



**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL**

## **TESIS**

**“DETERMINACIÓN Y EVALUACIÓN DEL ESPESOR  
ÓPTICO DE AEROSOL Y SU INFLUENCIA EN EL AIRE EN  
LA TEMPORADA SECA EN LA CIUDAD DE HUANCAYO  
EN EL AÑO 2015”**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**BERLY FRANCISCO BERRIOS DUEÑAS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**LIMA - PERÚ**

**2017**

## **DEDICATORIA**

### **Dedico esta tesis**

A mi hija Sofía, ¡¡por ser el motor de cada día!! Es mi mayor logro y lo mejor que me paso en la vida.

A mis padres Francisco y Silvia por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre.

A mi mamita Yolita por hacer de mí una mejor persona a través de sus consejos, enseñanza y amor.

A mis hermanos por su apoyo y confianza en todo lo necesario para cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

A todo el resto de mi familia, y amigos que de una y otra manera han llenado de sabiduría para terminar la tesis.

A todos en general por darme el tiempo para realizarme profesionalmente.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, agradezco a la prestigiosa Universidad Alas peruanas por haberme aceptado ser parte de ella y abierto las puertas de su seno científico para poder estudiar mi carrera, así como también a los diferentes docentes que me brindaron de sus conocimientos y su apoyo para seguir día a día hasta lograr mi objetivo.

También quisiera agradecer sinceramente al Ing. Edgar Espinoza por su esfuerzo y dedicación.

Sus conocimientos, sus orientaciones su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y motivación han sido fundamentales para mi formación como investigador.

Él ha inculcado en mi un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación completa.

A su manera, ha sido capaz de ganarse mi lealtad mi admiración, así como sentirme en deuda con el por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado la realización de esta tesis.

Y para finalizar agradezco a todos los que fueron mis compañeros de clase durante todos los niveles de universidad ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado en un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

## RESUMEN

Durante la 18va expedición Peruana realizada a la Antártica, se realizaron estudios detallados sobre los aerosoles, sobre todo del Espesor Óptico de Aerosol (AOD), es así que tomando como bases a estos estudios, se inició una pequeña campaña de mediciones y monitoreo, realizado en la región Andina del Perú, del resultado de esta campaña de mediciones se logró obtener muchas datas sobre mediciones de Índice UV, Ozono y Aerosoles. A continuación se describe los resultados del estudio de los aerosoles, obtenidos en las mediciones y monitoreos realizada durante los meses de Mayo, Junio, Julio, Agosto y Setiembre 2015, en la Región Andina – Huancayo, que se ubica a 12° de latitud Sur.

La determinación del espesor óptico del aerosol, es un parámetro bajo el cual es posible determinar la presencia de aerosoles de origen industrial, antropogénico, quema de biomasa, u otros, producto del transporte de masas atmosféricas, hacia una zona, por lo general debido a pequeños aumentos de concentraciones de aerosol debido a la actividad volcánica, la neblina, el polvo, o sales del mar o transporte de contaminantes puede perturbar el equilibrio del balance de energía en estas regiones.

El instrumental utilizado para la determinación de las propiedades físicas, fue un fotómetro solar SP02-L, este fotómetro se encuentra dentro del marco instrumental del Año Polar Internacional. Además este fotómetro dispone de 4 canales 412, 500, 675 y 862 nm lo que ha permitido hasta el momento medir espectros de irradiancia directa. Las observaciones fueron realizadas entre las 9 a.m. y 12 p.m. que corresponden a ángulos cenit solar inferiores a 45°, y teniendo como consideración principal los 30° de cielo despejado alrededor del Sol.

Para la captura de material particulado se utilizaron soportes de filtro tipo cónico (Stacked Filter Unit, SFU), con filtros de teflón y nuclepore de 0.2  $\mu\text{m}$  y 8  $\mu\text{m}$  de diámetro.

El estudio de los valores y variaciones del AOD, son importantes debido a la necesidad de conocer sus características, dado que los aerosoles en esta región son un tema de gran interés, por su influencia en el clima, debido a su importancia en el balance radiactivo, tanto por su efecto directo al dispersar la luz y su efecto indirecto al promover la formación de nubes, además de los efectos adversos en la salud.

Los valores máximos encontrados fueron: 0.58, 0.51, 0.36 y 0.31 a longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 nm respectivamente, con una desviación estándar de 0.12

Palabras Claves: Aerosol, Espesor Óptico de Aerosol, Balance Radiactivo

## ABSTRACT

During the 18th Peruvian expedition to Antarctica, detailed studies were carried out on aerosols, especially Aerosol Optical Thickness (AOD), so that, based on these studies, a small measurement and monitoring campaign was started. In the Andean region of Peru, the results of this campaign of measurements were obtained many dates on measurements of UV Index, Ozone and Aerosols. The results of the study of the aerosols, obtained in the measurements and monitoring carried out during the months of May, June, July, August and September 2015, in the Andean Region - Huancayo, which is located at 12 ° South latitude .

The determination of the optical thickness of the aerosol is a parameter under which it is possible to determine the presence of aerosols of industrial origin, anthropogenic, burning of biomass, or others, as a result of the transport of atmospheric masses, towards an area, usually due to Small increases in aerosol concentrations due to volcanic activity, haze, dust, or sea salts or transport of pollutants can disrupt the balance of energy balance in these regions.

The instrument used to determine the physical properties was a SP02-L solar photometer, this photometer is within the framework of the International Polar Year. In addition this photometer has 4 channels 412, 500, 675 and 862 nm which has allowed to measure spectra of direct irradiance. The observations were made between 9 a.m. and 12 p.m. which correspond to solar zenith angles lower than 45 °, and having as its main consideration the 30 ° of clear sky around the Sun.

For the capture of particulate material, stacked filter units (SFU) were used, with Teflon and nuclepore filters of 0.2 µm and 8 µm in diameter.

The study of values and variations of ODA are important due to the need to know their characteristics, since the aerosols in this region are a subject of great interest, due to their influence on the climate, due to their importance in the radiative balance , Both for its direct effect to disperse light and its indirect effect in promoting the formation of clouds, in addition to adverse effects on health.

The maximum values found were: 0.58, 0.51, 0.36 and 0.31 at wavelengths of 412, 500, 675 and 862 nm respectively, with a standard deviation of 0.12

Keywords: Aerosol, Aerosol Optical Thickness, Radiation Balance

# INTRODUCCIÓN

Es importante comprender de forma precisa el papel que desempeña los Aerosoles, actualmente, se ha descubierto que juegan un importante papel para la vida en la Tierra, debido a su capacidad de modificar tanto directa como indirectamente el balance radiactivo de nuestro planeta, además de ser también enormemente importantes en la química atmosférica, gracias a su gran capacidad de interacción con otros constituyentes. Para poder llegar a establecer de forma correcta su comportamiento, la comunidad científica ha emprendido una investigación exhaustiva de sus propiedades y características, mediante el estudio y monitorización de los mismos.

Dos de las propiedades más importantes de los aerosoles habitualmente estudiadas son el espesor óptico de aerosoles y la distribución en tamaños de las partículas de aerosoles. La primera de ellas es una magnitud adimensional que indica el poder que poseen las partículas de aerosol para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda. Es por tanto un parámetro fundamental para cualquier estudio de cambio climático ya que está directamente relacionada con los efectos directos de estos componentes atmosféricos.

En el monitoreo se utilizó para la determinación de las propiedades físicas, un fotómetro solar SP02-L, este fotómetro dispone de 4 canales 412, 500, 675 y 862 nm lo que ha permitido hasta el momento medir espectros de irradiancia directa. Las observaciones fueron realizadas entre las 9 a.m. y 12 p.m. que corresponden a ángulos cenit solar inferiores a  $45^\circ$ , y teniendo como consideración principal los  $30^\circ$  de cielo despejado alrededor del Sol. Para la captura de material particulado se utilizaron soportes de filtro tipo cónico (Stacked Filter Unit, SFU), con filtros de teflón y nuclepore de  $0.2 \mu\text{m}$  y  $8 \mu\text{m}$  de diámetro.



# ÍNDICE

|                |     |
|----------------|-----|
| DEDICATORIA    | i   |
| AGRADECIMIENTO | ii  |
| RESUMEN        | iii |
| ABSTRACT       | v   |
| INTRODUCCIÓN   | vii |

## CAPÍTULO I

### PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1. | Descripción de la realidad problemática | 01 |
| 1.2. | Formulación del problema                | 02 |
|      | 1.2.1. Problema general                 | 02 |
|      | 1.2.2. Problemas específicos            | 03 |
| 1.3. | Objetivo de la investigación            | 03 |
|      | 1.3.1. Objetivo general                 | 03 |
|      | 1.3.2. Objetivos específicos            | 03 |
| 1.4. | Delimitación de la Investigación        | 04 |
|      | 1.4.1. Delimitación Espacial            | 04 |
|      | 1.4.2. Delimitación Temporal            | 04 |
|      | 1.4.3. Delimitación Cuantitativa        | 04 |
| 1.5. | Justificación de la investigación       | 04 |
| 1.6. | Importancia de la investigación         | 05 |
| 1.7. | Limitaciones de la Investigación        | 05 |
|      | 1.7.1. Limitación de Recurso            | 05 |
|      | 1.7.2. Limitación de Información        | 06 |
|      | 1.7.3. Limitación de Muestra            | 06 |

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

|      |                                  |    |
|------|----------------------------------|----|
| 2.1. | Antecedentes de la Investigación | 07 |
|------|----------------------------------|----|

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.2.   | Marco Teórico  | 08 |
| 2.2.1. | La Atmosfera   | 08 |
| 2.2.2. | Características Físicas de la Atmosfera.   | 08 |
| 2.2.3. | Composición de la Atmosfera  | 10 |
| 2.2.4. | Contaminación Atmosférica.   | 11 |
| 2.2.5. | Aerosoles  | 11 |
| 2.2.6. | Los Aerosoles en la Atmosfera  | 17 |
| 2.2.7. | Caracterización de los Aerosoles   | 19 |
| 2.3.   | Marco Histórico  | 45 |
| 2.3.1. | Según Expósito Gonzáles, Francisco Javier. Determinación del espesor óptico de aerosoles mediante técnicas de teledetección en la región de Canarias. 1999.  | 45 |
| 2.3.2. | Según Montillo Rosero, Elena. Determinación de las propiedades de absorción de los aerosoles atmosféricos. Universidad de Valladolid. Facultad de Ciencias. 2010.  | 47 |
| 2.3.3. | Según Toledano, Carlos. Métodos de calibración de campo para la medida del espesor óptico de aerosoles mediante fotómetros solares. Grupo de Óptica Atmosférica. Dpto. Física Teórica, Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid.2006. | 47 |
| 2.4.   | Marco Legal  | 48 |
| 2.4.1. | Estándares de Calidad Ambiental.   | 50 |
| 2.5.   | Marco Conceptual   | 53 |
| 2.5.1. | Espesores Ópticos  | 53 |
| 2.5.2. | Espectro Visible   | 57 |
| 2.5.3. | Fotómetro Solar SP02 L Middleton   | 59 |
| 2.5.4. | Sensor OMI – Satélite AURA   | 60 |
| 2.5.5. | Colector de Aerosoles  | 60 |
| 2.5.6. | Técnica de Análisis Elemental por el Método de Plasma de Acoplamiento Inductivo ICP – MS.  | 60 |
| 2.5.7. | Filtros de Nucleopore y Teflón   | 61 |
| 2.5.8. | Dirección del Viento   | 62 |
| 2.5.9. | Masa de Aire   | 62 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 2.5.10. Método de Langley           | 64 |
| 2.6. Definición de Términos Básicos | 68 |

### **CAPÍTULO III**

#### **PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

|  |     |
|--|-----|
| 3.1. Ubicación geográfica de estudio.  | 69  |
| 3.1.1. Caracterización del área de estudio   | 69  |
| 3.2. Reseña del estudio  | 70  |
| 3.2.1. Descripción de la investigación   | 71  |
| 3.3. Tiempo de muestreo  | 71  |
| 3.4. Materiales y equipos  | 72  |
| 3.4.1. Fotómetro Solar   | 72  |
| 3.4.2. Multímetro Digital  | 73  |
| 3.4.3. Sistema Colector de Material Particulado  | 73  |
| 3.4.4. Estación Meteorológica  | 75  |
| 3.5. Metodología   | 75  |
| 3.5.1. Mediciones de radiación visible   | 75  |
| 3.5.2. Sistema de captura de material particulado  | 76  |
| 3.5.3. Técnica de análisis elemental por el método de Plasma<br>de Acoplamiento Inductivo ICP – MS | 78  |
| 3.6. Procedimiento   | 78  |
| 3.6.1. Fase de pre campo   | 78  |
| 3.6.2. Recopilación de información   | 82  |
| 3.7. Procesamiento de datos  | 94  |
| 3.7.1. Determinación del espesor óptico total por el método de Langley                             | 94  |
| 3.7.2. Determinación del espesor óptico de ozono   | 95  |
| 3.7.3. Determinación del espesor de Rayleigh   | 97  |
| 3.7.4. Determinación del espesor óptico de aerosol   | 98  |
| 3.7.5. Dirección del viento  | 100 |
| 3.7.6. Fase de laboratorio   | 103 |

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

|                            |  |     |
|----------------------------|--|-----|
| 4.1.                       | Evaluación del espesor óptico de aerosol y su influencia en el aire  | 105 |
| 4.1.1.                     | Variación horaria de la radiación visible  | 106 |
| 4.1.2.                     | Variación mensual de los espesores ópticos   | 108 |
| 4.1.3.                     | Variación mensual del espesor óptico de aerosol  | 112 |
| 4.2.                       | Dirección del viento y transporte de contaminantes   | 116 |
| 4.3.                       | Evaluación de los resultados del análisis cualitativo de la captura de aerosoles   | 117 |
| 4.4.                       | Data mensual del espesor óptico de aerosol   | 119 |
| CONCLUSIONES               |  | 120 |
| RECOMENDACIONES            |  | 122 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS |  | 123 |
| ANEXO                      |  | 127 |
| Anexo N° 1:                | Tabla N° 14. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 – L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Mayo 2015       | 128 |
| Anexo N° 2:                | Tabla N° 15. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 – L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Junio 2015      | 132 |
| Anexo N° 3:                | Tabla N° 16. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 – L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Julio 2015      | 135 |
| Anexo N° 4:                | Tabla N° 17. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 – L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Agosto 2015     | 139 |
| Anexo N° 5:                | Tabla N° 18. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 – L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Septiembre 2015 | 143 |

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

Los aerosoles, o también llamado material particulado, son una porción muy pequeña de la composición de la atmósfera. Estos son un conjunto de partículas gaseosas, sólidas o líquidas con un diámetro menor de 10  $\mu\text{m}$  que se encuentran suspendidas en la atmósfera, su concentración puede variar de entre los 0.003  $\mu\text{m}$  a más de 1000  $\mu\text{m}$  (Vergaz B. R., 2001). Estas partículas son frecuentemente encontradas en la parte más baja de la troposfera y a menudo están asociadas con la contaminación atmosférica. Según Andreae y col. (1995) los aerosoles atmosféricos juegan un rol importante en el cambio climático, influyendo en el clima de manera directa mediante la dispersión y absorción de la radiación solar produciendo un enfriamiento y calentamiento, respectivamente.

Los aerosoles son objeto de un exhaustivo estudio ya que no se conoce bien su composición ni la distribución de su tamaño. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) incluyó el espesor óptico de aerosoles en el listado básico de medidas del Programa de Vigilancia Atmosférica Mundial (GAW) (WMO, 1993). Los aerosoles también pueden producir un gran efecto en la salud de las personas en las ciudades, existe una fuerte correlación estadística positiva entre la concentración de PM<sub>10</sub> y la mortalidad diaria (Ostro y col., 1996) y entre PM<sub>10</sub> y las enfermedades respiratorias agudas en niños menores de 14 años (Ostro y col., 1999).

Algunos esfuerzos, han sido hechos sobre la identificación de aerosoles mediante métodos óptico, especialmente al realizar el análisis de los gráficos del exponente de Ångström en función del espesor óptico de aerosoles a 500 nm (Angstrom, 1929). El análisis de estos gráficos permite identificar fuentes posibles de aerosoles atmosféricos de acuerdo al catálogo OPAC: Optical

Properties for Aerosols and Clouds (M. Hess, P. Koepke, and I. Schult (1998): Optical Properties of Aerosols and clouds: The software package OPAC, Bull. Am. Met. Soc., 79, 831-844). Para complementar esta información es necesario investigar sobre la composición química de los aerosoles. Aún no se conoce la cantidad de aerosoles contribuidos por los humanos en la región andina peruana y no existen muchos estudios, pero a todo esto DIGESA inicia la declaratoria de los niveles de estados de alerta nacionales para contaminantes del aire en la ciudad de la Oroya (DIGESA 2008) sobre su dispersión y transporte, consideremos que esta ciudad se encuentra a 122.6 km de la ciudad de Huancayo, y existe una gran posibilidad de transporte de contaminantes por diversos medios. Este transporte implica que los contaminantes del aire puedan alcanzar sitios tan alejados, y llevar elementos químicos nocivos, dependiendo del origen como lo demuestra el estudio de la variación estacional de ozono troposférico (Suárez y col., el Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemadas de vegetación en la Amazonía, Mosaico Cient., 3, 2, 2006). Por ello este estudio cuantifica su presencia en la atmósfera durante la época seca (Mayo a Setiembre) en el año 2015 y evalúa los tipos de aerosoles presentes sobre la ciudad de Huancayo tanto por sus propiedades físicas como química, así como discute sus posibles orígenes.

## **1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema Principal**

¿Mediante la determinación y evaluación del espesor óptico de aerosol se podrá verificar la influencia en el aire en la ciudad de Huancayo en la temporada Seca en el año 2015?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Cuales serán las mediciones del espesor óptico de aerosol para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015?
- ¿Cuáles seran las propiedades opticas de los aerosoles para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015?
- ¿Cuál sera la composición química elemental de los aerosoles para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015?
- ¿Cuáles serán los datos mensuales obtenidos del espesor óptico de aerosol para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015?

## **1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar y evaluar el espesor óptico de aerosol para verificar su influencia en el aire en la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015.

### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar las mediciones del espesor óptico de aerosol para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015.
- Determinar las propiedades opticas de los aerosoles para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015.
- Determinar la composición química elemental de los aerosoles para la temporada seca en la ciudad de Huancayo en el año 2015.
- Crear una data mensual del espesor óptico de aerosol de la temporada seca en la ciudad de Huancayo del año 2015.

## **1.4. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Delimitación Espacial**

El punto de ubicación de la investigación es la Universidad Alas Peruanas – Filial Huancayo, en la sede principal, los equipos para el monitoreo se ubico en el techo de la Universidad, en un área despejado. El área urbana del distrito de Huancayo se encuentra a una latitud Sur de 12.04 ° y a una longitud Oeste de 75.34 °, a 3259 msnm. La Universidad está influenciada por la presencia de un alto flujo del parque automotor, mínima presencia industrial y actividad comercial.

### **1.4.2. Delimitación Temporal**

Este estudio se realizó en un periodo de 5 meses, a partir del mes de Mayo del 2015 hasta Setiembre 2015. Las mediciones se realizaron entre las 9am a 12pm, horas de la mañana de mayor radiación solar.

### **1.4.3. Delimitación Cuantitativa**

La delimitación cuantitativa esta dada por la contaminación por aerosoles en la temporada seca en la ciudad de Huancayo, que influye directamente en la ubicación del estudio.

## **1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Actualmente, se ha descubierto que los aerosoles juegan un importante papel para la vida en la Tierra, debido a su capacidad de modificar tanto directa como indirectamente el balance radiativo de nuestro planeta, además de ser también enormemente importantes en la química atmosférica, gracias a su gran capacidad de interacción con otros constituyentes.



Incluso el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), en su Tercer Informe Científico, recomendó un mayor estudio sobre los aerosoles debido a la significativa incertidumbre atribuida a ellos en el forzamiento radiativo terrestre y así como a su bajo grado de comprensión científica (IPCC, 2001).

Además, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) incluyó el espesor óptico de aerosoles en el listado básico de medidas del Programa de Vigilancia Atmosférica Mundial (GAW) (WMO, 1993). Ya que no se conoce bien su composición, ni la distribución de su tamaño de los aerosoles, es necesario realizar un exhaustivo estudio ya que los aerosoles también pueden producir un gran efecto a la salud de las personas en las ciudades, sobre todo, se cree que es un gran responsable de las enfermedades respiratorias agudas en niños menores a 14 años.

## **1.6. IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN**

Es importante estudiar a los aerosoles, sea en su concentración, comportamiento, propiedades químicas y físicas, así como su origen, con la finalidad de identificarlos para conocer su contribución como agente contaminante del aire.

## **1.7. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.7.1. Limitación de Recurso**

La limitación de recurso, para esta investigación, fue que no se contaba con laboratorios adecuados para los análisis que se requieren para la determinación química de los aerosoles.

### **1.7.2. Limitación de Información**

La información de primera mano o de calidad es de poco acceso, tanto en investigaciones científicas, sea en la biblioteca o en el internet.

### **1.7.3. Limitación de Muestra**

Obtener la muestra a tratar en la época seca fue difícil por las condiciones climáticas, debido a la presencia de nubosidad y lluvia en varios días de los 5 meses de monitoreo. Adicionalmente, solo se pudo monitorear de lunes a viernes, por condiciones que la Universidad brindó para este estudio.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

Con objeto de comprender de forma precisa del papel desempeñado por los aerosoles atmosféricos y poder llegar a establecer de forma correcta su comportamiento, la comunidad científica ha emprendido una investigación exhaustiva de sus propiedades y características, mediante el estudio y monitorización de los mismos.

Dos de las propiedades más importantes de los aerosoles habitualmente estudiadas son el espesor óptico de aerosoles y la distribución en tamaños de las partículas de aerosoles. La primera de ellas es una magnitud adimensional que indica el poder que poseen las partículas de aerosol para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda. Es por tanto un parámetro fundamental para cualquier estudio de cambio climático ya que está directamente relacionada con los efectos directos de estos componentes atmosféricos. La segunda indica la forma en la que las partículas de cierta masa de aire se encuentran distribuidas en función de su radio, lo cual es especialmente importante en la determinación de los efectos indirectos de los aerosoles, como sobre las propiedades de las nubes. Este parámetro es asimismo necesario para poder modelar la interacción de estas partículas con la radiación.

La medida de estos parámetros se realiza principalmente mediante sensores capaces de determinar la atenuación sufrida por la radiación solar al atravesar la atmósfera. Para ello, es necesario que estos sistemas miden la componente directa de la radiación solar visible, por lo que suele ser imprescindible el empleo de seguidores solares que mantengan al instrumento perfectamente alineados con el Sol, o bien otro mecanismo que permita eliminar la componente difusa de la global. La bondad en las

medidas vendrá dada en gran medida por la forma en la que se haga el seguimiento solar así como por la calidad del equipo empleado (sistema óptico - fotómetros). La precisión en las medidas también exige la intercomparación periódica con patrones estándar así como con otros instrumentos. Este tipo de medidas constituye, en la actualidad, la forma más precisa de medir este tipo de parámetros, dado que permite un mejor control de todas las variables involucradas en el proceso.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

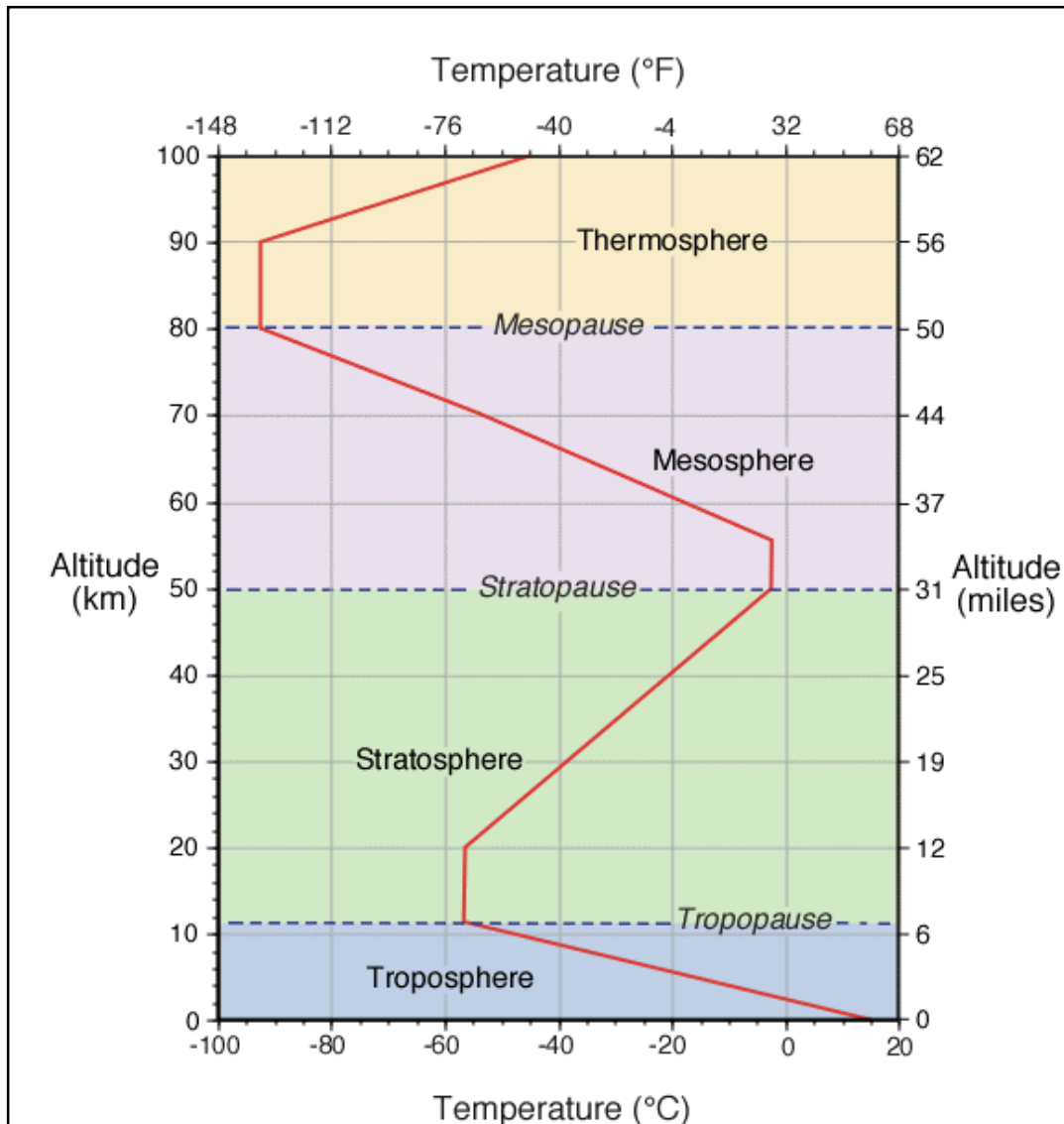
### **2.2.1. La Atmosfera**

La atmosfera es un componente vital del ambiente humano. Transmite y altera la energía solar que controla nuestro clima; actúa como escudo protector contra los peligrosos impactos de meteoritos y radiación penetrante, como los rayos ultravioleta del sol; y transporta semillas y esporas. Sus gases suministran las materias primas para la vida misma (Henry y Heinke, 2000).

### **2.2.2. Características Físicas de la Atmosfera**

La ciencia atmosférica trata del movimiento de masas de aire en la atmósfera, del balance de calor atmosférico y de la composición y reacciones químicas atmosféricas. La atmósfera también regula la temperatura de la Tierra, atemperando las variaciones térmicas entre el día y la noche. La presión y densidad de la atmósfera decrece de un modo gradual. Sin embargo la temperatura de la misma varía de un modo mucho más complejo, como se ilustra en la figura N° 1.

**Figura N°1. Variación esquemática de la temperatura de la atmósfera terrestre con la altura.**



Obsérvese que hay zonas en que la variación de la temperatura con la altura es constante separada por capas en que la temperatura misma no varía. Las regiones en que el gradiente de temperatura es constante determinan las distintas capas de la atmósfera. Las características de la atmosfera varían ampliamente con la altitud, el tiempo (la estación), situación (la altitud) e incluso la actividad solar.

### 2.2.3. Composición de la Atmosfera

La atmósfera es una mezcla de gases con numerosas partículas en suspensión, unas sólidas y otras líquidas. La atmósfera baja es eléctricamente neutra y contiene pocos iones libres; en su mayoría, se compone de moléculas. En cambio, la atmósfera alta está extensamente ionizada; muchos gases se descomponen en átomos individuales o en radicales libres como el hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ). A causa del papel especial que desempeña, el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) suele tratarse por separado. En este caso se dice que la atmósfera está compuesta de aire seco y vapor de agua, además de partículas en suspensión (Henry y Heinke, 2000).

Las partículas más pequeñas dentro de la atmósfera forman un aerosol (esto es, partículas de tamaño coloidal en un gas) pues no pueden precipitarse con rapidez. Las partículas detectables más pequeñas tienen un radio de  $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Son bastante numerosas en las zonas continentales, en especial en las ciudades.

En el mar el número de partículas es menor, pero el aire marítimo contiene muchas de mayor tamaño que no son cloruros y que desempeñan un papel fundamental en la condensación. Las partículas de cierto tamaño reflejan la luz solar de manera difusa formando las condiciones de visibilidad reducida que se conocen como bruma, neblina o niebla. Muchas partículas atmosféricas de hecho son líquidas, pues atraen la condensación de vapor de agua y se disuelven (Henry y Heinke, 2000).

Sin el aerosol, las nubes, la lluvia y la nieve no se podrían formar. Pero el exceso de partículas, provenientes del humo de las chimeneas, el escape de los automóviles o la tierra suelta, reduce la visibilidad y pueden causar problemas de salud. La mayor parte de la contaminación del aire es de este tipo.

#### **2.2.4. Contaminación Atmosférica**

Los contaminantes del aire son sustancias que, cuando están en la atmosfera, afectan de manera adversa la salud de humanos, animales, plantas o vida microbiana; dañan materiales, o interfieren con el disfrute de la vida y el uso de propiedades. En ciertos casos no controlamos las emisiones de manera apropiada.

Debemos depender entonces de sus dispersión y de los subsecuentes procesos naturales de limpieza de la atmosfera para evitar concentraciones excesivas de contaminantes, las cuales causaran efectos indeseables (Henry y Heinke, 2000).

#### **2.2.5. Aerosoles**

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera cuyos tamaños pueden oscilar entre las centenas y las milésimas de micra. Ejemplos de este tipo de constituyente atmosférico son los humos provenientes de la combustión industrial, incendios forestales, tráfico, etc.

Pero la mayor parte de los mismos en la atmósfera poseen un origen natural; los ejemplos más notorios pueden ser las partículas de sal del rocío marino, o el polvo de los desiertos, que con frecuencia es transportado a enormes distancias. La cantidad total de aerosoles que se encuentran en suspensión en el aire varía desde menos de 1 mg/m<sup>3</sup>, valor que se observa sobre los casquetes polares o en la troposfera oceánica libre, hasta 1 mg/m<sup>3</sup> en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales.

Su estudio comenzó hace mas de sesenta años, pero no ha sido realizado de forma sistemática hasta hace unos treinta aproximadamente, por lo que nuestro conocimiento sobre ellos es

todavía limitado. No obstante, desde hace bastante tiempo se tenía certeza de que eran los responsables de los atractivos colores de los atardeceres, de la calima de los paisajes o de la neblina contaminada (smog) de las grandes ciudades.

Actualmente, se ha descubierto además que juegan un importante papel para la vida en la Tierra, debido a su capacidad de modificar tanto directa como indirectamente el balance radiativo de nuestro planeta, además de ser también enormemente importantes en la química atmosférica, gracias a su gran capacidad de interacción con otros constituyentes, tal y como se puede ver en la Tabla N° 1.

No ha sido fácil para la comunidad científica valorar la influencia de estas partículas dado que, a diferencia de otros constituyentes atmosféricos como por ejemplo los gases traza, forman una clase de sustancias con diferentes formas, composiciones químicas, distribuciones de tamaño y propiedades ópticas. Además presentan una enorme variabilidad tanto espacial como temporal de sus concentraciones, llegando incluso a presentar varios órdenes de magnitud de diferencia. No obstante, numerosos autores como Charlson et al. (1992), Kiehl y Briegleb (1993), Taylor y Penner (1994), Chyleky Wong (1995) y recientemente Díaz et al. (1998), han podido obtener mediante modelos que, en general, el efecto producido por los aerosoles es comparable en magnitud al originado por los gases de efecto invernadero, pero con signo contrario, ver Figura N° 2.



