; en el distrito de San Miguel (Mapa N°1).

Dentro de la Universidad Católica, esta estación meteorológica se encuentra ubicada en la parte posterior del campus donde la avenida más cercana es la Av. José de la Riva Agüero, distante unos 100 m de la estación, en la cual el tránsito vehicular es moderado. En dirección opuesta a esta avenida pero a una distancia un poco mayor se encuentra la avenida Universitaria, y en la misma dirección a una distancia más corta se ubica la playa de estacionamiento de la universidad.

Esta estación de muestreo se encuentra rodeada de jardines y algunas edificaciones de un solo piso. Frente a ella, al otro lado de la avenida Riva Agüero, se encuentra el Parque Las Leyendas; lo que

constituye una gran aren verde que sin duda tiene influencias importantes en el medio ambiente de esta estación.

No existen edificaciones altas cerca a la estación por lo cual los vientos son muy regulares, predominando los vientos con dirección Sur y SO (Mapas N°2-4). Además, por su cercanía al mar, la humedad relativa promedio es alta durante casi todo el año (entre 77% y 98%).

La caseta de muestreo en esta estación se encuentra ubicada sobre un parante a una altura de 1,9 m del suelo. Por otro lado, el lugar donde se encuentra instalada esta estación se clasifica como zona residencial.

3.2.3. ESTACIÓN DE MUESTREO N°3

Está ubicada en la Estación Meteorológica San Marcos, en la parte posterior del campus de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Mapa N°1).

Esta estación se encuentra muy cerca de la Avenida U. R. Benavides (Colonial) y de la Avenida German Amezaga, por donde el tránsito vehicular no es muy elevado.

No existen edificaciones cerca a la estación de muestreo, salvo un centro habitacional ubicado en la parte posterior de la Universidad conformado por construcciones de 2 pisos.

Los vientos en este sector son predominantes del SO; cuando llevan dirección Sur pierden dirección y se vuelven turbulentos al impactar en el centro habitacional mencionado (Mapas N°2-4). Por otro lado, la humedad atmosférica en esta zona es relativamente alta durante casi todo el año.

Por estar muy cerca de una zona marcadamente comercial (Av. Colonial) y una zona residencial (parte lateral del campus), se clasifica al lugar donde se encuentra instalada la estación como una zona semicomercial

En esta estación de muestreo, la caseta de muestreo está ubicada a una altura de 1,6 m del suelo.

3.2.4. ESTACIÓN DE MUESTREO N°4

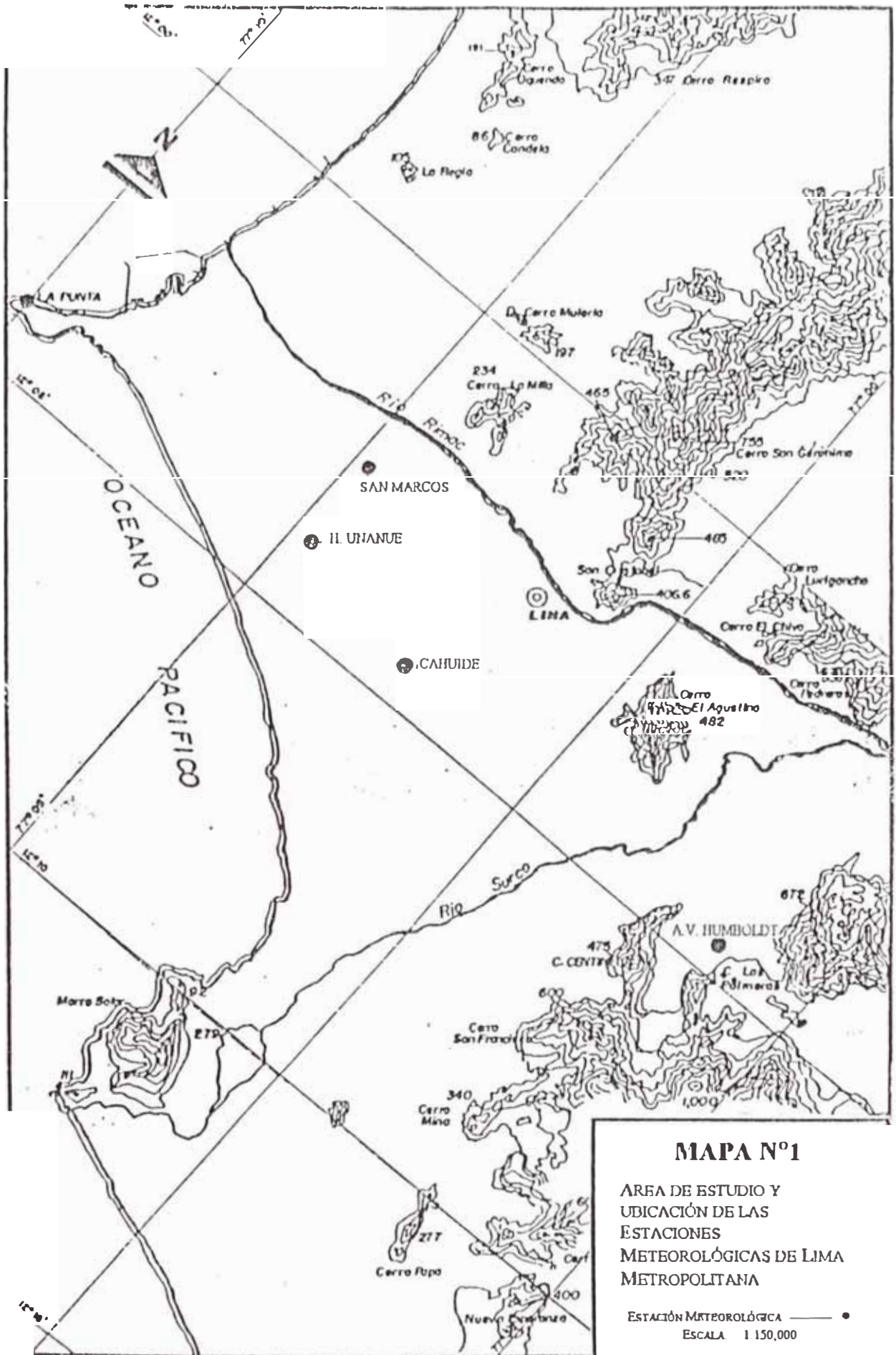
Está ubicada en la Estación Meteorológica Alexander Von Humbolt de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en el campus de la misma, en el distrito de La Molina (Mapa N°1).

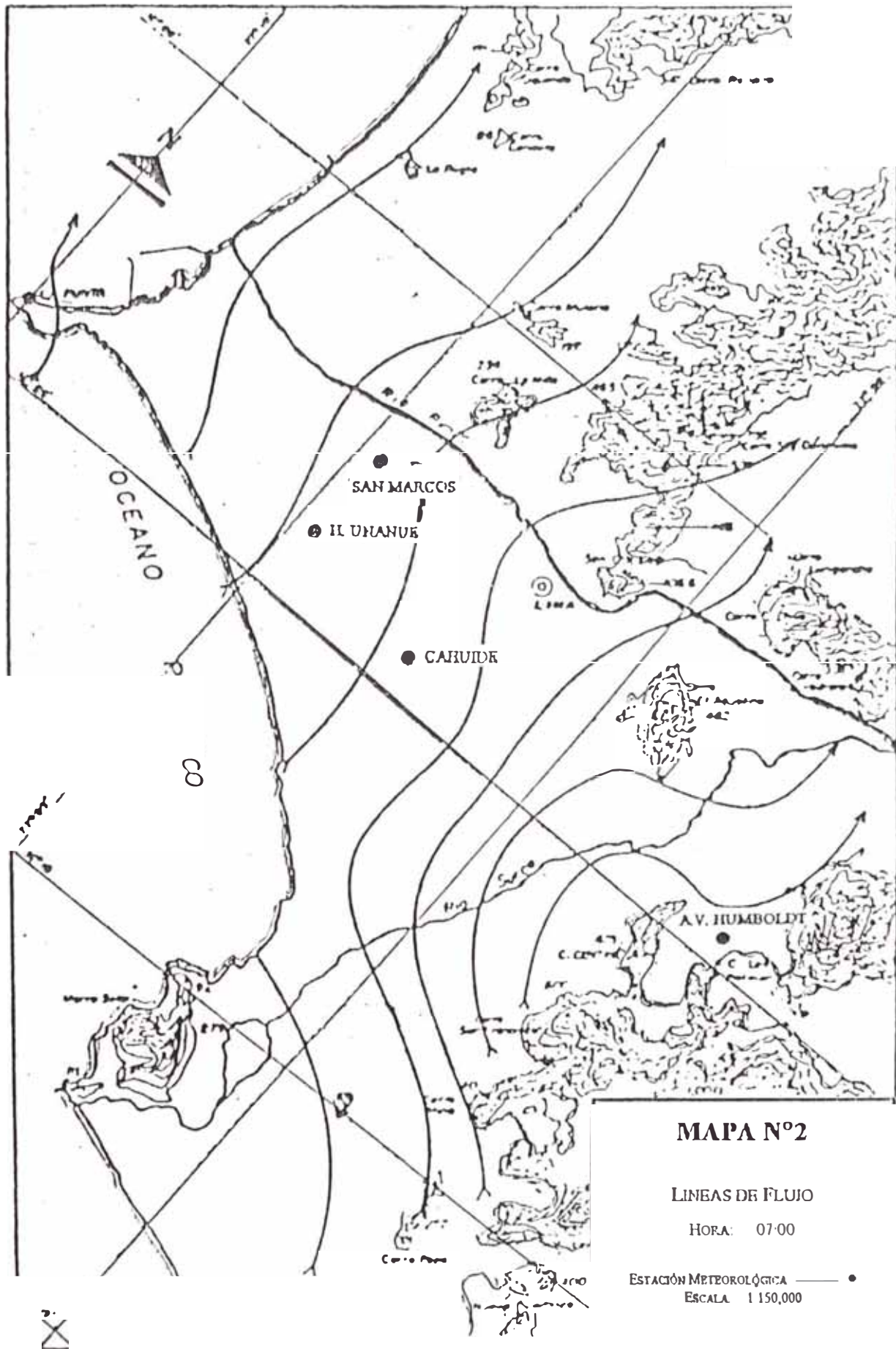
Esta estación se encuentra rodeada en su totalidad por campos de cultivo, en los cuales se realizan permanentemente faenas agrícolas. En estas faenas se usan tractores y se recurre además a la quema de maleza y residuos vegetales a la usanza tradicional.

La única avenida cerca a esta estación de muestreo es la Avenida La Universidad, la cual se encuentra a una distancia de unos 200 m aproximadamente.

Con respecto a la topografía del lugar, existen cerros que rodean la estación (ver mapas) e impiden la circulación del aire y el desplazamiento de los contaminantes contenidos en él. También por este motivo, en esta estación predominan los vientos del Oeste y NO (Mapas N°2-4).

En esta estación, la caseta de muestreo se encuentra sobre el techo de la oficina a 2,5 m del suelo. Esta zona además se clasifica como zona rural.