**Tabla N° 1. Principales gases de efecto invernadero y sus efectos según Wuebbles et al. (1989)**

| <b>Gas Traza</b>                 | <b>Tiempo de Vida en la Atmósfera (años)</b> | <b>Efecto sobre la química atmosférica</b>         |
|----------------------------------|--|--|
| CO <sub>2</sub>                  | 120  | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| CH <sub>4</sub>                  | 10   | Reacciona con OH, O <sub>3</sub> y CO <sub>2</sub> |
| CO                               | -  | Afecta al OH, O <sub>3</sub> y CO <sub>2</sub>     |
| N <sub>2</sub> O                 | 150  | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| NO <sub>4</sub>                  | -  | Afecta al OH y al O <sub>3</sub>                   |
| CFC – 11                         | 65   | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| CFC – 12                         | 130  | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| CFC – 113                        | 90   | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| HCFC – 22                        | 15   | Reacciona con OH y Afecta al O <sub>3</sub>        |
| CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> | 6  | Reacciona con OH y Afecta al O <sub>3</sub>        |
| CF <sub>2</sub> ClBr             | 25   | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| CF <sub>3</sub> Br               | 110  | Afecta al O <sub>3</sub>                           |
| SO <sub>2</sub>                  | -  | Reacciona con OH y aumenta los aerosoles           |
| CH <sub>3</sub> SCH <sub>3</sub> | -  | Reacciona con OH y es precursor de SO <sub>2</sub> |
| CS <sub>2</sub>                  | -  | Precursor de COS y aumenta los aerosoles           |
| COS                              | -  | Reacciona con OH y aumenta los aerosoles           |
| O <sub>3</sub>                   | -  | Afecta a la química atmosférica                    |

Es decir, mientras estos gases provocan finalmente un calentamiento de la Tierra, los aerosoles pueden dar lugar a un enfriamiento de la misma. En ciertas circunstancias, sin embargo, algunos autores como Tegen y Lacis (1996) han hecho constar la necesidad de establecer la altitud de la capa de determinado tipo de aerosoles para que dicho signo sea efectivamente negativo.

Los aumentos de temperatura pronosticados para finales del milenio, debido principalmente al incremento en las cantidades globales de CO<sub>2</sub> desde la Revolución Industrial, se han visto incumplidos en gran medida. Una de las causas principales de error en estas predicciones se dirige al inadecuado papel que se le ha hecho desempeñar a los aerosoles, que como se ha indicado han podido compensar parcialmente el efecto invernadero.

La forma en la que las partículas de aerosol son capaces de modificar directamente el balance de radiación de nuestro planeta se basa en el hecho de que son capaces de absorber y dispersar la radiación solar que incide sobre ellas. El tamaño de estas partículas es similar al de la longitud de onda de la radiación proveniente del Sol, por lo que pueden interactuar eficazmente con ésta, reduciendo la irradiancia solar total que finalmente alcanza la superficie de la Tierra. Esta atenuación puede llegar a ser especialmente significativa a nivel regional, dependiendo de la proximidad a la que se encuentren dichas zonas a determinadas fuentes de aerosoles (Ball y Robinson, 1982).

Por otra parte, los aerosoles también pueden alterar indirectamente el balance energético del planeta, al modificar las propiedades de las nubes, principales fuentes del albedo planetario, el cociente entre la radiación solar incidente y la reflejada. Los núcleos de condensación de las nubes (CCN), es decir, las partículas sobre las que se fija el agua líquida que da lugar a la nube, están constituidas por aerosoles. Twomey (1977) y posteriormente Charlson et al. (1987) han propuesto que dado un contenido en agua, si se aumenta el número de núcleos de condensación, se provoca que el agua líquida disponible se distribuya en un mayor número de pequeñas gotas, aunque de menor dimensión que las que habría con menos CCN. Esto produce, finalmente, un aumento en el albedo de la nube en cuanto a la radiación de onda corta, pero muy poca o ninguna variación en la de onda larga. Este efecto se acusa especialmente en nubes de espesor

moderado tales como estratos y estrato-cúmulos marinos que cubren aproximadamente el 25% de la superficie de la Tierra. Por otro lado, un aumento en el número de CCN puede retardar la velocidad de crecimiento condensacional de las pequeñas gotas de agua que constituyen la nube, dado que existen más gotículas compitiendo por la misma cantidad de agua disponible. Esta ralentización puede retrasar e incluso evitar el inicio de los procesos de colisión-coalescencia necesarios para la producción de precipitaciones (Takahashi, 1976; Porter, 1988). Finalmente, Albrecht (1989) ha indicado que los cambios inducidos por los CCN en la precipitación pueden también afectar a la cobertura nubosa regional y por tanto al albedo.

Por último, dado el tamaño de las partículas a las que nos estamos refiriendo, es fácil que dichos componentes atmosféricos penetren en nuestras vías respiratorias y queden adheridos en los alvéolos y bronquiolos pulmonares. Esto puede llegar a ser especialmente grave en personas con problemas respiratorios. Así, han llegado a establecerse algunas enfermedades respiratorias debido a estos agentes, bajo estas condiciones meteorológicas se suelen agravar enormemente cuadros de alergias y otras patologías inmunológicas.

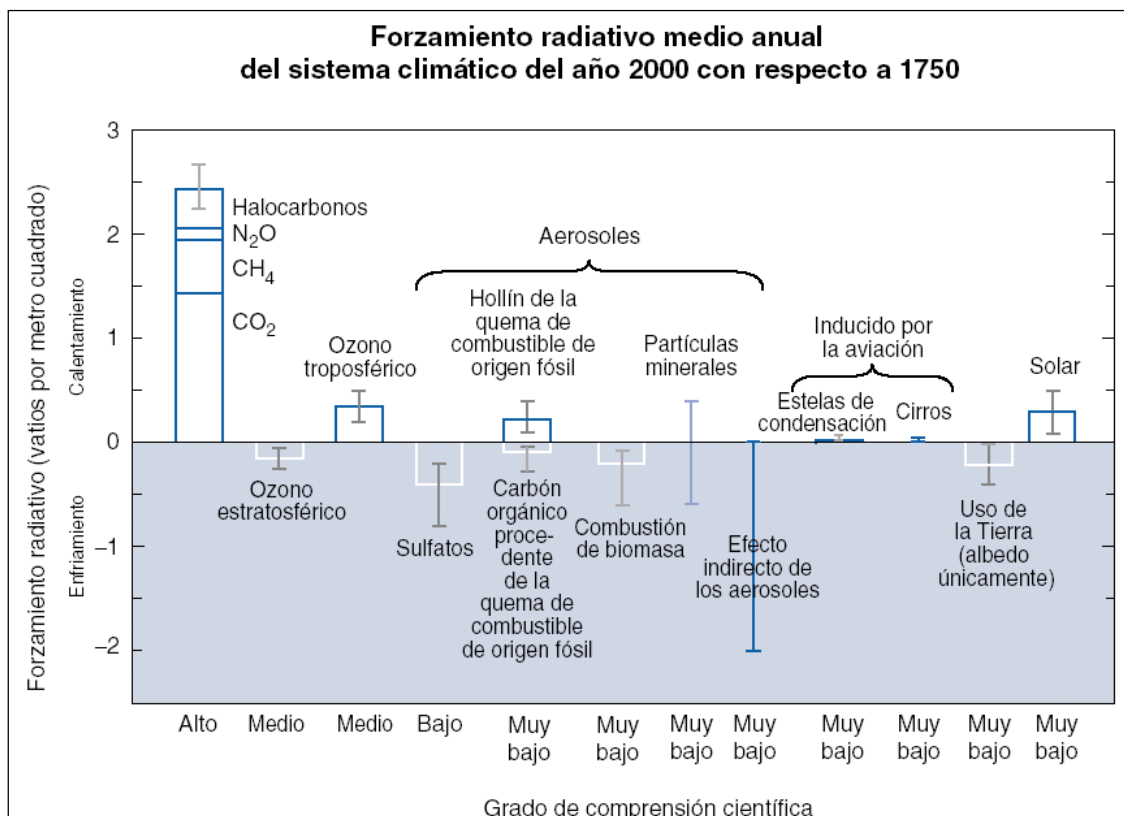
Por todo lo mencionado, podemos decir que las altas variaciones espaciales y temporales de la concentración del aerosol y sus propiedades físicas y química lo han hecho difícil de valorar cuantitativamente el impacto exacto en el clima. Es por eso que, los aerosoles son objeto de un exhaustivo estudio ya que no se conoce bien su composición ni la distribución de su tamaño.

Mediante un detallado estudio de diversas regiones espectrales es posible cuantificar elementos presentes en la atmósfera que influyen en el clima, ver figura N° 2, de entre ellos, la capa de ozono y los aerosoles, que en términos generales, tendrían un efecto de

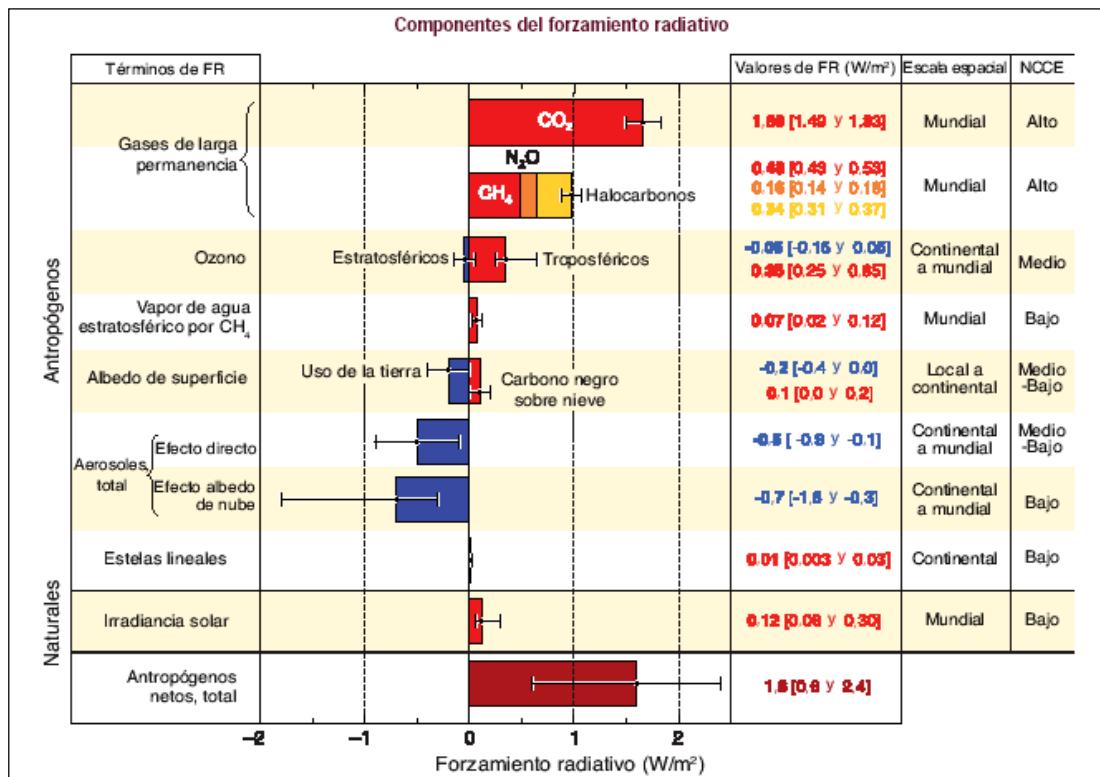
enfriamiento, pero también aportarían importante incertidumbre en la variabilidad climática. Incluso el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), en su Tercer Informe Científico, recomendó un mayor estudio sobre los aerosoles debido a la significativa incertidumbre atribuida a ellos en el forzamiento radiativo terrestre y así como a su bajo grado de comprensión científica (IPCC, 2001).

Este punto lo podemos observar en la figura N° 2 y 3, donde se muestran los factores que fuerzan el cambio climático global, gran parte de los aerosoles ayudan al enfriamiento global, a la par se observa el grado de comprensión científica con respecto a los aerosoles, resultando ser MUY BAJO.

**Figura N° 2. Factores que fuerzan el cambio climático global y el grado de comprensión científica.**



**Figura N° 3. Componentes del forzamiento radiativo resultado de los contaminantes atmosféricos naturales y antropogénicos y el grado de comprensión científica.**



### 2.2.6. Los Aerosoles en la Atmósfera

Generalmente, el término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas (Mészáros, 1999). Los aerosoles atmosféricos, partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera con tamaños que oscilan entre las centenas y las milésimas de micra, juegan un papel fundamental para la vida en la Tierra. Esas partículas varían en tamaño, composición y origen.

Para clasificarlas se emplean sus propiedades o comportamiento aerodinámico porque: rigen el transporte y remoción de las partículas del aire; se relacionan con la deposición y eliminación dentro del sistema respiratorio; y además, se asocian con la composición química y origen (Rojas, 2005). Es necesario considerar que el término Material Particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba

todas las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro > 20  $\mu\text{m}$ ), caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera (Donisa et al., 2000).

Los aerosoles atmosféricos o Material Particulado, corresponden a partículas suspendidas en el aire cuyo tamaño es muy variado, abarcando desde los 0.001  $\mu\text{m}$  (aerosoles microscópicos) hasta los 100  $\mu\text{m}$  (aerosoles visibles).

Su importancia se debe a su capacidad de modificar tanto directa como indirectamente el balance radiactivo de nuestro planeta. Directamente, dado que pueden absorber y dispersar la radiación proveniente del Sol, alterando por tanto la relación entre la radiación que alcanza a la Tierra y la que es reflejada por ésta, el albedo. E indirectamente, puesto que son capaces de modificar las propiedades de las nubes, principales fuentes de albedo planetario. Asimismo, son enormemente importantes en la química atmosférica, gracias a su gran capacidad de interacción con otros constituyentes.

Desde hace algunas décadas se han venido produciendo altos niveles de contaminación, tanto de gases como de partículas que han afectado la salud de la población. Dado el tamaño de las partículas de las que estamos hablando, es fácil que dichos componentes atmosféricos penetren en nuestras vías respiratorias y queden adheridos en los alvéolos y bronquiolos pulmonares.

Esto puede llegar a ser especialmente grave en personas con problemas respiratorios. Tradicionalmente, los estudios de los efectos de las partículas atmosféricas (PM) sobre la salud se han enfocado al material Particulado < 10  $\mu\text{m}$  (PM10) y < 2,5  $\mu\text{m}$  (MP 2,5) de diámetro. Recientemente, sólo se ha estudiado la fracción de mayor diámetro de las PM10, macropartículas > 2,5  $\mu\text{m}$ . Comparadas con las PM 2.5, estas partículas se caracterizan por tener diferentes orígenes y composición (Casas, 2004).

## 2.2.7. Caracterización de los Aerosoles

### a) Distribución global de los aerosoles

La interacción de las fuentes, el envejecimiento y tiempo de residencia, junto con los procesos de transporte en la atmósfera conducen a una distribución global de los aerosoles atmosféricos. Es decir, si bien cualquier combinación de aerosoles es posible se observa que éstos tienden a formar unidades bien diferenciadas, formadas por tan sólo uno o muy pocos tipos de partículas de aerosol.

La Organización Meteorológica Mundial ha establecido cinco unidades o modelos básicos de aerosoles, generados a partir de las combinaciones apropiadas de las diferentes partículas de aerosol, para representar toda la atmósfera (W.M.O., 1986). Estos modelos se enumeran en la siguiente tabla N° 2.

**Tabla 2. Modelos de aerosoles básicos.**

| <b>Modelo de aerosol</b> | <b>Tipos de aerosol que la componen</b>        | <b>Porcentaje en volumen de las partículas de aerosol</b> |
|--------------------------|--|---|
| Continental              | Tipo de polvo                                  | 70  |
|                          | Soluble en agua                                | 29  |
|                          | Hollín   | 1   |
| Urbano/<br>Industrial    | Soluble en agua                                | 61  |
|                          | Hollín   | 22  |
|                          | Tipo de polvo                                  | 17  |
| Marítimo                 | Oceánico                                       | 95  |
|                          | Soluble en Agua                                | 5   |
| Estratosférico           | Gotas de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 75% | 100   |
| Volcánico                | Ceniza Volcánica o<br>(con envejecimiento):    | 100   |
|                          | Gotas de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 75% | 100   |

Esta clasificación ha resultado ser muy útil para simulaciones numéricas de códigos de transferencia radiativa. Desde un punto de vista físico existen diferentes parámetros que permiten caracterizar a los aerosoles, especialmente, el espesor óptico de aerosoles.

## **b) Función de la distribución de tamaños de los aerosoles**

La interacción de las diferentes fuentes de aerosoles, junto con el envejecimiento y tiempo de residencia, y los procesos de transporte en la atmósfera conducen a que los aerosoles se agrupen formando unidades bien diferenciadas unas de otras. Por la misma razón se observa que éstos presentan una variación característica en el número de partículas según el radio de las mismas.

Este parámetro permite caracterizar a los aerosoles en el sentido de que según sea el tamaño de la partícula y la  $\lambda$  de la radiación que incide sobre ella, esta función toma diferentes valores. Así, se observa que para partículas cuyo radio sea mucho menor que la longitud de onda incidente la función de fase toma el mismo valor para cualquier ángulo.

Sin embargo, a medida que el radio de la partícula se aproxima al de la longitud de onda incidente o la supera, la probabilidad de dispersión de la radiación en la dirección del haz incidente aumenta notablemente, mientras que la retrodispersión ( $90^\circ < \Theta < 270^\circ$ ) disminuye.

Un valor constante para cualquier ángulo de dispersión indica que las partículas poseen un radio mucho menor que la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación que las incide. En la atmósfera, las moléculas, pese a tener también un tamaño menor que  $\lambda$ ,



presentan un comportamiento algo diferente. Esto es debido a que la dispersión de la luz que producen es distinta según sea el plano de polarización de la radiación que les llega.

#### **i) Fuentes de aerosoles atmosféricos**

Existen dos procesos principales mediante los que se originan partículas de aerosoles. Una es la desintegración y dispersión de material sólido, tales como la erosión del material de la corteza terrestre, la desintegración y dispersión de biomasa o la producción y dispersión de sal marina en pequeñas gotas.

El segundo proceso consiste en la modificación de las sustancias en suspensión en la atmósfera, de tal forma que aparezcan nuevas partículas a partir de las anteriores. Tales procesos son conversiones de gas a partícula (o, abreviadamente “gtp”) cuyo origen se debe a especies gaseosas condensables y a la evaporación de las gotículas de las nubes y otros elementos, que dejan tras de sí a nuevas partículas de aerosol.

Los dos tipos de procesos citados anteriormente conducen a una cierta composición química de los aerosoles y determinan la distribución en tamaño de los mismos. Así, la degradación y desintegración del material sólido de la corteza terrestre produce principalmente partículas con radio mayores de 0,1 mm, mientras que la variación del material suspendido en la atmósfera genera normalmente partículas inferiores a 1  $\mu\text{m}$  de radio.

Pese al incremento espectacular en la cantidad de partículas emitidas a la atmósfera por parte del hombre desde la Revolución Industrial, tanto directa como indirectamente, es la

Naturaleza la que, todavía hoy, genera el mayor porcentaje de los aerosoles atmosféricos. Se ha estimado que dicha producción puede oscilar entre 300 y  $1.350 \times 10^6$  Tm/año para aerosoles naturales y entre  $20-60 \times 10^6$  Tm/año para los de origen antrópico (d'Almeida et al., 1991). En la siguiente tabla pueden verse las cantidades estimadas en millones de toneladas al año, de partículas con radios inferiores a 100  $\mu$ m enviadas a la atmósfera, tanto de forma natural como inducida por el hombre.

**Tabla N° 3. Estimación de las cantidades de partículas con radio inferior a 100  $\mu$ m enviadas a la atmósfera, en millones de toneladas al año.**

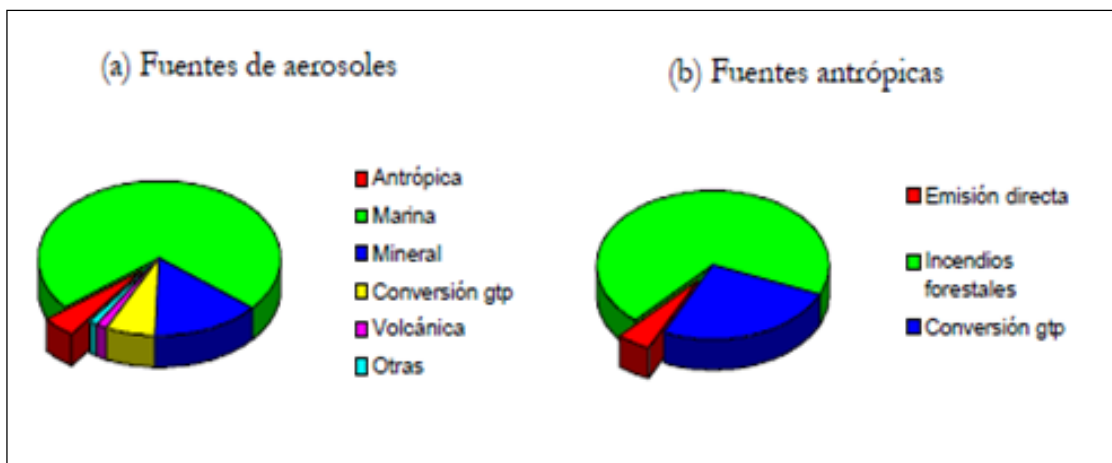
| <b>Principales partículas enviadas</b> | <b>Cantidades enviadas (MTm/año)</b> |
|--|--------------------------------------|
| <b>Origen Natural</b>                  |                                      |
| Polvo Extraterrestre                   | 1 – 2                                |
| Sal de mar                             | 200 – 1.000                          |
| Polvo del desierto                     | 50 – 200                             |
| Biológicas                             | 8                                    |
| Restos Volcánicos                      | 3 – 15                               |
| Conversión gas a partícula             | 35 – 110                             |
| <b>Total</b>                           | <b>297 – 1.335</b>                   |
| <b>Origen Antrópico</b>                |                                      |
| Emisión Directa                        | 1 – 9                                |
| Conversión gas a partícula             | 18 – 33                              |
| Restos incendios forestales            | 1 – 15                               |
| <b>Total</b>                           | <b>20 – 57</b>                       |
| <b>Total</b>                           | <b>317 – 1.392</b>                   |

Las principales fuentes que constituyen los aerosoles en la atmósfera son: la extraterrestre, la marina, la mineral, la conversión gtp, la volcánica, la biológica y las fuentes antrópicas. Estas son mostradas en la figura N° 4, mediante

diagramas circulares. En ellos puede observarse la contribución de cada una de las diferentes fuentes. El diagrama (a) representa el total de las cantidades de partículas enviadas a la atmósfera. Se ha remarcado especialmente la producida y/o inducida por el ser humano. Este sector (en rojo) se muestra a su vez fraccionado en el diagrama (b).

En él se observa que la mayoría de los aerosoles antrópicos están constituidos principalmente por las partículas resultantes de la quema de zonas forestales, bien intencionadamente, como suele ocurrir cerca de las selvas para conseguir tierras de labor, bien fortuitamente por negligencias achacables al hombre. La emisión directa, se refiere a aquellas partículas emitidas por el hombre que pasan a ser directamente aerosoles, sin la necesidad de ningún otro proceso, mientras que la conversión gas a partícula o gtp, da cuenta de aquellas que, si bien originariamente no constituyen por sí mismas partículas de aerosol, tras re combinaciones posteriores y procesos de conversión, pasan a engrosar la lista de la materia particulada en suspensión en la atmósfera.

**Figura N° 4. Diagramas circulares en los que se muestra la contribución de las diferentes fuentes de aerosoles: (a) muestra todas las fuentes y (b) corresponde únicamente a aquellas provenientes de fuentes antrópicas.**



Cada fuente de aerosol genera uno o varios tipos característicos de partículas, los cuales han sido clasificados en la Tabla N° 4.

**Tabla N° 4. Tipo de partículas producidas según el origen de las fuentes de aerosoles.**

| <b>Fuentes de aerosoles</b>      | <b>Tipo de partículas generado</b>  |
|----------------------------------|---|
| Extraterrestre                   | Polvo meteórico   |
| Marina                           | Sal de mar<br>Biológico (Sulfuri de di-metil ó DMS)<br>Compuestos orgánicos secundarios         |
| Mineral                          | Polvo mineral del desierto<br>Polvo mineral no desértico  |
| Conversión gas a partícula (gtp) | Sulfatos<br>Nitratos<br>Orgánicos secundario  |
| Volcánica                        | Ceniza volcánica<br>Sulfuros  |
| Biológica                        | Partículas orgánicas de la quema de vegetación<br>Orgánicos primarios                           |
| Antrópica                        | Sulfuros<br>Nitratos<br>Organicos primarios<br>Orgánicos secundarios<br>Ceniza<br>Polvo mineral |

A continuación se detallan cada una de las principales fuentes de producción de aerosoles.

## **1. Fuente Extraterrestre**

El polvo interplanetario que llega a la atmósfera terrestre para formar parte de los aerosoles contiene entre otros los siguientes elementos: Fe, Si, Mg, S, Ar, Ca, Ni, Al, Na, Cr, Mn, Cl, K, Ti y Co. Las partículas que lo forman son mucho más abundantes en las regiones próximas a los polos, si bien, lógicamente, su aportación al total es muy pequeña y ha sido incluida dentro del grupo de otros, el cual en conjunto constituye tan sólo el 1%.

Es de destacar que, con bastante frecuencia, el polvo extraterrestre golpea contra aquellas partículas situadas en la alta atmósfera, llegando a formar parte de la constitución de los aerosoles estratosféricos.

## **2. Fuente Biológica**

Los principales tipos de aerosoles generados por la fuente biológica se refieren a compuestos orgánicos primarios y a partículas derivadas de la quema de zonas del bosque con un origen natural. Ya Went (1960) sugirió el enorme potencial de la vegetación como fuente de hidrocarburos naturales, lo cual ha dado pie para que otros autores como Hahn (1980) hayan estudiado e identificado los principales compuestos orgánicos primarios generados por esta fuente, precursores de las partículas de aerosol. Éstos son las parafinas de cadena directa (n-alcanos) y ácidos grasos de cadena directa (ácidos carboxílicos). También cabe destacar la ceniza y otros productos derivados de la quema de la masa forestal.

### 3. Fuente Antrópica

La fuente antrópica genera el 5% de los aerosoles en suspensión en la atmósfera. La mano del hombre produce tanto directa como indirectamente casi todos los tipos de partículas vistos anteriormente. De sus industrias y de la combustión de los derivados del petróleo genera toda suerte de compuestos orgánicos primarios y secundarios, sulfuros y nitratos. Éstos, mediante conversiones gtp se transforman en materia particulada formadoras de CCN, que, por tanto, aumentan el número de partículas sobre las que se puede depositar el agua precipitable.

Tal y como ya se ha comentado esto puede llegar a producir una disminución e incluso la ausencia de precipitaciones. Asimismo, aumenta la producción de polvo mineral no desértico, tras la erosión generada en las construcciones de carreteras y demás edificaciones. Sin embargo, la mayor cantidad de partículas emitida a la atmósfera inducida por el hombre se refiere a la emisión de ceniza y restos de la quema de bosques. Bien intencionadamente, bien fortuitamente aunque achacable a negligencias humanas, todos los años se queman extensiones enormes de bosques y selvas (Guillot, 1991).

Los terrenos desprovistos así de vegetación son mucho más vulnerables contra la acción de los agentes atmosféricos, aumentando también la aportación de aerosoles minerales no desérticos. Con esto se contribuye también a la desertificación del planeta y por tanto al aumento de los desiertos y, finalmente al aporte de aerosoles minerales del desierto.

Con objeto de establecer modelos estándar para cálculos de transferencia radiativa en la atmósfera y así poder establecer la bondad de los diferentes algoritmos existentes, la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M.) estableció seis tipos básicos de aerosoles. Éstos representan a toda la materia particulada en la atmósfera y son:

- a) Partículas tipo polvo
- b) Partículas solubles en agua
- c) Partículas oceánicas
- d) Partículas de hollín
- e) Pequeñas gotas de ácido sulfúrico al 75%
- f) Partículas de ceniza volcánica

Los términos “tipo polvo” y “solubles en agua” se refieren a la porción de los aerosoles que son insolubles y solubles en agua. El primero de ellos, además, no se refiere a partículas de polvo del desierto, sino que intenta ser representativo de las partículas obtenidas del suelo de las latitudes medias. Las oceánicas son partículas provenientes del rocío marino, formadas en un 30% por sal marina y un 70% de agua líquida.

Las partículas de hollín representan a la fracción antrópica, proveniente de la quema de derivados del petróleo y el carbón. Las gotas de ácido sulfúrico son una disolución al 75% de  $H_2SO_4$  en agua y se emplea para representar los aerosoles de tipo estratosféricos. Junto a este último también se incluyen en la zona estratosférica las partículas de ceniza volcánica, si bien éstas sólo se tienen en cuenta en épocas en las que ha tenido lugar recientemente alguna erupción importante.

Las combinaciones apropiadas de estos tipos básicos de aerosoles representan los diferentes modelos o grupos de aerosoles que aparecen de forma muy notoria en la atmósfera.

#### **4. Fuente Marina**

La fuente marina constituye el origen del grueso de los aerosoles encontrados en la atmósfera, incorporando a ésta principalmente, partículas de sal, sulfuro de dimetilo (DMS) y compuestos orgánicos secundarios. Las primeras, la aportación más cuantiosa, se producen tras la ruptura de las pequeñas burbujas que forman el rocío del agua de mar y su posterior evaporación en la atmósfera. Continuamente, en las crestas de las olas, con el impacto de las gotas de lluvia sobre el mar y cuando el mar bate contra las costas se está produciendo dicho rocío marino. Éste es elevado en el aire mediante turbulencias y tras el proceso antes indicado pasan a generar el aerosol más numeroso. Obviamente, dado su origen, es en la troposfera y principalmente en los primeros dos kilómetros de altitud donde se sitúa este tipo de aerosol.

La segunda gran aportación de la fuente marina es la del sulfuro de dimetilo, más conocido por DMS del inglés Dimethylsulfide,  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ . La producción de dicho compuesto no está todavía muy clara, dado que si bien autores como Andrea (1985) la ha encontrado fuertemente unida a la productividad de fitoplancton en una gran variedad de escenarios, Bates et al. (1993) o Covert et al. (1992) indican exactamente lo contrario.

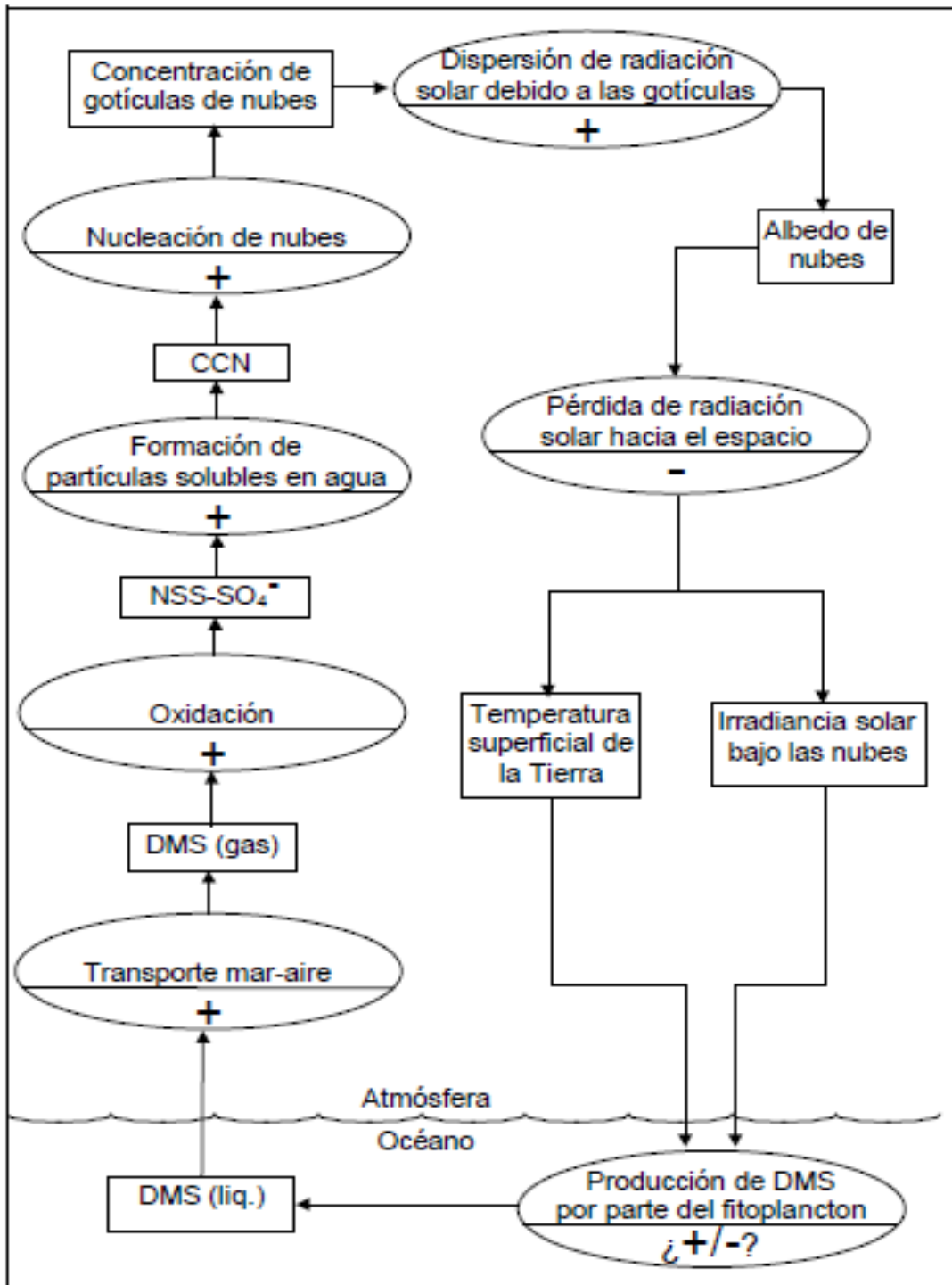


Aunque por sí mismos no constituyen propiamente un aerosol, son la base para la producción de núcleos de condensación de nubes basados en el azufre tras diferentes conversiones gtp, y por tanto fundamentales para la generación de nubes en este entorno.

Este producto biológico, el DMS, es considerado como la principal fuente de azufre oceánico en la atmósfera, con una contribución postulada del 30% del azufre total de la misma (Hoppel et al., 1987; Charlson et al., 1987; Ayers et al., 1991).

Dada esta aportación al balance atmosférico del azufre, cualquier variación en la producción del mismo, finalmente podrá alterar indirectamente el balance de calor de la Tierra. Basándose en este hecho se han propuesto un mecanismo de retroalimentación biológico, que emplea las partículas de aerosol basadas en el azufre como comodín, y que se muestra en la figura N° 5.

Figura N° 5. Realimentación biológica en el balance de radiación de la Tierra.



Finalmente, dado que determinadas zonas de la superficie del mar pueden estar recubiertas con películas orgánicas, se ha propuesto que junto a las partículas de sal se produzcan compuestos orgánicos secundarios (Jaenicke).

## 5. Fuente Mineral

Las fuentes minerales están constituidas principalmente por los desiertos y aquellas zonas continentales en las que los agentes meteorológicos son capaces de degradar y dispersar el material que las forma. Es sin duda, el polvo mineral del desierto la principal aportación a la atmósfera, y los desiertos, la fuente más importante. En estas zonas despobladas de una vegetación que afirme el suelo, los fuertes vientos son capaces de elevar y arrastrar partículas de diferentes tamaños a enormes distancias.

### ii) Conversión gas a partícula (GTP)

Constituyen la segunda gran fuente de aerosoles en la atmósfera y tiene su origen en reacciones químicas entre diferentes sustancias. La mayor parte de estas sustancias provienen de fuentes naturales, tales como la flora marina, la biota terrestre y las erupciones volcánicas. Sus principales precursores son los sulfatos como el dióxido de azufre  $\text{SO}_2$ , sulfuro de hidrógeno  $\text{H}_2\text{S}$ , disulfuro de carbono  $\text{CS}_2$ , sulfuro de dimetilo  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$  o el disulfuro de dimetilo  $\text{CH}_3\text{SSCH}_3$ ; los derivados del nitrógeno como el óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ , el dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ , óxido nítrico  $\text{NO}$ , trióxido de nitrógeno  $\text{NO}_3$ , trióxido de dinitrógeno  $\text{N}_2\text{O}_3$  o el pentóxido de nitrógeno  $\text{N}_2\text{O}_5$ ; y los compuestos orgánicos primarios, y aquellos que son emitidos directamente a la atmósfera.

Uno de los ejemplos más importantes es la conversión del sulfuro de dimetilo, DMS, a núcleos de condensación mediante la oxidación de dicho compuesto y la formación de sulfatos no procedentes de la sal marina, especialmente útiles como indicadores del nivel de contaminación industrial. Otro ejemplo

notorio de creación de CCN lo constituye la formación de pequeñas gotas de ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ , a partir de las partículas de  $SO_2$  producidas, principalmente, en las erupciones volcánicas. Los compuestos orgánicos primarios, han sido también investigados, dado que éstos resultan en orgánicos secundarios tras reacciones fotoquímicas. Los principales precursores de aerosoles orgánicos son las olefinas: alquenos, olefinas cíclicas, diolefinas; las parafinas y los aromáticos (Hahn, 1980).

La principal característica de las fuentes volcánicas radica en su impredecibilidad. Si bien, en promedio, su aporte al conjunto de las partículas en la atmósfera no es excesivo, en determinadas erupciones, pueden expulsar tanta cantidad de sustancias del interior de la tierra como para modificar cualquier previsión realizada con modelos. Los aerosoles de origen volcánico suelen estar formados por partículas de polvo y cenizas de diferentes compuestos como:  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , o  $Fe_2O_3$ , así como gases tan reactivos como  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $HCl$ , etc., los cuales posteriormente, mediante procesos de conversión de gas a partícula generan nuevos aerosoles.

Las erupciones volcánicas expulsan sobre todo  $SO_2$ , este gas, en estas explosiones tan virulentas, asciende hasta la troposfera superior y la estratosfera, donde, llevados por las corrientes en chorro, circunda el globo, notándose sus efectos a enormes distancias del punto de origen (Bluth et al., 1992, Stowe et al., 1992). Además, dicho compuesto reacciona con radicales hidroxilos  $HO$  dando lugar a nubes cuyos CCN están formados por pequeñas gotas de ácido  $2SO_4$ , de larga residencia en la atmósfera y que se extienden a lo largo de todo el planeta.

### iii) Envejecimiento y tiempos de residencia

Los tiempos de residencia de las partículas en la atmósfera, también dependen de su tamaño. Partículas de tamaño menor a 2,5  $\mu\text{m}$  pueden tener tiempos de residencia de días o incluso semanas y podrían ser transportadas miles de kilómetros.

No todas las partículas permanecen el mismo tiempo en la atmósfera tras su emisión o formación en la atmósfera, sino que son eliminadas por deposición seca o húmeda en distintos tiempos dependiendo de sus características. Los parámetros determinantes en el tiempo de residencia de una partícula en la atmósfera son su diámetro, su composición química y sus propiedades termodinámicas (Sosaky et al., 1988).

Una vez que las partículas de aerosol han sido generadas por sus fuentes, éstas pueden experimentar en la atmósfera una serie de procesos que dan lugar a lo que, usualmente, se le denomina envejecimiento. Los aerosoles, transportados dentro la atmósfera por diferentes eventos meteorológicos, pueden diluirse en aire limpio, agruparse con otros, formar núcleos de condensación para las pequeñas gotas que forman las nubes (gotículas), ser atrapados por las gotas de lluvia en su caída (proceso denominado lavado y junto con la anterior extracción húmeda), o sedimentarse debido a su velocidad vertical o al impacto contra obstáculos terrestres (extracción seca).

En estos procesos de envejecimiento pueden, por tanto, aumentar su masa o bien disminuirla. Algunos de ellos sólo ocurren en las capas bajas de la troposfera dada la abundancia de vapor de agua, precipitaciones y obstáculos terrestres, mientras que otros son más efectivos en las capas altas, dado que allí las masas de aire son transportadas a una mayor velocidad.

Si bien todos los procesos aquí comentados no son, en absoluto, bien conocidos, sí se sabe que, en general, el envejecimiento de los aerosoles provoca una serie de efectos característicos como son: la formación de una distribución en tamaños muy marcada, el cambio de la composición química (que puede ser muy diferente de la del punto de partida) y la formación de grupos de aerosoles bastante uniformes, constituidos por unos pocos tipos de partículas. Esto ha permitido a la Organización Mundial de Meteorología (O.M.M.) establecer tan sólo cinco modelos de aerosoles para representar toda la atmósfera, que serán vistos posteriormente.

Obviamente, cualquier proceso de envejecimiento depende notoriamente del tiempo que una partícula de aerosol pueda estar en suspensión, i.e., del tiempo de residencia. Gracias al estudio experimental del tiempo que una partícula, como tal entidad, puede permanecer suspendida en la atmósfera, se ha elaborado una expresión analítica que relaciona dicho tiempo con el radio de las mismas (Jaenicke, 1980). Dicha ecuación empírica toma la forma:

$$\frac{1}{t_{res}} = \frac{1}{C_F} \left( \frac{r}{R} \right)^2 + \frac{1}{C_D} \left( \frac{r}{R} \right)^{-2} + \frac{1}{t_{hum}}$$

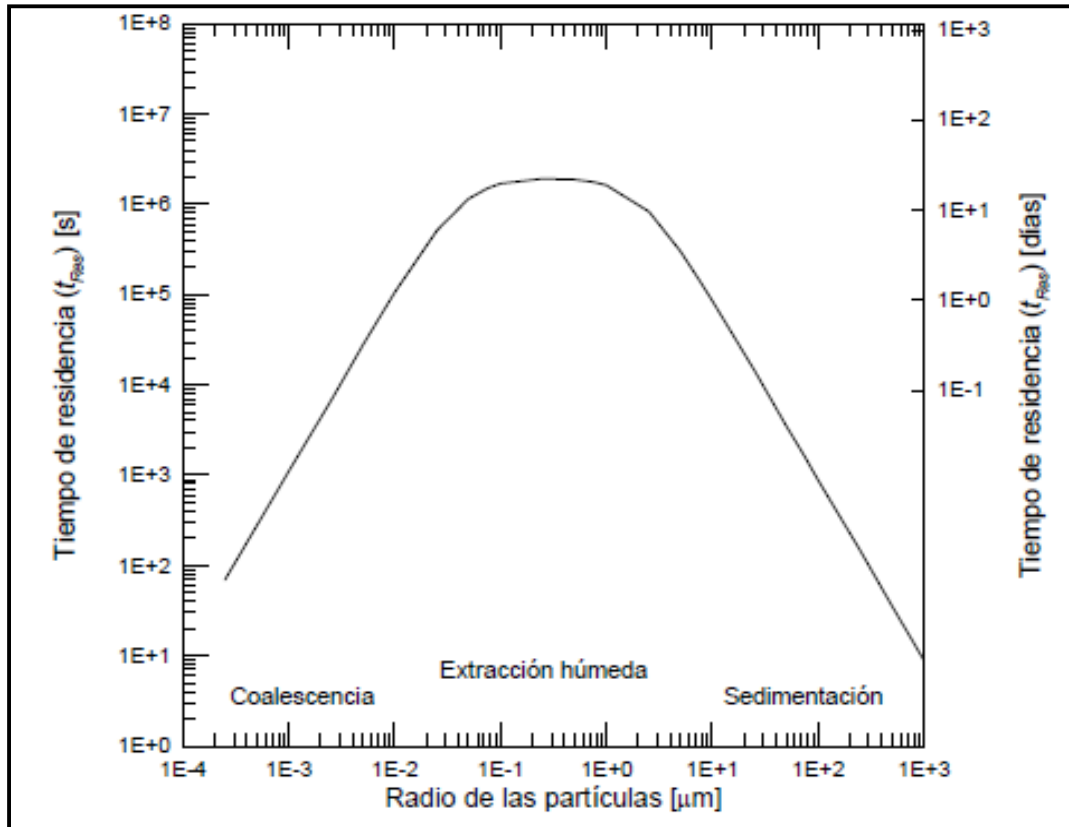
donde  $t_{res}$  es el tiempo de residencia,  $r$  el radio de la partícula,  $R=0,3$  mm el radio estándar,  $C_F$  y  $C_D$  constantes y  $t_{hum}$  el tiempo límite de permanencia en la atmósfera debido a procesos de extracción húmedos. A partir de dicha ecuación se tiene, por tanto, que los núcleos de Aitken poseen un tiempo de residencia relativamente corto, debido principalmente a los procesos de coalescencia con otras partículas. Asimismo, son las partículas grandes (0,1-10 mm) las que poseen un mayor

tiempo de vida, donde los procesos de extracción húmeda son los principales mecanismos de reducción de éstas. Finalmente, las partículas gigantes, sedimentan rápidamente dado su peso, con lo que nuevamente se obtienen tiempos de residencia bajos.

Con estos tiempos de vida media es posible calcular hasta que distancias pueden ser transportadas las partículas en función de su tamaño. Si asumimos una velocidad de transporte horizontal de 8 m/s y una velocidad ascensional de 2 cm/s, valores razonables para unas condiciones atmosféricas estándar. Cabe destacar que las partículas comprendidas entre los intervalos de 0,1 y 1,0 mm pueden ser elevadas a niveles de la alta troposfera, siendo capaces de trasladarse de un continente a otro.

Uno de los mejores ejemplos lo tenemos con el polvo mineral del desierto del Sahara, el cual tras recorrer todo el Atlántico Norte Subtropical alcanza el continente americano, siendo medido desde hace años en Antillas o Barbados (Prospero y Carlson, 1972; Prospero et al., 1981; Prospero et al., 1987; Prospero, 1996). Debería ser mencionado también que algunos gases precursores de pequeñas partículas por conversiones gtp, pueden llegar a tener tiempos de vida lo suficientemente grande como para mezclarse y distribuirse a lo largo de todo el globo terrestre, aumentando así la presencia de dichas partículas.

**Figura N° 6. Tiempo de residencia de las partículas de aerosol en la atmósfera según su radio. Estimación realizada para un modelo de aerosoles con 300 partículas/cm<sup>3</sup> y tiempo de deposición húmeda de 21 días.**



**Tabla N° 5. Desplazamiento de las partículas de aerosol**

| Radio de las partículas (μm) | Distancia horizontal (Km.) | Elevación vertical (m) |
|------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 0,001                        | 8                          | 20                     |
| 0,01                         | 800                        | 2.000                  |
| 0,1                          | 8.000                      | 20.000                 |
| 1                            | 8.000                      | 20.000                 |
| 10                           | 800                        | 2.000                  |
| 100                          | 8                          | 20                     |



Mención aparte recibe el transporte en la estratosfera. Dada las características de esta capa atmosférica, las partículas allí generadas (conversión gtp) o las que consigan llegar allí en los plegamientos de la tropopausa por la presencia de las corrientes en chorro (Expósito et al., 1991), pueden llegar a tener tiempos de residencia comprendidos entre los 2 y 3 años (Jaenicke, 1980).

## **1. Diámetro**

El tiempo de vida de las partículas con tamaño inferior a  $0.02 \mu\text{m}$  es del orden de horas debido a su rápida transformación a la moda Aitken. Para partículas de diámetro superior a  $0.05 \mu\text{m}$ , su tiempo de residencia tiene relación inversa con su tamaño; así, las partículas de diámetro  $>20 \mu\text{m}$  son eliminadas de la atmósfera por gravedad en un tiempo del orden de horas, mientras que a las partículas de diámetro entre 2 y  $3 \mu\text{m}$  les corresponde un tiempo de residencia de entre 2 y 4 días, siendo las partículas pertenecientes a la moda de acumulación y al límite superior de la moda Aitken ( $0.1 - 1 \mu\text{m}$ ) las que presentan el mayor tiempo de residencia en la atmósfera (Mészáros, 1999).

## **2. Composición química**

En cuanto a la composición química, un aspecto muy influyente es el carácter higroscópico del material. Las partículas de diámetro entre  $0.1$  y  $1 \mu\text{m}$  están formadas principalmente por material higroscópico, de modo que actúan como núcleos de condensación y son eliminadas de la atmósfera por deposición húmeda, así, la vida media de estas partículas se considera similar a la del agua, del orden de 10 días (Pósfai et al., 2000).

### **3. Propiedades termodinámicas**

Las propiedades termodinámicas tienen una influencia importante en los procesos de formación de partículas secundarias tales como nucleación y condensación (Eastern y Peter, 1994).

Por otra parte, la relación en la que se encuentran las fases sólida y gaseosa de un compuesto depende también de las condiciones ambientales (humedad y temperatura), en especial para especies como el nitrato amónico y los compuestos orgánicos volátiles (Adams et al., 1999).

### **4. Sumideros de aerosoles**

Los procesos de envejecimiento y tiempo de residencia vienen determinados por los efectos de eliminación de aerosoles en los sumideros. Éstos, al igual que las fuentes, pueden actuar como sumideros de volumen, como es el caso de la formación de nubes, o como sumideros de área, como es el caso de la extracción por deposición seca. También puede ser considerado el transporte de partículas de aerosol a otras zonas de la atmósfera como otro tipo de sumidero, como es el caso del transporte a la estratosfera, donde las partículas allí depositadas pueden permanecer durante varios años.

No obstante, algunos autores consideran a dicha capa más como una fuente que como un sumidero, dado que la mayoría de los aerosoles que se encuentran en ella son producidos in situ mediante mecanismos de conversión GTP.

Dado que hasta ahora sólo se ha registrado en la atmósfera la conversión de gas a partícula (GTP), y nunca la de partícula a gas (salvo para el caso del agua), la extracción de materia en forma de partículas de la atmósfera debe ser mayor que la que se aporta. Ha sido estimado, grosso modo, que el 50% de la extracción se debe a los sumideros de área antes mencionados, mientras que el 50% restante se debe a la extracción húmeda (Beilke, 1975).

## **5. Efecto invernadero**

Un balance medio de energía para el sistema climático mundial muestra que la superficie de la Tierra absorbe aproximadamente la mitad de la radiación solar incidente, la cual se encuentra situada entre las longitudes de onda de 0,2 a 4 mm. Dicha radiación calienta la superficie de la Tierra que, a su vez, emite energía en la región infrarroja o térmica (4-100 mm).

Ciertos componentes de la atmósfera terrestre como el vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, etc., son capaces de absorber dicha radiación, para después reemitirla tanto hacia el espacio como hacia la superficie de la Tierra nuevamente. Esta emisión descendente contribuye a aumentar la entrada neta de energía hacia la superficie, elevando así la temperatura de ésta. A este efecto se le conoce con el nombre de efecto invernadero.

La intensidad del efecto invernadero puede medirse mediante la diferencia entre la temperatura de emisión efectiva de la Tierra tal como se observa desde el espacio (255 K aproximadamente) y la media mundial de la temperatura superficial (unos 286 K). Dicho efecto natural

hace que la Tierra sea más cálida (aproximadamente unos 30 °C) de lo que en realidad sería si éste no existiera y, en gran medida, ha favorecido el desarrollo y mantenimiento de la vida en nuestro planeta.

Entre los gases de efecto invernadero es, sin duda, el vapor de agua el gas más importante. Si dicho gas fuese el único presente, el efecto invernadero de una atmósfera de latitudes medias y cielos limpios, sería del 60-70% del valor que presentaría si se incluyeran la totalidad de los gases. Le sigue en importancia el CO<sub>2</sub>, que, siguiendo con el ejemplo anterior en las mismas condiciones, y siendo él el único gas existente produciría un efecto invernadero del 25% (nótese que, sin embargo, estas cantidades no son aditivas debido a la superposición de las bandas de absorción de estos gases).

A partir de la Revolución Industrial, el hombre ha comenzado a modificar sustancialmente las concentraciones en la atmósfera de estos gases de origen natural y a introducir otros nuevos que, de una forma directa, o indirecta (interviniendo en la química atmosférica), actúan como gases de efecto invernadero, modificando el balance radiativo existente.

La mayoría de los modelos climáticos calculan, con el actual ritmo de emisión de los gases de efecto invernadero, un calentamiento medio entre 2 y 4 °C desde la era pre-industrial hasta nuestros días. Sin embargo, las observaciones muestran que dicho calentamiento ha sido menor de 1 °C. Cabe preguntarse por tanto si los modelos climáticos son incorrectos, o si es que están interviniendo otros factores que no han sido tenidos en cuenta en dichos

modelos. Las investigaciones recientes indican que el principal factor que falla es muy probablemente el efecto de los aerosoles sobre la radiación.

## **6. Radiación solar**

El Sol es la principal fuerza motriz del clima en la Tierra. El sistema tierra-atmósfera intercepta la radiación solar reflejando parte de la misma y absorbiendo el resto, de tal forma que, a largo plazo la energía de la radiación solar que se absorbe está en perfecto equilibrio con la emitida al espacio. Sin embargo, existen diversos factores que pueden modificar este equilibrio.

Cuando ello ocurre, los componentes climáticos como la temperatura media del planeta, el nivel del mar, los bancos de hielos polares, la cobertura nubosa y un largo etc., se ven notablemente afectados. Entre los principales factores que se barajan por parte de la comunidad científica como posibles modificadores de este equilibrio radiativo, cabe destacar especialmente, a la variación en la radiación solar que alcanza nuestro planeta, la variación en la concentración de los gases de efecto invernadero y los aerosoles.

Existen dos fuentes principales que pueden dar lugar a una variación en la radiación solar que alcanza nuestro planeta: la debida a cambios orbitales y la debida a cambios en la irradiancia solar total. La primera de ellas, conocida como teoría astronómica o de Milankovitch, estudia las variaciones de energía solar recibidas por la Tierra asociadas con tres parámetros de la órbita terrestre alrededor del Sol que varían cíclicamente. Según Hays et

al. (1976) el factor clave en esta teoría no es tanto la cantidad total de radiación solar recibida por el globo en un año, sino la cantidad de radiación recibida a altas latitudes en los hemisferio durante el verano.

En lo que respecta a las variaciones en la irradiancia solar total, éstas responden a cambios en la actividad superficial del Sol y se desarrollan en fase con el ciclo de manchas solares, cuya duración es de aproximadamente 11 años. Así, Foukal y Lean (1990) han obtenido que a un mayor número de manchas solares corresponde una radiación solar también elevada.

Esto es debido a que el aumento de las regiones brillantes (fáculas fotosféricas) que ocurren en estas situaciones compensa y supera la disminución en la radiación producida por las manchas. Los mayores cambios en términos de la energía total se producen en la región de onda corta y en particular en el UV, si bien, a 0,3 mm por ejemplo dicha variación del ciclo solar no alcanza el 1%. No obstante se cree que los cambios integrados sobre la totalidad de las longitudes de onda, es decir, sobre la irradiancia solar total, denominada “constante solar”, presentan una mayor importancia respecto a los cambios en el clima.

## **7. Espectro Electromagnético**

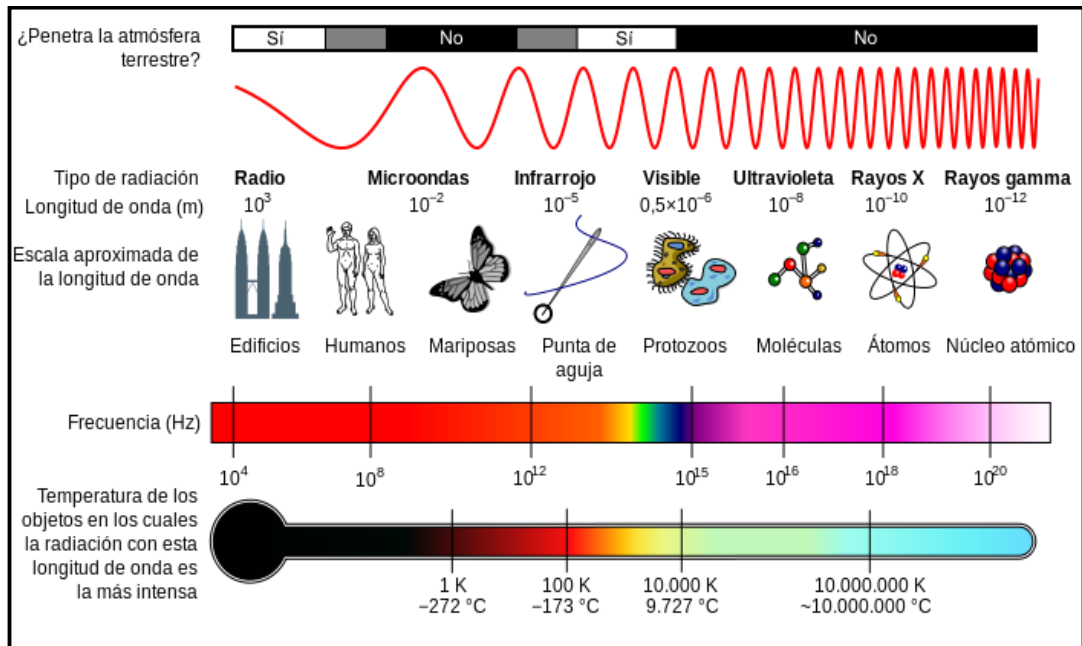
Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o

absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir ver el espectro, permiten realizar medidas sobre el mismo, como son la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación.

Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda con ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Se cree que el límite para la longitud de onda más pequeña posible es la longitud de Planck mientras que el límite máximo sería el tamaño del Universo aunque formalmente el espectro electromagnético es infinito y continuo.

El espectro electromagnético cubre longitudes de onda muy variadas. Por lo tanto, las ondas electromagnéticas de alta frecuencia tienen una longitud de onda corta y mucha energía mientras que las ondas de baja frecuencia tienen grandes longitudes de onda y poca energía.

**Figura N° 7. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda (con ejemplos), frecuencia y la temperatura de emisión de cuerpo negro.**



Por lo general, las radiaciones electromagnéticas se clasifican basándose en su longitud de la onda en ondas de radio, microondas, infrarrojos, visible –que percibimos como luz visible– ultravioleta, rayos X y rayos gamma. La espectroscopia puede detectar una región mucho más amplia del espectro electromagnético que el rango visible de 400 a 700 nm.

## 8. Fotómetro solar

Un fotómetro solar es un instrumento que mide la cantidad de luz solar. La mayoría de los fotómetros solares miden la luz solar en una estrecha gama de colores o de longitudes de onda. Todos deberían medir únicamente la luz solar que llega directamente del sol y no la luz solar dispersada por las moléculas de aire y los aerosoles. Por ello, el fotómetro solar se dirige directamente hacia el Sol y la luz se hace



pasar por un pequeño orificio (agujero o abertura) que limita en gran medida la cantidad de luz dispersa que llega al detector del instrumento.

En un amplio sentido, un fotómetro es cualquier instrumento usado para medir la intensidad de la luz. Los que se utilizan para la fotometría, son instrumentos para detectar:

- Intensidad de luz dispersa.
- Absorbancia.
- Fluorescencia.

Con el fotómetro solar se realiza una serie de secuencias de mediciones a lo largo de un día, sujetas a un horario, las mediciones pueden ser dirigidas tanto al sol para medir flujos espectrales de radiación solar directa, como al cielo para medir flujos de radiación esparcida hacia el punto de observación desde diferentes puntos de la bóveda celeste. Se debe considerar, la salida y la puesta de sol. Además de la estabilidad atmosférica o la interferencia de las nubes, por ello es importante elegir los períodos de tiempos correctos, de esto depende la determinación del espesor óptico del aerosol atmosférico.

## **2.3. MARCO HISTÓRICO**

### **2.3.1. Según Expósito González, Francisco Javier. Determinación del espesor óptico de aerosoles mediante técnicas de teledetección en la región de Canarias. 1999.**

El estudio de los aerosoles se ha ido desarrollando de acuerdo a los avances de la ciencia. Uno de esos estudios es el siguiente realizado

por el D. Francisco Javier Expósito González, titulado “Determinación del espesor óptico de aerosoles mediante técnicas de teledetección en la región de Canarias”, en el describe una aproximación a la solución de la ecuación de transferencia radiactiva que contemple un mayor número de longitudes de onda. Realiza comparaciones con data de satélites, de los cuales se van a disponer de más canales en las regiones del visible, UV y NIR, con lo cual fue posible disponer de mayor información y de un mejor conocimiento de las características de los aerosoles detectados.

Por otro lado, dada la importancia de los aerosoles en cuanto a la modificación del balance energético del sistema tierra-atmósfera, es de especial interés conocer las diferentes propiedades de estos constituyentes atmosféricos a nivel planetario, para poder precisar el forzamiento radiactivo que ellos producen. Teniendo en cuenta además que sus efectos pueden llegar a ser más importantes a nivel local, las medidas desde satélite son especialmente interesantes, ya que permiten mostrar cómo es su influencia según regiones. Se han iniciado algunos trabajos para nuestra territorio (Díaz et al., 1998a), si bien una futura línea de investigación podría ser la expansión de los análisis a las diferentes zonas cubiertas por el satélite, generando mapas de forzamiento.

Los resultados de espesor óptico de aerosoles obtenidos a partir de la aplicación del algoritmo desarrollado en esta memoria a los datos proporcionados por los satélites NOAA en el año 1994, muestran varias características bien definidas en el comportamiento de esta variable. Es patente la existencia de una distribución zonal para la misma. El polvo del desierto y la quema de biomasa parecen ser los principales causantes de la presencia de aerosoles.

**2.3.2. Según Montillo Rosero, Elena. Determinación de las propiedades de absorción de los aerosoles atmosféricos. Universidad de Valladolid. Facultad de Ciencias. 2010.**

El estudio de las propiedades ópticas de los aerosoles y específicamente, la absorción de la radiación solar, es vital en la determinación del impacto de estas partículas en la evolución climática del planeta. Adicionalmente, la determinación de estas propiedades en las regiones polares tiene una importancia científica adicional teniendo en cuenta su susceptibilidad a los cambios climáticos del planeta. Este trabajo fue desarrollado en función de la medición, evaluación y análisis de las propiedades de absorción de los aerosoles en la estación subártica de ALOMAR (63N, 16E), utilizando dos técnicas diferentes de medidas insitu para la medida del coeficiente de absorción y dos métodos de obtención distintos para el albedo de scattering simple. Este trabajo es un aporte más del Grupo de Óptica Atmosférica en el estudio, caracterización y construcción de la climatología basada en las propiedades físicas y radiativas de los aerosoles en diferentes zonas del planeta.

**2.3.3. Según Toledano, Carlos. Métodos de calibración de campo para la medida del espesor óptico de aerosoles mediante fotómetros solares. Grupo de Óptica Atmosférica. Dpto. Física Teórica, Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid.2006.**

El presente artículo está enmarcado acerca de la caracterización óptica de los aerosoles atmosféricos en la estación de El Arenosillo (Huelva), integrada en la red AERONET. La continuidad de las series de datos largas se basa en los procedimientos de calibración de la red. Como previo al análisis de las calibraciones, se expone el presente resumen sobre los métodos de calibración para fotómetros, en particular sobre los métodos de campo para realizar calibraciones absolutas que permitan calcular el espesor óptico de aerosoles, poniendo especial énfasis en sus dificultades y limitaciones.

## **2.4. MARCO LEGAL**

Debemos entender el concepto de calidad ambiental, como el conjunto de características del medio ambiente, relacionado con la disponibilidad y facilidad de acceso a los recursos naturales y a la ausencia o presencia de agentes nocivos. Todo esto necesario para el mantenimiento y crecimiento de la calidad de vida de los seres humanos.

Asociados a este concepto, se encuentran los términos Estándar de Calidad Ambiental (ECA) y Límite Máximo Permisible (LMP), instrumentos de gestión ambiental que buscan regular y proteger la salud pública y la calidad ambiental, permitiéndole a la autoridad ambiental desarrollar acciones de control, seguimiento y fiscalización de los efectos causados por las actividades humanas.

Un Estándar de Calidad Ambiental (ECA) es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos o biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa significativo para la salud de las personas ni al ambiente.

Los Límites Máximos Permisibles (LMP) son considerados “la concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que caracterizan a un efluente o a una emisión, que al ser excedido puede causar daños a la salud, bienestar humano y al ambiente”. La característica más importante de los LMP, es que su cumplimiento es exigible legalmente; es decir, el titular de la actividad productiva que no cumpla con los mismos puede ser pasible de sanción.

Consideramos a los siguientes decretos y leyes, como aquellos que legislan en parte la Calidad del aire,

## **a) Estándares de Calidad Ambiental (ECAs)**

- Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente Parte Pertinente.
- Decreto Supremo N° 074-2001-PCM - Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire. Publicada el 24 de junio de 2001.
- Decreto Supremo N° 069-2003-PCM (15/Jul/03). Establecen Valor Anual de Concentración de Plomo. Publicado el 15 de julio de 2003.
- Decreto Supremo N° 003-2008 MINAM (21/Ago/08). Aprueban Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aire. Publicado el 21 de agosto de 2008.

## **b) Límites Máximos Permisibles (LMPs)**

### **1. Límites máximos permisibles (LMPs) Sector Energía y Minas**

- Resolución Ministerial N° 315-96-EM/VMM (19/Jul/96). Aprueba niveles máximos permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero metalúrgico. Publicada el 19 de julio de 1996.

### **2. Límites máximos permisibles (LMPs) Sector Producción**

- Decreto Supremo N° 003-2002-PRODUCE (04/Oct/02). Aprueban Límites Máximos Permisibles y valores referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre, papel. Publicada el 04 de octubre de 2002.

### **3. Límites máximos permisibles (LMPs) Sector Transporte y Comunicaciones**

- Decreto Supremo N° 047-2001-MTC (30/Oct/01). Establecen Límites Máximos Permisibles de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulan en la red vial. Publicada el 30 de octubre de 2001.

Los criterios para la evaluación de la calidad del aire están dados por dos tipos de instrumentos legales. Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) proporcionan los criterios de calidad que se aplican al aire ambiental en su condición de cuerpo receptor de emisiones de contaminantes atmosféricos (emisiones gaseosas o de material particulado). Los Límites Máximos Permisibles (LMP) proporcionan los criterios de calidad exigidos para las fuentes puntuales de emisión de contaminantes atmosféricos. Los ECA y los LMP están definidos por las siguientes normas:

- Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire – DS 074-2001-PCM.
- Valor Anual de Concentración de Plomo – DS 069-2003-PCM.
- Niveles Máximos Permisibles de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas - RM 315-96-EM/VMM (19/07/96).