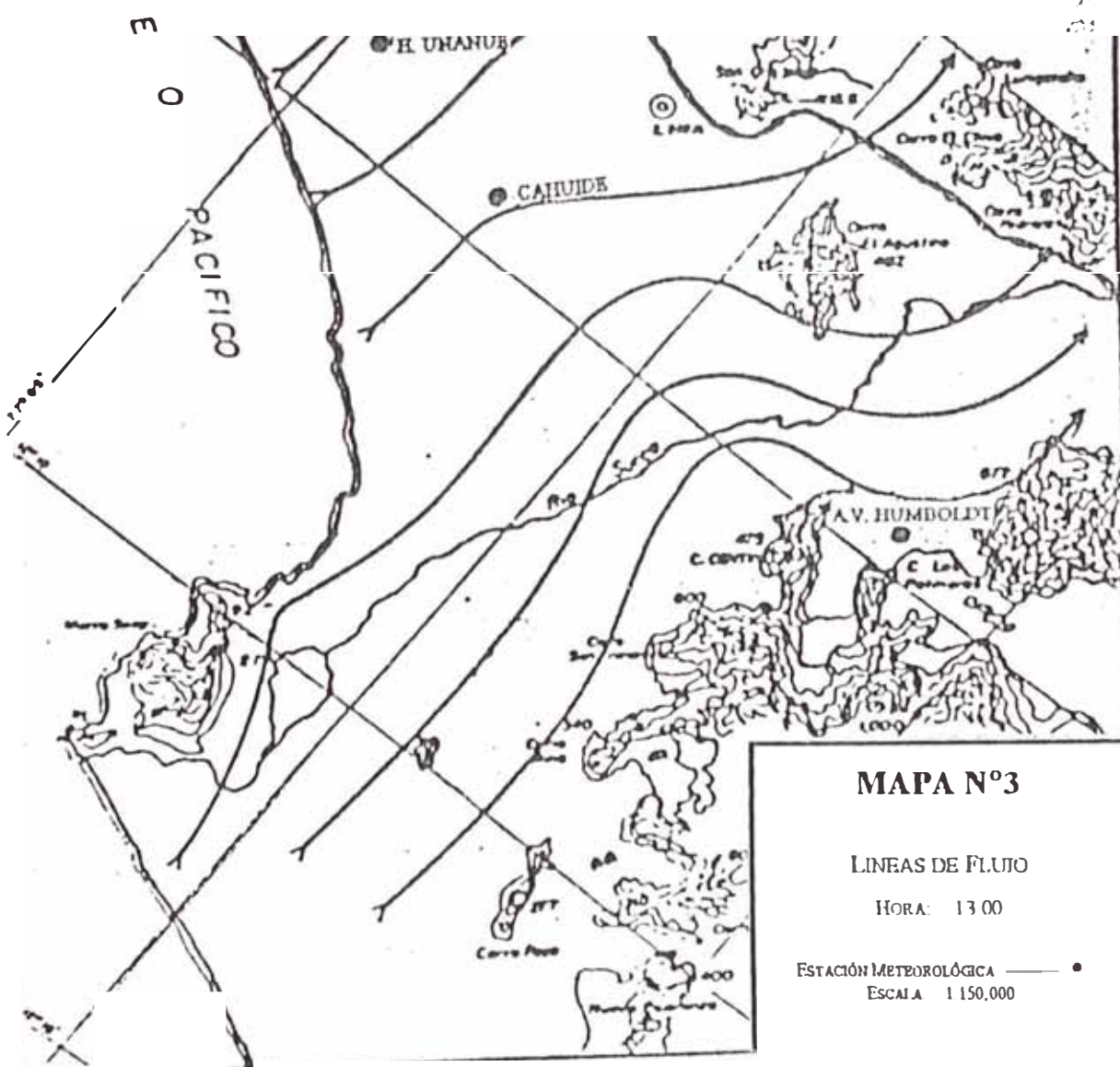
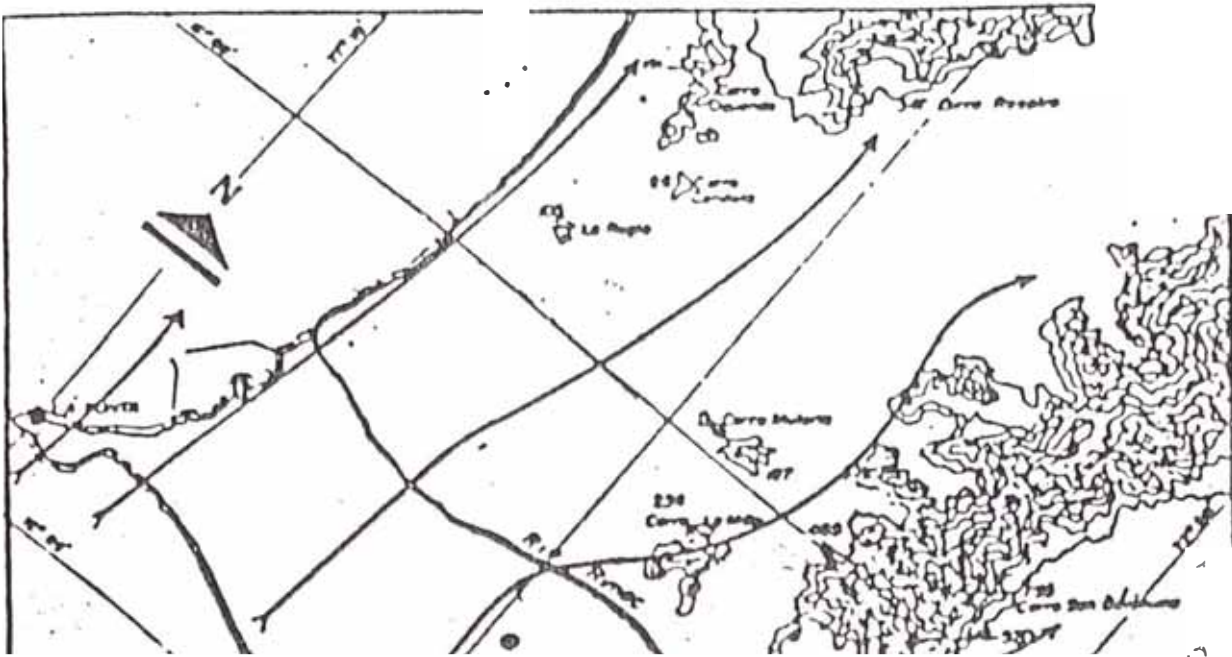


MAPA N°2

LÍNEAS DE FLUJO

HORA: 07:00

ESTACIÓN METEOROLÓGICA — ●
ESCALA 1:150,000

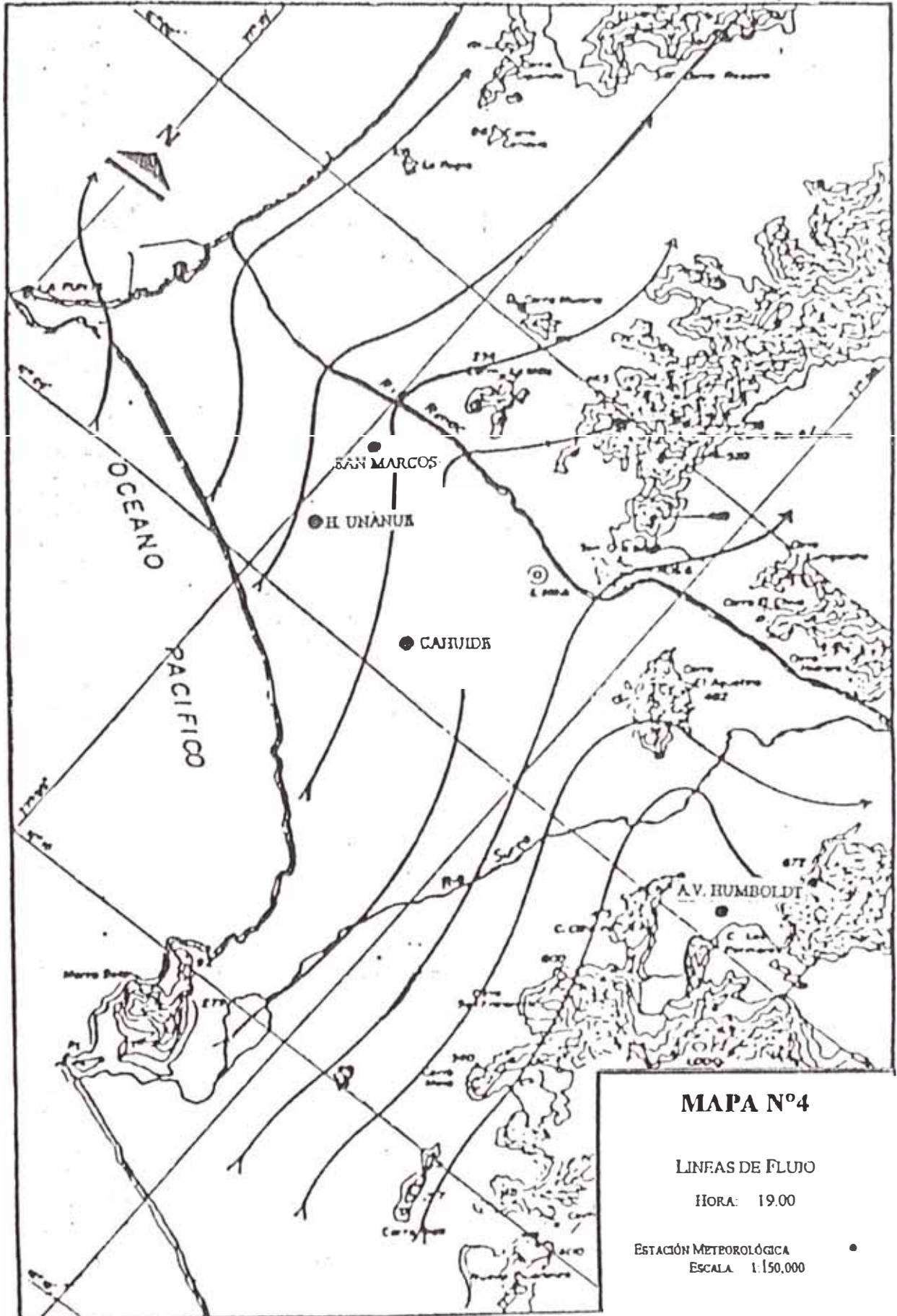


MAPA N°3

LINEAS DE FLUJO

HORA: 13 00

ESTACIÓN METEOROLÓGICA — ●
ESCALA 1 150,000



3.3. PERIODOS DE MUESTREO

Según la ASTM (American Society for Testing and Materials), el periodo de muestreo en la determinación de SO_2 por el método de las bujías reactivas de peróxido de plomo, debe ser un mes ó 30 días o algún periodo mayor para obtener una conveniente mínima cantidad de sulfato para analizar gravimétricamente⁽¹⁾.

El periodo de muestreo seleccionado para este trabajo fue de dos semanas (14 días) en base a los criterios siguientes:

En primer lugar, el método usado para analizar el sulfato formado en las bujías luego del muestreo, no es el gravimétrico sino el método turbidimétrico (el cual es más sensible), pudiendo de este modo exponer las bujías un periodo más corto (dos semanas); tiempo en el cual la cantidad de SO_2 captado (sulfato formado en la bujía) va a poder ser detectada por el método analítico con la mayor exactitud posible. Con un periodo de exposición más corto se corre el riesgo de que sólo reaccione con la bujía una muy pequeña cantidad de SO_2 , la que sería detectada como trazas por el método analítico sin poder dar como resultado un valor preciso. Seleccionar un tiempo de exposición mayor implicaría tener un menor número de datos en el mismo tiempo total de muestreo, e impediría realizar un seguimiento más cercano de los valores de contaminación por SO_2 tal como lo exige el monitoreo.