#### **2.4.1. Estándares de Calidad Ambiental**

##### **a) Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire**

Los ECA se definen como aquellos "niveles de concentración máxima de contaminantes del aire que en su condición de cuerpo receptor es recomendable no exceder para evitar riesgo a la salud humana. Como estos estándares protegen la salud, son considerados estándares primarios"

Los ECA son "referencia obligatoria en el diseño y aplicación de las políticas ambientales y de las políticas, planes y programas públicos en general. Ninguna autoridad judicial o administrativa podrá hacer uso de los estándares nacionales de calidad ambiental del aire, con el objeto de sancionar bajo forma alguna a personas jurídicas o naturales".

**Tabla N° 6. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el Aire**

| Parámetro                                     | Período | Criterio                                      |   |
|---|---------|---|---|
|   |         | Valor Límite<br>( $\mu\text{m}/\text{Nm}^3$ ) | Observaciones   |
| Dioxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )           | Anual   | 80  | Media aritmética anual  |
|   | 24h     | 365   | No debe excederse más de 1 vez al año   |
| PM <sub>10</sub>                              | Anual   | 50  | Media aritmética anual  |
|   | 24h     | 150   | No debe excederse más de 3 veces al año                                       |
| Monóxido de carbono (CO)                      | 8h      | 10 000  | Promedio móvil  |
|   | 1h      | 30 000  | No debe excederse más de 1 vez al año   |
| Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )        | Anual   | 100   | Promedio aritmético anual   |
|   | 1h      | 200   | No debe excederse más de 24 veces al año                                      |
| Ozono O <sub>3</sub>                          | 8h      | 120   | No debe excederse más de 24 veces al año                                      |
| Plomo (Pb)                                    | Anual   | 0,5   | Promedio aritmético de los valores mensuales. En la Fracción PM <sub>10</sub> |
|   | Mensual | 1,5   | No debe excederse más de 24 veces al año                                      |
| Sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) | 24h     | -   | Por definir en el futuro  |

| Parámetro                               | Período | Criterio                                      |  |
|---|---------|---|--|
|   |         | Valor Límite<br>( $\mu\text{m}/\text{Nm}^3$ ) | Observaciones                            |
| <b>Valores Transitorios</b>             |         |   |  |
| Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )    | Anual   | 100   | Promedio anual                           |
| PM <sub>10</sub>                        | Anual   | 80  | Promedio anual                           |
|   | 24h     | 200   | No debe excederse más de 3 veces al año  |
| Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) | 1h      | 250   | No debe excederse más de 24 veces al año |
| Ozono (O <sub>3</sub> )                 | 8h      | 160   | No debe excederse más de 3 veces al año  |
| Plomo (Pb)                              | Anual   | 1,0   | Anual                                    |

## b) Niveles de Estados de Alerta

Mediante DS 009-2003-SA (25/06/03) se aprobó el Reglamento sobre los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire. Esta norma define los diferentes estados de alerta para contaminantes de aire basados en las concentraciones críticas (PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO y H<sub>2</sub>S).

Los estados de alerta que han sido definidos son: de cuidado, peligro y de emergencia. El organismo responsable de declarar y suspender los estados de alerta es la DIGESA.

### 1. Límites Máximos Permisibles de Emisiones Gaseosas

Mediante RM 315 – 96 – EM/VMM (19/07/96) se establecieron los LMPs para emisión de contaminantes a la atmósfera. Estos valores se miden en la fuente y son aplicables únicamente a



fuentes puntuales. Los niveles de material particulado, plomo y arsénico son valores constantes y se muestran en la Tabla N° 7.

**Tabla N° 7. Niveles máximos Permisibles para Emisiones Gaseosas.**

| Parámetro                  | Valor en cualquier momento (mg/Nm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|--|
| Material particulado total | 100  |
| Plomo                      | 25   |
| Arsénico                   | 25   |

## 2.5. MARCO CONCEPTUAL

### 2.5.1. Espesores Ópticos

#### a) Espesor Óptico Total $\tau$

La determinación del espesor óptico total esta basada en la Ley de Lambert-Beer, la cual explica la atenuación de la radiación solar al paso por la atmósfera (Vitae y Tomasi, 1998).

$$\tau_t = \frac{\ln\left(\frac{RI_{0\lambda}}{I_\lambda}\right)}{m} \quad (2)$$

donde R es el factor de corrección distancia sol-tierra,  $I_\lambda$ , es la intensidad de radiación observada a una longitud de onda ( $\lambda$ ), a nivel de la superficie del suelo;  $I_{0\lambda}$  es la intensidad de radiación en el tope de la atmósfera, obtenido gráficamente por el método de Langley (Reagan y col, 1984), para una  $\lambda$  en particular; y m es la masa del aire determinado por la secante del ángulo cenit solar.

El método de Langley esta basado en el principio de extinción espectral y la ley de Beer – Lambert Bouguer. En este método las observaciones de radiación son planteados como una función de la masa de aire. La pendiente de la regresión lineal resultante es  $(\lambda t)$  y la radiación correspondiente a  $m$  igual a cero es la  $I_0\lambda$ .

Estudios realizados indican que al menos 20 ajustes son necesarios, debido a que variaciones monótonas en el  $\tau$  AOD dan lugar a errores sistemáticos en la determinación del  $I_0$  por el método de Langley, pues estos errores son imposibles de detectar en un solo ajuste (Reagan, 1986, Terez, 2003). Por ello, para asegurar un adecuado voltaje de lo extraterrestre se realizaron 7 ajustes a partir de los cuales obtuvo un promedio, esto es también recomendado por (Slusser y col, 2000), para poder determinar el  $\tau$  AOD con un error absoluto de 0.01-0.02. En condiciones de baja turbiedad este error absoluto puede significar un error relativo superior al 10% en el  $\tau$  AOD (Wehrl, 2000).

## **b) Espesor Óptico de Aerosol $\tau$ AOD**

Es una magnitud adimensional que indica el poder que poseen las partículas de aerosol para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda. Es por tanto un parámetro fundamental para cualquier estudio de cambio climático ya que está directamente relacionada con los efectos directos de estos componentes atmosféricos.

La determinación del espesor óptico del aerosol, es un parámetro bajo el cual es posible determinar la presencia de aerosoles de origen industrial, antropogénico, quema de biomasa, u otros, producto del transporte de masas atmosféricas, hacia una zona, por lo general debido a pequeños aumentos de concentraciones

de aerosol debido a la actividad volcánica, la neblina, el polvo, o sales del mar o transporte de contaminantes puede perturbar el equilibrio del balance de energía en estas regiones.

Sin embargo, como contrapartida, estos métodos poseen el hándicap de la limitación espacial. Las medidas realizadas son llevadas a cabo en una base de observación concreta y el número de éstas es, en general, muy limitado. Además, para determinados parámetros altamente variables en el espacio como el espesor óptico de aerosoles (AOD) o la distribución de partículas, los datos obtenidos en un punto concreto son difícilmente extrapolables más allá de unas pocas decenas de kilómetros.

Se hace necesario por tanto el empleo de técnicas de teledetección mediante radiómetros situados en plataformas espaciales que permitan cubrir la mayor superficie posible del planeta. Sin embargo, el uso de estas técnicas hace que el problema se complique enormemente. En primer lugar es necesario llevar a cabo una calibración periódica del instrumental instalado a bordo de los satélites. A continuación, y una vez obtenida la imagen por parte del sensor, ésta tendrá que pasar por diferentes procesos que permitan corregirla de las numerosas circunstancias que tienen lugar durante su adquisición, tales como el movimiento del satélite, el ángulo de visión, la esfericidad de la Tierra, su movimiento durante la captación de la señal, etc.

Finalmente, es necesario aplicar un modelo de transferencia radiativa que permita obtener, a partir de las radiancias medidas por el instrumento, los parámetros de interés. Por todo ello, obtener el producto final no resulta sencillo, si bien es absolutamente necesario si se desea estudiar con detenimiento a los aerosoles y el papel que juegan en el cambio climático.

A finales de los años 80, la agencia norteamericana NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) comenzó a producir experimentalmente AOD desde satélite a partir de las medidas realizadas con el canal 1 del Advanced Very High Resolution Radiometer) a bordo de sus satélites. Dicho producto comenzó a ser operacional a principios de la década de los 90 y se basó en la relación casi lineal existente entre el AOD y la radiancia medida por el satélite, se han elaborado una serie de tablas que, según la geometría de observación del satélite y la posición del Sol, establecen la radiancia que debería medir el satélite. Cualquier variación de la misma se considera que es debida a aerosoles.

El espesor óptico de aerosol, puede ser determinado para diferentes longitudes de onda correspondiente a la espectro visible, a partir del espesor óptico total ( $\tau_t$ ), el cual es la suma de los espesores ópticos del aire (dispersión Rayleigh,  $\tau_{Ray}$ ), ozono ( $\tau_{O3}$ ) y aerosoles ( $\tau_{AOD}$ ), de allí que se obtiene la ecuación para el espesor óptico de aerosol (Bodhaine, 1999). La secuencia de ecuaciones se basa en el cálculo de los tres primeros espesores ópticos.

$$\tau_{AOD} = \tau_t - \tau_{Ray} - \tau_{o_3} \quad (1)$$

### c) Espesor Óptico del Aire - RAYLEIGH $\tau_{Ray}$

El espesor óptico del aire conocido como el de Rayleigh, es calculado utilizando la ecuación de (Dutton y col., 1994):

$$\tau_{Ray} = \frac{P}{P_0} \times 0.00877 \times \lambda^{-4.05} \quad (3)$$

donde,  $P$  es la presión de sitio,  $P_0$ , presión atmosférica estándar al nivel del mar en mb y  $\tau$  la longitud de onda en micrómetros.

#### d) Espesor Óptico de Ozono $\tau_{O_3}$

El espesor óptico de ozono, esta en función de la concentración de la columna total de ozono ( $\Omega$ ) en UD y el coeficiente de absorción de ozono ( $\sigma$ ).

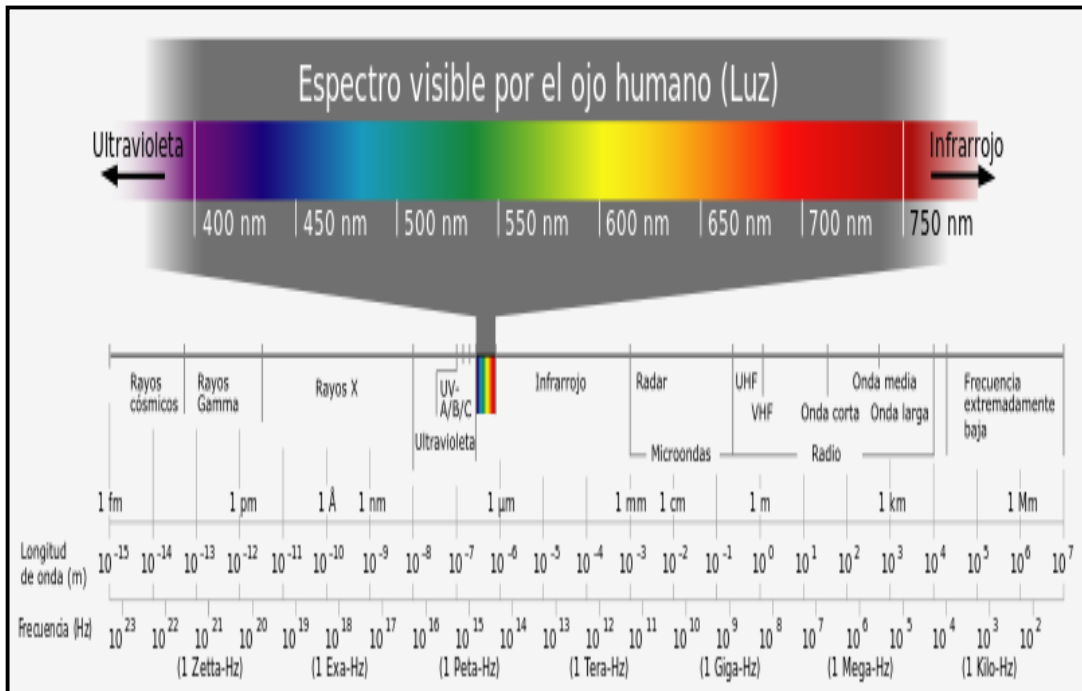
$$\tau_{O_3} = \frac{\Omega \times \sigma}{1000} \quad (4)$$

Las concentraciones de la columna total de ozono, son realizadas por diversos sensores, uno de ellos es el OMI (Ozone Monitoring Instrument) situado en el satélite AURA enviado por la Agencia Nacional de Administración Espacial NASA. La concentración de ozono es medido en unidades Dobson (UD).

### 2.5.2. Espectro Visible

Por encima de la frecuencia de las radiaciones infrarrojas se encuentra lo que comúnmente es llamado luz, un tipo especial de radiación electromagnética que tiene una longitud de onda en el intervalo de 0,4 a 0,8 micrómetros. Este es el rango en el que el sol y las estrellas similares emiten la mayor parte de su radiación. Probablemente, no es una coincidencia que el ojo humano sea sensible a las longitudes de onda que emite el sol con más fuerza. Las unidades usuales para expresar las longitudes de onda son el Angstrom y el nanómetro. La luz que vemos con nuestros ojos es realmente una parte muy pequeña del espectro electromagnético.

**Figura N° 8. Espectro Visible por el ojo humano.**



La radiación electromagnética con una longitud de onda entre 380 nm y 760 nm (790-400 terahercios) es detectada por el ojo humano y se percibe como luz visible. Otras longitudes de onda, especialmente en el infrarrojo cercano (más de 760 nm) y ultravioleta (menor de 380 nm) también se refiere a veces como la luz, aún cuando la visibilidad a los seres humanos no es relevante. Si la radiación tiene una frecuencia en la región visible del espectro electromagnético se refleja en un objeto, por ejemplo, un tazón de fruta, y luego golpea los ojos, esto da lugar a la percepción visual de la escena. Nuestro sistema visual del cerebro procesa la multitud de frecuencias que se reflejan en diferentes tonos y matices, y a través de este, no del todo entendido fenómeno psico-físico, la mayoría de la gente percibe un tazón de fruta; Un arco iris muestra la óptica (visible) del espectro electromagnético. En la mayoría de las longitudes de onda, sin embargo, la radiación electromagnética no es visible directamente, aunque existe tecnología capaz de manipular y visualizar una amplia gama de longitudes de onda.

La luz puede usarse para diferentes tipos de comunicaciones. Las ondas electromagnéticas pueden modularse y transmitirse a través de fibras ópticas, lo cual resulta en una menor atenuación de la señal con respecto a la transmisión por el espacio libre.

**Figura N° 9. Rango de Longitud de onda por cada color.**



| Color    | Longitud de onda |
|----------|------------------|
| violeta  | 380–450 nm       |
| azul     | 450–495 nm       |
| verde    | 495–570 nm       |
| amarillo | 570–590 nm       |
| naranja  | 590–620 nm       |
| rojo     | 620–750 nm       |

### 2.5.3. Fotómetro Solar SP02 L Middleton

Se utilizó un fotómetro solar SP02-L de Middleton Solar, de Australia (Middleton Solar, 2004 Manual Operations SP02-L). Este fotómetro solar se encuentra dentro del marco instrumental del Año Polar Internacional. Este instrumento puede ser utilizado para observaciones de aerosol, ozono y vapor de agua. La configuración del SP02-L esta basado en 4 canales en las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 nm, lo que ha permitido obtener espectros de irradiancia directa de radiación visible.

Estos canales espectro-piroheliométricos se encuentran axialmente alineados en un recinto herméticamente cerrado, los mismos que actúan simultáneamente cuando el instrumento es alineado directamente al sol utilizando un diopter. El SP02-L tiene una banda

de paso de 10 nm, y una vista de campo de sólo 2.5°, las señales de salida tienen un rango de -0.05 a 4.50 VDC, adicionalmente tiene una salida de temperatura interna (10mV/1°C). La temperatura de operación del fotómetro solar es de -30°C a 70 °C.

#### **2.5.4. Sensor OMI – Satélite AURA**

El sensor OMI está situado en el satélite AURA enviado por la Agencia Nacional de Administración Espacial NASA. El OMI provee datos diarios de esta ubicación y utiliza diversas longitudes de onda en el rango de 270 a 380 nm. Tiene una muy fina resolución espectral de 1.0 a 0.45 nm FWHM lo que le permite medir varios otros compuestos atmosféricos. En su mejor elevación sobre el terreno puede tener captar una resolución de 13 km × 24 km.

#### **2.5.5. Colector de Aerosoles**

Un colector de Aerosoles, es un sistema que succiona el aire por un lado del equipo, que puede ser de varias formas, como triangular, este colector tiene la finalidad de retener el material particulado, tanto grueso y fino contenido en el aire, estas partículas son retenidas en una (s) unidad de soporte de filtro, que pueden ser de varios tipos: filtros de nuclepore, cuarzo y teflón.

#### **2.5.6. Técnica de Análisis Elemental por el Método de Plasma de Acoplamiento Inductivo ICP – MS**

ICP-MS o Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo, es una técnica de análisis inorgánico que es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud ( ng/l – mg/l). Consiste en un equipo dotado de un monocromador posterior a la muestra y una serie de detectores dedicados a cada elemento en diferentes posiciones del plano focal.



Su principal característica es que posee unos límites de detección para la mayoría de los elementos de unas pocas ppb – ppt que la hace ideal para el análisis de elementos traza. La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Ar. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un analizador y detectados. Tiene gran variedad de aplicaciones en las siguientes áreas: biología, física de materiales, medioambiente, geoquímica.

### **2.5.7. Filtros de Nucleopore y Teflón**

#### **a) Filtros Nucleopore**

Se obtienen al bombardear películas muy finas de policarbonato (10  $\mu\text{m}$  de grosor) con radiación nuclear y luego tratándola con un producto químico. La radiación provoca daños locales que se agrandan por el tratamiento químico y se convierten en “agujeros”, cuyo tamaño se controla según el tipo de solución y el tiempo de aplicación. Los filtros Nucleopore tienen orificios uniformes en disposición vertical sobre una fina película y se usan en microscopía electrónica de barrido, de forma que las células filtradas quedan dispuestas en un plano uniforme sobre la parte superior del filtro.

#### **b) Filtros de Teflón**

El teflón, es un material que se caracteriza por ser hidrófobo y por tener una excelente resistencia, tanto química como física frente a los disolventes puros y todo tipo de sustancias químicas agresivas (pH1-14).

Debido a su naturaleza, puede ser utilizado en sistemas de filtración o esterilización de gases, muestreadores de aire, limpieza de muestras de aerosoles y tareas de venteo.

#### **2.5.8. Dirección del Viento**

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) y su fuerza es tanto mayor cuanto mayor es el gradiente de presiones.

La determinación de la dirección y velocidad del viento se realiza a partir del estudio de la distribución de la presión atmosférica en la geografía terrestre, es decir a partir de los mapas isobáricos, donde existen dos principios generales:

1. El viento va siempre desde los anticiclones a las borrascas.
2. Su velocidad se calcula en función de los juntas o separadas que estén las isobaras en el mapa. Cuanto más juntas estén las isobaras, más fuerza tendrá el viento y cuanto más separadas, menos.

#### **2.5.9. Masa de Aire**

El concepto de masa de aire fue introducido por Bergeron en 1929 quien la definió como "una porción de la atmósfera cuyas propiedades físicas son más o menos uniformes en la horizontal y su cambio abrupto en los bordes"

Una masa de aire se caracteriza por su gran extensión horizontal de 500 a 5000 Km (en la vertical de 0,5 a 20 Km.) y su homogeneidad horizontal en los referente a la temperatura y contenido de vapor de agua.

Las masas de aire adquieren sus propiedades en contacto con las superficies sobre las que se forman. Dada la poca conductividad calorífica del aire, los grandes volúmenes deben circular lentamente sobre las zonas denominadas regiones fuentes, para adquirir una distribución homogénea de temperatura y humedad.

Según la región donde adquieren sus propiedades básicas se clasifican en:

- Aire Artico o Antártico (A): Se genera sobre la región cubierta de hielo y nieve, con circulación preferentemente anticiclónica. Es fría, seca y estable.
- Aire polar continental (Pc): Se genera en la región subpolar. Es fría y seca.
- Aire polar marítimo (Pm): Se genera en las zonas subpolar y ártica. Es fría y húmeda.
- Aire tropical continental (Tc) Se genera en la zona continental subtropical de altas presiones. Es cálida y seca.
- Aire tropical marítimo (Tm): Se genera en los anticiclones subtropicales, sobre los océanos. Es cálida y húmeda.
- Aire ecuatorial (E): Se genera en los mares tropicales y ecuatoriales. Es caliente y muy húmeda.

Según su comportamiento termodinámico se pueden dividir en :

- Fría (K): Cuando es más fría que las masas de aire próximas o que la superficie sobre la cual se desplaza
- Cálida (W): Se la denomina de esta forma cuando es más caliente que las masas de aire próximas o que la superficie sobre la cual se desplaza.

### 2.5.10. Método de Langley

El método de Langley se basa en la ley de Beer-Bouguer-Lambert, en la que indicamos el subíndice  $\lambda$  puesto que esta relación se cumple para cada longitud de onda:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} \cdot e^{-\tau_{\lambda} m} \quad (1)$$

$I$  es la irradiancia medida a nivel del suelo,  $I_0$  es la irradiancia extraterrestre, corregida de la distancia tierra-sol,  $\tau$  es el espesor óptico total de la atmósfera y "m" es la masa óptica relativa, que se define como el cociente entre el camino óptico real de la luz solar a través de la atmósfera y el camino óptico que atravesaría si la incidencia solar fuese vertical.

Tomando logaritmos se obtiene:

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{0\lambda} - \tau_{\lambda} \cdot m \quad (2)$$

Si para una longitud de onda se representa el logaritmo de la irradiancia medida frente a la masa óptica relativa, a lo largo de una serie de medidas sin variación en el espesor óptico total, el resultado es una recta cuya pendiente es el espesor óptico total y cuya ordenada en el origen corresponde al logaritmo de la irradiancia extraterrestre para esa longitud de onda o canal. Ésta nos dará el coeficiente de calibración para esta longitud de onda o canal.

Si comparamos esta señal extraterrestre (en voltaje o cuentas digitales) con el espectro de irradiancia extraterrestre, y teniendo en cuenta la función instrumento o respuesta espectral de los filtros, podemos obtener unos coeficientes de calibración para convertir la señal bruta en unidades físicas ( $W/m^2$ ). En todo caso, para el cálculo de espesores ópticos con la ley de Beer-Bouguer-

Lambert no son necesarios coeficientes de calibración en unidades físicas, como ya se ha indicado, tan solo la señal extraterrestre que se obtiene a partir de la ordenada en el origen en el ajuste de Langley. Estos coeficientes, tal y como se obtienen a partir del ajuste del método de Langley, dependen de la distancia tierra-sol del día en que se realiza la calibración. Por ello se hace una corrección para obtener un coeficiente referido a la distancia media tierra-sol. Cuando se quiera calcular el espesor óptico para un día concreto, se vuelve a aplicar esta corrección, que podemos evaluar, por ejemplo, con la siguiente fórmula, que depende simplemente del día del año (Nd), donde  $\Gamma$  se conoce como el ángulo del día (en radianes), dado por:

$$\Gamma = 2\pi(Nd - 1)/365:$$

$$d = 1.00110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + \\ + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + \\ + 0.000077 \sin(2\Gamma) \quad (3)$$

El método de Langley clásico requiere que el espesor óptico total de la atmósfera permanezca constante durante la serie de medidas realizadas. A su vez estas medidas deben cubrir un rango de masas ópticas, que será distinto según las características del instrumento que pretendemos calibrar, del lugar de calibración (en particular la latitud) y de la región del espectro a que nos referimos. Habitualmente se consideran masas ópticas menores que 6 o 7 en las calibraciones por el método de Langley. Slusser et al también aborda la elección del rango de masa ópticas, en este caso para la región espectral ultravioleta, donde la sensibilidad del instrumento es un factor determinante, encontrándose que para el canal de 300 nm el rango de masas ópticas es tan solo de 1.2 a 2.2.

Pueden ocurrir variaciones en el espesor óptico de la atmósfera que no son detectables a partir del ajuste de Langley, en particular a

partir de indicadores como el coeficiente de correlación o la desviación estándar, y que introducen errores difícilmente evaluables. Se advierte claramente que variaciones monótonas en el AOD dan lugar a errores sistemáticos en la calibración por el método de Langley, que además son imposibles de detectar en un solo ajuste. Por ello, para asegurar una precisión del 1% en la calibración (en lugares idóneos, como alta montaña) es necesario realizar un cierto número de ajustes a partir de los cuales realizar un promedio. Al menos 20 ajustes por el método de Langley son necesarios para asegurar una precisión del 1% en el voltaje extraterrestre, lo cual es imprescindible para poder determinar el AOD con un error absoluto de 0.01-0.02. En condiciones de baja turbiedad este error absoluto puede significar un error relativo superior al 10% en el AOD. Si llevamos un poco más lejos este argumento, la bondad de una estación de medida para realizar calibraciones por el método de Langley se puede caracterizar mediante el tiempo que hace falta para llevar a cabo los ajustes necesarios para alcanzar una precisión del 1% en la calibración.

La clave para esta condición se encuentra en el número de días estables y soleados de la estación. Las condiciones ideales para realizar una calibración Langley pasan por la menor variación posible en el espesor óptico total. Esta variación, en las longitudes de onda no afectadas por absorciones, se debe a los aerosoles, por lo que se suelen buscar lugares en alta montaña, en altitudes donde la cantidad de aerosoles en la columna atmosférica es baja y sus variaciones pequeñas en términos absolutos. Las estaciones por encima de la capa límite planetaria, como Mauna Loa en Hawai, son óptimas para este tipo de calibraciones. De hecho numerosas redes de fotómetros realizan la calibración absoluta de sus instrumentos de referencia en Mauna Loa. Por supuesto las zonas urbanas no son adecuadas, y en los lugares dentro de la capa de mezcla continental se requerirá un número elevado de calibraciones y los coeficientes

de calibración estarán afectados por más error. Las fuentes de error para el método de Langley se deben a:

- La estabilidad del espesor óptico total durante las medidas. En la región UV las variaciones de ozono durante el día tienen especial importancia. Las variaciones en la cantidad de aerosol afectan a todo el rango espectral. Tienen especial relevancia las variaciones sistemáticas del espesor óptico de aerosoles, como ya se ha comentado.
- El ancho de banda finito del espectro, puesto que la ley de Beer-Bouguer-Lambert es sólo aplicable monocromáticamente, y su aplicación sobre una banda de cierta anchura espectral (la función instrumento del aparato o la anchura del filtro empleado) conlleva un error. Este error aumenta con la anchura y también depende de la región espectral considerada. La linealidad de la respuesta del detector frente al flujo incidente.
- La contribución de radiación difusa en la medida directa al sol, en función de lo grande que sea el campo angular que ve el detector.
- Si deseamos convertir la señal en unidades físicas, entonces hay que considerar también el error del espectro de irradiancia extraterrestre que se emplee. Los errores suelen ser menores del 2% y además son susceptibles de mejora a medida que se desarrollen mejores medidas desde satélites.
- La consideración de una misma masa óptica para moléculas, aerosoles y gases absorbentes (como el ozono). Estas diferencias son mayores para el UV por la fuerte dependencia con el ozono y aumentan con el ángulo cenital solar.
- La entrada de luz parásita a nuestro sistema, en particular por la transmitancia fuera de la banda nominal en filtros interferenciales.

Las variaciones en la temperatura del instrumento, en caso de que no esté estabilizado, que pueden provocar tanto un cambio en la

respuesta del detector como un desplazamiento en longitud de onda de los filtros interferenciales.

## 2.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **AEROSOLES:** Suspensiones de partículas en aire (polvos < 0,5 micrones y humos > 0,5 micrones) o líquidos en aire (neblinas < 0,5 micrones y rocíos > 0,5 micrones).
- **CONTAMINANTE:** Cualquier sustancia en el ambiente que a determinadas concentraciones puede ser perjudicial para el hombre, los animales y las plantas.
- **ECA:** Estándares De Calidad Ambiental
- **ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL:** El espesor óptico (o profundidad óptica) hace referencia a la cantidad de luz que pasa a través de un material. La cantidad de luz transmitida puede ser muy pequeña (menor del 1%) o muy grande (casi del 100%). Cuanto mayor sea el espesor óptico, menos luz pasa a través de ese material. En lo referente a la atmósfera, el espesor óptico de aerosoles (AOT) describe en qué medida los aerosoles impiden la transmisión directa de la luz del Sol de una cierta longitud de onda a través de la atmósfera.
- **DIÁMETRO AERODINÁMICO DE LA PARTÍCULA:** Diámetro de una esfera de densidad 1 g/cm<sup>3</sup> que tiene la misma velocidad final debida a la fuerza gravitatoria en el aire en calma que la que tiene la partícula, bajo las condiciones existentes de temperatura, presión y humedad relativa.
- **LÍMITE TOLERABLE:** Nivel de exposición a un estímulo o toxina suficientemente corto para no provocar sintomatologías en el sujeto.



# **CAPÍTULO III**

## **PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

### **3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE ESTUDIO**

El estudio se realizó en la Universidad Alas Peruanas de la Filial Huancayo. Está situada sobre los 3259 msnm. Tiene como punto de ubicación una latitud sur de 12.04° y una longitud oeste de 75.34°

#### **3.1.1. Caracterización del Área de Estudio**

Debido a su latitud (12° LS), Huancayo debería tener un clima cálido. Sin embargo, la presencia de la Cordillera de los Andes y la altitud de la ciudad (3250 msnm) causan grandes variaciones en el clima. Huancayo tiene un clima templado pero inestable durante todo el año, variando entre 24° en los días más cálidos y 5° grados centígrados en las noches más frías. La gran variación de las temperaturas hace que en la zona sólo se distingan dos estaciones:

- La temporada de lluvias desde octubre hasta abril, correspondiente a gran parte de la primavera y el verano.
- La temporada seca de mayo a septiembre.
- Temperatura mínima: 5° grados promedio
- Temperatura máxima: 24° grados promedio
- Presión atmosférica de Huancayo: 693.27mb
- Precipitación: que corresponde a la temporada seca cubre la mayor parte con precipitaciones menores de 100mm, los valores mensuales de esta temporada se pueden visualizar en la tabla N° 8.

**Tabla N° 8. Precipitación total mensual en mm. Fuente SENAMHI - 2015**

| Parámetros climáticos promedio   |       |     |      |      |      |       |       |
|----------------------------------|-------|-----|------|------|------|-------|-------|
| Precipitación total (mm) mensual | Ene   | Feb | Mar  | Abr  | May  | Jun   | Anual |
|                                  | 205.7 | 271 | 133  | 79.1 | 11.5 | 0     |       |
|                                  | Jul   | Ago | Sep  | Oct  | Nov  | Dic   | 894.9 |
|                                  | 9.8   | 0   | 79.9 | 69.7 | 55.7 | 139.3 |       |
| <b>Fuente: SENAMHI 2015</b>      |       |     |      |      |      |       |       |

### 3.2. RESEÑA DEL ESTUDIO

Durante la 18va expedición Peruana realizada a la Antártica, se realizaron estudios detallados sobre los aerosoles, sobre todo del Espesor Óptico de Aerosol, es así que tomando como bases a estos estudios, se inició una pequeña campaña de mediciones y monitoreo, realizado en la región Andina del Perú, es a partir de estos monitores realizados que se obtuvo una gran data de información sobre Índice UV, Ozono y Aerosoles, es a partir de estas mediciones y monitoreos, que se realizó el presente estudio, donde se describe los resultados obtenidos de los aerosoles durante los meses de Mayo, Junio y Julio, Agosto y Setiembre del año 2015, en la Región Andina – Huancayo, que se ubica a 12° de latitud Sur.

El presente estudio fue realizado, en la Universidad Alas Peruanas – Filial Huacayo, se tuvo como punto de partida las investigaciones realizadas en la “Primera Etapa del Proyecto Medición Espectral de la Radiación Solar para cuantificar la Capa de Ozono, El Índice UV y Espesor Óptico de Aerosol en la Atmósfera Antártica y su Relación con las Mediciones en Perú” que corresponde a la 18va expedición a la Antártica, que fue trabajado en convenio entre el Instituto Antártico y la Universidad Alas Peruanas.

Esta investigación es Experimental, se eligió la temporada seca de la ciudad de Huancayo como la mejor temporada para realizar mediciones, por la mayor frecuencia de días despejados con brillo solar. Fueron 5 meses de monitoreo con los equipos que fueron usados en la Antártica.

### **3.2.1. Descripción de la Investigación**

La presente investigación fue dividida en diversas actividades, que van desde la instalación de equipos e instrumentos, registro de datos, creación de una base de datos y el respectivo procesamiento de los datos obtenidos durante los 5 meses de monitoreo.

### **3.3. TIEMPO DE MUESTREO**

Para realizar esta investigación, se utilizó el método de Langley, este método en estaciones ordinarias, esta sujeta a la disponibilidad de días estables y despejados. Es por ello, se tuvo en cuenta las temporadas predominantes de la ciudad de Huancayo; la temporada seca tiene una duración de 5 meses, de Mayo a Setiembre, durante el cual gran parte del tiempo el sol permanece visible. En los cinco meses de monitoreo, se tuvieron las siguientes características:

- A inicios de la temporada, en el mes de Mayo se caracterizó por presentar brillo solar desde tempranas horas de la mañana, manteniéndose hacia el atardecer.
- Hubo presencia de nubosidad horaria no predominante entre los meses de Junio a Agosto, algunas mañan las condiciones fueron de nublado parcial, variando en cielo despejado al medio día.
- Poca presencia de vientos, e excepción de Agosto, mes que tiene como singularidad la predominancia de vientos fuertes.
- A finales de la temporada, el mes con menor brillo solar fue del mes de setiembre por las condiciones climáticas que presento, como nubosidad baja estratiforme, dando como resultado condiciones de cielo cubierto con presencia de lluvias o lloviznas por las mañanas, variando alrededor del medio día a condiciones de nublado parcial a nubes dispersas con presencia de ligero brillo solar.

### 3.4. MATERIALES Y EQUIPOS

#### 3.4.1. Fotómetro Solar

Se utilizó un fotómetro solar SP02-L de Middleton Solar, de Australia. Este fotómetro solar fue parte de las investigaciones en la Antártida, y en convenio entre el Instituto Antártico y la Universidad Alas Peruanas se obtuvo este equipo para el monitreo correspondiente. Este instrumento puede ser utilizado para observaciones de aerosol, ozono y vapor de agua. La configuración del fotómetro solar está basada en 4 canales en las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 nm, lo que ha permitido obtener espectros de irradiancia directa de radiación visible. Estos canales espectro-piroheliométricos se encuentran axialmente alineados en un recinto herméticamente cerrado, los mismos que actúan simultáneamente cuando el instrumento es alineado directamente al sol utilizando un diopter.

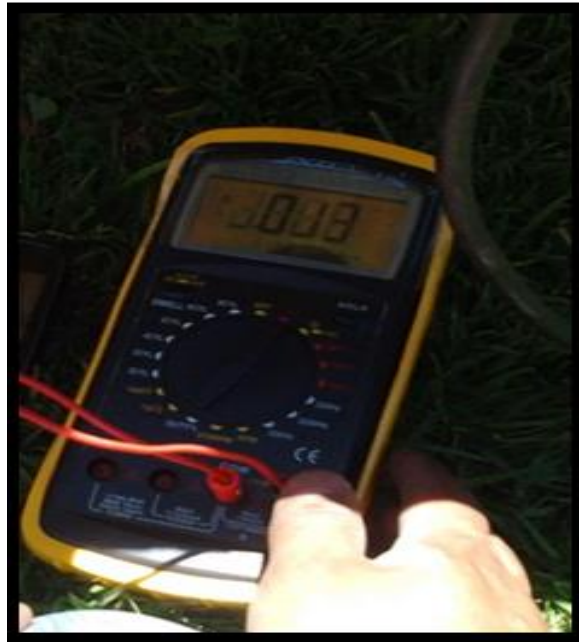
**Fotografía N° 1. Fotómetro solar SP02-L de Middleton Solar**



### 3.4.2. Multímetro Digital

Para registrar las lecturas del fotómetro solar se utilizó un multímetro digital. Este Multímetro registró las lecturas de las 4 longitudes de radiación visible de onda del fotómetro solar.

**Fotografía N° 2. Multímetro Digital.**



### 3.4.3. Sistema Colector de Material Particulado

Se montó un sistema de material particulado para el análisis elemental, para lo cual se dispuso de una bomba de vacío (HI-Q Environmental Company, USA), de 1/4 HP y un flujo de 20 LPM con su respectivo rodámetro. Adicionalmente se coloca una unidad de filtro Estacionario (Stacker Filter Unit, SFU), donde se utilizó los filtros de nuclepore y teflón, para la captura de material fino y grueso. También se colocó un sistema electrónico para el funcionamiento y protección de la bomba de vacío.

**Fotografía N° 3. Bomba de vacío (HI-Q Environmental Company, USA) y su respectivo rotámetro (Dwyer serie VFA) con una entrada de flujo másico de 10 L/min**



**Fotografía N° 4. Unidad de Filtro Estacionario (Stacker Filter Unit, SFU)**



#### **3.4.4. Estación Meteorológica**

Como otro punto se logro conseguir una pequeña estación meteorológica, obteniéndose datos de temperatura ambiental, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, precipitación y humedad relativa, que son indicadores necesarios para evaluar los resultados del espesor óptico de aerosol.

### **3.5. METODOLOGÍA**

#### **3.5.1. Mediciones de Radiación Visible**

El equipo de medición para la radiación visible, es básicamente con el fotómetro solar, que fue alineado alineamiento perpendicularmente a los rayos solares, con ayuda de un voltímetro se registró el voltaje en cada canal.

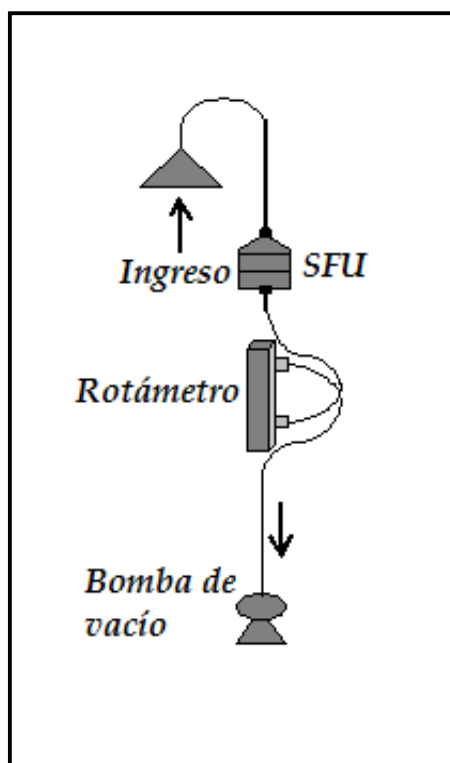
Las longitudes de onda que mide el instrumento son de 412, 500, 675 y 862 nanómetros. Las mediciones se realizaron en los días con 0 o menor cobertura nubosa alrededor del Sol, cada 30 min durante todo el tiempo que se mantuviera estas condiciones de cobertura entre las 9am a 12:00pm. La ubicación del equipo dependía de la salida, puesta del sol y de los vientos para su mejor manipulación y protección del equipo.

El procesamiento de datos para la identificación de los tipos de aerosol consistió en una primera fase en la determinación del espesor óptico total a partir de la ley de Lambert Beer, la Irradiancia fuera de la atmósfera para cada longitud de onda, del espesor óptico del ozono, del espesor óptico Rayleigh y del espesor óptico del Aerosol. Se ha obtenido la irradiancia extraterrestre por el método Langley utilizando herramientas estadísticas de regresión para la identificación de días con alta significancia estadística, lo que permitió un adecuado cálculo de la irradiancia extraterrestre para cada longitud de onda, utilizados para el procesamiento del Espesor Óptico Total.

### 3.5.2. Sistema de Captura de Material Particulado

Para la determinación de la composición química se utilizó un sistema de captura de material particulado como se muestra en la figura N° 8 . El sistema succiona el aire por el lado del protector de lluvia de forma triangular, el material particulado grueso y fino contenido en el aire es retenido en los SFU (unidad de soporte de filtro) por los filtros de nuclepore y teflón, estos últimos retiene el material, luego el aire libre de estas partículas pasa por un rotámetro para el monitoreo del flujo de aire en LPM y finalmente expulsado al exterior por la bomba de vacío. El sistema de monitoreo localizó en la parte más alta y alejado posible de fuentes de contaminación directas.

Figura N° 10. Sistema de captura de material particulado



Se utilizaron filtros de teflón para la captura de partículas finas entre 0.2  $\mu\text{m}$  y 8  $\mu\text{m}$  y filtros de nuclepore para la captura de partículas gruesas mayores a 8  $\mu\text{m}$  y de finas a 0.2  $\mu\text{m}$ . Los filtros de nucleopore y Teflón fueron pesados previamente antes del análisis y han sido



guardados en placas petri de plástico. Antes de colocar los filtros en los SFU, las placas petry de procedencia fueron debidamente rotuladas con la fecha de inicio, tipo de filtro y peso inicial, al terminar el muestreo se retornaron a las placas respectivas, finalmente almacenados todos los filtros en un cooler para mantenerlos fuera de una posible contaminación.

**Fotografía N° 5. Filtro de nucleopore de nucleopore poseen un diámetro de poro de 8 um, es decir que atrapan partículas menores a 10 um.**



Los filtros de Teflón y Nuclepore fueron pesados previamente antes de se usados, utilizando una microbalanza con una precisión de  $\pm 1\mu\text{g}$ , y guardados en placas petri de plástico en un contenedor, dentro de un congelador, la colección se realizo cada 10 a 30 min. hasta acumular un volumen de 43 metros cúbicos por muestra, al terminar el monitoreo, los filtros se guardaron sus respectivas placas petri y bolsas ziploc para su análisis por la técnica de ICP (inductively coupled plasma).

### **3.5.3. Técnica de Análisis Elemental por el Método de Plasma de Acoplamiento Inductivo ICP – MS**

El método de análisis que se utilizara en las muestras colectadas para lograr la determinación de la composición química elemental es el Plasma Acoplado Inductivamente (Inductively Coupled Plasma, ICP) sugerido según el trabajo de Gidhagen et al (2002). Este método tiene la ventaja de realizar la determinación simultánea de hasta 30 elementos químicos entre metales y no-metales, por lo que es posible obtener una mayor información de las muestras a estudiar. Adicionalmente, el límite de detección es muy bajo lo que permite detectar valores traza de los elementos. Este Análisis fue realizado por el laboratorio CORPLAB, acreditado por INDECOPI.

## **3.6. PROCEDIMIENTO**

### **3.6.1. FASE DE PRE CAMPO**

La fase de pre campo, consistió en preparar, armar e instalar todos los equipos necesarios para el monitoreo de esta investigación.

#### **a) RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

Se baso primeramente en la recopilación de información sobre el tema, siendo completados con las revisiones correspondientes de artículos científicos, páginas web y otros trabajos de investigación sobre el tema.

#### **b) ENSAMBLAJE DEL FOTÓMETRO SOLAR**

Se ensablo el fotómetro solar SP02-L de Middleton Solar y fue calibrado durante 5 días para iniciar con el estudio, este fotómetro se ubico en el techo de la Sede Principal de la Universidad Alas

Peruanas - Filial Huancayo, fue requisito indispensable tener un área despejada. La configuración del SP02-L esta basado en 4 canales en las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 nm. Estos canales espectro-piroheliométricos se encuentran axialmente alineados en un recinto herméticamente cerrado, los mismos que actúan simultáneamente cuando el instrumento es alineado directamente al sol utilizando un diopter. Estos valores son registrados por un multímetro digital.

Para su correcta instalación, en la primera fase, fue necesario el uso de un trípode para que logre tener la adecuada elevación y no hayan sombras que interfieran con el sensor, logrando su alineamiento perpendicular a los rayos solares, además se uso un voltímetro para registrar el voltaje en cada canal, y una batería de 12 volteos para la alimentación al fotómetro.

**Fotografía N° 6. Fotómetro solar SP-02L, instalado en un trípode alineado perpendicularmente a los rayos solares para mediciones continuas de radiación solar directa.**



En la segunda fase se instaló un Tracker (Kipp & Zonen Tracker 2AP ) solar para seguimiento continuo a la radiación solar directa. La fotografía N° 7 muestra el fotómetro ya instalado en un tracker solar en el techo de la Universidad Alas Peruanas – Filial Huancayo.

**Fotografía N° 7. Vista del fotómetro solar SP-02L (circulo rojo) instalado en un tracker solar para mediciones continuas de radiación solar directa.**



### **c) Instalación de la Estación Meteorológica**

Esta mini estación meteorológica fue instalada en el mes de Julio, a mitad del periodo del monitoreo, esta estación complementa la información sobre:

- Presión atmosférica
- Temperatura ambiental
- Humedad relativa.
- Velocidad y dirección del viento
- Precipitación

**Fotografía N° 8. Vista de la estación metereológica.**



**d) Sistema Colector de Aerosoles**

Se montó un sistema de material particulado para el análisis elemental, utilizando los filtros de nuclepore y teflón, para lo cual se dispuso de una bomba de vacío, de 1/4 HP a un flujo de 20 LPM aproximadamente. Tanto en la instalación y en la práctica no se dio ningún inconveniente, los días de trabajo fueron de mejor desarrollo y normalidad.

### 3.6.2. Fase de Campo

El trabajo de campo consiste en tomar las lecturas del fotómetro solar cada 30 minutos para su posterior armado de Data y evaluación en gabinete. Todas las observaciones y actividades son anotadas en una bitácora para la validación posterior de la calidad de la información. Fue posible implementar las primeras mediciones continuas del espesor óptico de aerosol en la ciudad de Huancayo, sin ninguna contrariedad.

#### 1. Mediciones de la estación meteorológica

Con ayuda de la estación meteorológica, se obtuvo datos de temperatura, presión y humedad, que son indicadores necesarios para evaluar los resultados del espesor óptico de aerosol. Esta estación meteorológica empezó a operar desde el 21 de Julio al 12 de Agosto del 2015. En la tabla N° 8 se muestra los datos obtenidos diarios por hora.

**Tabla N° 9. Mediciones de temperatura, humedad y presión atmosférica, obtenidas con una estación meteorológica casera en Huancayo. Base de Datos del 21 de Julio al 12 de Agosto 2015**

| FECHA     | HORA LOCAL | TEMPERATURA °C | HUMEDAD % | PRESION hPa |
|-----------|------------|----------------|-----------|-------------|
| 21-Jul-08 | 09:35:45   | 23.6           | 21        | 1020        |
| 21-Jul-08 | 11:46:38   | 26.6           | 16        | 1013        |
| 21-Jul-08 | 12:06:03   | 27.6           | 14        | 1013        |
| 22-Jul-08 | 09:03:45   | 13.6           | 35        | 1013        |
| 22-Jul-08 | 09:33:59   | 14.4           | 33        | 1013        |
| 22-Jul-08 | 09:59:40   | 21.6           | 23        | 1013        |
| 22-Jul-08 | 10:29:53   | 22.4           | 22        | 1014        |
| 22-Jul-08 | 10:58:59   | 24.9           | 19        | 1014        |

| <b>FECHA</b> | <b>HORA LOCAL</b> | <b>TEMPERATURA °C</b> | <b>HUMEDAD %</b> | <b>PRESION hPa</b> |
|--------------|-------------------|-----------------------|------------------|--------------------|
| 22-Jul-08    | 11:32:51          | 23.9                  | 21               | 1014               |
| 22-Jul-08    | 12:01:15          | 23                    | 22               | 1016               |
| 23-Jul-08    | 09:02:35          | 13.9                  | 37               | 1012               |
| 23-Jul-08    | 09:30:36          | 21.8                  | 24               | 1013               |
| 23-Jul-08    | 09:58:10          | 24                    | 21               | 1014               |
| 23-Jul-08    | 10:29:03          | 25.8                  | 19               | 1011               |
| 23-Jul-08    | 11:01:14          | 25.4                  | 20               | 1013               |
| 23-Jul-08    | 11:31:08          | 26.1                  | 18               | 1011               |
| 23-Jul-08    | 12:00:22          | 26                    | 17               | 1014               |
| 24-Jul-08    | 09:05:12          | 14.8                  | 34               | 1012               |
| 24-Jul-08    | 09:30:15          | 16.8                  | 26               | 1015               |
| 24-Jul-08    | 10:04:06          | 14.4                  | 30               | 1017               |
| 24-Jul-08    | 10:32:18          | 16                    | 29               | 1017               |
| 24-Jul-08    | 10:59:30          | 16.9                  | 28               | 1016               |
| 24-Jul-08    | 11:33:22          | 17.3                  | 28               | 1015               |
| 24-Jul-08    | 12:01:45          | 21.2                  | 23               | 1015               |
| 31-Jul-08    | 09:03:42          | 13.1                  | 38               | 1012               |
| 31-Jul-08    | 09:33:15          | 10.2                  | 43               | 1016               |
| 31-Jul-08    | 10:29:20          | 16.6                  | 32               | 1013               |
| 31-Jul-08    | 10:57:45          | 21.2                  | 25               | 1012               |
| 31-Jul-08    | 11:33:25          | 25.1                  | 20               | 1012               |
| 31-Jul-08    | 12:05:07          | 25.8                  | 19               | 1014               |
| 1-Aug-08     | 10:00:07          | 14.4                  | 34               | 1016               |
| 1-Aug-08     | 10:30:10          | 12.5                  | 40               | 1013               |
| 4-Aug-08     | 08:58:24          | 19.4                  | 32               | 1014               |
| 4-Aug-08     | 09:36:54          | 22.9                  | 25               | 1014               |
| 4-Aug-08     | 10:02:34          | 25.4                  | 22               | 1018               |
| 4-Aug-08     | 11:01:05          | 26.2                  | 20               | 1020               |
| 4-Aug-08     | 11:35:29          | 28.2                  | 17               | 1015               |
| 4-Aug-08     | 12:07:53          | 29.3                  | 16               | 1015               |

| FECHA     | HORA LOCAL | TEMPERATURA °C | HUMEDAD % | PRESION hPa |
|-----------|------------|----------------|-----------|-------------|
| 11-Aug-08 | 09:03:45   | 12.6           | 41        | 1014        |
| 11-Aug-08 | 09:29:55   | 10.5           | 47        | 1012        |
| 11-Aug-08 | 10:01:32   | 12.3           | 44        | 1018        |
| 11-Aug-08 | 10:31:05   | 19.4           | 31        | 1013        |
| 11-Aug-08 | 10:59:22   | 23.3           | 25        | 1022        |
| 11-Aug-08 | 12:02:58   | 25.8           | 20        | 1028        |
| 12-Aug-08 | 09:33:38   | 12.9           | 39        | 1016        |
| 12-Aug-08 | 10:02:50   | 13             | 40        | 1015        |
| 12-Aug-08 | 10:33:20   | 17.3           | 32        | 1015        |
| 12-Aug-08 | 11:03:05   | 26.5           | 21        | 1027        |
| 12-Aug-08 | 11:30:39   | 28.6           | 17        | 1022        |
| 12-Aug-08 | 12:07:13   | 31.2           | 15        | 1021        |

## 2. Muestreo Cuantitativo de los Aerosoles

### a) Mediciones de radiación visible directa

Para el procesamiento de datos en el cálculo del espesor óptico se realizaron lecturas cada 30 min., cabe mencionar que las mediciones son realizadas en el transcurso de la mañana, entre las 9:00 a.m. hasta las 12:00 p.m., teniendo como consideración principal los 30° de cielo despejado alrededor del Sol, sin embargo también se ha monitoreado a cielo parcialmente despejado, considerándose para el procesamiento de datos, principalmente para el cálculo de la Irradiancia extraterrestre por el método de Langley solo los días despejados, en un promedio de 7 lecturas por cada longitud de onda por cada día, durante todo los meses de de monitoreo. Para determinar el espesor óptico de aerosoles , es necesario obtener otros datos importantes como son: Espesor Óptico Total, Espesor Óptico de Rayleigh y el Espesor Óptico de



Ozono. Los valores tuvieron un comportamiento esperado para la época seca y tuvo mayores valores al final de la estación seca (mes de Agosto).

Cabe resaltar que las mediciones de la radiación visible empezó el 13 de Mayo del 2015, a partir de esta fecha se tuvo 141 días posibles a monitorear, de los cuales el 30% fueron días no hábiles a monitorear por ser fin de semana (la Universidad no otorgo permiso para el monitoreo los sábados y domingos) o ser días feriados, el otro 30% de días no hábiles a monitoreo fueron días por no presentar condiciones climáticas favorables (nublado total). Solo fueron monitoreados 56 días que representa el 40% del total de días (Ver Tabla N° 10). En la siguiente tabla N° 11 se observa el calendario de mediciones realizado durante los 5 meses de monitoreo.

**Tabla N° 10. Distribución de Trabajo iniciada las mediciones de radiación visible.**

| <b>Observaciones</b>                                    | <b>Total de días</b> | <b>Porcentaje %</b> |
|---|----------------------|---------------------|
| Días no hábiles por feriados y/o universidad no atiende | 42                   | 30%                 |
| Días no hábiles por condiciones climáticas              | 43                   | 30%                 |
| Días hábiles a monitorear                               | 56                   | 40%                 |
| <b>Total de días posibles a monitorear</b>              | <b>141</b>           | <b>100%</b>         |

La data obtenida correspondiente al mes de setiembre, no ha sido de buena calidad, debido a la predominancia de días, con cielo total y parcialmente cubierto por nubes densas, en este mes hubo al menos 37% de días con nubosidad mayor a 25% de cobertura nubosa, normal en esta época del año en la ciudad de Huancayo, condiciones que impiden la medición correspondiente, ya que es el último mes de la temporada seca, donde inicia la época de lluvias.

Tabla N° 11. Calendario de mediciones de radiación visible, en los 5 meses de monitoreo.

| CALENDARIO DE MEDICIONES |    |                        |       |    |              |       |    |              |        |    |              |           |    |              |
|--------------------------|----|------------------------|-------|----|--------------|-------|----|--------------|--------|----|--------------|-----------|----|--------------|
| MAYO                     |    |                        | JUNIO |    |              | JULIO |    |              | AGOSTO |    |              | SETIEMBRE |    |              |
| J                        | 1  | --                     | D     | 1  | --           | M     | 1  | Realizado    | V      | 1  | No realizado | L         | 1  | Realizado    |
| V                        | 2  | --                     | L     | 2  | Realizado    | Mi    | 2  | No realizado | S      | 2  | --           | M         | 2  | No realizado |
| S                        | 3  | --                     | M     | 3  | Realizado    | J     | 3  | Realizado    | D      | 3  | --           | Mi        | 3  | Realizado    |
| D                        | 4  | --                     | Mi    | 4  | No realizado | V     | 4  | Realizado    | L      | 4  | Realizado    | J         | 4  | No realizado |
| L                        | 5  | --                     | J     | 5  | realizado    | S     | 5  | --           | M      | 5  | No realizado | V         | 5  | Realizado    |
| M                        | 6  | --                     | V     | 6  | No realizado | D     | 6  | --           | Mi     | 6  | No realizado | S         | 6  | --           |
| Mi                       | 7  | --                     | S     | 7  | --           | L     | 7  | Realizado    | J      | 7  | No realizado | D         | 7  | --           |
| J                        | 8  | Instalación de equipos | D     | 8  | --           | M     | 8  | No realizado | V      | 8  | No realizado | L         | 8  | No realizado |
| V                        | 9  |                        | L     | 9  | Realizado    | Mi    | 9  | No realizado | S      | 9  | --           | M         | 9  | Realizado    |
| S                        | 10 |                        | M     | 10 | No realizado | J     | 10 | No realizado | D      | 10 | --           | Mi        | 10 | No realizado |
| D                        | 11 |                        | Mi    | 11 | No realizado | V     | 11 | Realizado    | L      | 11 | Realizado    | J         | 11 | Realizado    |
| L                        | 12 | PRUEBA                 | J     | 12 | No realizado | S     | 12 | --           | M      | 12 | Realizado    | V         | 12 | No realizado |
| M                        | 13 | Realizado              | V     | 13 | no Realizado | D     | 13 | --           | Mi     | 13 | No realizado | S         | 13 | --           |
| Mi                       | 14 | Realizado              | S     | 14 | --           | L     | 14 | No realizado | J      | 14 | No realizado | D         | 14 | --           |
| J                        | 15 | Realizado              | D     | 15 | --           | M     | 15 | Realizado    | V      | 15 | Realizado    | L         | 15 | Realizado    |
| V                        | 16 | Realizado              | L     | 16 | No realizado | Mi    | 16 | Realizado    | S      | 16 | --           | M         | 16 | No realizado |
| S                        | 17 | --                     | M     | 17 | No realizado | J     | 17 | Realizado    | D      | 17 | --           | Mi        | 17 | Realizado    |
| D                        | 18 | --                     | Mi    | 18 | Realizado    | V     | 18 | Realizado    | L      | 18 | Realizado    | J         | 18 | Realizado    |
| L                        | 19 | Realizado              | J     | 19 | Realizado    | S     | 19 | --           | M      | 19 | Realizado    | V         | 19 | No realizado |
| M                        | 20 | Realizado              | V     | 20 | Realizado    | D     | 20 | --           | Mi     | 20 | Realizado    | S         | 20 | --           |
| Mi                       | 21 | Realizado              | S     | 21 | --           | L     | 21 | Realizado    | J      | 21 | No realizado | D         | 21 | --           |

| CALENDARIO DE MEDICIONES |    |              |       |    |              |       |    |              |        |    |              |           |    |              |
|--------------------------|----|--------------|-------|----|--------------|-------|----|--------------|--------|----|--------------|-----------|----|--------------|
| MAYO                     |    |              | JUNIO |    |              | JULIO |    |              | AGOSTO |    |              | SETIEMBRE |    |              |
| J                        | 22 | Realizado    | D     | 22 | --           | M     | 22 | Realizado    | V      | 22 | No realizado | L         | 22 | Realizado    |
| V                        | 23 | No realizado | L     | 23 | No realizado | Mi    | 23 | Realizado    | S      | 23 | --           | M         | 23 | No realizado |
| S                        | 24 | --           | M     | 24 | No realizado | J     | 24 | Realizado    | D      | 24 | --           | Mi        | 24 | Realizado    |
| D                        | 25 | --           | Mi    | 25 | Realizado    | V     | 25 | No realizado | L      | 25 | No realizado | J         | 25 | No realizado |
| L                        | 26 | Realizado    | J     | 26 | Realizado    | S     | 26 | --           | M      | 26 | Realizado    | V         | 26 | Realizado    |
| M                        | 27 | Realizado    | V     | 27 | No realizado | D     | 27 | --           | Mi     | 27 | Realizado    | S         | 27 | --           |
| Mi                       | 28 | Realizado    | S     | 28 | --           | L     | 28 | Feriado      | J      | 28 | Realizado    | D         | 28 | --           |
| J                        | 29 | Realizado    | D     | 29 | --           | M     | 29 | Feriado      | V      | 29 | No realizado | L         | 29 | No realizado |
| V                        | 30 | No realizado | L     | 30 | No realizado | Mi    | 30 | No realizado | S      | 30 | --           | M         | 30 | No realizado |
| S                        | 31 | --           |       |    |              | J     | 31 | Realizado    | D      | 31 | --           |           |    |              |

Se ha ordenado la data original obtenida del monitoreo de la radiación directa visible en las cuatro longitudes de onda 412, 500, 675 y 862 nm, y estas se muestran en la Tabla N° 14 .

**Fotografía N° 10. Vista del registro de las lecturas de radiación visible del Fotómetro solar**



**i) Masa de Aire**

Para el procesamiento de los datos, primeramente se ha determinado la masa del aire para cada instante de las mediciones, utilizando el modelo propuesto por David Brooks del Programa GLOBE de los EEUU.

**ii) Espesor Óptico Total**

La determinación del espesor óptico total esta basada en la Ley de Lambert-Beer, la cual explica la atenuación de la radiación solar al paso por la atmósfera (Vitae y Tomasi, 1998).

$$\tau_t = \frac{\ln\left(\frac{RI_{0\lambda}}{I_\lambda}\right)}{m} \quad (2)$$

donde R es el factor de corrección distancia sol-tierra,  $I_\lambda$ , es la intensidad de radiación observada a una longitud de onda ( $\lambda$ ), a nivel de la superficie del suelo;  $I_{0\lambda}$  es la intensidad de radiación en el tope de la atmósfera, obtenido gráficamente por el método de Langley (Reagan y col, 1984), para una  $\lambda$  en particular; y m es la masa del aire determinado por la secante del ángulo cenit solar.

Se ha obtenido la irradiancia extraterrestre por el método Langley utilizando herramientas estadísticas de regresión para la identificación de días con alta significancia estadística, lo que permitió un adecuado cálculo de la irradiancia extraterrestre para cada longitud de onda, utilizados para el procesamiento del Espesor Óptico Total.

### iii) Espesor Óptico de Rayleigh

El espesor óptico del aire conocido como el de Rayleigh, es calculado utilizando la ecuación de (Dutton y col., 1994):

$$\tau_{Ray} = \frac{P}{P_0} \times 0.00877 \times \lambda^{-4.05} \quad (3)$$

Se ha considerado para el cálculo del Espesor Óptico de Rayleigh la presión atmosférica en la ciudad de Huancayo de 693.2744 mb y la presión atmosférica a nivel del mar de 1013.25 mb; para finalmente obtener el Espesor Óptico de Aerosol (AOD) diario para cada instante de las mediciones.

**Tabla N° 12. Datos para el Espesor Óptico de Rayleigh**

| Datos       |          |
|-------------|----------|
| P sitio: mb | 693.2744 |
| Po mb       | 1013.25  |

**iv) Espesor Óptico de ozono**

El espesor óptico de ozono, esta en función de la concentración de la columna total de ozono ( $\Omega$ ) en UD obtenido con el Microtops II y el coeficiente de absorción de ozono ( $\sigma$ ).

$$\tau_{O_3} = \frac{\Omega \times \sigma}{1000} \quad (4)$$

Para las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 los coeficientes de absorción son 0.001996295, 0.000909956, 0.000271087 y 0.000101433 respectivamente, estos valores fueron proporcionados por el Dr. Joseph Michelsky de la NOAA vía e-mail.

Se ha obtenido del mismo satélite AURA, la concentración de la columna total de ozono en unidades Dobson (UD) para los días monitoreados, para la determinación del Espesor Óptico de Ozono.

**v) Espesor Óptico de Aerosol**

Para la determinación del espesor óptico de aerosol, se utilizó un fotómetro solar SP02-L de Middleton Solar. El espesor óptico de aerosol es determinado para las longitudes de onda de 412, 500 675 y 862 nm, a partir del

espesor óptico total ( $\tau_t$ ), el cual es la suma de los espesores ópticos del aire (dispersión Rayleigh,  $\tau_{Ray}$ ), ozono ( $\tau_{O_3}$ ) y aerosoles ( $\tau_{AOD}$ ), de allí que se obtiene la ecuación para el espesor óptico de aerosol (Bodhaine, 1999). La secuencia de ecuaciones se basa en el cálculo de los tres primeros espesores ópticos.

$$\tau_{AOD} = \tau_t - \tau_{Ray} - \tau_{o_3} \quad (1)$$

### **3. Muestreo Cualitativo de los Aerosoles**

#### **a) Muestreo de Material Particulado**

En esta ocasión, se tomaron las muestras durante los días finales de Agosto del 2015, durante 2 días para fines de una mayor colecta. Se colectaron en total 4 filtros: 2 de la fracción fina y 2 de la fracción gruesa. Los filtros de Teflón (Politetrafluoroetileno PTFE) y Nucleopore (Policarbonato) fueron enviados a los laboratorios de Corlab en la ciudad de Lima para fines de poder ser analizados por la técnica de ICP (Inductively Coupled Plasma) la cual permite conocer la composición elemental del material grueso y fino del material particulado (aerosoles) colectado en esta ubicación urbana de Huancayo.

#### **i) Fase de Gabinete**

El trabajo de gabinete involucra el procesamiento, análisis e interpretación de la información, salida de reportes preliminares, cuadros, gráficos y la elaboración final de los resultados.

Se logró obtener una base de datos de los 5 meses monitoreados, con mediciones espectrales de radiación solar visible en 4 longitudes de onda, entre las horas de 9am a 12pm, cada 30 minutos, este horario es importante puesto que estos parámetros se midieron en la temporada donde se tiene mayor presencia de brillo solar.

Las mediciones espectrales de radiación visible directa, fueron utilizadas para el cálculo del espesor óptico de aerosol. Las muestras colectadas de material particulado fueron enviadas al laboratorio correspondiente, para su análisis elemental; en un total de 4 muestras (2 filtros de teflón y 2 filtros de nuclepore).

Sin embargo, a pesar de las condiciones desfavorables del clima en un porcentaje de días se logró una data representativa para el estudio, porque la presencia de nubes alrededor del Sol y días nublados en la estación fueron sobre todo más frecuentes en el último mes. En la siguiente tabla se observa la cantidad de días monitoreados por mes. A continuación se muestran cuadros mensuales, en los que se presentan el promedio de las mediciones por hora y día en voltaje por longitud de onda, con las observaciones correspondientes a la medición.

**Tabla N° 13. Días monitoreados por mes.**

| <b>Mes</b>                                | <b>Días Monitoreados</b> |
|---|--------------------------|
| Mayo                                      | 12 días                  |
| Junio                                     | 9 días                   |
| Julio                                     | 14 días                  |
| Agosto                                    | 10 días                  |
| Setiembre                                 | 11 días                  |
| <b>Total días monitoreados en 5 meses</b> | <b>56 días</b>           |



## ii) Data del Fotómetro Solar

La data fue ordenada y clasificada por día y hora en un formato excel, se tiene 5 archivos por cada vez de monitoreo. En las tablas N° 14, 15, 16, 17 y 18 (Ver Anexos) pueden observarse las datas correspondientes a cada día monitoreado, a cada hora, y en cada longitud de onda, y las anotaciones de las condiciones climáticas de cada día de monitoreo.