Por otro lado, los valores de contaminación por SO_2 obtenidos en un periodo de muestreo pequeño serán más representativos de los valores reales diarios de ese periodo, que los valores obtenidos en un periodo de muestreo mayor.

En algunos casos, por motivos circunstanciales, el muestreo duró más de 2 semanas.

En lo referente al tiempo total de monitoreo del SO_2 , este fue de un año. El monitoreo de la concentración de SO_2 en la atmósfera, exige un seguimiento continuo por un tiempo relativamente grande por lo que para este trabajo se consideró pertinente un lapso de un año. En este periodo se deben presentar diferentes condiciones de muestreo, debido a los cambios climáticos que acompañan a las diferentes estaciones del año, los cuales influyen en parte en los cambios de los valores de la contaminación, en este caso por SO_2 .

3.4. PROGRAMA DE CAPTACIÓN DE MUESTRAS

Como ya se dijo, cada muestreo tuvo una duración de dos semanas (en algunos casos duró más), y el tiempo total que duró el monitoreo fue de un año.

Las bujías se instalaban en las cuatro estaciones de muestreo el mismo día, y se retiraban de las mismas dos semanas después, dejando en su lugar bujías nuevas.

Las fechas en que se instalaron y se retiraron las bujías de las cuatro estaciones, en cada muestreo son las siguientes:

MUESTREO	FECHA	MUESTREO	FECHA
1°	del 13/08/90 al 04/09/90	13°	del 19/02/91 al 05/03/91
2°	del 04/09/90 al 18/09/90	14°	del 05/03/91 al 19/03/91
3°	del 18/09/90 al 02/10/90	15°	del 19/03/91 al 02/04/91
4°	del 02/10/90 al 16/10/90	16°	del 02/04/91 al 30/04/91
5°	del 16/10/90 al 30/10/90	17°	del 30/04/91 al 14/05/91
6°	del 30/10/90 al 13/11/90	18°	del 14/05/91 al 28/05/91
	del 13/11/90 al 27/11/90	19°	del 28/05/91 al 18/06/91
8°	del 27/11/90 al 11/12/90	20°	del 18/06/91 al 02/07/91
9°	del 11/12/90 al 08/01/91	21°	del 02/07/91 al 16/07/91
10°	del 08/01/91 al 22/01/91	22°	del 16/07/91 al 30/07/91
11°	del 22/01/91 al 05/02/91	23°	del 30/07/91 al 13/08/91
12°	del 05/02/91 al 19/02/91	24°	del 13/08/91 al 27/08/91

3.5. MÉTODO DE MUESTREO

El método de muestreo utilizado en este trabajo es el de las bujías reactivas de peróxido de plomo.

Este método se basa en la determinación de la sulfatación causada por el contaminante gaseoso SO_2 al reaccionar con una pasta reactiva de peróxido de plomo (PbO_2) expuesta en el ambiente contaminado.

La bujía reactiva de peróxido de plomo consiste en un cilindro de PVC sobre el cual se ha enrollado y cosido una gasa de algodón de 100cm² de superficie en la que se impregna la pasta reactiva de PbO₂; tal como se muestra en la figura 1.



FIGURA 1: Bujía Reactiva de Peróxido de Plomo

Las bujías recién preparadas deben permanecer en un desecador con sílica gel por 24 horas, luego de lo cual se exponen al medio ambiente de la estación de muestreo respectiva, dentro de una caseta que la va a resguardar de los cambios climatológicos de la zona o de los impactos que sobre su superficie pudiera ocurrir por acción de los insectos o las aves. Las casetas de muestreo preparadas para este trabajo tienen forma cilíndrica con una altura de 20 cm y un diámetro de 16 cm. Están cubiertas con una malla plástica y tienen un techo de madera a dos aguas.

El traslado de las bujías a las estaciones de muestreo debe realizarse colocándolas en contenedores cerrados para evitar su exposición al SO₂ de otros ambientes y contaminarlas antes de ser usadas.

Del grupo de bujías preparadas es necesario guardar cada vez una bujía sin exponer para usarla como blanco de reactivos en el posterior análisis de las bujías expuestas.

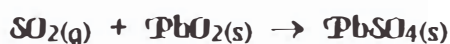
Luego de estar expuestas por 14 días en las respectivas estaciones de muestreo, se determina el grado de sulfatación de cada bujía mediante el método turbidimétrico para calcular luego el índice de sulfatación (I.S.)

$$I.S. = \frac{\text{mg SO}_3}{100 \text{ cm}^2 \text{ PbO}_2 \times \text{día}}$$

Con el valor del índice de sulfatación y los valores promedio de la velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica durante el periodo de muestreo, se puede calcular el valor de la concentración promedio de SO_2 (en ppm) en el ambiente de exposición de la bujía, utilizando el factor de correlación (Fc) calculado para cada caso:

$$C \text{ (ppm)} = Fc \times I.S.$$

Este método de muestreo se fundamenta en que el SO_2 del ambiente reacciona con el PbO_2 de la pasta reactiva para formar PbSO_4 según la siguiente ecuación química:



Esta reacción se produce al impactar las moléculas de SO_2 en la superficie de la pasta reactiva. La cantidad de moléculas de SO_2 que impactan en la bujía expuesta depende fundamentalmente de la concentración de SO_2 en el ambiente; aunque también depende pero en menor grado de la velocidad del viento que transporta estas moléculas, de la temperatura del ambiente donde se muestrea, de la presión atmosférica, de la difusibilidad del gas en el aire, etc. , así como de la geometría y área de la bujía. Todos estos factores mencionados están contenidos en el llamado "Factor de Correlación".

En la elaboración de la pasta reactiva se usa no menos de 8 g de PbO_2 asegurándose así que la reactividad de la superficie de la bujía con el SO_2 permanezca en forma constante durante el periodo de muestreo.

Una vista de un corte de la superficie de la bujía donde se aprecia el impacto de las moléculas de SO_2 , se muestra en la figura 1.

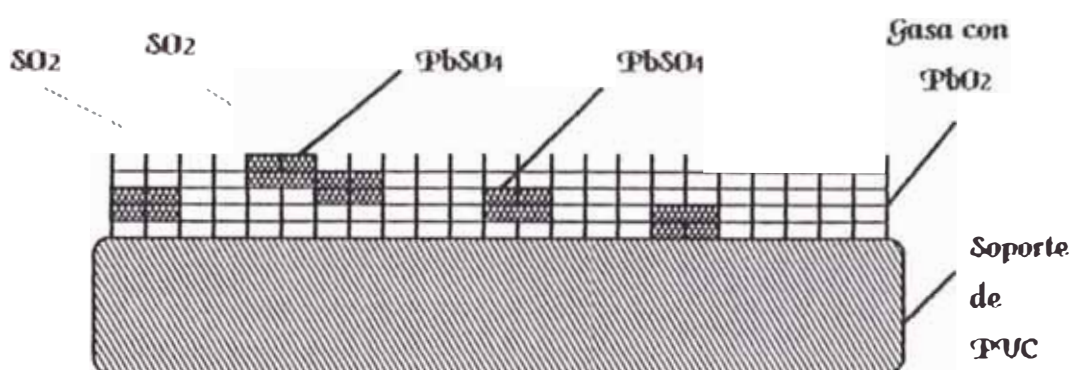


FIGURA 2 : Corte de la Superficie de una Bujía Reactiva

En esta figura se puede apreciar que la reacción del SO_2 con el PbO_2 de la bujía no sólo ocurre en la superficie de la pasta reactiva, sino también en el interior de ella; aunque esta capa es muy delgada (0,5 mm).

3.5.1. PREPARACIÓN DE LAS BUJÍAS REACTIVAS

El área reactiva de las bujías preparadas tiene las siguientes dimensiones:

diámetro = 4,9 cm

altura = 6,5 cm

De este modo, las bujías tendrán una superficie reactiva de 100cm^2 .

Los materiales necesarios y el procedimiento para preparar las bujías se detallan a continuación.

3.5.1.1. MATERIALES Y REACTIVOS

Los siguientes son los materiales y reactivos para preparar 5 bujías, necesarias para realizar un muestreo en las cuatro estaciones instaladas (una se usará como blanco):

- 05 Tubos de PUC de 4,8 cm de diámetro externo y 10 cm de longitud.
- 05 Gasas de algodón doble, de 6,5 cm de ancho por 15,5 cm de largo.
- Aguja e hilo.
- 01 Pincel.
- 05 Vasos de 50 ml.
- 02 Vasos de 250 ml.
- 01 Probeta de 25 ml.
- 05 Baguetas.
- 01 Balanza con aproximación al 0,01 gr.
- 01 Desecador con sílica gel.
- Peróxido de plomo PbO_2 Riedel de Haen (8,5 gr por bujía).
- Glicerina 3,0 ml.
- Goma tragacanto 0,5 gr.
- Alcohol absoluto 5,0 ml.
- Agua destilada

3.5.1.2. PROCEDIMIENTO

- En un tubo de PVC de 4,8 cm de diámetro se enrolla y cose una gasa en 2 capas de 6,5 cm × 15,5 cm de modo que una vez cosida, el diámetro sea 4,9 cm. Así, se tendrá una superficie efectiva de la bujía de 100 cm².
- Se prepara el mucilago de goma tragacanto disolviendo 0,5 g de goma tragacanto en 5 ml de alcohol absoluto, diluyendo luego a 50 ml con agua desionizada
- Se mide 3,0 ml de glicerina pura y se mezcla con 30 ml del mucilago de goma tragacanto.
- La pasta reactiva se prepara pesando 8,5 g de PbO₂ en un vaso de 50 ml y mezclándolos con 6,0 ml de la solución anterior (mucilago - glicerina), agitando con una bagueta hasta conseguir una pasta uniforme.
- Inmediatamente después de preparada esta pasta se la aplica sobre la gasa enrollada en el soporte, usando un pincel, cubriendo toda la superficie de esta.
- La bujía recién preparada, se deja en un desecador con sílica gel por 24 horas, luego de lo cual está lista para su uso.

El transporte de las bujías hasta el lugar de instalación debe hacerse en bolsas de polietileno nuevas y evitando en lo posible tener contacto con la superficie reactiva.

3.5.2. TRATAMIENTO QUÍMICO DE LAS BUJÍAS EXPUESTAS

Se corta en pequeños trozos la gasa de la bujía expuesta que contiene la pasta reactiva y se los coloca en un vaso de 400 ml junto con 75 ml de agua desionizada y 5,0 g de carbonato de sodio; se remoja por 3 horas con agitación ocasional y se lleva luego a ebullición suave sobre una plancha durante 25 minutos, cubriendo el vaso con una luna de reloj y regenerando el agua que se pueda evaporar. En este paso, el carbonato de sodio reaccionará con el sulfato de plomo (insoluble) para formar sulfato de sodio y carbonato de plomo (insoluble)



Luego de enfriada, se filtra la solución con papel Whatman N°40 ó 42, lavando convenientemente. El filtrado se recibe en un erlenmeyer de 250 ml y se neutraliza a pH 3 ó 4 (usando como indicador papel universal) con aproximadamente 7 ml de HCl concentrado; se hierve la solución para desalojar todo el CO₂ y se evapora a un volumen aproximado de 40 ml, se transfiere a una fiola de 50 ml y se completa hasta la marca con agua desionizada.

El mismo procedimiento se realiza con una bujía sin expomer, cuya solución va a servir como blanco de reactivos.

De este modo tenemos ya lista la solución para el análisis de sulfatos por el método turbidimétrico.

3.6. ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS

El análisis químico de las bujías luego del periodo de exposición consiste en la determinación del grado de sulfatación que se ha producido en la superficie reactiva, esto es, en la determinación de la cantidad de sulfato formado por la reacción del SO_2 con el PbO_2 .

Debido a que la cantidad de sulfato formado está en el orden de los microgramos (μg) el método gravimétrico no podrá ser empleado, por lo que en este trabajo se usa el método turbidimétrico como un buen método alternativo para la cuantificación de sulfatos.

El método turbidimétrico para determinar sulfatos consiste en formar una suspensión coloidal de sulfato de bario mediante la adición de cloruro de bario a la muestra que contiene sulfatos, y medir luego con un espectrofotómetro el porcentaje de transmitancia (%T) de esta solución (turbia por el precipitado formado) colocada en la celda del espectrofotómetro. Con el valor medido de %T se calcula el valor de \mathcal{A} ($\mathcal{A}=2-\log\%T$). El %T es una medida de la cantidad de luz que es transmitida por la suspensión y \mathcal{A} representa la cantidad de luz que es reflejada y difractada por la misma.

La magnitud de \mathcal{A} será proporcional a la cantidad de precipitado formado, y por consiguiente a la cantidad de sulfatos existente en la muestra. La concentración de sulfato en la muestra se determina extrapolando el valor medido de \mathcal{A} en una curva de calibración previamente preparada con patrones de alta pureza. Un estudio de este método se presenta en el anexo.

3.6.1. MATERIALES REACTIVOS E INSTRUMENTOS

Los materiales reactivos e instrumentos usados para el análisis de las 4 muestras y el blanco de reactivos son los siguientes:

- 01 Pipeta graduada de 10 ml.
- 05 Pipetas volumétricas de 2 ml.
- 01 Pinza para matraz.
- 05 Fiolas de 25 ml.
- 01 Probeta con tapa de 100 ml.
- 01 Dosificador.
- Glicerina Q.P. 5 ml.
- Alcohol absoluto 10 ml.
- BaCl_2 Q.P. en cristales 0.8 gr.
- Agua desionizada
- 01 Espectrofotómetro Spectronic 20 con fototubo azul.
- 05 Celdas para espectrofotómetro de 0,5 pulgadas de diámetro.
- 01 Balanza analítica
- 01 Plancha de calentamiento.

3.6.2. PROCEDIMIENTO

De la solución obtenida del tratamiento químico de las bujías se toman 2 ml, con una pipeta volumétrica y se transvasan a una fiola de 25 ml; se agrega 2,5 ml de una solución de glicerina - alcohol 1:2 (v/v) que sirve como medio dispersante y se enrraza a 25 ml.

Se agrega mediante un dosificador 2 porciones (aprox. 230 mg) de cristales de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (el dosificador carga $0,1155 + 7 \times 10^{-4}$ g de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ según la tara efectuada); se agita vigorosamente hasta disolución de los cristales de cloruro de bario y se deja reposando 15 minutos, luego de los cuales habrá aparecido una suspensión coloidal de BaSO_4 .

Se coloca una pequeña cantidad de esta solución en una celda de 0,5 pulgadas y se lee su %T a 500 nm, mediante un espectrofotómetro Spectronic 20. El instrumento se calibra a 100% con la solución de la bujía sin reaccionar a la cual se le ha seguido el mismo proceso analítico.

Se calcula la absorbancia y se lee el respectivo valor de concentración de sulfato (en este caso expresado en valores de SO_3), en una curva de calibración previamente elaborada (ver anexo).

A partir de las cantidades de SO_4^- encontradas (expresadas como SO_3), se determinan los respectivos índices de sulfatación (I.S.):

$$\text{I.S.} = \frac{\text{mg SO}_3}{100 \text{ cm}^2 \text{ PbO}_2 \times \text{día}}$$

3.7. PROCESAMIENTO ANALÍTICO DE LAS MUESTRAS

Una vez obtenidos los índices de sulfatación de las bujías, es necesario calcular los factores de correlación correspondientes a cada muestreo, para conocer la concentración del SO_2 durante el monitoreo. Para esto se cuenta con las mediciones meteorológicas efectuadas en las

estaciones donde se instalaron las bujías. Los promedios de estas mediciones se muestran en los cuadros N° 1, 2, 3 y 4.

La concentración de SO_2 en el ambiente (en ppm), se calcula a partir del índice de sulfatación con la siguiente expresión:

$$C = Jc \times S$$

Donde:

C= Concentración de SO_2 en ppm.

Jc = Factor de Correlación.

S = Índice de Sulfatación de la Bujía, en $\text{mg SO}_3/100 \text{ cm}^2/\text{dia}$.

Los valores de los índices de sulfatación (S) obtenidos en el análisis químico de las bujías se muestran en el cuadro N°5.

El factor de correlación se calcula a partir de la siguiente expresión⁽¹⁴⁾:

$$Jc = \frac{1,186 \times 10^{-4} (273,15 + t) \phi}{p}$$

t = Temperatura promedio en °C .

ϕ = Diámetro externo de la bujía en cm .

p = Presión barométrica en atm

$D_{1,2}$ = Coeficiente de difusión del SO_2 en el aire en cm^2/seg .

N_{Sh} = Número de Sherwood.

Partiendo de la ecuación de Gilliland se obtiene una expresión para calcular el valor del coeficiente de difusión del SO_2 en el aire (en cm^2/seg)

$$D_{1,2} = \frac{2,26 \times 10^{-5} T^{3/2}}{P}$$

T = Temperatura en $^{\circ}\text{K}$.

p = Presión barométrica en atm.

El cálculo del número de Sherwood (N_{Sh}) se realiza con la siguiente expresión:

$$N_{Sh} = \frac{2}{\left(\frac{\phi}{2h} + 1\right) \ln\left(1 + \frac{2h}{\phi}\right)} + 0,6 N_{Sc}^{1/3} N_{Re}^{1/2}$$

N_{Sc} = Número de Schmidt.

N_{Re} = Número de Reynolds.

ϕ = Diámetro de la bujía en cm.

h = Altura de la pasta reactiva de la bujía en cm.

Con la siguiente expresión se calcula el número de Schmidt (N_{Sc}):

$$N_{Sc} = \frac{\nu}{D_{1,2}}$$

ν = Viscosidad cinemática del aire en cm^2/seg .

$D_{1,2}$ = Coeficiente de difusión del SO_2 en el aire en cm^2/seg .

El número de Reynolds (N_{Re}) se calcula como sigue:

$$N_{Re} = \frac{v\phi}{\nu}$$

Donde:

ν = viscosidad cinemática del aire en cm^2/seg .

v = velocidad promedio del viento que incide en la bujía en cm/seg .

ϕ = diámetro de la bujía en cm .

El valor de la viscosidad cinemática del aire (ν) en cm^2/seg , usada en las dos expresiones anteriores, se calcula con la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{\mu}{d}$$

μ = viscosidad absoluta del aire en poise ($\text{dina} \times \text{seg}/\text{cm}^2$).

d = densidad del aire en g/cm^3

A continuación se muestran los valores de las mediciones meteorológicas en las cuatro estaciones de muestreo durante el monitoreo (cuadros N° 1, 2, 3 y 4), los cuales servirán para calcular los valores de los factores de correlación correspondientes a cada muestreo.

El cuadro N°5 muestra los índices de sulfatación (S) obtenidos en los análisis químicos de las bujías durante el monitoreo. Los datos obtenidos en los análisis químicos de las bujías así como el tiempo de exposición de las mismas, necesarios para calcular los valores de los índices de sulfatación, se muestran en los apéndices A, B y C.

Cuadro N° 1
Datos meteorológicos de la estación de muestreo N° 1
(Estación Meteorológica Senamhi " Cahuide")

MUESTREO N°	Velocidad del viento (Km/h)	Temperatura (°C)	Presión atmosférica (m-bar)
1	4,25	14,9	1002,5
2	7,21	15,8	1002,5
3	7,30	15,9	1002,7
4	7,22	16,7	1003,5
5	7,20	17,0	1003,4
6	10,80	17,0	1002,5
7	10,78	17,8	1003,0
8	7,97	19,6	1001,5
9	7,21	19,8	1001,8
10	3,60	21,2	1002,0
11	4,88	22,7	1001,2
12	7,20	21,4	1001,4
13	7,22	22,2	1001,2
14	7,18	23,2	1002,0
15	6,68	22,7	1002,2
16	3,60	20,9	1002,6
17	6,94	19,2	1004,1
18	7,21	18,9	1002,6
19	4,14	18,2	1002,0
20	4,11	17,2	1002,2
21	7,19	17,4	1003,1
22	7,21	18,2	1003,3
23	7,97	18,2	1003,0
24	9,01	16,1	1002,8

Cuadro N°2
Datos meteorológicos de la estación de muestreo N°2
(Estación Meteorológica PUC " Hipólito Unanue")

MUESTREO N°	Velocidad del viento (Km/h)	Temperatura (°C)	Presión atmosférica (m-bar)
1	10,08	15,6	1002,2
2	9,72	16,5	1001,8
3	9,00	17,2	1002,9
4	7,92	17,4	1003,4
5	10,80	17,5	1002,4
6	11,52	17,7	1002,9
7	18,00	18,3	1003,6
8	16,20	20,2	1001,1
9	14,40	20,9	1001,0
10	18,00	21,1	1002,8
11	16,71	21,9	1002,1
12	14,40	21,3	1001,8
13	13,28	22,3	1002,0
14	10,80	23,3	1001,1
15	10,82	22,8	1002,7
16	9,00	21,3	1002,8
17	14,40	19,4	1003,6
18	13,68	19,0	1003,2
19	10,80	18,3	1002,7
20	11,52	17,6	1002,9
21	14,38	17,5	1003,5
22	14,40	16,7	1003,7
23	13,70	17,1	1002,2
24	13,28	15,6	1002,6

Cuadro N°3
Datos meteorológicos de la estación de muestreo N°3
(Estación Meteorológica Senamhi " San Marcos")

MUESTREO N°	Velocidad del viento (Km/h)	Temperatura (°C)	Presión atmosférica (m-bar)
1	10,80	15,6	1001,1
2	9,72	16,5	1000,0
3	10,08	16,9	1002,0
4	9,00	17,4	1002,8
5	9,36	17,6	1002,9
6	9,00	17,7	1002,7
7	13,32	18,4	1001,9
8	14,40	20,3	1001,0
9	14,76	20,7	1000,8
10	17,28	21,5	1001,0
11	17,64	22,6	1000,3
12	16,71	21,7	1000,8
13	16,20	22,6	1000,2
14	14,40	23,1	1000,5
15	14,04	23,1	1001,0
16	12,60	21,4	1001,5
17	12,24	19,6	1002,6
18	12,96	19,3	1001,2
19	11,88	18,6	1001,5
20	11,52	17,7	1001,1
21	12,60	17,8	1002,2
22	11,88	17,8	1002,3
23	12,24	17,5	1001,2
24	12,62	16,0	1002,0

Cuadro N°4
Datos meteorológicos de la estación de muestreo N°4
(Estación Meteorológica UNA " Alexander Von Humboldt")