Para el procesamiento de los datos, primeramente se ha determinado la masa del aire para cada instante de las mediciones, utilizando el modelo propuesto por David Brooks del Programa GLOBE de los EEUU, estos datos son calculados colocando la fecha y la latitud del área de estudio, en su modelo el cual está colgado en su página web. En la Tabla N° 19 se muestran los valores promedios diarios obtenidos de la Masa de Aire para cada día monitoreado.

**Tabla N° 19. Valores Promedios Diarios de Masa de Aire**

| Fecha     | Masa de Aire | Fecha     | Masa de Aire | Fecha     | Masa de Aire |
|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|
| 13-May-08 | 1.1960647816 | 09-Jun-08 | 1.4007010415 | 21-Jul-08 | 1.3758681572 |
| 14-May-08 | 1.2314700861 | 18-Jun-08 | 1.4143420440 | 22-Jul-08 | 1.3772529239 |
| 15-May-08 | 1.3120451748 | 19-Jun-08 | 1.4397984642 | 23-Jul-08 | 1.3793388841 |
| 16-May-08 | 1.3258496743 | 20-Jun-08 | 1.3569320177 | 24-Jul-08 | 1.3683421273 |
| 19-May-08 | 1.3843486997 | 25-Jun-08 | 1.5089804274 | 31-Jul-08 | 1.3407041839 |
| 20-May-08 | 1.3521325828 | 26-Jun-08 | 1.5246494953 | 04-Ago-08 | 1.3301431631 |
| 21-May-08 | 1.3473775085 | 01-Jul-08 | 1.4252830807 | 11-Ago-08 | 1.3051583109 |
| 22-May-08 | 1.3466406168 | 03-Jul-08 | 1.4151603148 | 12-Ago-08 | 1.2343126621 |
| 26-May-08 | 1.3712707308 | 04-Jul-08 | 1.4149317538 | 15-Ago-08 | 1.2190602616 |
| 27-May-08 | 1.3584919054 | 07-Jul-08 | 1.4153516570 | 18-Ago-08 | 1.2639283163 |
| 28-May-08 | 1.3784044285 | 11-Jul-08 | 1.3956232733 | 19-Ago-08 | 1.2624261483 |
| 29-May-08 | 1.5347371803 | 15-Jul-08 | 1.4041981380 | 20-Ago-08 | 1.2404489553 |
| 02-Jun-08 | 1.4236269914 | 16-Jul-08 | 1.3987278049 | 26-Ago-08 | 1.1837258662 |
| 03-Jun-08 | 1.3995125412 | 17-Jul-08 | 1.3865944058 | 27-Ago-08 | 1.2367490061 |
| 05-Jun-08 | 1.3946808765 | 18-Jul-08 | 1.3850355077 | 28-Ago-08 | 1.2261222816 |

### 3.7. PROCESAMIENTO DE DATOS

#### 3.7.1. Determinación del Espesor Óptico Total por el Metodo de Langley

Para la determinación del espesor óptico total, se procedió a utilizar un formato excel, en el cual se colocó toda la información correspondiente que la fórmula exige, según el método Langley. A continuación se muestra la Tabla N° 20 con los valores promedios diarios.

**Tabla N° 20. Valores Promedios Diarios del Espesor Óptico Total de Mayo a Agosto 2015. en la Ciudad de Huancayo**

| Fecha     | Espesor Óptico Total |              |              |              |
|-----------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412 nm               | 500 nm       | 675 nm       | 862 nm       |
| 13-May-08 | 0.4508572389         | 0.2186371537 | 0.1324445725 | 0.0536718339 |
| 14-May-08 | 0.4672129542         | 0.2647778339 | 0.1809276412 | 0.1315115292 |
| 15-May-08 | 0.6779934713         | 0.4744084588 | 0.3949084653 | 0.3267060389 |
| 16-May-08 | 0.5853904337         | 0.2684554482 | 0.1896978589 | 0.1076962808 |
| 19-May-08 | 0.4998752852         | 0.2624085925 | 0.1871130802 | 0.0839730192 |
| 20-May-08 | 0.4635349397         | 0.2220448615 | 0.1446598299 | 0.0815254911 |
| 21-May-08 | 0.4029723240         | 0.2007011564 | 0.1231209948 | 0.0630496642 |
| 22-May-08 | 0.5558780511         | 0.2632095396 | 0.1856054136 | 0.1917951494 |
| 26-May-08 | 0.5543918440         | 0.2328584874 | 0.1565268536 | 0.0840399973 |
| 27-May-08 | 0.4568548393         | 0.1919384420 | 0.1150223038 | 0.0510671812 |
| 28-May-08 | 0.5382419276         | 0.2328123430 | 0.1568572992 | 0.0839108527 |
| 29-May-08 | 0.5607593699         | 0.2301944010 | 0.1626270630 | 0.0963752568 |
| 02-Jun-08 | 0.5532441125         | 0.3588948139 | 0.1607083054 | 0.0910550407 |
| 03-Jun-08 | 0.5962943906         | 0.4094984273 | 0.2203250247 | 0.1318050793 |
| 05-Jun-08 | 0.4129503070         | 0.2769659910 | 0.1297292111 | 0.0572115977 |
| 09-Jun-08 | 0.4602111160         | 0.2933817314 | 0.1275060659 | 0.0594499616 |
| 18-Jun-08 | 0.3640102892         | 0.2420128914 | 0.0819707436 | 0.0340439436 |
| 19-Jun-08 | 0.3921107552         | 0.2748459874 | 0.1100428804 | 0.0578451892 |
| 20-Jun-08 | 0.4053198233         | 0.2638923777 | 0.0912279796 | 0.0377755025 |

| Fecha     | Espesor Óptico Total |              |              |              |
|-----------|----------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412 nm               | 500 nm       | 675 nm       | 862 nm       |
| 25-Jun-08 | 0.3626645801         | 0.2510209787 | 0.1105370554 | 0.0470527807 |
| 26-Jun-08 | 0.4409918822         | 0.3169735110 | 0.1530105633 | 0.0930864031 |
| 01-Jul-08 | 0.4477582876         | 0.3297165864 | 0.1364096751 | 0.0665418272 |
| 03-Jul-08 | 0.4795588833         | 0.3369843617 | 0.1516269353 | 0.0799260589 |
| 04-Jul-08 | 0.4313324427         | 0.2912747613 | 0.1261635213 | 0.0681616940 |
| 07-Jul-08 | 0.4958613905         | 0.3732037751 | 0.1540566040 | 0.0793635279 |
| 11-Jul-08 | 0.4899807851         | 0.3708697469 | 0.1760389041 | 0.1046600550 |
| 15-Jul-08 | 0.4688978841         | 0.2898497119 | 0.1237921336 | 0.0575188839 |
| 16-Jul-08 | 0.5051688086         | 0.3777228531 | 0.1645964935 | 0.0863454536 |
| 17-Jul-08 | 0.4238145471         | 0.3063264647 | 0.1351938854 | 0.0633392807 |
| 18-Jul-08 | 0.4971105703         | 0.3559147582 | 0.1572732801 | 0.0859989978 |
| 21-Jul-08 | 0.4064025509         | 0.2896996488 | 0.1346550030 | 0.0636479987 |
| 22-Jul-08 | 0.5206202870         | 0.3624496499 | 0.1505025439 | 0.0684483887 |
| 23-Jul-08 | 0.4813559838         | 0.3388498754 | 0.1374994910 | 0.0634596949 |
| 24-Jul-08 | 0.4918508356         | 0.3407865855 | 0.1400668354 | 0.0645503787 |
| 31-Jul-08 | 0.4621298332         | 0.3233434148 | 0.1478905997 | 0.0790648655 |
| 04-Ago-08 | 0.4743668714         | 0.3298849209 | 0.1312681049 | 0.0588220357 |
| 11-Ago-08 | 0.4886339292         | 0.3597374454 | 0.1488136501 | 0.0725831161 |
| 12-Ago-08 | 0.4127327533         | 0.2906796406 | 0.1139582399 | 0.0481886313 |
| 15-Ago-08 | 0.5051977891         | 0.3577931565 | 0.1530428264 | 0.0691235005 |
| 18-Ago-08 | 0.7992597790         | 0.6116071279 | 0.3837941418 | 0.2573376505 |
| 19-Ago-08 | 0.5258893797         | 0.3663445022 | 0.1461152177 | 0.0608472894 |
| 20-Ago-08 | 0.5879861686         | 0.4110590576 | 0.1754130944 | 0.0828944473 |
| 26-Ago-08 | 0.5116264933         | 0.3604819704 | 0.1426517067 | 0.0443667069 |
| 27-Ago-08 | 0.5786865744         | 0.4142426615 | 0.1862570586 | 0.1039798949 |
| 28-Ago-08 | 0.5318727938         | 0.3815832187 | 0.1568049132 | 0.0731085166 |

### 3.7.2. Determinación del Espesor Óptico de Ozono

Para la determinación del espesor óptico de ozono, se procedió a utilizar un formato excel, en el cual se colocó toda la información correspondiente que la fórmula exige. Para las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 se requieren los siguientes coeficientes de

absorción, los cuales son 0.001996295, 0.000909956, 0.000271087 y 0.000101433 respectivamente, estos valores fueron proporcionados por el Dr. Joseph Michelsky de la NOAA vía e-mail. A continuación en la Tabla N° 21, se muestran los valores promedios diarios obtenidos.

**Tabla N° 21. Valores Promedios Diarios del Espesor Óptico de Ozono de Mayo a Agosto 2015. en la Ciudad de Huancayo**

| Fecha     | Espesor Óptico de ozono |              |              |              |
|-----------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412 nm                  | 500 nm       | 675 nm       | 862 nm       |
| 13-May-08 | 0.0004598066            | 0.0002095902 | 0.0000624395 | 0.0000233631 |
| 14-May-08 | 0.0004693689            | 0.0002139489 | 0.0000637380 | 0.0000238489 |
| 15-May-08 | 0.0004640787            | 0.0002115375 | 0.0000630196 | 0.0000235801 |
| 16-May-08 | 0.0004716247            | 0.0002149771 | 0.0000640443 | 0.0000239635 |
| 19-May-08 | 0.0004702872            | 0.0002143674 | 0.0000638627 | 0.0000238956 |
| 20-May-08 | 0.0004754177            | 0.0002167060 | 0.0000645594 | 0.0000241563 |
| 21-May-08 | 0.0004590480            | 0.0002092444 | 0.0000623365 | 0.0000233245 |
| 22-May-08 | 0.0004727027            | 0.0002154685 | 0.0000641907 | 0.0000240183 |
| 26-May-08 | 0.0004617830            | 0.0002104910 | 0.0000627078 | 0.0000234635 |
| 27-May-08 | 0.0004657157            | 0.0002122836 | 0.0000632419 | 0.0000236633 |
| 28-May-08 | 0.0004617830            | 0.0002104910 | 0.0000627078 | 0.0000234635 |
| 29-May-08 | 0.0004617630            | 0.0002104819 | 0.0000627051 | 0.0000234625 |
| 02-Jun-08 | 0.0004700875            | 0.0002142764 | 0.0000638356 | 0.0000238854 |
| 03-Jun-08 | 0.0004716447            | 0.0002149862 | 0.0000640470 | 0.0000239646 |
| 05-Jun-08 | 0.0004847004            | 0.0002209373 | 0.0000658199 | 0.0000246279 |
| 09-Jun-08 | 0.0004724232            | 0.0002153411 | 0.0000641527 | 0.0000240041 |
| 18-Jun-08 | 0.0004966183            | 0.0002263698 | 0.0000674383 | 0.0000252335 |
| 19-Jun-08 | 0.0004843012            | 0.0002207553 | 0.0000657657 | 0.0000246076 |
| 20-Jun-08 | 0.0004841814            | 0.0002207007 | 0.0000657494 | 0.0000246016 |
| 25-Jun-08 | 0.0004907292            | 0.0002236854 | 0.0000666386 | 0.0000249343 |
| 26-Jun-08 | 0.0004999322            | 0.0002278803 | 0.0000678883 | 0.0000254019 |
| 01-Jul-08 | 0.0004950612            | 0.0002256600 | 0.0000672269 | 0.0000251544 |
| 03-Jul-08 | 0.0005007107            | 0.0002282352 | 0.0000679940 | 0.0000254414 |
| 04-Jul-08 | 0.0005085362            | 0.0002318022 | 0.0000690567 | 0.0000258390 |
| 07-Jul-08 | 0.0004965584            | 0.0002263425 | 0.0000674302 | 0.0000252304 |

| Fecha     | Espesor Óptico de ozono |              |              |              |
|-----------|-------------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412 nm                  | 500 nm       | 675 nm       | 862 nm       |
| 11-Jul-08 | 0.0005019484            | 0.0002287993 | 0.0000681621 | 0.0000255043 |
| 15-Jul-08 | 0.0004971373            | 0.0002266063 | 0.0000675088 | 0.0000252599 |
| 16-Jul-08 | 0.0004908490            | 0.0002237400 | 0.0000666549 | 0.0000249403 |
| 17-Jul-08 | 0.0004909289            | 0.0002237764 | 0.0000666657 | 0.0000249444 |
| 18-Jul-08 | 0.0004940630            | 0.0002252050 | 0.0000670913 | 0.0000251037 |
| 21-Jul-08 | 0.0005012497            | 0.0002284809 | 0.0000680672 | 0.0000254688 |
| 22-Jul-08 | 0.0004961791            | 0.0002261696 | 0.0000673787 | 0.0000252112 |
| 23-Jul-08 | 0.0004932246            | 0.0002248228 | 0.0000669775 | 0.0000250611 |
| 24-Jul-08 | 0.0004891921            | 0.0002229847 | 0.0000664299 | 0.0000248562 |
| 31-Jul-08 | 0.0004708262            | 0.0002146131 | 0.0000639359 | 0.0000239230 |
| 04-Ago-08 | 0.0004731219            | 0.0002156596 | 0.0000642476 | 0.0000240396 |
| 11-Ago-08 | 0.0004930849            | 0.0002247591 | 0.0000669585 | 0.0000250540 |
| 12-Ago-08 | 0.0005010700            | 0.0002283990 | 0.0000680428 | 0.0000254597 |
| 15-Ago-08 | 0.0005010700            | 0.0002283990 | 0.0000680428 | 0.0000254597 |
| 18-Ago-08 | 0.0004831034            | 0.0002202094 | 0.0000656031 | 0.0000245468 |
| 19-Ago-08 | 0.0004930849            | 0.0002247591 | 0.0000669585 | 0.0000250540 |
| 20-Ago-08 | 0.0004791108            | 0.0002183894 | 0.0000650609 | 0.0000243439 |
| 26-Ago-08 | 0.0004950812            | 0.0002256691 | 0.0000672296 | 0.0000244454 |
| 27-Ago-08 | 0.0004811071            | 0.0002192994 | 0.0000653320 | 0.0000244454 |
| 28-Ago-08 | 0.0004890923            | 0.0002229392 | 0.0000664163 | 0.0000248511 |

### 3.7.3. Determinación del Espesor de Rayleigh

El espesor óptico del aire conocido como el de Rayleigh, es calculado utilizando la ecuación de (Dutton y col., 1994). Se ha considerado para el cálculo del Espesor Óptico de Rayleigh los siguientes datos:

**Tabla Nº 12. Datos para el Espesor Óptico de Rayleigh**

| Datos       |          |
|-------------|----------|
| P sitio: mb | 693.2744 |
| Po mb       | 1013.25  |

En la Tabla N° 22 se muestran los valores únicos del Espesor Óptico de Rayleigh, para cada longitud de onda, estos 4 datos nos sirven para poder procesar toda la data de mediciones y obtener el Espesor Óptico de Aerosol.

**Tabla N° 22. Valores Promedios del Espesor Óptico de Rayleigh de Mayo a Agosto 2015. en la Ciudad de Huancayo**

| $\lambda=$ | um | 0.412        | 0.500        | 0.675        | 0.862        |
|------------|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| EOR        |    | 0.2176979902 | 0.0993938760 | 0.0294786686 | 0.0109492335 |

### 3.7.4. Determinación del Espesor Óptico de Aerosol

Una vez determinado los 3 primeros espesores ópticos, se procedio a determinar el AOD, obteniendose los valores promedios diarios en las 4 longitudes de onda, en un formato excel, el AOD, fue determinado para los meses de Mayo a Agosto, ya que no se considero el mes de setiembre por presentar limitaciones en las condiciones climaticas al momento del monitoreo.

**Tabla N° 23. Valores Promedios Diarios del Espesor Óptico de Aerosol de Mayo a Agosto 2015. en la Ciudad de Huancayo**

| Fecha     | Espesor Óptico de Aerosol |              |              |              |
|-----------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412                       | 500          | 675          | 862          |
| 13-May-08 | 0.2326994420              | 0.1190336875 | 0.1029034644 | 0.0426992373 |
| 14-May-08 | 0.2490455951              | 0.1651700090 | 0.1513852346 | 0.1205384467 |
| 15-May-08 | 0.4598314024              | 0.3748030453 | 0.3653667771 | 0.3157332252 |
| 16-May-08 | 0.3672208188              | 0.1688465950 | 0.1601551460 | 0.0967230838 |
| 19-May-08 | 0.2817070078              | 0.1628003490 | 0.1575705489 | 0.0729998901 |
| 20-May-08 | 0.2453615318              | 0.1224342794 | 0.1151166019 | 0.0705521014 |
| 21-May-08 | 0.1848152858              | 0.1010980360 | 0.0935799897 | 0.0520771062 |
| 22-May-08 | 0.3377073582              | 0.1636001951 | 0.1560625543 | 0.1808218976 |
| 26-May-08 | 0.3362320708              | 0.1332541203 | 0.1269854771 | 0.0730673003 |
| 27-May-08 | 0.2386911334              | 0.0923322823 | 0.0854803934 | 0.0400942843 |

| Fecha     | Espesor Óptico de Aerosol |              |              |              |
|-----------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412                       | 500          | 675          | 862          |
| 28-May-08 | 0.3200821544              | 0.1332079759 | 0.1273159228 | 0.0729381557 |
| 29-May-08 | 0.3425996166              | 0.1305900431 | 0.1330856893 | 0.0854025609 |
| 02-Jun-08 | 0.3350760347              | 0.2592866614 | 0.1311658013 | 0.0800819217 |
| 03-Jun-08 | 0.3781247558              | 0.3098895651 | 0.1907823091 | 0.1208318812 |
| 05-Jun-08 | 0.1947676163              | 0.1773511776 | 0.1001847226 | 0.0462377363 |
| 09-Jun-08 | 0.2420407026              | 0.1937725143 | 0.0979632445 | 0.0484767240 |
| 18-Jun-08 | 0.1458156807              | 0.1423926456 | 0.0524246367 | 0.0230694766 |
| 19-Jun-08 | 0.1739284639              | 0.1752313561 | 0.0804984461 | 0.0468713480 |
| 20-Jun-08 | 0.1871376517              | 0.1642778010 | 0.0616835615 | 0.0268016674 |
| 25-Jun-08 | 0.1444758607              | 0.1514034173 | 0.0809917482 | 0.0360786129 |
| 26-Jun-08 | 0.2227939599              | 0.2173517547 | 0.1234640064 | 0.0821117677 |
| 01-Jul-08 | 0.2295652362              | 0.2300970504 | 0.1068637796 | 0.0555674394 |
| 03-Jul-08 | 0.2613601824              | 0.2373622505 | 0.1220802726 | 0.0689513840 |
| 04-Jul-08 | 0.2131259163              | 0.1916490831 | 0.0966157960 | 0.0571866214 |
| 07-Jul-08 | 0.2776668419              | 0.2735835566 | 0.1245105052 | 0.0683890639 |
| 11-Jul-08 | 0.2717808464              | 0.2712470716 | 0.1464920734 | 0.0936853172 |
| 15-Jul-08 | 0.2507027565              | 0.1902292295 | 0.0942459562 | 0.0465443905 |
| 16-Jul-08 | 0.2869799694              | 0.2781052371 | 0.1350511701 | 0.0753712798 |
| 17-Jul-08 | 0.2056256280              | 0.2067088123 | 0.1056485511 | 0.0523651027 |
| 18-Jul-08 | 0.2789185171              | 0.2562956772 | 0.1277275202 | 0.0750246606 |
| 21-Jul-08 | 0.1882033109              | 0.1900772919 | 0.1051082672 | 0.0526732964 |
| 22-Jul-08 | 0.3024261176              | 0.2628296043 | 0.1209564966 | 0.0574739441 |
| 23-Jul-08 | 0.2631647690              | 0.2392311765 | 0.1079538450 | 0.0524854003 |
| 24-Jul-08 | 0.2736636532              | 0.2411697247 | 0.1105217369 | 0.0535762890 |
| 31-Jul-08 | 0.2439610168              | 0.2237349257 | 0.1183479953 | 0.0680917090 |
| 04-Ago-08 | 0.2561957593              | 0.2302753853 | 0.1017251887 | 0.0478487625 |
| 11-Ago-08 | 0.2704428541              | 0.2601188102 | 0.1192680230 | 0.0616088287 |
| 12-Ago-08 | 0.1945336930              | 0.1910573656 | 0.0844115285 | 0.0372139381 |
| 15-Ago-08 | 0.2869987288              | 0.2581708815 | 0.1234961149 | 0.0581488073 |
| 18-Ago-08 | 0.5810786854              | 0.5119930425 | 0.3542498702 | 0.2463638702 |
| 19-Ago-08 | 0.3076983046              | 0.2667258670 | 0.1165695907 | 0.0498730020 |
| 20-Ago-08 | 0.3698090676              | 0.3114467921 | 0.1458693649 | 0.0719208699 |
| 26-Ago-08 | 0.2934334219              | 0.2608624253 | 0.1131058085 | 0.0333930281 |

| Fecha     | Espesor Óptico de Aerosol |              |              |              |
|-----------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
|           | 412                       | 500          | 675          | 862          |
| 27-Ago-08 | 0.3605074771              | 0.3146294860 | 0.1567130580 | 0.0930062160 |
| 28-Ago-08 | 0.3136857113              | 0.2819664034 | 0.1272598283 | 0.0621344320 |

La tabla N° 24 muestra los datos procesados correspondientes a toda la temporada de monitoreo en relación a los espesores ópticos, se muestra un resumen de los valores máximos encontrados para cada tipo de espesor óptico, del total de las observaciones realizadas con ángulos cenit solar inferior a 45°.

**Tabla 24.: Valores máximos de los Espesores Ópticos**

| Espesor Óptico  | 412 nm     | 500 nm     | 675 nm     | 862 nm     | DesvEst    |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <b>Total</b>    | 0.79925978 | 0.61160713 | 0.39490847 | 0.32670604 | 0.2150192  |
| <b>Ozono</b>    | 0.00050854 | 0.0002318  | 0.00006906 | 0.00002584 | 0.00021861 |
| <b>Rayleigh</b> | 0.21769799 | 0.09939388 | 0.02947867 | 0.01094923 | 0.09363998 |
| <b>Aerosol</b>  | 0.58107869 | 0.51199304 | 0.36536678 | 0.31573323 | 0.12389287 |

El espesor óptico de aerosol disminuye con el incremento de la longitud de onda y son de razonable dimensión, al igual que el espesor óptico de Rayleigh, por lo que podemos confiar en nuestras mediciones. Los bajos valores del espesor óptico de ozono demuestran la débil interacción que tienen estas longitudes de onda con la molécula del ozono.

### 3.7.5. Dirección del Viento

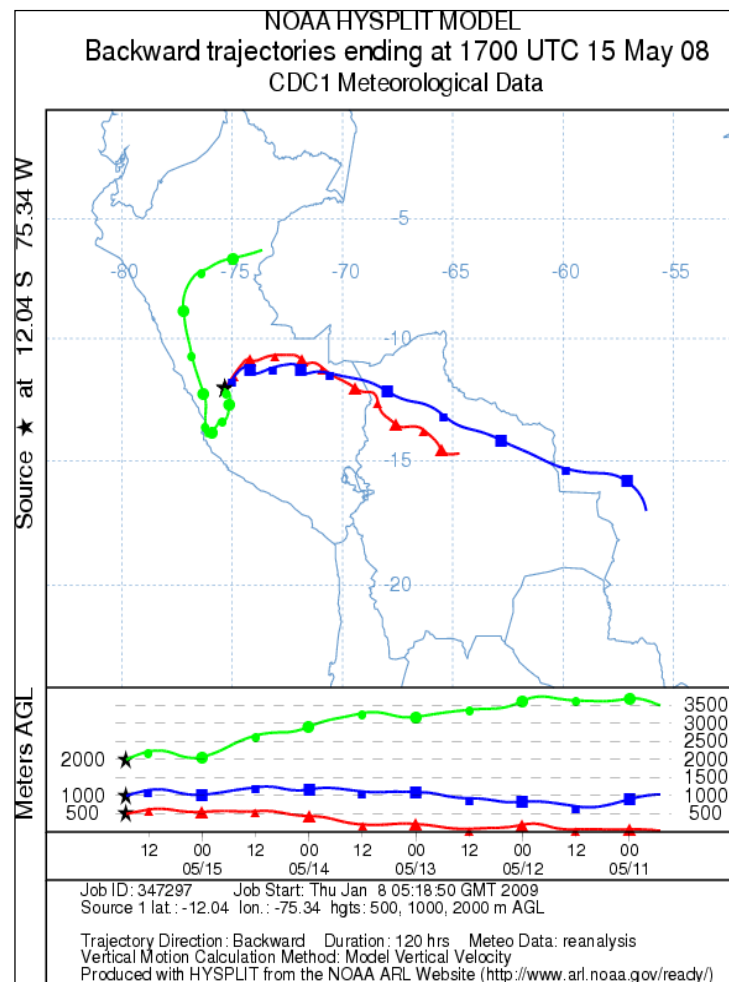
Con el modelo de velocidad vertical del viento del NOAA, es posible obtener imágenes de la posible dirección del viento, con la finalidad de entender la distribución de los aerosoles que suelen viajar desde grandes distancias, lo que justificaria la presencia de ciertos elementos que fueron encontrados en el análisis elemental realizados por el laboratorio. A continuación se muestran dos imágenes que se



obtuvieron del modelo ya mencionado. Se tomaron las dos fechas con mayor concentración del aerosol que fueron registrados durante el monitoreo.

Con respecto al análisis de las intensidades del viento superficial en los períodos analizados, en horas matutinas predominaron vientos de intensidad media débil (< 3 m/s), y con ocurrencia de calmas significativas; en horas vespertinas se presentaron intensidades medias débiles, moderadas al medio día y fuertes por la tarde. En cuanto a las direcciones predominantes, se registraron principalmente vientos de componente noreste, suroeste y oeste.

**Figura N° 11. Dirección del Viento en la ciudad de Huancayo según el Modelo Vertical de Velocidad del Viento según el NOAA para el 15 de Mayo, 2015**





### 3.7.6. Fase de Laboratorio

#### a) Técnica de Análisis Elemental ICP-MS

Los resultados entregados por el laboratorio CORPLAB se presentan en la Tabla N° 25. Esta técnica fue capaz de determinar y cuantificar la presencia de hasta 16 elementos entre el material particulado fino y grueso, capturado en los 4 filtros utilizados. Fue posible determinar la composición química de los aerosoles. Los resultados, muestran valores importantes de silicio y calcio, relacionados al polvo del suelo y también valores altos de potasio y zinc, el primero especialmente importante elemento trazador de la contaminación por quema de vegetación. Ambos procesos son totalmente justificados debido a la época de medición y por la cercanía a los sitios de quemas o incendios forestales. El elemento que está ausente es el plomo, lo cual no ha sido posible tener una explicación adecuada. Las muestras colectadas son tratadas con una mezcla de agua regia (ácido nítrico y ácido clorhídrico) para su disgregación. Luego, son llevadas a muy altas temperaturas, estado plasmático, para lograr su descomposición elemental.

**Tabla N° 25. Composición elemental de los aerosoles colectados en la Ciudad de Huancayo tanto en la fracción fina y gruesa.**

| Nro. | En ug/mtra | Lim de Det | Fracción Fina |       | Fracción Gruesa |       |
|------|------------|------------|---------------|-------|-----------------|-------|
|      |            |            | FFM1          | FFM2  | FGM1            | FGM2  |
| 1    | Aluminio   | 0.20       | 1.37          | 1.39  | 4.74            | 10.40 |
| 2    | Boro       | 0.20       | 1.91          | N.D.  | 4.03            | 3.70  |
| 3    | Bario      | 0.01       | 0.07          | 0.13  | 0.22            | 0.26  |
| 4    | Calcio     | 2.60       | 26.34         | 27.95 | 52.8            | 67.7  |
| 5    | Cobre      | 0.04       | N.D.          | 0.55  | N.D.            | N.D.  |
| 6    | Hierro     | 0.02       | 0.73          | 1.26  | 4.69            | 6.63  |

| Nro. | En ug/mtra | Lim de Det | Fracción Fina |       | Fracción Gruesa |        |
|------|------------|------------|---------------|-------|-----------------|--------|
|      |            |            | FFM1          | FFM2  | FGM1            | FGM2   |
| 7    | Potasio    | 0.90       | 9.40          | 22.66 | 33.89           | 26.95  |
| 8    | Magnesio   | 0.23       | 0.80          | N.D.  | 12.37           | 17.93  |
| 9    | Manganeso  | 0.03       | N.D.          | 0.62  | 0.21            | 0.27   |
| 10   | Sodio      | 0.31       | N.D.          | 7.89  | 53.15           | 65.30  |
| 11   | Níquel     | 0.03       | N.D.          | 0.07  | N.D.            | N.D.   |
| 12   | Antimonio  | 0.11       | N.D.          | N.D.  | 0.59            | N.D.   |
| 13   | Silicio    | 0.70       | 38.46         | 15.65 | 21.35           | 146.40 |
| 14   | Estroncio  | 0.01       | 0.16          | 0.12  | 0.40            | 0.48   |
| 15   | Titanio    | 0.05       | N.D.          | N.D.  | N.D.            | 0.39   |
| 16   | Zinc       | 0.10       | 0.53          | 1.47  | 0.65            | 0.84   |

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS**

#### **4.1. EVALUACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL Y SU INFLUENCIA EN EL AIRE**

Para poder evaluar la influencia de los aerosoles, en la ciudad de Huancayo, fue primordial, realizar la determinación del espesor óptico del aerosol (AOD), este es un parámetro bajo el cual es posible determinar la presencia de aerosoles de origen industrial, antropogénico, quema de biomasa, u otros, producto del transporte de masas atmosféricas, hacia una zona. Este transporte implica que los contaminantes del aire puedan alcanzar sitios tan alejados, y llevar elementos químicos nocivos, dependiendo del origen. Por lo general debido a pequeños aumentos de concentraciones de aerosol debido a diversas actividades o transporte de contaminantes puede darse las siguientes influencias:

- Perturbar el equilibrio del balance de energía en estas regiones, al alterar a su capacidad de modificar tanto directa como indirectamente el balance radiativo de nuestro planeta, porque se basan, en el hecho de que son capaces de absorber y dispersar la radiación solar que incide sobre ellas.
- Al modificar las propiedades de las nubes, es decir, las partículas sobre las que se fija el agua líquida que da lugar a la nube, están constituidas por aerosoles (Los núcleos de condensación de las nubes - CCN). Esto produce, finalmente, un aumento en el albedo de la nube en cuanto a la radiación de onda corta, pero muy poca o ninguna variación en la de onda larga. Por otro lado, un aumento en el número de CCN puede retardar la velocidad de crecimiento condensacional de las pequeñas gotas de agua que constituyen la nube, dado que existen más gotículas compitiendo por la misma cantidad de agua disponible. Esta ralentización puede retrasar e incluso evitar el inicio de los procesos de colisión-coalescencia necesarios para la producción de precipitaciones.

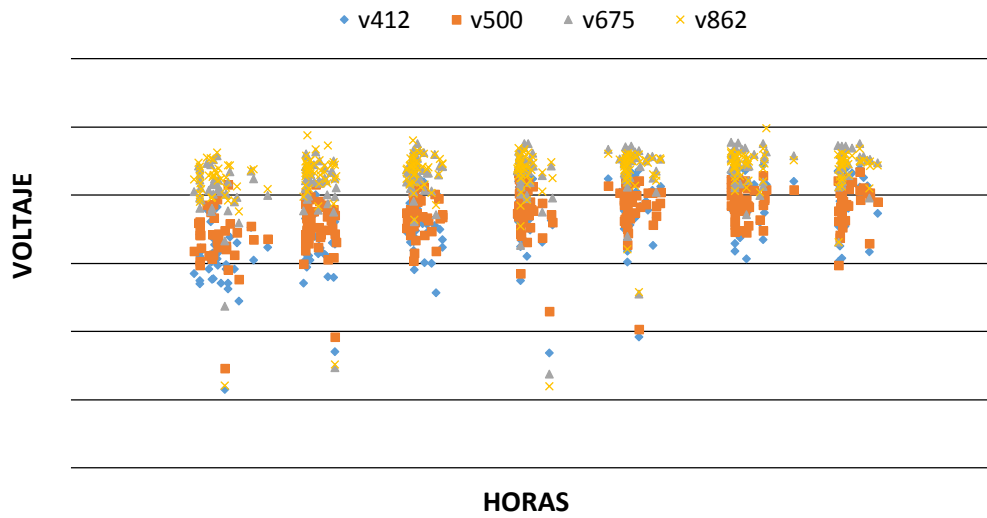
- Finalmente, los cambios inducidos por los CCN en la precipitación pueden también afectar a la cobertura nubosa regional y por tanto al albedo.
- Además de ser también enormemente importantes en la química atmosférica, gracias a su gran capacidad de interacción con otros constituyentes.
- Los aerosoles también pueden producir un gran efecto en la salud de las personas en las ciudades, existe una fuerte correlación estadística positiva entre la concentración de PM10 y la mortalidad y entre PM10 y las enfermedades respiratorias agudas en niños menores de 14 años.