MUESTREO N°	Velocidad del viento (Km/h)	Temperatura (°C)	Presión atmosférica (m-bar)
1	14,11	14,8	985,8
2	14,40	15,7	985,4
3	13,79	15,8	985,5
4	10,08	16,4	986,2
5	10,12	16,6	986,1
6	10,10	17,6	984,4
7	10,11	17,7	984,3
8	9,22	19,6	983,6
9	9,00	20,5	983,4
10	7,92	21,4	984,0
11	8,17	21,7	983,3
12	8,64	22,1	982,9
13	8,50	22,4	982,9
14	8,28	22,8	982,9
15	7,92	22,5	983,0
16	5,80	20,8	983,4
17	7,16	18,5	985,5
18	7,20	18,3	984,3
19	6,62	17,2	985,4
20	7,06	16,8	985,7
21	10,44	15,6	986,5
22	10,62	16,2	986,8
23	10,08	18,0	985,8
24	10,11	16,4	985,5

Cuadro N° 5

Indices de Sulfatación ($\text{mg SO}_3/100 \text{ cm}^2 \text{ PbO}_2/\text{día}$)

MUESTREO N°	ESTACION 1	ESTACION 2	ESTACION 3	ESTACION 4
1	0,6250	0,2557	0,5454	0,1364
2	0,9331	0,8527	0,8349	0,5402
3	0,5938	0,3259	0,4018	0,3661
4	0,6071	0,3527	0,6563	0,5179
5	0,5804	0,2456	0,3259	0,3884
6	0,7232	0,5313	0,8479	0,7589
7	0,2724	0,1875	0,3527	0,4018
8	0,9732	0,5670	0,6696	0,7099
9	1,1071	0,7054	1,2143	1,0089
10	0,6696	0,4553	0,6071	0,5938
11	0,4911	0,1429	0,6071	0,4911
12	0,7232	0,5670	0,4152	0,6563
13	0,7099	0,5313	0,4152	0,5804
14	0,7589	0,4777	0,8750	0,7589
15	0,5089	0,4777	0,6161	0,5089
16	0,6964	0,4911	0,5938	0,6295
17	0,3750	0,5804	0,6295	0,5804
18	0,4911	0,5804	0,4688	0,6831
19	0,1964	0,2500	0,1964	0,0952
20	0,4821	0,1429	0,2009	0,1429
21	0,7813	0,3393	0,4286	0,6831
22	0,9643	0,4821	0,2946	0,2679
23	0,6474	0,0982	0,0804	0,1474
24	0,3482	0,3482	0,4420	0,1071

Con los datos de los cuadros N° 1, 2, 3 y 4 y las expresiones mencionadas, procedemos a calcular el valor del factor de correlación para el primer muestreo de la estación N° 1 :

$$t = 14,9 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Rightarrow \quad T = 288,05 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$v = 4,25 \text{ Km/h} = 118,06 \text{ m/seg}$$

$$p = 1002,5 \text{ mb} = 0,9894 \text{ atm}$$

$$\phi = 4,9 \text{ cm}$$

$$h = 6,5 \text{ cm}$$

$$D_{1,2} = \frac{2,26 \times 10^{-5} \times 288,05^{3/2}}{0,9894}$$

$$D_{1,2} = 0,11167 \text{ cm}^2/\text{seg}$$

$$N_{Sc} = \frac{0,152 \text{ cm}^2/\text{seg}}{0,11167 \text{ cm}^2/\text{seg}}$$

$$N_{Sc} = 1,3612$$

$$N_{Re} = \frac{118,06 \text{ cm/seg} \times 4,9 \text{ cm}}{0,152 \text{ cm}^2/\text{seg}}$$

$$N_{Re} = 3805,89$$

$$N_{sh} = \left(\frac{4,9 \text{ cm}}{2 \times 6,5 \text{ cm}} + 1 \right) \ln \left(1 + \frac{2 \times 6,5 \text{ cm}}{4,9 \text{ cm}} \right) + 0,6 \times 1,3612^{1/3} \times 3805,89^{1/2}$$

$$N_{sh} = 42,1434$$

$$J_c = \frac{1,186 \times 10^{-4} (273,15 + 14,9) 4,9}{0,9894 \times 0,11167 \times 42,1434}$$

$$\therefore J_c = 0,03595$$

Este valor del factor de correlación también se puede obtener utilizando el programa en pascal "Factor", al cual se le introducen los datos de velocidad del viento en Km/h, temperatura en °C y presión atmosférica en mb (milibares), dándonos como resultado el valor del factor de correlación correspondiente.

Este programa fue elaborado específicamente para este trabajo y se detalla en el anexo.

Los factores de correlación siguientes, tabulados en el cuadro N°6 fueron calculados con el programa "Factor".

Cuadro N°6
Factores de Correlación (Jc)

MUESTREO N°	ESTACION 1	ESTACION 2	ESTACION 3	ESTACION 4
1	0,03595	0,02357	0,02280	0,02008
2	0,02777	0,02399	0,02401	0,01988
3	0,02760	0,02491	0,02357	0,02031
4	0,02775	0,02652	0,02491	0,02369
5	0,02778	0,02278	0,02443	0,02365
6	0,02278	0,02206	0,02491	0,02368
7	0,02279	0,01770	0,02055	0,02367
8	0,02645	0,01866	0,01978	0,02477
9	0,02778	0,01978	0,01954	0,02507
10	0,03897	0,01771	0,01808	0,02668
11	0,03361	0,01837	0,01790	0,02628
12	0,02780	0,01977	0,01838	0,02558
13	0,02776	0,02058	0,01867	0,02578
14	0,02783	0,02278	0,01976	0,02612
15	0,02883	0,02275	0,02003	0,02669
16	0,03896	0,02491	0,02112	0,03108
17	0,02828	0,01976	0,02142	0,02802
18	0,02777	0,02027	0,02083	0,02796
19	0,03642	0,02278	0,02174	0,02912
20	0,03654	0,02206	0,02208	0,02822
21	0,02781	0,01978	0,02112	0,02328
22	0,02776	0,01976	0,02174	0,02309
23	0,02644	0,02026	0,02143	0,02369
24	0,02490	0,02058	0,02110	0,02366

3.8. RESULTADOS

Los valores de las concentraciones de SO_2 (C) expresadas en ppm, se obtienen por el producto de los respectivos índices de sulfatación (S), mostrados en el cuadro N°5, y los factores de correlación (Jc) correspondientes, mostrados en el cuadro N°6:

$$C = S \times Jc$$

Así, para el primer muestreo de la estación N°1, la concentración de SO_2 será:

$$C = 0,6250 \times 0,03595 = 0,02247 \text{ ppm}$$

Del mismo modo se calculan los valores de las concentraciones de SO_2 correspondientes a cada muestreo, los cuales se muestran en el cuadro N°7 .

Cuadro N°7
Concentraciones de SO₂ en ppm obtenidas en el monitoreo

MUESTREO N°	FECHA	ESTACION 1	ESTACION 2	ESTACION 3	ESTACION 4
1	del 13/08/90 al 04/09/90	0,02247	0,00602	0,01243	0,00274
2	del 04/09/90 al 18/09/90	0,02591	0,02045	0,02005	0,01074
3	del 18/09/90 al 02/10/90	0,01638	0,00812	0,00947	0,00744
4	del 02/10/90 al 16/10/90	0,01685	0,00935	0,01603	0,01227
5	del 16/10/90 al 30/10/90	0,01612	0,00559	0,00796	0,00919
6	del 30/10/90 al 13/11/90	0,01647	0,01172	0,02112	0,01797
7	del 13/11/90 al 27/11/90	0,00621	0,00332	0,00725	0,00951
8	del 27/11/90 al 11/12/90	0,02574	0,01058	0,01324	0,01758
9	del 11/12/90 al 08/01/91	0,03076	0,01395	0,02373	0,02529
10	del 08/01/91 al 22/01/91	0,02609	0,00806	0,01098	0,01584
11	del 22/01/91 al 05/02/91	0,01651	0,00263	0,01087	0,01291
12	del 05/02/91 al 19/02/91	0,02010	0,01121	0,00763	0,01679
13	del 19/02/91 al 05/03/91	0,01971	0,01093	0,00775	0,01496
14	del 05/03/91 al 19/03/91	0,02112	0,01088	0,01729	0,01982
15	del 19/03/91 al 02/04/91	0,01467	0,01087	0,01234	0,01598
16	del 02/04/91 al 30/04/91	0,02713	0,01223	0,01254	0,01956
17	del 30/04/91 al 14/05/91	0,01061	0,01147	0,01348	0,01626
18	del 14/05/91 al 28/05/91	0,01364	0,01176	0,00977	0,01910
19	del 28/05/91 al 18/06/91	0,00715	0,00570	0,00427	0,00277
20	del 18/06/91 al 02/07/91	0,01762	0,00315	0,00444	0,00403
21	del 02/07/91 al 16/07/91	0,02173	0,00671	0,00905	0,01590
22	del 16/07/91 al 30/07/91	0,02677	0,00953	0,00640	0,00619
23	del 30/07/91 al 13/08/91	0,01712	0,00199	0,00172	0,00349
24	del 13/08/91 al 27/08/91	0,00867	0,00717	0,00933	0,00253

Con los datos del cuadro N°7 se elaboraron los gráficos N° 1, 2, 3, 4 y 5, los cuales nos dan una mejor visión de los niveles de contaminación y la variación de los mismos en cada estación de muestreo .

Los gráficos N° 1, 2, 3 y 4 nos muestran la concentración de SO₂ en cada muestreo, en las estaciones de muestreo 1, 2, 3 y 4 respectivamente, mientras que el gráfico N°5 muestra, comparativamente, la variación de la concentración de SO₂ en las 4 estaciones de muestreo a la vez.

Además, del cuadro N° 7 se calcula la concentración promedio de de SO₂ en todo el monitoreo, para cada estación de muestreo:

$$C(\text{SO}_2)_{\text{prom}} = \frac{\sum C(\text{SO}_2)_i}{24}$$

Donde:

$C(\text{SO}_2)_i$ = Concentración de SO₂ en cada muestreo ; $i = 1, \dots, 24$

24 = Número de muestreos

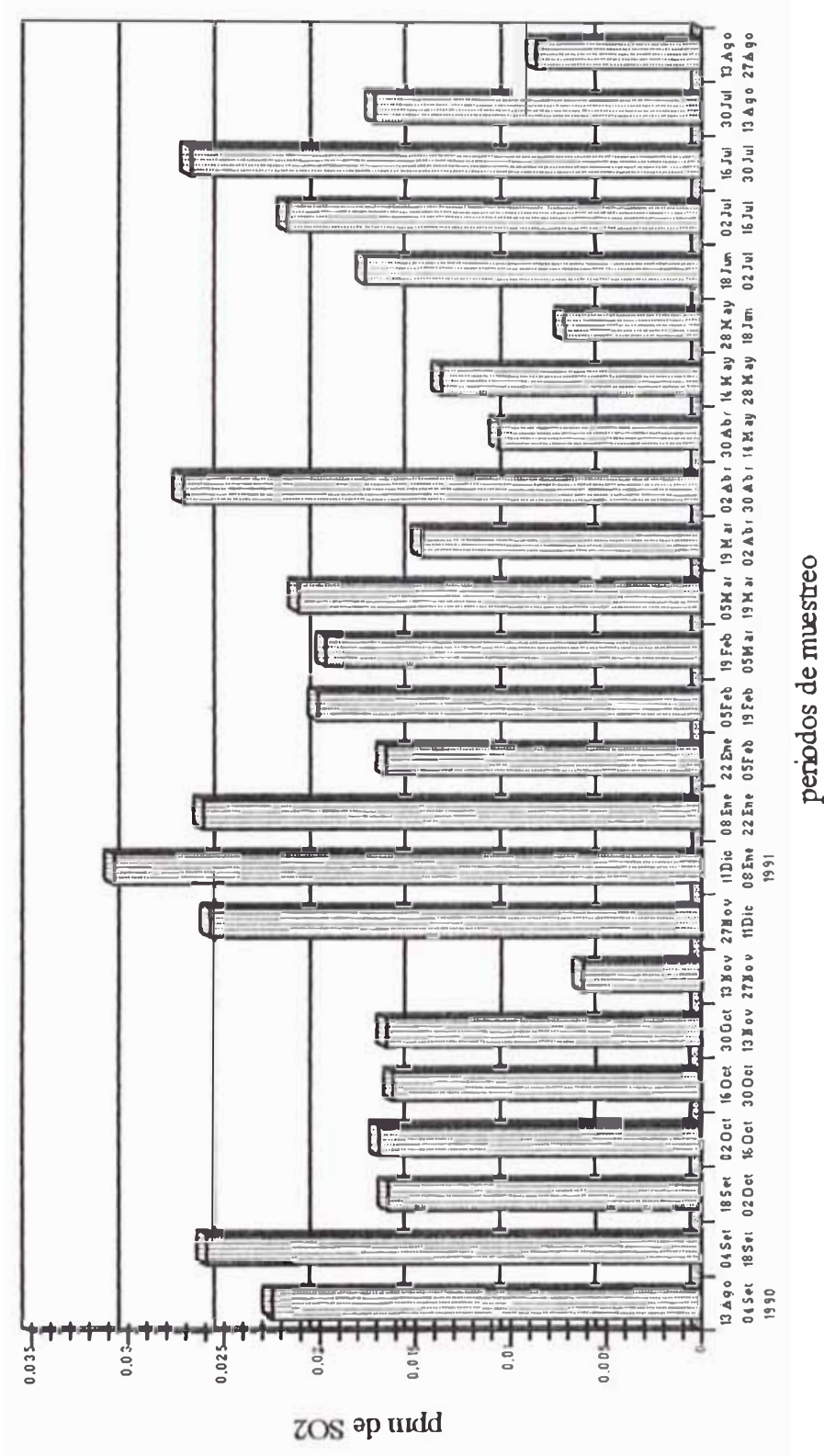
El cálculo de la concentración promedio de SO₂ en cada estación de muestreo dio como resultado los valores mostrados en el cuadro N°8.

Cuadro N°8

Concentración Promedio de SO₂ en Cada Estación de Muestreo

Estación N°	C(SO ₂)prom
1	0,01856 ppm
2	0,00888 ppm
3	0,01121 ppm
4	0,01243 ppm

Gráfico #1
 Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación #1



periodos de muestreo

Gráfico #2
 Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación #2

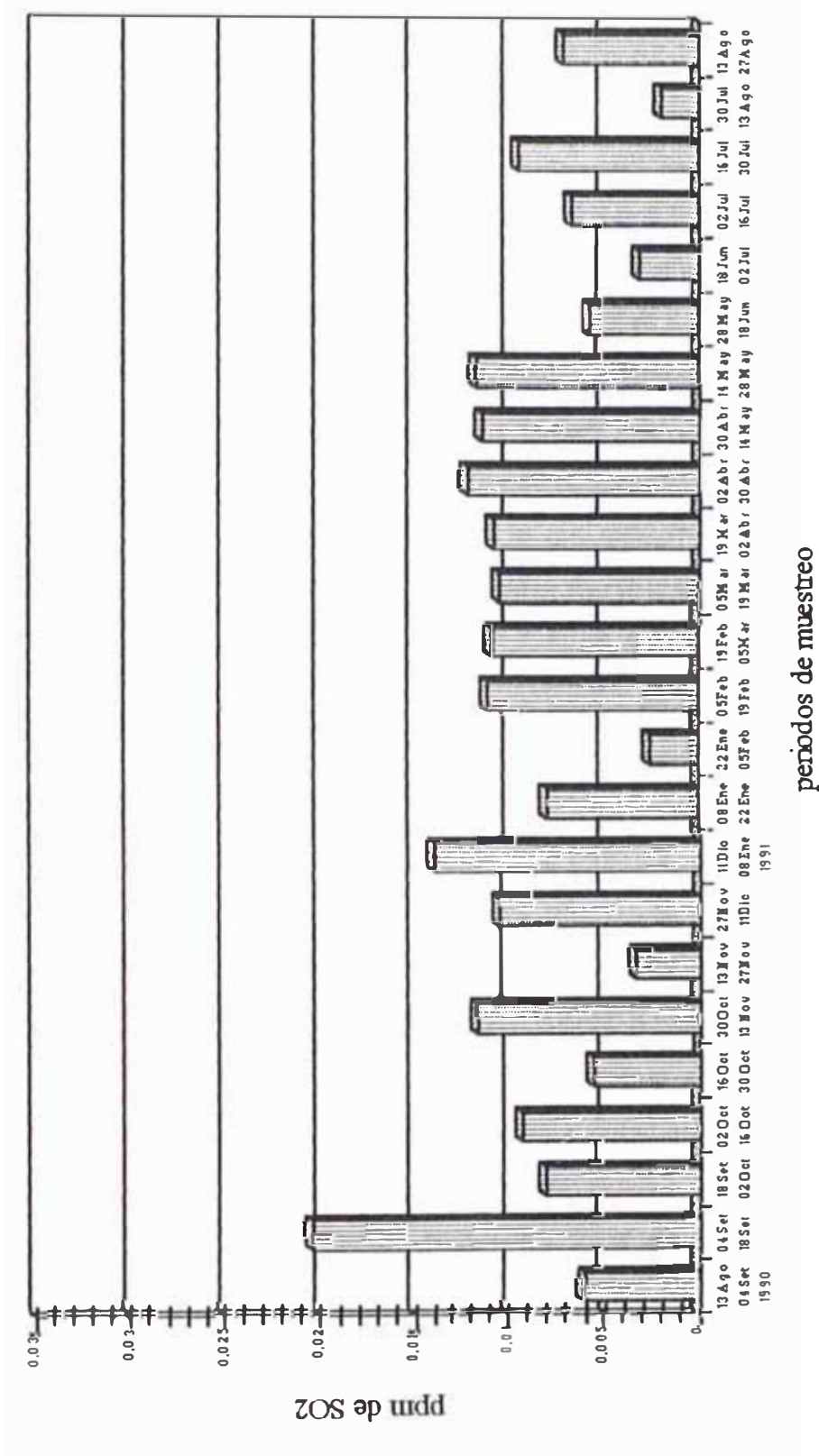


Gráfico #3
 Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación #3

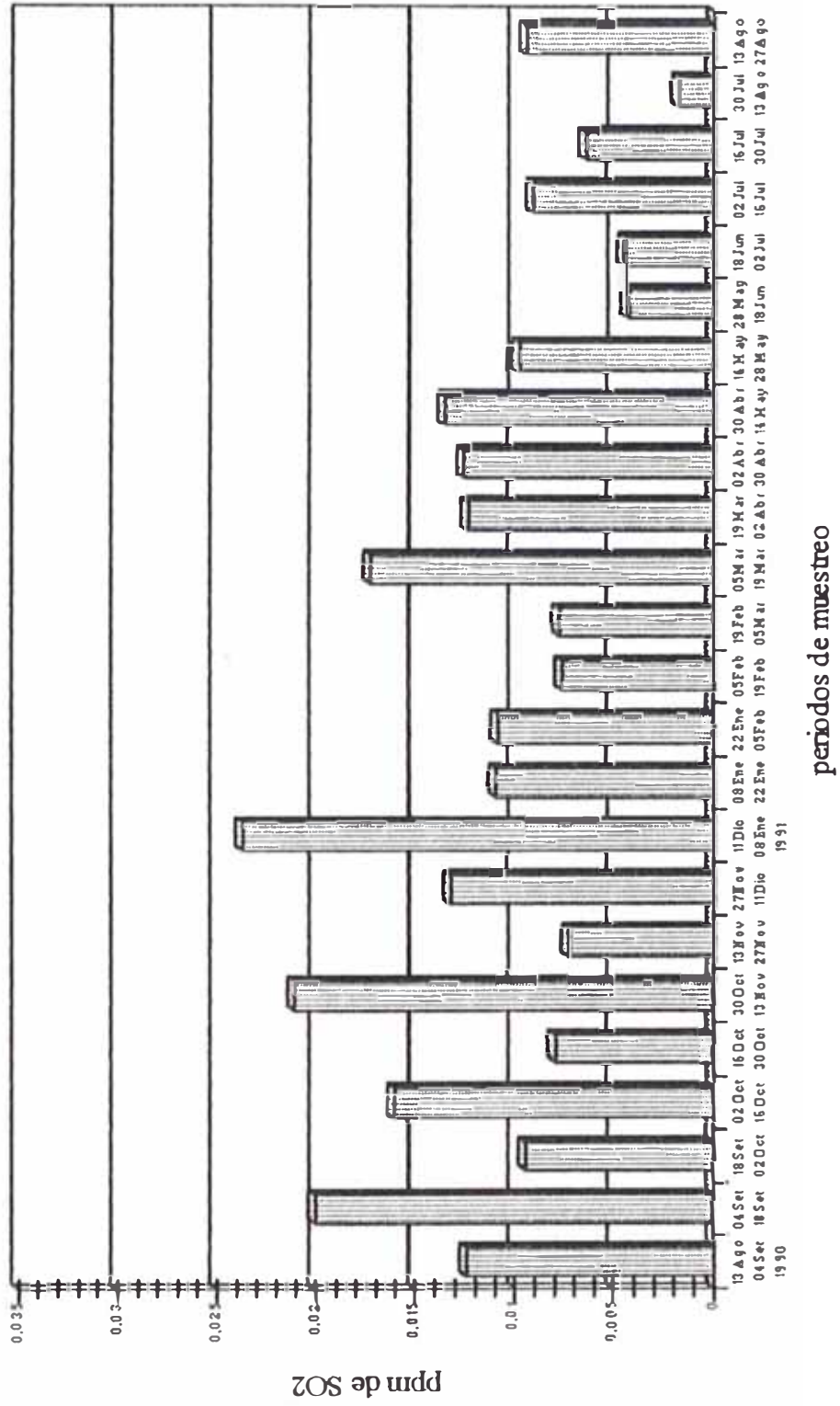


Gráfico #4
 Concentración de Dióxido de Azufre en la Estación #4

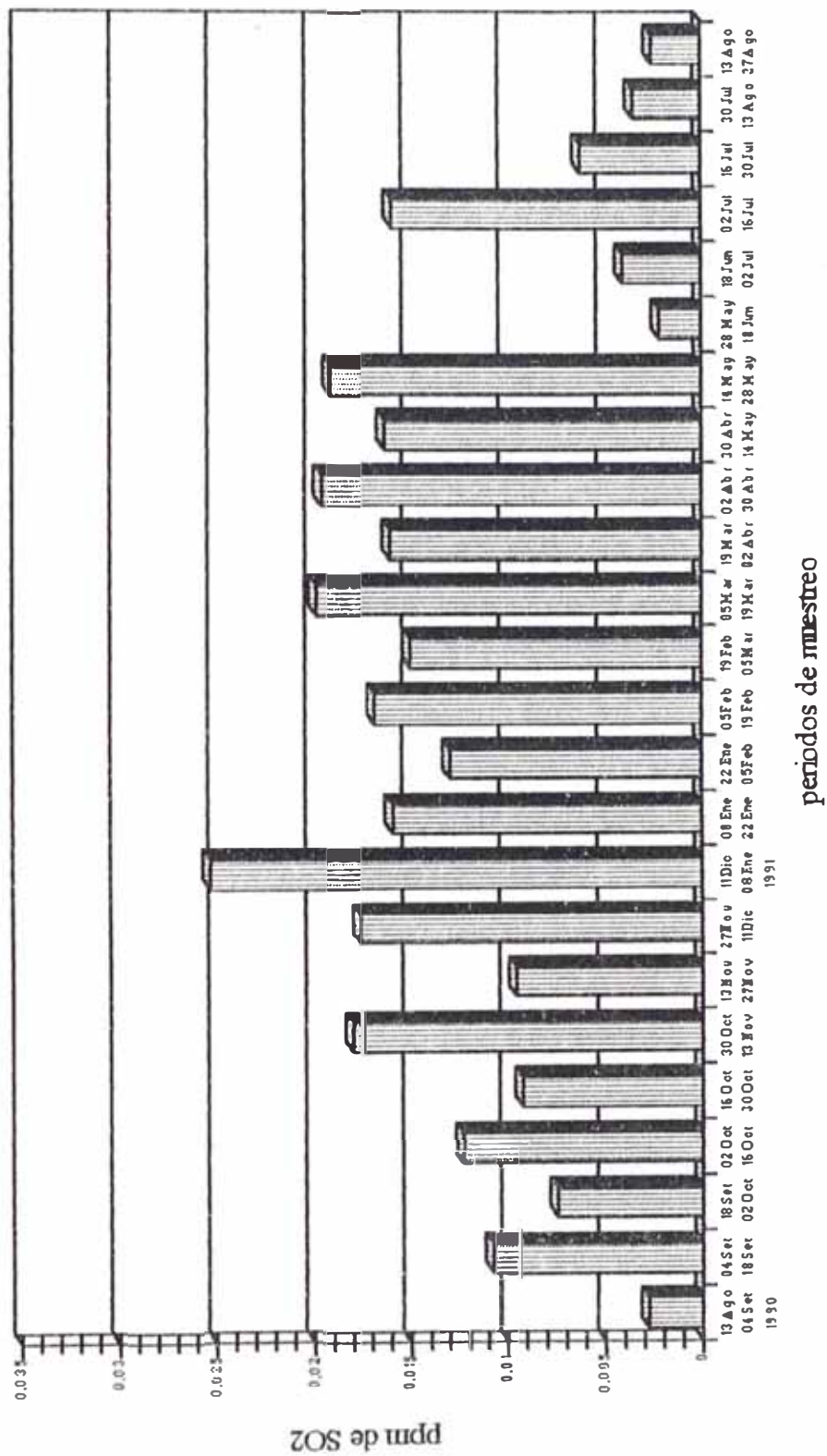
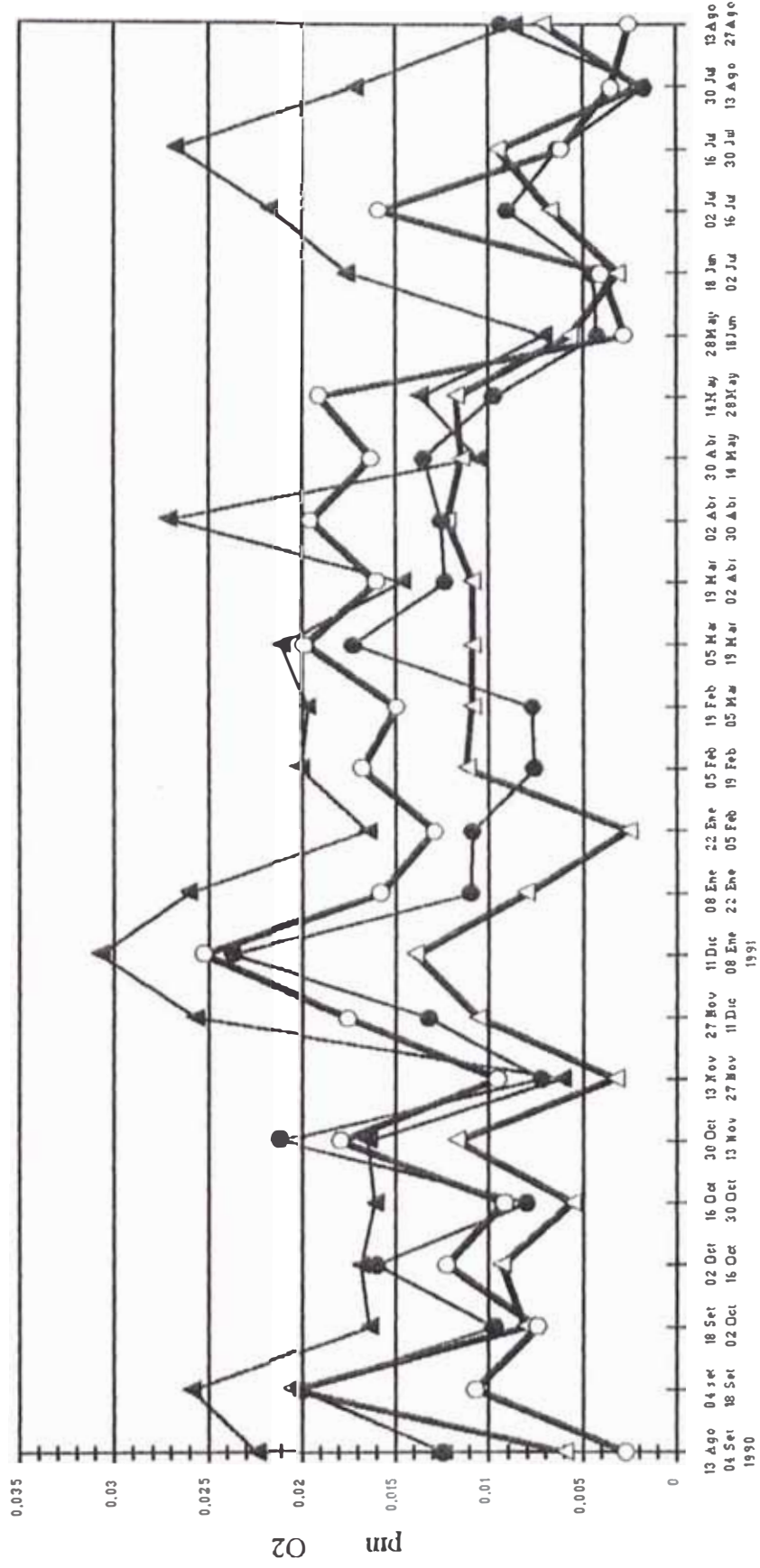


Gráfico #5
 Concentración de Dióxido de Azufre en las 4 Estaciones de Muestreo

▲ estación # 1 —△— estación # 2 ● estación # 3 —○— estación # 4



periodos de muestreo

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El mayor valor promedio de contaminación por SO_2 se obtuvo en la estación de muestreo N°1 ubicada en la estación meteorológica del SENAMHU "Cahuide" (en la Av. Salaverry), la cual se encuentra en una zona clasificada como comercial. La concentración promedio de SO_2 en esta estación fue de 0,01856 ppm.

Este resultado era esperado; la concentración de SO_2 en esta estación debía ser más alta que en las otras estaciones de muestreo por las características de la zona, donde existe un nutrido tránsito vehicular y por los vientos encajonados por los edificios existentes favoreciendo la acumulación del contaminante en esta zona.

Sin duda, la contaminación por SO_2 en esta estación de muestreo se debe primordialmente a los gases de combustión emanados por las abundantes unidades de transporte automotor que circulan cerca de la estación.

Una observación importante es que en el mes de Mayo durante los muestreos 17, 18 y parte del 19, el tránsito vehicular fue restringido por la Av. Salaverry por obras de reparación de pistas. Los valores bajos de contaminación obtenidos en estos muestreos en la estación N°1, se relacionan directamente con esta disminución del tránsito vehicular.

La estación de muestreo en la que se obtuvo el menor valor promedio de contaminación por SO_2 fue la N°2, ubicada en la estación meteorológica "Hipólito Uanue" de la Universidad Católica del Perú,

ubicada en una zona clasificada como residencial. Este valor fue 0,00888 ppm .

En esta estación, como se observan en los gráficos N° 2 y 5, se obtuvieron los menores valores de contaminación por SO₂; sin embargo, los menores valores esperaban obtenerse en la estación N°4 clasificada como rural cuya concentración promedio de SO₂ fue de 0,01243 ppm valor mayor inclusive que el correspondiente a la estación N°3 (0,01121 ppm) clasificada como semicomercial. Se explicarán estos resultados:

En primer lugar, en la estación N°2 (residencial) ubicada en la Universidad Católica, las 2 avenidas más cercanas se encuentran algo distantes de la estación de muestreo. Esta estación tiene un clima húmedo por su cercanía al mar siendo algo frecuente ligeras precipitaciones en los meses fríos que contribuyen a limpiar el ambiente. Además cerca a ella existen importantes áreas verdes con árboles en las cuales no se practican labores de cultivo, sirviendo como descontaminantes de la zona.

Por el contrario, en la estación N°4 (rural) ubicada en la Universidad Agraria, a pesar que la avenida más próxima está algo distante, sin embargo, las características de los vientos existentes en la zona con dirección Oeste y NO, transportan los gases contaminantes de esta avenida en la dirección donde se encuentra instalada la estación de muestreo. La topografía del lugar es un factor importante en la obtención de estos resultados, ya que esta zona está rodeada de cerros que impiden el desplazamiento del viento y no permiten que se renueve la masa de aire de la zona, provocando un estancamiento de esta (como se observa en los mapas N°2, 3 y 4) y como consecuencia la acumulación del contaminante. El clima seco existente en esta zona (casi no llueve en todo

el año) y las labores agrícolas que se realizan cerca de la estación, donde se usan tractores que despiden gases de combustión e incluyen la quema frecuente de maleza y forraje, son también factores que se relacionan con los resultados obtenidos.

En la estación N°3 (semicomercial) donde se esperaba una concentración de SO_2 más alta que la obtenida, influyó la dirección del viento (S y SO) el cual viene del mar hacia la estación sin atravesar zonas importantes de emisión de contaminantes (mapas N° 2, 3 y 4). La zona comercial próxima (Av. Colonial) no tiene efectos contaminantes en la estación ya que se encuentra ubicada al NNO de esta, esto significa que los vientos se desplazan siempre de la estación de muestreo a la zona comercial; lo contrario no ocurre.

Una observación muy importante es el aumento del valor de la concentración promedio de SO_2 en el ambiente de las 4 estaciones de muestreo, en el periodo del 11 de diciembre al 08 de Enero.

Esta elevación del valor de la contaminación se debe a la fiesta de Año Nuevo, en la cual, como se sabe, se queman indiscriminadamente abundantes y diversos materiales, siendo los neumáticos de automóviles los que en mayor cantidad se queman. Estos neumáticos, como es sabido, contienen azufre proveniente del proceso de vulcanización del caucho, el cual al ser quemado desprende abundantes gases carbónicos con un alto contenido de SO_2 .