A continuación, se realizó el análisis de datos, se revisó la variación horaria de la radiación visible durante el monitoreo con la finalidad de entender el comportamiento de los aerosoles en diferentes longitudes de onda y la atenuación de la radiación por los aerosoles con respecto a la atmósfera de la zona. Como segundo punto se revisó la variación mensual de los espesores ópticos obtenidos del procesamiento de datos, con la finalidad de entender su comportamiento espectral. El tercer punto, es evaluar la variación mensual del espesor óptico de aerosol, que es el fundamento del estudio. Y como punto final evaluar los resultados del análisis elemental de los aerosoles, con la finalidad de conocer su composición química y sus posibles orígenes.

#### **4.1.1. Variación horaria de la radiación visible**

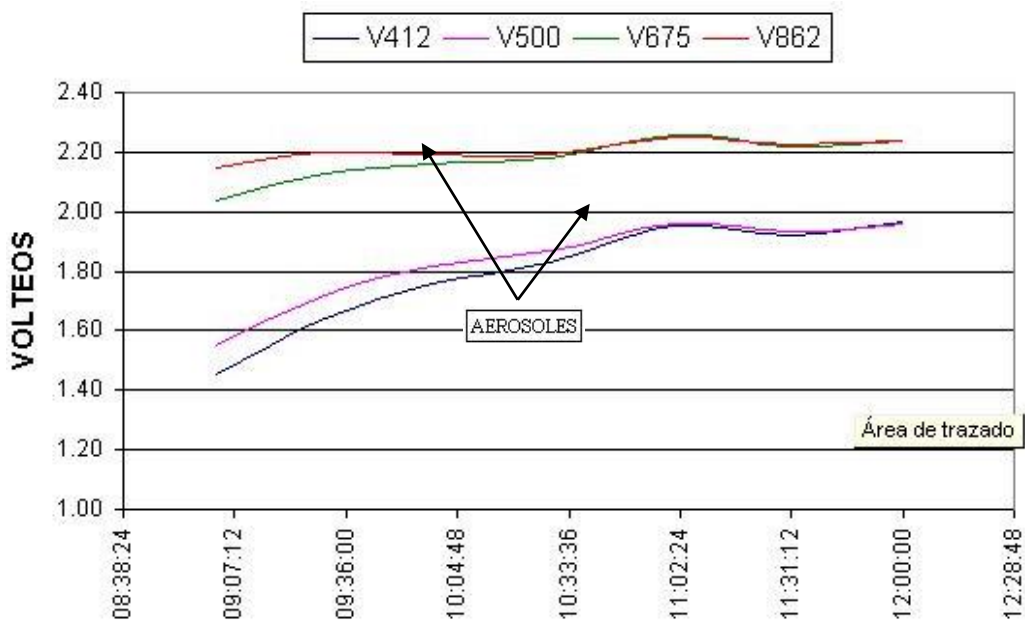
A continuación se muestra en el gráfico N° 1 la variación horaria de las 4 longitudes de onda. La longitud de onda de mayor variación horaria en la campaña de mediciones respecto a estos cuatro meses es de 412 nm. Ya que la interacción de los aerosoles se da en cuanto a la radiación.

**Gráfico N° 1 : Variación horaria de la radiación visible**



El gráfico N° 2, corresponde a las mediciones del día 23-07-08, con cero de cobertura solar durante las horas de la mañana, en la cual es posible observar la atenuación de la radiación por los aerosoles con respecto a una atmósfera limpia, se puede observar la interacción entre la radiación y los aerosoles se incrementa, siendo la longitud de onda de 862 nm la que tiene mayor variación por efecto de los aerosoles.

**Gráfico N° 2: Variación diurna de la intensidad de radiación.**



#### 4.1.2. Variación mensual de los espesores ópticos.

- **En relación a los espesores ópticos**

En relación a los espesores ópticos, la tabla N° 24, muestra un resumen de los valores máximos encontrados para cada tipo de espesor óptico, del total de las observaciones realizadas con ángulos cenit solar inferior a 45°.

**Tabla 24.: Valores máximos de los Espesores Ópticos**

| <b>Espesor Óptico</b> | <b>412 nm</b> | <b>500 nm</b> | <b>675 nm</b> | <b>862 nm</b> | <b>DesvEst</b> |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Total</b>          | 0.79925978    | 0.61160713    | 0.39490847    | 0.32670604    | 0.2150192      |
| <b>Ozono</b>          | 0.00050854    | 0.0002318     | 0.00006906    | 0.00002584    | 0.00021861     |
| <b>Rayleigh</b>       | 0.21769799    | 0.09939388    | 0.02947867    | 0.01094923    | 0.09363998     |
| <b>Aerosol</b>        | 0.58107869    | 0.51199304    | 0.36536678    | 0.31573323    | 0.12389287     |

De estos resultados podemos definir que: el espesor óptico de aerosol (AOD) disminuye con el incremento de la longitud de onda y son de razonable dimensión, al igual que el espesor óptico de Rayleigh, por lo que podemos confiar en nuestras mediciones. Los bajos valores del espesor óptico de ozono demuestran la débil interacción que tienen estas longitudes de onda con la molécula del ozono.

Los gráficos siguientes muestran el comportamiento espectral de los espesores ópticos total, ozono, Rayleigh y aerosol con los datos obtenidos en la ciudad de Huancayo.

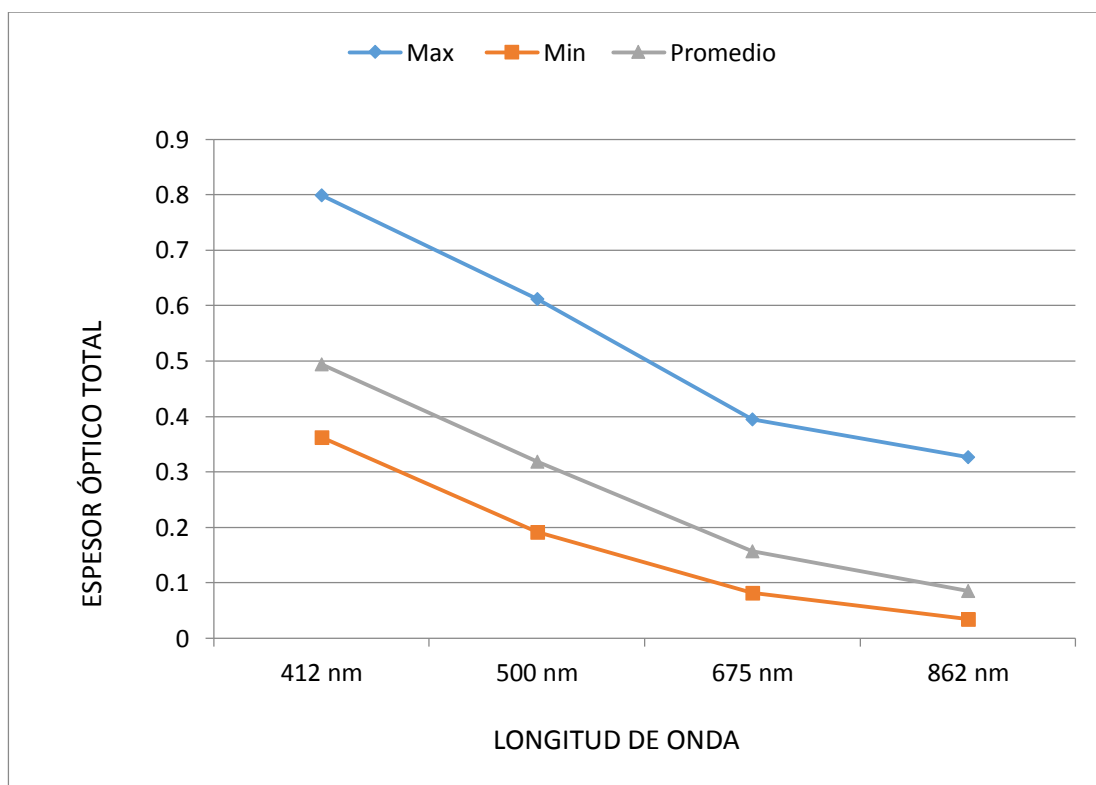


### a) Espesor Óptico Total

Tabla 25. Valores máximos del Espesor Óptico Total

| Medidas de Tendencia central y de Dispersión | Monitoreo Mayo - Agosto 2015 |              |              |              |
|--|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|  | Espesor Óptico Total         |              |              |              |
|  | 412 nm                       | 500 nm       | 675 nm       | 862 nm       |
| Max  | 0.799259779                  | 0.611607128  | 0.394908465  | 0.326706039  |
| Min  | 0.36266458                   | 0.191938442  | 0.081970744  | 0.034043944  |
| Promedio                                     | 0.4937745679                 | 0.3182297627 | 0.1575212014 | 0.0859317042 |
| Desviación estándar                          | 0.0807392904                 | 0.0779634996 | 0.0571837695 | 0.0532527523 |

Gráfico N° 3. Comportamiento espectral del Espesor Óptico Total

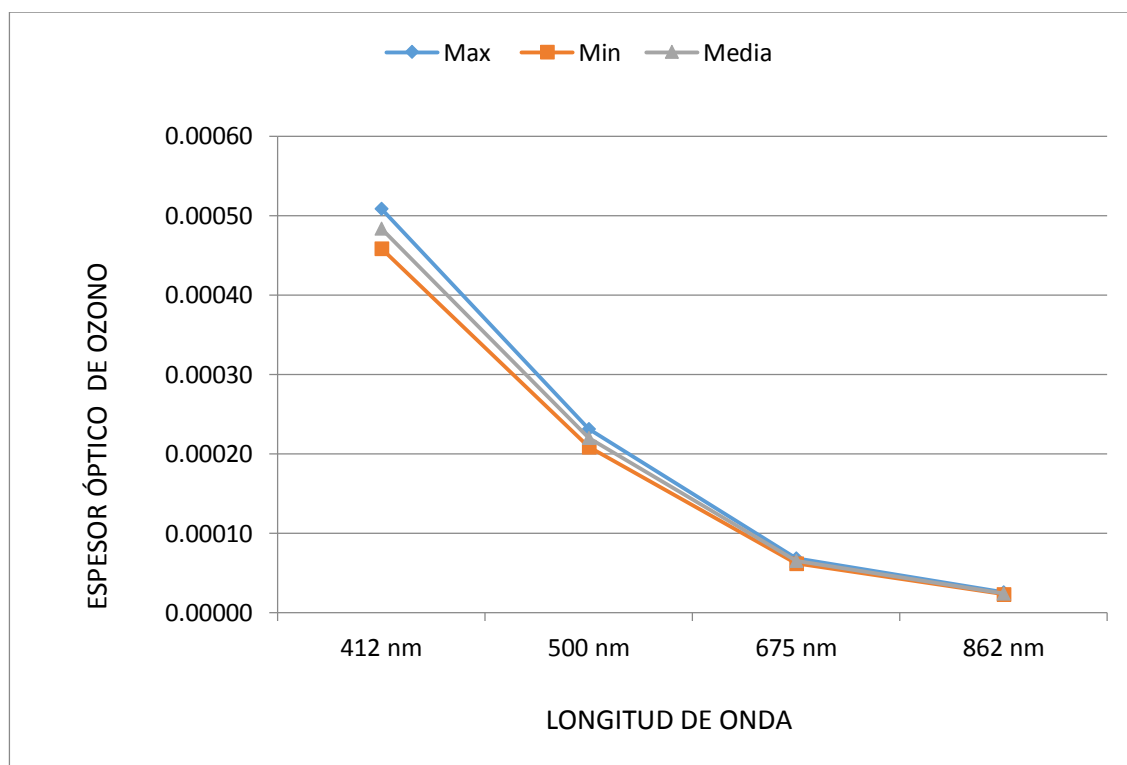


## b) Espesor Óptico de Ozono

Tabla 26. Valores máximos del Espesor Óptico de Ozono

| Medidas de Tendencia central y de Dispersión | Monitoreo Mayo - Agosto 2015 |              |              |              |
|--|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
|  | Espesor Óptico de ozono      |              |              |              |
|  | 412 nm                       | 500 nm       | 675 nm       | 862 nm       |
| Max  | 0.0005085362                 | 0.0002318022 | 0.0000690567 | 0.0000258390 |
| Min  | 0.0004590480                 | 0.0002092444 | 0.0000623365 | 0.0000233245 |
| Media  | 0.0004836309                 | 0.0002204498 | 0.0000656747 | 0.0000245578 |
| Desviación estándar                          | 1.40955E-05                  | 6.42506E-06  | 1.9141E-06   | 7.10895E-07  |

Gráfico N° 4. Comportamiento espectral del Espesor Óptico de Ozono

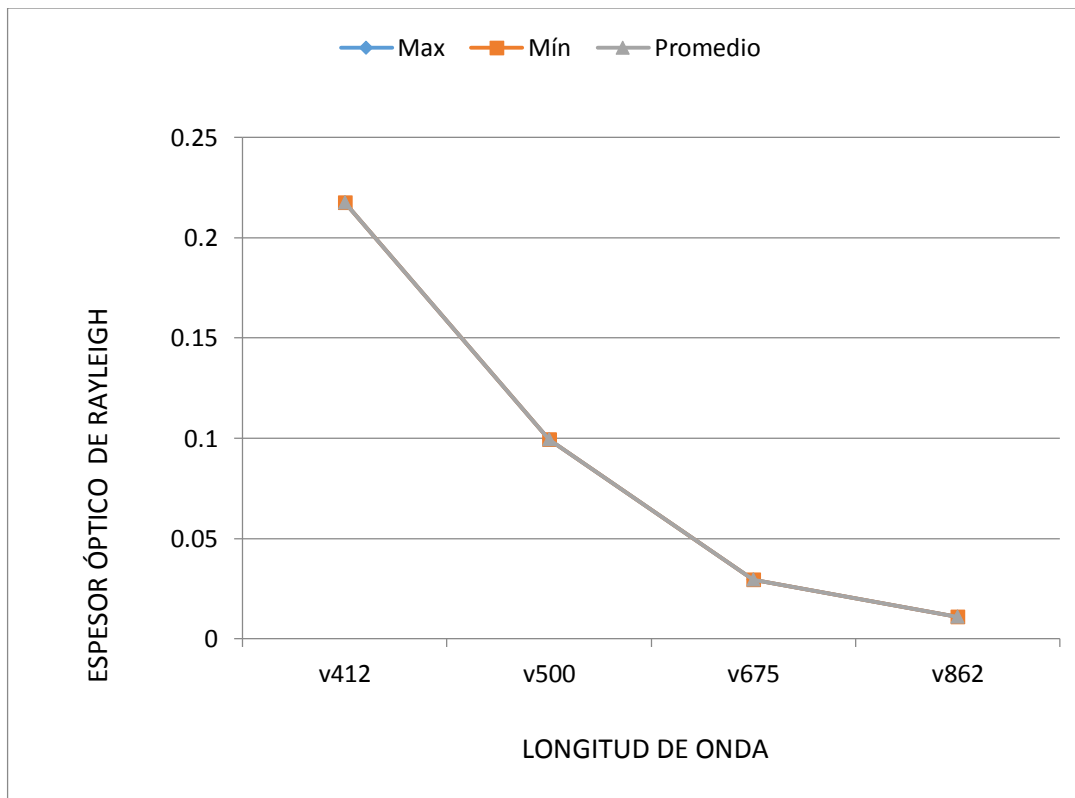


c) Espesor óptico de Rayleigh

Tabla 27. Valores máximos del Espesor Óptico de Rayleigh

| Medidas de Tendencia central y de Dispersión | Monitoreo Mayo - Agosto 2015 |            |            |            |
|--|------------------------------|------------|------------|------------|
|  | Espesor Óptico de Rayleigh   |            |            |            |
|  | v412                         | v500       | v675       | v862       |
| Promedio                                     | 0.21769799                   | 0.09939388 | 0.02947867 | 0.01094923 |

Gráfico N° 5. Comportamiento espectral del Espesor Óptico de Rayleigh

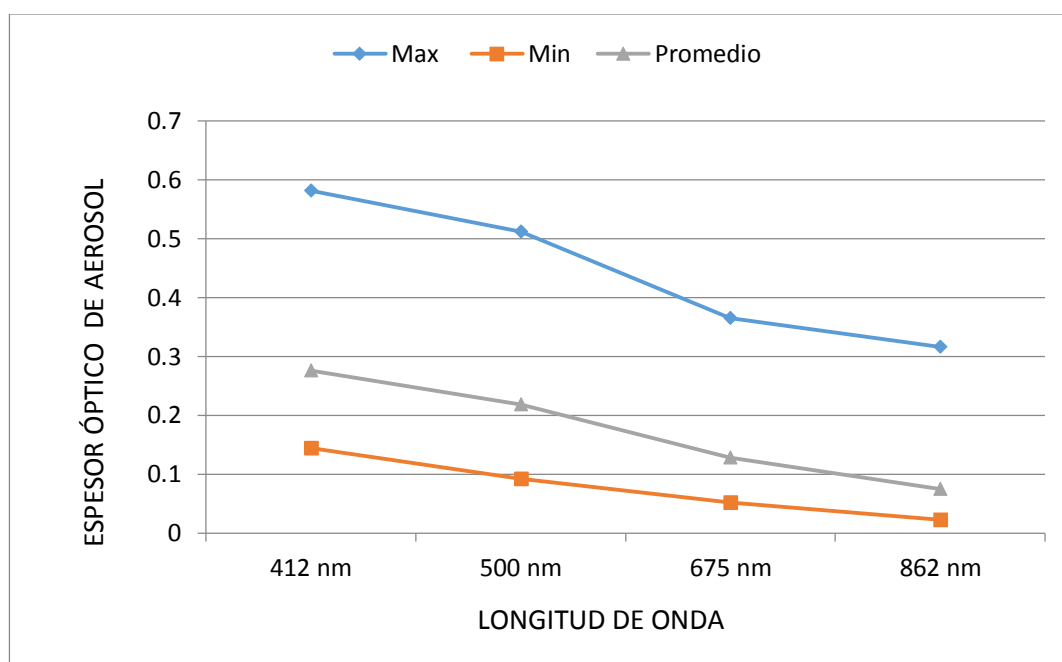


#### d) Espesor óptico de Aerosol

Tabla 28. Valores máximos del Espesor Óptico de Aerosol

| Medidas de Tendencia central y de Dispersión | Monitoreo Mayo - Agosto 2015 |             |             |             |
|--|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|  | Espesor Óptico de Aerosol    |             |             |             |
|  | 412 nm                       | 500 nm      | 675 nm      | 862 nm      |
| Max  | 0.581078685                  | 0.511993043 | 0.365366777 | 0.315733225 |
| Min  | 0.144475861                  | 0.092332282 | 0.052424637 | 0.023069477 |
| Promedio                                     | 0.275592947                  | 0.218615437 | 0.127976858 | 0.074957913 |
| Desviación estándar                          | 0.080743566                  | 0.077961675 | 0.057184257 | 0.053252951 |

Gráfico N° 6. Comportamiento espectral del Espesor Óptico de Aerosol

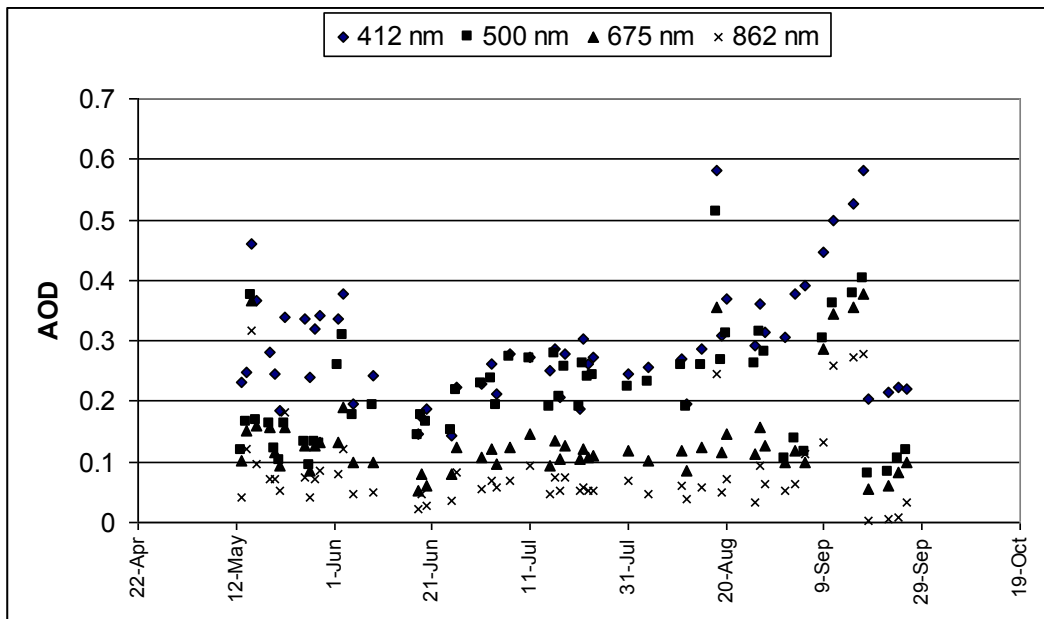


#### 4.1.3. Variación mensual del espesor óptico de aerosol

Los gráficos N° 7, muestran los resultados obtenidos del AOD, en los 5 meses de monitoreo, se puede observar una clara disminución del AOD en el mes de setiembre, esta disminución en las lecturas se debe a las condiciones climáticas que se presentaron en dicho mes

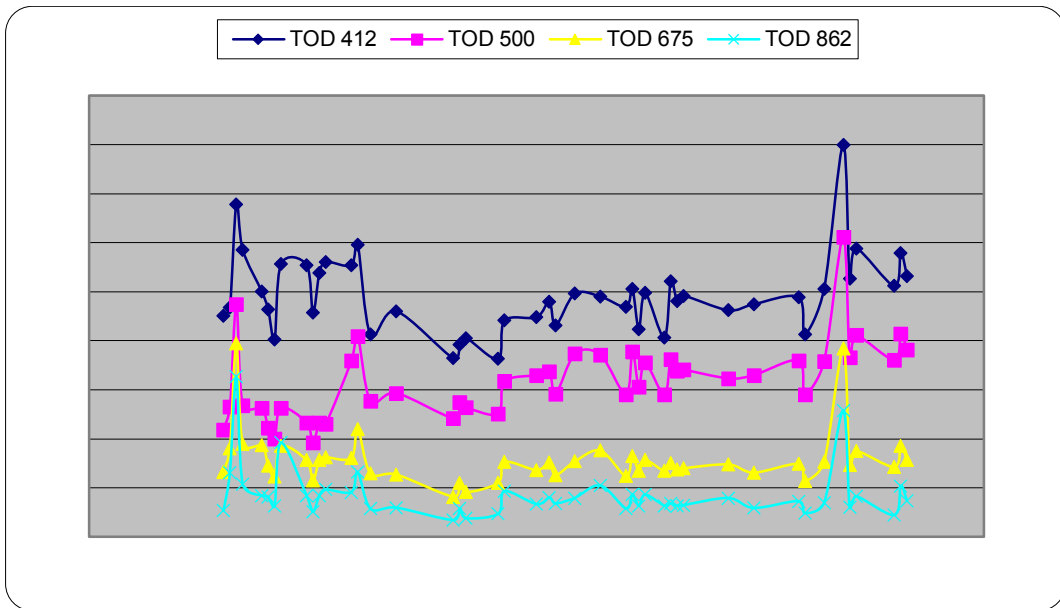
siendo datos poco confiables para el procesamiento de los datos, por ello se considerara a los 4 primeros meses de monitoreo para el análisis de los resultados.

**Gráfico N° 7 . Variación mensual del AOD, durante el periodo de 13/05/15 al 26/09/15**

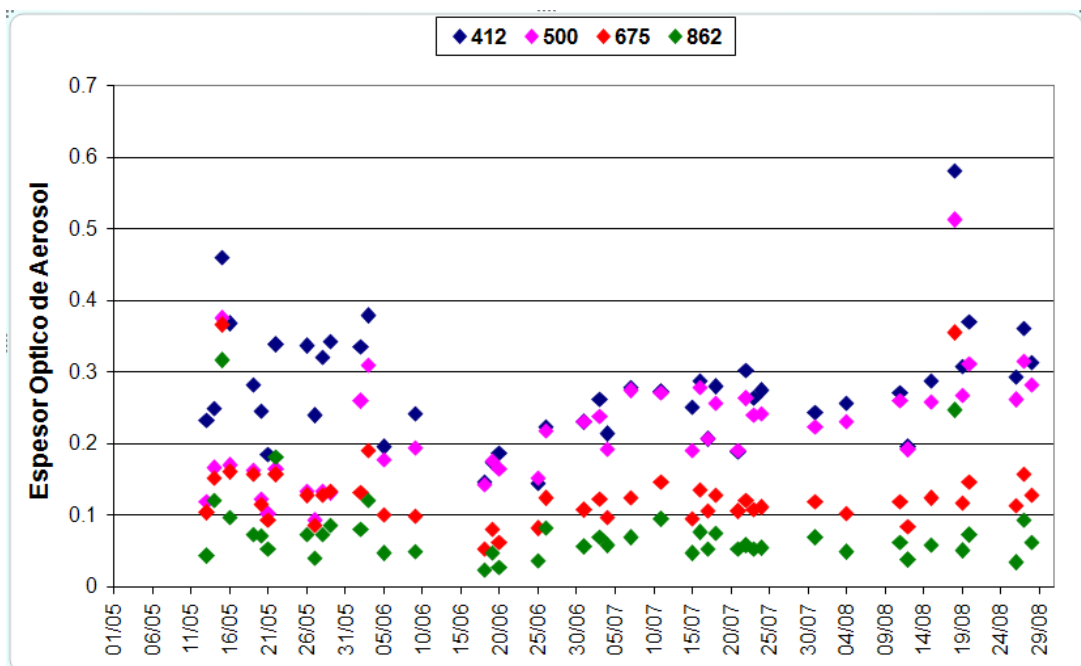


El gráfico N° 8 y 9, nos muestran la variación mensual del Espesor Óptico de Aerosol durante el periodo de mediciones, desde el 13 de Mayo al 28 de Agosto del 2015, encontrándose una mayor variación en el mes de Agosto.

**Gráfico N° 8. Variación mensual del AOD, durante el periodo de 13/05/15 al 28/08/15**



**Gráfico N° 9. Variación mensual del AOD, durante el periodo de 13/05/15 al 28/08/15**



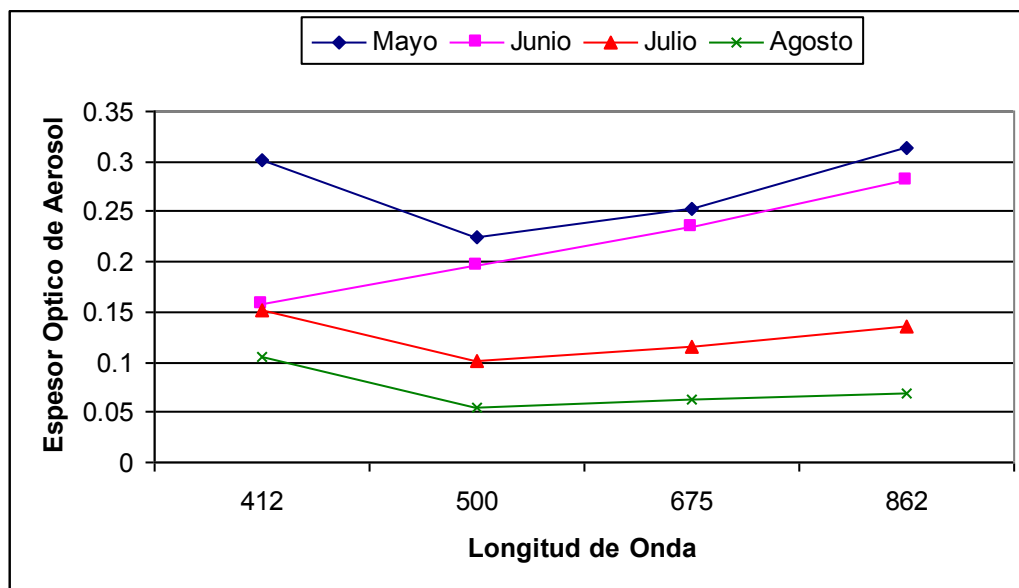
El gráfico N° 10, muestra los valores determinados de Espesor Óptico de Aerosol (AOD) para cada longitud de onda. En relación a la dispersión esta figura muestra claramente que a mayor longitud de

onda disminuye la dispersión del AOD, siendo el AOD a 412 nm el mas disperso en el mes de Mayo, mientras que el AOD a 862 nm en el mes de agosto es el menos disperso, esto se debe a la mayor actividad fotoquímica de los aerosoles a longitud de onda menores.

**Tabla 29. Valores máximos del Espesor Óptico de Aerosol en 4 longitudes de onda.**

|     | Mayo        | Junio       | Julio      | Agosto     |
|-----|-------------|-------------|------------|------------|
| 412 | 0.302416128 | 0.158481111 | 0.15080456 | 0.10542571 |
| 500 | 0.223844601 | 0.19724331  | 0.10032913 | 0.05504945 |
| 675 | 0.253621607 | 0.23528361  | 0.11584041 | 0.06261453 |
| 862 | 0.314413813 | 0.28069774  | 0.13617056 | 0.06973023 |

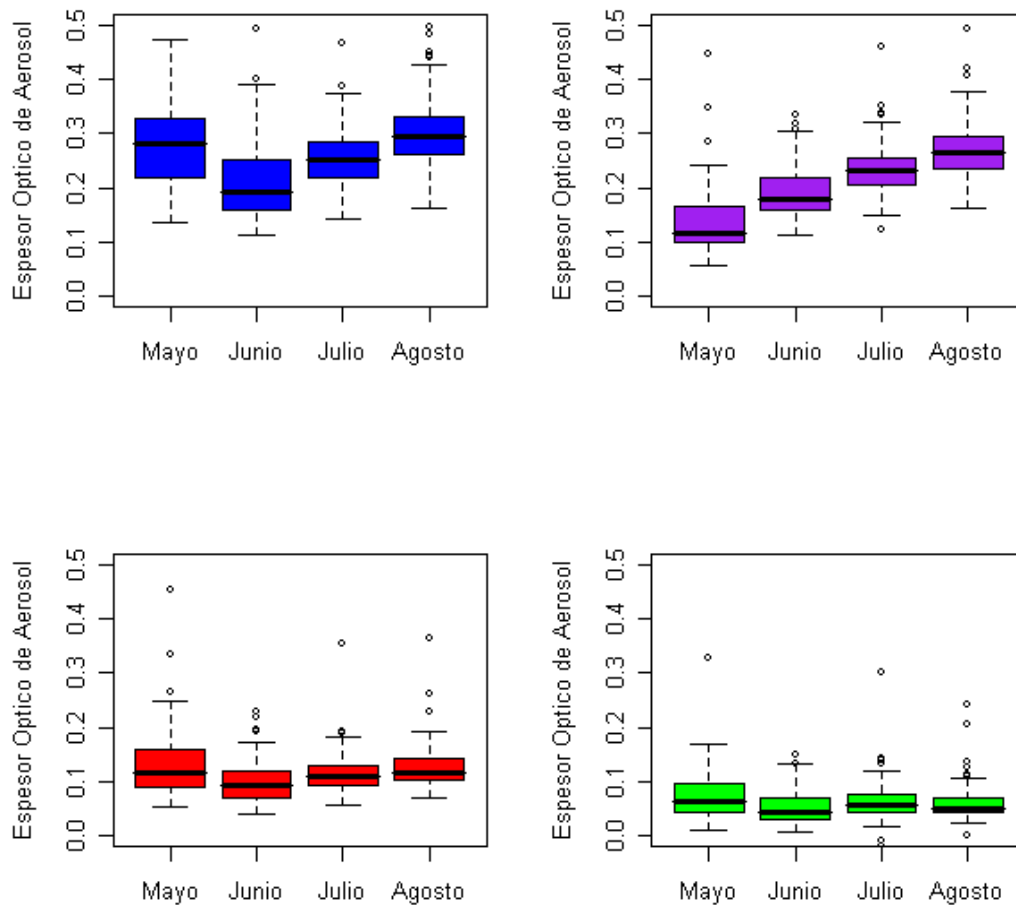
**Gráfico N° 10. Variacion del AOD mensual para cada longitud de onda**



Al realizar el análisis de varianza (ANOVA), para evaluar la diferencia mensual del AOD, que ha sido aplicado para los meses Mayo, Junio, Julio y Agosto, para las 4 longitudes de onda. Encontramos dos casos muy particulares, en los dos primeros cuadrantes, para una longitud de 412 nm existe una diferencia significativa entre los meses Junio - Agosto, mientras que para una longitud de 500 nm la diferencia significativa se da entre los meses de Junio - Mayo, Mayo - Agosto y

Mayo – Julio. Mientras que para 675 y 862 nm no hay una diferencia significativa en los cuatro meses monitoreados.