En este sentido cabe recalcar que, siendo esta elevación del grado de contaminación por SO_2 causada por la quema indiscriminada de neumáticos principalmente, sólo en un día, sin embargo eleva el valor

promedio del período de muestreo en un 70% respecto al valor promedio obtenido durante todo el monitoreo.

La concentración máxima de SO_2 en todo el monitoreo se obtuvo en la estación N°1 (Estación Calhude del SENAMHU en la Av. Salaverry, Jesús María), en el período de muestreo del 11 de Diciembre al 08 de Enero y su valor fue de 0,03076 ppm. Este valor aunque está por debajo del límite permisible (0,057 ppm para 24 horas de exposición, según lo establecido por el Instituto de Salud Ocupacional⁽⁸⁾) es preocupante por que demuestra que frente a condiciones adversas podrían presentarse niveles de contaminación más cercanos al límite permisible o superar este valor inclusive, con consecuencias inesperadas para la salud de la población. Esta alta concentración de SO_2 , como ya se explicó, se debe a la contaminación generada durante las fiestas de fin de año.

La mínima concentración de SO_2 fue registrada en la estación de muestreo N°2 (estación meteorológica de la Universidad Católica "Hipólito Unanue") cuyo valor fue de 0,00199 ppm. Esta se obtuvo en el período de muestreo del 30 de Julio al 13 de Agosto y su bajo valor se debe a las condiciones climatológicas de ese período, como son la baja temperatura y la humedad reinante por los meses de invierno; esta influencia del clima se explica más abajo.

Es interesante notar la disminución de la concentración de SO_2 en los meses de invierno (Mayo - Agosto) en las estaciones de muestreo 2, 3 y 4. Si bien la disminución en la concentración de SO_2 no es muy notoria, se evidencia en los resultados obtenidos mostrados en los gráficos N° 2, 3

y 4. Esta disminución de la contaminación se debe a que en los meses de invierno se presentan precipitaciones que aunque no son muy intensas, son algo frecuentes. Estas precipitaciones limpian la atmósfera al solubilizar y arrastrar los contaminantes a tierra.

Sin embargo, en la estación N°1 no se aprecia esta disminución en la contaminación por SO_2 , debido a que en esta estación de muestreo la presencia del gas contaminante es más severa y proviene, como ya se dijo, casi exclusivamente del tránsito vehicular existente en la zona; aparte de las características de la misma que por la presencia de edificaciones altas, se genera un aumento de la contaminación ambiental al acumularse los contaminantes en el aire, el que queda encajonado, sin poder regenerarse. En este caso, a la vez que las precipitaciones limpian el aire, se continúa emitiendo cada vez más contaminante.

Respecto al Factor de Correlación, los valores obtenidos varían desde 0,01770 hasta 0,03897 según sean las condiciones meteorológicas de la zona.

Los Factores de Correlación promedio en las cuatro estaciones son:

Cuadro N°9
Factor de Correlación Promedio en Cada Estación

Estación N°	Fc prom
1	0,02964
2	0,02134
3	0,02125
4	0,02500

El factor de correlación establecido por el ISO (Instituto de Salud Ocupacional) tiene un valor igual a 0,0250. Vemos que este valor está muy cercano a los valores promedio obtenidos en las 4 estaciones de muestreo, es más, coincide con el valor obtenido en la estación N°4. Sin embargo, cabe recalcar la importancia que tiene conocer el valor exacto del Factor de Correlación, ya que un valor asumido constante convertirá los Índices de Sulfitación obtenidos en diferentes condiciones atmosféricas, en valores de concentración sin tener en cuenta que las condiciones de muestreo fueron diferentes en cada caso.

5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que la contaminación por SO_2 en la ciudad de debe principalmente al elevado tránsito automotor existente en ella. Esto se refleja en el resultado obtenido en la estación N°1 ubicada en una zona clasificada como comercial, en la cual la alta contaminación por SO_2 es producto del alto flujo vehicular existente en este tipo de zonas; y el problema se ve agravado con los continuos congestionamientos y lentitud en el tránsito vehicular.
- Las zonas comerciales de la ciudad, de características similares a la estación N°1 (tales como las avenidas Abancay, Alfonso Ugarte, Caquetá, Grau, Tacna, Javier Prado, Plaza 2 de Mayo, etc., por mencionar algunas), pueden presentar un índice de contaminación promedio alrededor de 0,0185 ppm de SO_2 , valor que puede ser mayor o menor en un día, según sea mayor o menor el tránsito y/o las congestiones vehiculares.
- Los valores promedio de contaminación por SO_2 obtenidos en este trabajo están por debajo del valor permisible (0,057 ppm para 24 h. de exposición según el ISU); los niveles de contaminación en las zonas comerciales constituyen el 33% de este valor y es seguro que en algún determinado instante la concentración de SO_2 en el ambiente haya alcanzado valores más próximos al permisible.
- Las zonas rurales aledañas a la ciudad, como la estación N°4, no están libres de la contaminación por SO_2 ; ya que si las condiciones

atmosféricas son adversas, si existe alguna vía de transporte automotor cercana, si se usan maquinarias en las labores agrícolas y se abusa de la quema de desechos agrícolas y basura, se pueden alcanzar concentraciones de SO_2 que si bien no son altas, pueden superar los valores encontrados en zonas urbanas no comerciales como las estaciones N° 2 y 3.

- ♦ Respecto al monitoreo del contaminante SO_2 , es importante conocer las características meteorológicas y urbanas que rodean a las estaciones de muestreo para poder interpretar y explicar los resultados obtenidos en ellas. Eventualmente, no se puede instalar una estación de muestreo en cualquier lugar seleccionado, ya que para calcular los valores exactos de la concentración de SO_2 a partir de los índices de sulfatación obtenidos mediante las bujías de peróxido de plomo se necesita conocer los parámetros meteorológicos durante el tiempo de muestreo y a no ser que se cuente con el instrumental necesario, se deben instalar en estaciones meteorológicas tal como se hizo en este trabajo.
- ♦ El método de las bujías de plomo empleado en este trabajo, demostró ser un método de muestreo conveniente ya que no tiene un costo elevado y con él se pueden determinar concentraciones muy pequeñas de SO_2 ; siendo su desventaja que necesita periodos de muestreo relativamente largos.

6. RECOMENDACIONES

- Es necesario que este tipo de monitoreo se efectúe permanentemente para tener un conocimiento de la variación de la contaminación ambiental, poder alertar en caso haya un aumento excesivo en estos valores y determinar, si es necesario, la fuente que genera dicho aumento, para que se puedan tomar las medidas del caso.
- Para seleccionar los lugares donde se instalarán estaciones de muestreo, es importante (antes de instalarlas) estudiar las características urbanas de la zona en lo referente al tránsito vehicular, existencia de edificaciones altas, áreas verdes, avenidas importantes cerca y algo distantes de la zona; así como el comportamiento de los vientos, factor que es muy importante en la explicación de los resultados que se obtendrán.
- Si bien, los niveles de contaminación encontrados en este trabajo no son alarmantes, se deben tomar las medidas necesarias para prevenir un aumento peligroso de la contaminación por SO_2 ; ya que como se mencionó, anteriormente, la mejor solución al problema de la contaminación es justamente prevenirla.
- Se debe hacer una campaña para mejorar los hábitos de la población y evitar la quema de gran cantidad de neumáticos durante las fiestas de Año Nuevo.
- Surge como una medida precautoria de una contaminación severa, que se norme la no utilización de vehículos que emiten una gran cantidad de gases tóxicos e irritantes (entre ellos el SO_2), ya que como

se dijo, estos son una de las principales fuentes de contaminación en la ciudad.

- ♦ Urge también que el tránsito vehicular en la ciudad sea reordenado, para evitar la lentitud de este y evitar los grandes congestionamientos, dos problemas que agravan otro problema, el de la contaminación; ya que por estos motivos se genera un aumento de la concentración de los gases contaminantes.
- ♦ Es imprescindible que las autoridades tomen cartas en el problema de la contaminación ambiental, ya que los organismos existentes para ese fin sólo trabajan en lo referente a la medición de algunos contaminantes, y no difunden sus resultados ni hacen una campaña alertando a la población de los efectos que traería consigo, niveles de contaminación mayores a los existentes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- (1) ASTM, "Standard Method For Evaluation Of Total Sulfation In Atmosphere By The Lead Peroxide Candle", ASTM Designation: D 2010-65 (1965).
- (2) ASTM, "Recommended Practice For Planning The Sampling Of The Atmosphere", ASTM Designation: D 1357-57 (Reapproved 1967).
- (3) ASTM, "Recommended Practices For Sampling Atmospheres For Analysis Of Gases And Vapors", ASTM Designation: D 1605-60 (1960).
- (4) Cotton y Wilkinson, "Química Inorgánica Avanzada", Edit. Limusa, México 1986.
- (5) Del Giorgio J. A., "Contaminación Atmosférica: Método De Vigilancia y Redes De Vigilancia", Ed. Alhambra, España 1977.
- (6) El Peruano Diario Oficial, "Informe Final De La Comisión Multisectorial", Informe De La Comisión Multisectorial Encargada De Estudiar El Problema De La Contaminación Ambiental En La Ciudad De Ilo y Los Valles De Ilo, Tambo y Locumba y De La Bahía De Ite, 73291 (1989).
- (7) Holguín Meneses J. E., Quintanilla L. U. R. "Contaminación Atmosférica Por SO₂", Informe Del Curso Seminario De Tesis De la Especialidad De Química, Facultad De Ciencias De La UIN (1989).

- (8) ONSO, "Salud Ocupacional". Revista Del Instituto Nacional De Salud Ocupacional, 19, 40 (1974).
- (9) Kutz M., "Measurement Of Air Pollution", World Health Organization, Suiza 1969.
- (10) Kolthoff J. M. "Tratado De Química Analítica", Ed. Nigar, USA 1960.
- (11) Meyer Paul L., "Probabilidad Y Aplicaciones Estadísticas", Dep. De Matemáticas De La Universidad Estatal De Washington.
- (12) Liang S.J., Sterling C.V., Galloway T.R., "Evaluation Of The Effectiveness Of The Lead Peroxide Method For Atmospheric Monitoring Of Sulfur Dioxide", J. of the Air Pollution Control Assoc. 23, 605 (1973).
- (13) Quesada Pucheco J. M., "Estudio Del Confort Climático En Lima Metropolitana Y Callao", Tesis Para Optar El Título De Ingeniero Meteorólogo, Univ. Nac. Agraria La Molina (1987).
- (14) Quispe Paredes L., "Monitoreo De Dióxido De Azufre En Aire Contaminado Mediante Las Bujías Reactivas De Peróxido De Plomo", Rev. Técnica De La UNO 3, 33 (1986).
- (15) Ross R. D., "La Industria Y La Contaminación Del Aire", Ed. Diana, México 1974.
- (16) Seinfeld, John H., "Air Pollution: Physical And Chemical Fundamentals", Mc Graw Hill Book Co., New York 1975.

- (17) Silverman Leslie. "Industrial Air Sampling And Analysis", Chemistry And Toxicology Series; Bulletin N°1.
- (18) Stern Arthur C. "Air Pollution" I y II, Academic Press 3^{era} Edic., New York.
- (19) Vizcarra Andrew M. A., "Tecnosfera: La Atmósfera Contaminada Y Sus Relaciones Con El Público", Lima 1982.
- (20) Vogel Arthur J., "Química Analítica Cuantitativa", Edit Kapelusz, Buenos Aires 1960.
- (21) World Health Organization, "Selected Methods Of Measuring Air Pollutants", Génova 1976.