**Gráfico N° 11. Análisis de varianza y Tukey del AOD mensual**



#### 4.2. DIRECCIÓN DEL VIENTO Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

Las imágenes obtenidas con el modelo de velocidad vertical del viento del NOAA, nos muestra las direcciones predominantes que se registraron principalmente en la temporada seca en la ciudad de Huancayo, estas imágenes tienen la finalidad de darnos a conocer la posible distribución de los aerosoles que suelen viajar desde grandes distancias, lo que justificaria la presencia de ciertos elementos que fueron encontrados en el análisis elemental realizados por el laboratorio. En cuanto a las direcciones predominantes, se registraron principalmente vientos de componente



noreste, suroeste y oeste. Lo que justificaria los valores altos de potasio y zinc, que son rastros de la quema de vegetación de zonas altoandinas y amazónicas.

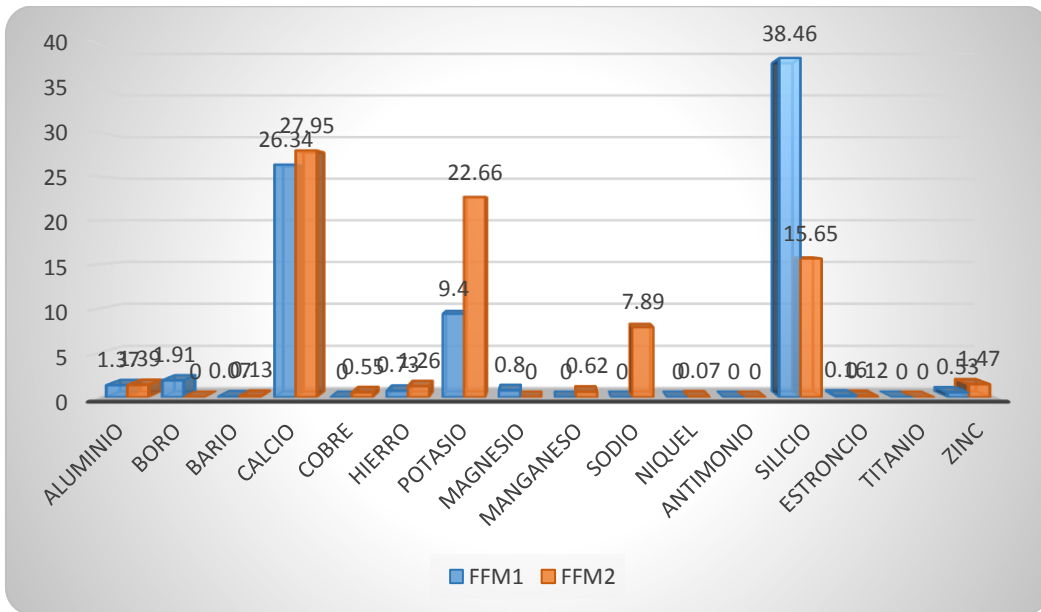
Otro aspecto interesante de estos resultados es la ausencia de plomo, habitual contaminante urbano. Sobre todo considerando que contamos con una ciudad (Oroya) conocida por su alta contaminación de plomo, las imágenes muestran la poca predominancia de los vientos de la Oroya a Huancayo, lo que justificaria la ausencia de plomo en los resultados de análisis elemental.

#### **4.3. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS CUALITATIVO DE LA CAPTURA DE AEROSOLES**

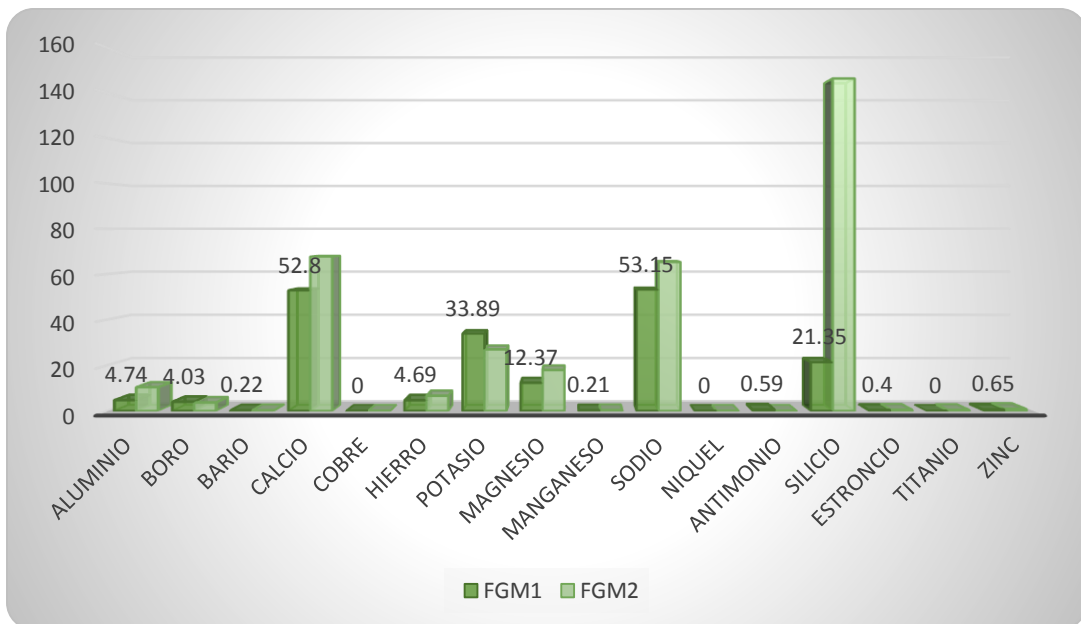
Otro aspecto considerado en el trabajo era el de saber la composición química de los aerosoles presentes en la ubicación en la cual se evalúan hasta 30 elementos químicos y con lo cual es posible tener una primera evidencia sólida sobre el origen de los contaminantes presentes en el aire.

La tabla N° 30, muestra los resultados obtenidos durante las mediciones efectuadas el mes de agosto del 2015, época seca en Huancayo.

**Gráfico N° 12. Comparación entre las 2 muestras de la fracción fina. Se registraron 16 elementos.**



**Gráfico N° 13. Comparación entre las 2 muestras de la fracción gruesa. Se registraron 16 elementos.**



Se encuentran valores altos de sílice y calcio que son elementos habituales en los suelos. Este mes particularmente en Huancayo es la temporada de vientos fuertes por lo que es posible que estos vientos puedan tener suficiente fuerza para poder elevar el material particulado y alcanzar la parte

alta del edificio. Así mismo, vientos en esta temporada producen polvareda que son capaces de cubrir grandes áreas de la ciudad. Esto debido a que aun existen muchas calles sin pavimentar y no existe una adecuada limpieza (o lavado) de calles en Huancayo.

Los valores de potasio y zinc pueden justificarse debido a la presencia de rastros de quema de vegetación en los alrededores o sitios aun mas alejados, dado que tambien se muestran en la fracción fina. Esto coincide con el hecho de que durante la temporada seca, cuando se realizaron las mediciones, hay una mayor actividad de quemas tanto a nivel local como a nivel regional, zonas altoandinas y amazonicas.

Otro aspecto interesante de estos resultados es la ausencia de plomo, habitual contaminante urbano. Es posible que el nivel sea demasiado bajo a la altura que se ha estado colectando o que quizás los niveles de plomo puedan estar disminuyendo debido a la reducción de plomo en la gasolina y tambien a que mas vehiculos estan utilizando combustibles como el gas propano y el gas natural. Sin embargo, sera necesario un monitoreo mas continuo para confirmar dicho resultado. Así mismo como para poder tener una mejor informacion sobre el efecto del transporte de contaminantes desde lugares mas alejados hasta Huancayo.

#### **4.4. DATA MENSUAL DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL**

Se logro obtener una data de las mediciones realizadas durante los 5 meses de monitoreo, las cuales fueron procesadas y se obtuvo el espesor óptico de aerosol para cada mes, estos datos pueden ser utilizadas para otros estudios, relacionados a los aerosoles. Los datos se encuentran en la Tabla N° 23.

## CONCLUSIONES

Durante la campaña de mediciones en la época seca (Mayo a Septiembre) en la ciudad de Huancayo se han podido realizar las mediciones de las propiedades físicas y químicas de los aerosoles, concluyendo:

- Se determinó los valores del espesor óptico de aerosol para la temporada seca en la ciudad de Huancayo con una precipitación menor a 100mm, encontrándose valores máximos hasta de 0.58 a 412 nm, 0.51 a 500nm, 0.36 a 675nm y 0.31 a 862nm, mostrando cierta consistencia durante dicha temporada. De estos resultados podemos definir que: el espesor óptico de aerosol (AOD) disminuye con el incremento de la longitud de onda y son de razonable dimensión. Los valores mensuales no variaron tan significativamente a lo largo de la estación seca, sin embargo, es posible notar que los valores máximos se dieron al final de la estación, mes de Agosto. Los aerosoles influyen en el clima de manera directa mediante la dispersión y absorción de la radiación solar produciendo un enfriamiento y calentamiento respectivamente; y de manera indirecta actuando como núcleos de condensación para la formación de nubes ó modificando las propiedades ópticas y periodo de vida de las nubes.
- Se logró la adecuada determinación del, espesor óptico total, espesor óptico del ozono y de Rayleigh. De estos resultados podemos definir que: el espesor óptico de Rayleigh disminuye con el incremento de la longitud de onda, por lo que podemos confiar en nuestras mediciones. Los bajos valores del espesor óptico de ozono demuestran la débil interacción que tienen estas longitudes de onda con la molécula del ozono.
- El Espesor Óptico de Aerosol, es un parámetro que determina la presencia de aerosoles de diferentes orígenes, así como del transporte de los contaminantes del aire, así lo demuestra los resultados del modelo de velocidad vertical del viento del NOAA, en los días de máxima concentración del aerosol, la dirección del viento que se registraron principalmente fueron vientos de componente

noreste, suroeste y oeste, lo que confirmaría con los resultados de la composición química elemental de los aerosoles.

- Se realizó la colecta de material particulado y su posterior análisis de su composición química elemental. Los resultados iniciales del análisis elemental, del material particulado colectado en la zona de estudio, indican que la composición química de los tipos de aerosoles encontrados tienen contribuciones significativas. Los resultados han mostrado una importante presencia de polvo del suelo, y de elementos con posible origen en la quema de vegetación. El plomo no fue registrado. Por ello es necesario realizar mediciones más continuas para tener una mejor evaluación de las causas de la contaminación en la ciudad de Huancayo.
- Se logró obtener una data de las mediciones de radiación visible realizadas durante los 5 meses de monitoreo, las cuales fueron procesadas y se obtuvo los resultados del espesor óptico de aerosol para cada mes, estos datos pueden ser utilizados para otros estudios, relacionados a los aerosoles.

## RECOMENDACIONES

Es esencial la investigación del comportamiento de los aerosoles, con especial atención a la incidencia en los componentes químicos que puedan realizar ingresos hospitalarios de consulta externa y de urgencias según causas específicas y grupos de edad. Pero debido al retraso en la captura de la información es difícil, pero no imposible realizar un estudio sobre la misma, ya que esta permitirá tener una amplia visión de los aerosoles y su influencia en el aire, para establecer un sistema de alerta basado en modelos de pronóstico los cuales podrían prevenir los efectos sobre la población de los posibles impactos.

Se recomienda realizar monitoreos continuos de análisis elemental de los aerosoles, para conocer su composición, y sobre todo dar seguimiento a los contaminantes mas comunes que afectan la salud, como el plomo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Andreae M. O., "Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels en World Survey of Climatology" Vol. 16, Future Climates of the World, A. Henderson-Sellers, 341- 392 Elsevier, New York, (1995).
- Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. Geografil Annal., 2, 156-166, (1929).
- Blanchard D.C., y Woodcock A.E. "The production, concentration and vertical distribution of the sea-salt aerosol", Ann. N. Y. Acad. Sci., 338, 330-347. (1980)
- Bodhaine B. A., Wood N.B., Dutton E. G., and Slusser J. R., On Rayleigh Optical Depth Calculations, J. Atmos. And Ocean Tech 16, 1854-1864, (1999).
- Castro T., Madronich S. Rivale S., Muhlia A., Mar B. "influencia of aerosols on photochemical smog in Mexico City, Atmospheric Environment 35, 1765-1772, (2001)
- Dutton, E. G., Reddy P., Ryan S. and DeLuisi J. J., Features and effects of aerosol optical depth observed at Mauna Loa, Hawaii: 1982–1992. J. Geophys. Res., 99, 8295–8306. Edle'n, B., 1953: The dispersion of standard air. J. Opt. Soc. ( 1994)
- Eck T. F., Holben B.N., Reid J.S., O'Neill N. T., Schafer J. S., Dubovik O., Simimov A., Yamasoe M. A. and Artaxo P., High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. Geophysical Research Letters, Vol. 30, No. 20, 2035. (2003).
- Dubovik, O., B.N.Holben, T.F.Eck, A.Smirnov, Y.J.Kaufman, M.D.King, D.Tanre, and I.Slutsker, Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, J.Atm.Sci., 59, 590-608, (2002).
- Hess M., P. Koepke, I. Schult, "Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC" Bulletin of the American Meteorological Society 831 – 844 Vol. 79, No. 5, (1998).
- Kirchhoff, V. W., Silva A. A., Costa C. A., Pes Leme N. Pavao H. G., Zarratti F., UV-B optical thickness observations of the atmosphere, Journal of Geophysical Research, Bol 106, N° D3, 2963-2973. February 16, (2001).
- Guía de usuario del Fotómetro Solar modelo SP02-L de Middleton Imc, (2004)

- Manual de Usuario del Fotómetro de ozono, modelo Microtops II de la Solar Light Co. (2001)
- Ostro, B.; Eskeland, G.; Sánchez, J. M.; y Feyzioglu, T. “Air Pollution and Health Effects: A Study of Medical Visits Among Children in Santiago, Chile”. *Environmental Health Perspectives*, 107 (1). (1999).
- Ostro, B.; Sánchez, J. M.; Aranda, C.; y Eskeland, G. “Air Pollution and Mortality: Results from a Study of Santiago, Chile”. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 6 (1), 97-114. (1996).
- Otero L, Ristori P., Robledo F., Holben B., Quel E. Aerosol Optical Thickness For Different AERONET -NASA Stations During, (2002)
- Otero L., Ristori P., Vilar O., Dworniczak J. , Holben B y Quel E. “Caracterización de un Proceso de Intrusión de Aerosoles en Córdoba Mediante un fotómetro Solar de la Red AERONET, Bahía Blanca, *Anales Afa* Vol. 16. // ISSN 0327-358, 41-44, (2004).
- Penndorf, R.,: Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 m and their application to atmospheric optics. *J. Opt. Soc. Amer.*, 47, 176–182, (1957).
- Raes, Frank, Dingenen R. Vita, Vignati E., Wilson J. , Putaud J., Sinfeld J. and Adams M., “Formation and cycling of aerosols in the global troposphere”, *Atmos. Environ.*, 34, 4215-4240, (2000).
- Reagan J.A., Scott – Fleming I.C., Herman B.M. and Schotland R.M., “Recovery of spectral optical, depth and zero – airmass solar spectral irradiance under conditions of temporally varying optical depth proceedings of IGARSS’84 Symposium”, *Strasbourg, Esa sp 215*, 455-459, (1984).
- Reagan J. A., Thomason L. W., Herman B. M., Palmer J. M., “Assessment of atmospheric limitations on the determination of the solar spectral constant from ground-based spectroradiometer measurements”, *IEEE T. Geosci. Remote GE-24*, 258-265 (1986).
- Shifrin K., “Simple Relationships for the Angstrom parameter of disperse systems”, *Appl. Opt.*, 34, 4480 – 4485, (1995).



- Slusser J., Gibson J., Bigelow D., Kolinski D., Disterhoft P., Lantz K., Baubien A., “Langley method of calibrating UV filter radiometers”, J. Geophys. Res. 105 (D4), 4841-4849 (2000).
- Solomon S., Garcia R., F. Sherwood and Webbles J., “On the depletion of Antarctic ozone”, Nature, 321, 755-4240, (2000).
- Stone R. S. “Monitoring aerosol optical depth at Barrow, Alaska and South Pole; Historical overview, recent results, and future goals, (2002).
- Terez E. I., Terez G. A. , “A method to determine atmospheric optical depth using observations of direct solar radiation”, J. Geophys. Res. 108 (D22), AAC6 1-6 (2003).
- Tomasi C. and Vitale V. “Calculation of the relative optical mass functions for air, water vapour, ozone and nitrogen dioxide in the Antarctic and Arctic Atmospheres”, 7 th Workshop Italian Research on Antarctic Atmosphere, Conference Proceedings Vol. 62, October 22-24, 1997, Italian Physical Society, Bologna, Italy, 253-282, (1998).
- Tomasi C., y col, “Aerosol in polar regions; A historical overview based on optical depth and in situ observations, J. Geophys. Res., 112, D 16205, doi: 10.1029/2007JD008432, (2007)
- Vergaz B. R., “Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos. Caracterización del área del Golfo de Cádiz”. Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid. Septiembre (2001).
- Wehrli Ch., “Calibration of filter radiometers for determination of atmospheric optical depth”, Metrologia 37 (5), 419-422 (2000).
- ALBRECHT, B.A. 1989. Aerosol, cloud microphysics and fractional cloudiness. Science, 245, 1227-1230.
- D’ALMEIDA, G.A., KOEPKE P. AND SHETTLE E.P., 1991. Atmospheric Aerosols, Global Climatology and Radiative Characteristics. A. Deepack Publishing. Hampton, Virginia.EE UU.
- AOKI, T., 1985. A method for matching the HIRS/2 and AVHRR pictures of TIROS-N satellites, en The Technical Proceedings of the Second International OVS Study Conference. Igls, Austria, 18-22 Febrero de 1985. pp. 349-368.

- Andreae MO, Gelencser A. black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. Atmospheric chemistry and physics discussions (alemania). 2006; 132(4): 3463-3455.
- Bethea RM. Air Pollution Control Technology. Van Nostrand Reinhold Company (USA). 1978; 15(13): 23-5.

# ANEXOS

## ANEXO N° 1

**Tabla N° 14. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 –  
L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Mayo 2015**

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 13-May-08 | 10:29:30   | 2.098                            | 2.160 | 2.323 | 2.343 | 211.9      | Presencia de nubes densas    |
| 13-May-08 | 11:38:22   | 1.872                            | 1.966 | 2.278 | 2.293 | 256.6      | Presencia de nubes densas    |
| 13-May-08 | 12:02:02   | 2.102                            | 2.045 | 2.141 | 2.148 | 267.4      | Presencia de nubes densas    |
| 14-May-08 | 10:00:00   | 1.934                            | 1.943 | 2.198 | 2.216 | 202.2      | Presencia de nubes densas    |
| 14-May-08 | 10:30:00   | 1.880                            | 1.911 | 2.006 | 1.920 | 243.6      | Presencia de nubes densas    |
| 14-May-08 | 11:00:00   | 1.803                            | 1.856 | 1.698 | 1.603 | 253.0      | Presencia de nubes densas    |
| 14-May-08 | 11:30:00   | 1.999                            | 2.068 | 2.352 | 2.300 | 265.7      | Presencia de nubes densas    |
| 14-May-08 | 12:01:00   | 2.136                            | 2.092 | 2.336 | 2.295 | 268.5      | Presencia de nubes densas    |
| 15-May-08 | 9:08:01    | 1.354                            | 2.079 | 2.095 | 2.217 | 229.2      | Presencia de nubes dispersas |
| 15-May-08 | 9:38:00    | 0.854                            | 0.960 | 0.734 | 0.758 | 189.0      | Presencia de nubes dispersas |
| 15-May-08 | 10:08:00   | 1.615                            | 1.837 | 2.212 | 2.228 | 187.6      | Presencia de nubes dispersas |
| 15-May-08 | 10:38:00   | 0.844                            | 1.147 | 0.690 | 0.597 | 191.6      | Presencia de nubes dispersas |
| 15-May-08 | 11:08:03   | 1.836                            | 1.922 | 2.019 | 2.106 | 189.5      | Presencia de nubes dispersas |
| 15-May-08 | 11:38:00   | 1.924                            | 1.924 | 2.097 | 2.196 | 219.9      | Presencia de nubes dispersas |
| 15-May-08 | 12:08:00   | 2.006                            | 2.014 | 2.261 | 2.214 | 236.0      | Presencia de nubes dispersas |
| 16-May-08 | 9:03:27    | 1.381                            | 1.532 | 1.904 | 1.985 | 160.4      | Presencia de nubes dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 16-May-08 | 9:38:20    | 1.674                            | 1.656 | 2.054 | 2.136 | 208.5      | Presencia de nubes dispersas |
| 16-May-08 | 10:03:00   | 1.506                            | 1.705 | 2.033 | 2.077 | 224.6      | Presencia de nubes dispersas |
| 16-May-08 | 10:31:40   | 1.549                            | 1.654 | 1.998 | 2.076 | 242.9      | Presencia de nubes dispersas |
| 16-May-08 | 11:02:00   | 1.831                            | 1.870 | 2.272 | 2.066 | 223.6      | Presencia de nubes dispersas |
| 16-May-08 | 11:33:15   | 1.531                            | 1.727 | 1.855 | 2.053 | 247.0      | Presencia de nubes dispersas |
| 16-May-08 | 12:01:00   | 1.770                            | 1.816 | 2.229 | 2.225 | 262.9      | Presencia de nubes dispersas |
| 19-May-08 | 9:07:00    | 1.622                            | 1.738 | 1.662 | 1.999 | 174.9      | Presencia de nubes densas    |
| 19-May-08 | 9:38:00    | 1.804                            | 1.851 | 2.126 | 2.221 | 217.5      | Presencia de nubes densas    |
| 19-May-08 | 10:08:00   | 1.674                            | 1.858 | 2.206 | 2.233 | 248.3      | Presencia de nubes densas    |
| 19-May-08 | 10:39:00   | 1.781                            | 1.799 | 1.976 | 2.122 | 261.1      | Presencia de nubes densas    |
| 19-May-08 | 11:08:00   | 1.832                            | 1.848 | 2.177 | 2.143 | 224.5      | Presencia de nubes densas    |
| 20-May-08 | 9:00:10    | 1.613                            | 1.707 | 2.052 | 2.086 | 175.4      | Despejado                    |
| 20-May-08 | 9:30:00    | 1.850                            | 1.868 | 2.193 | 2.202 | 212.6      | Despejado                    |
| 20-May-08 | 10:00:00   | 1.913                            | 1.909 | 2.203 | 2.187 | 220.9      | Despejado                    |
| 20-May-08 | 10:30:00   | 2.004                            | 1.983 | 2.254 | 2.235 | 233.4      | Despejado                    |
| 20-May-08 | 11:00:00   | 1.841                            | 1.950 | 2.204 | 2.124 | 245.6      | Despejado                    |
| 20-May-08 | 11:31:00   | 1.910                            | 1.977 | 2.162 | 2.172 | 235.1      | Despejado                    |
| 20-May-08 | 12:00:00   | 1.895                            | 1.875 | 2.096 | 2.111 | 278.3      | Despejado                    |
| 21-May-08 | 9:02:00    | 1.892                            | 1.928 | 2.230 | 2.272 | 166.8      | Despejado                    |
| 21-May-08 | 9:35:00    | 1.916                            | 1.924 | 2.123 | 2.173 | 198.3      | Despejado                    |
| 21-May-08 | 10:02:00   | 1.961                            | 1.959 | 2.108 | 2.056 | 222.3      | Despejado                    |
| 21-May-08 | 10:32:00   | 2.109                            | 2.033 | 2.197 | 2.143 | 248.0      | Despejado                    |
| 21-May-08 | 11:02:00   | 2.147                            | 2.089 | 2.314 | 2.291 | 245.7      | Despejado                    |
| 21-May-08 | 11:32:00   | 2.057                            | 2.061 | 2.333 | 2.289 | 266.6      | Despejado                    |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES             |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|---------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                           |
| 21-May-08 | 12:00:00   | 2.056                            | 2.049 | 2.289 | 2.270 | 258.2      | Despejado                 |
| 22-May-08 | 9:07:00    | 0.577                            | 0.731 | 1.184 | 0.603 | 170.2      | Presencia de nubes densas |
| 22-May-08 | 9:37:30    | 1.898                            | 1.892 | 2.251 | 2.243 | 225.4      | Presencia de nubes densas |
| 22-May-08 | 10:07:00   | 1.994                            | 1.974 | 2.148 | 2.151 | 239.7      | Presencia de nubes densas |
| 22-May-08 | 11:07:00   | 2.036                            | 2.016 | 2.285 | 2.267 | 258.7      | Presencia de nubes densas |
| 22-May-08 | 11:38:20   | 1.949                            | 1.978 | 2.265 | 2.234 | 249.2      | Presencia de nubes densas |
| 22-May-08 | 12:10:02   | 1.866                            | 1.952 | 2.234 | 2.217 | 274.1      | Presencia de nubes densas |
| 26-May-08 | 9:00:00    | 1.350                            | 1.513 | 1.976 | 2.009 | 181.7      | Despejado                 |
| 26-May-08 | 9:31:00    | 1.523                            | 1.705 | 2.092 | 2.153 | 210.4      | Despejado                 |
| 26-May-08 | 10:00:00   | 1.729                            | 1.811 | 2.213 | 2.226 | 227.6      | Despejado                 |
| 26-May-08 | 10:30:40   | 1.678                            | 1.799 | 2.174 | 2.197 | 234.8      | Despejado                 |
| 26-May-08 | 11:00:00   | 1.673                            | 1.754 | 2.096 | 2.124 | 260.0      | Despejado                 |
| 26-May-08 | 11:30:00   | 1.589                            | 1.729 | 2.093 | 2.106 | 229.1      | Despejado                 |
| 26-May-08 | 12:00:00   | 1.868                            | 1.891 | 2.220 | 2.207 | 233.0      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 9:05:10    | 1.483                            | 1.615 | 2.038 | 2.107 | 167.1      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 9:35:00    | 1.563                            | 1.912 | 2.200 | 2.216 | 210.5      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 10:06:00   | 1.777                            | 2.009 | 2.299 | 2.296 | 235.4      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 10:36:05   | 1.940                            | 1.941 | 2.145 | 2.166 | 238.2      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 11:05:40   | 1.889                            | 2.014 | 2.277 | 2.238 | 244.0      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 11:38:00   | 2.217                            | 2.142 | 2.379 | 2.338 | 260.8      | Despejado                 |
| 27-May-08 | 12:05:00   | 2.194                            | 2.169 | 2.377 | 2.337 | 267.8      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 9:00:00    | 1.579                            | 1.774 | 2.108 | 2.136 | 171.7      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 9:30:10    | 1.641                            | 1.865 | 2.185 | 2.174 | 202.5      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 10:00:03   | 1.796                            | 1.923 | 2.136 | 2.216 | 219.4      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 10:30:00   | 1.869                            | 1.999 | 2.266 | 2.247 | 232.4      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 11:00:00   | 1.510                            | 1.634 | 2.059 | 2.092 | 238.5      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 11:30:00   | 1.772                            | 1.803 | 2.069 | 2.134 | 271.4      | Despejado                 |
| 28-May-08 | 12:00:00   | 1.538                            | 1.832 | 2.076 | 2.063 | 240.3      | Despejado                 |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 29-May-08 | 9:06:00    | 1.354                            | 1.645 | 2.023 | 2.117 | 168.4      | Presencia de nubes dispersas |
| 29-May-08 | 9:35:20    | 1.557                            | 1.742 | 2.103 | 2.114 | 212.5      | Presencia de nubes dispersas |
| 29-May-08 | 10:05:00   | 1.498                            | 1.733 | 2.028 | 2.016 | 218.3      | Presencia de nubes dispersas |

## ANEXO N° 2

**Tabla N° 15. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 –  
L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Junio 2015**

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP . (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |             |                              |
| 02-Jun-08 | 9:30:00    | 1.473                            | 1.745 | 2.154 | 2.175 | 219.5       | Presencia de nubes dispersas |
| 02-Jun-08 | 10:00:00   | 1.592                            | 1.875 | 2.189 | 2.261 | 233.1       | Presencia de nubes dispersas |
| 02-Jun-08 | 10:30:00   | 1.623                            | 1.717 | 2.088 | 2.126 | 259.1       | Presencia de nubes dispersas |
| 02-Jun-08 | 11:00:00   | 1.804                            | 1.928 | 2.179 | 2.149 | 247.6       | Presencia de nubes dispersas |
| 02-Jun-08 | 11:30:00   | 1.646                            | 1.781 | 2.055 | 2.029 | 266.4       | Presencia de nubes dispersas |
| 03-Jun-08 | 9:08:00    | 1.313                            | 1.454 | 1.884 | 1.958 | 164.7       | Presencia de nubes dispersas |
| 03-Jun-08 | 9:37:30    | 1.395                            | 1.543 | 1.875 | 1.934 | 199.0       | Presencia de nubes dispersas |
| 03-Jun-08 | 10:06:20   | 1.286                            | 1.590 | 1.858 | 1.928 | 217.8       | Presencia de nubes dispersas |
| 03-Jun-08 | 10:36:00   | 1.654                            | 1.688 | 1.873 | 2.023 | 227.5       | Presencia de nubes dispersas |
| 03-Jun-08 | 11:07:03   | 1.633                            | 1.783 | 2.122 | 2.153 | 251.6       | Presencia de nubes dispersas |
| 03-Jun-08 | 11:37:00   | 1.798                            | 1.818 | 1.996 | 2.019 | 268.3       | Presencia de nubes dispersas |
| 05-Jun-08 | 9:04:00    | 1.676                            | 1.834 | 2.093 | 2.145 | 153.5       | Despejado                    |
| 05-Jun-08 | 9:31:00    | 1.953                            | 1.967 | 2.240 | 2.253 | 174.1       | Despejado                    |
| 05-Jun-08 | 10:01:00   | 1.885                            | 1.975 | 2.137 | 2.196 | 208.3       | Despejado                    |
| 05-Jun-08 | 10:30:00   | 2.039                            | 2.065 | 2.250 | 2.189 | 217.6       | Despejado                    |
| 05-Jun-08 | 11:00:00   | 2.094                            | 2.043 | 2.238 | 2.287 | 234.1       | Despejado                    |
| 05-Jun-08 | 11:30:00   | 2.092                            | 2.044 | 2.205 | 2.263 | 245.8       | Despejado                    |
| 05-Jun-08 | 12:00:00   | 1.940                            | 1.974 | 2.210 | 2.225 | 256.7       | Despejado                    |
| 09-Jun-08 | 9:00:00    | 1.709                            | 1.806 | 2.196 | 2.207 | 164.8       | Despejado                    |
| 09-Jun-08 | 9:29:40    | 1.827                            | 1.935 | 2.210 | 2.244 | 205.6       | Despejado                    |



| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP . (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |             |                              |
| 09-Jun-08 | 10:01:00   | 1.899                            | 1.950 | 2.270 | 2.232 | 225.8       | Despejado                    |
| 09-Jun-08 | 10:30:00   | 1.865                            | 1.945 | 2.168 | 2.158 | 241.2       | Despejado                    |
| 09-Jun-08 | 11:00:00   | 1.588                            | 1.965 | 2.209 | 2.224 | 238.0       | Despejado                    |
| 09-Jun-08 | 11:30:00   | 1.960                            | 1.975 | 2.241 | 2.217 | 264.5       | Despejado                    |
| 09-Jun-08 | 12:00:00   | 2.001                            | 2.000 | 2.149 | 2.245 | 268.9       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 9:05:00    | 1.913                            | 1.971 | 2.286 | 2.311 | 148.2       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 9:32:33    | 2.001                            | 2.078 | 2.316 | 2.333 | 197.2       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 10:01:00   | 2.032                            | 2.085 | 2.375 | 2.326 | 217.7       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 10:32:05   | 2.139                            | 2.093 | 2.377 | 2.311 | 229.4       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 11:01:05   | 2.165                            | 2.100 | 2.360 | 2.296 | 248.6       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 11:30:58   | 2.191                            | 2.119 | 2.384 | 2.307 | 262.5       | Despejado                    |
| 18-Jun-08 | 12:00:15   | 2.096                            | 2.089 | 2.302 | 2.208 | 246.1       | Despejado                    |
| 19-Jun-08 | 9:00:00    | 1.597                            | 1.704 | 1.982 | 1.949 | 171.4       | Presencia de nubes dispersas |
| 19-Jun-08 | 9:31:01    | 1.796                            | 1.865 | 2.180 | 2.183 | 200.6       | Presencia de nubes dispersas |
| 19-Jun-08 | 10:00:00   | 1.952                            | 1.962 | 2.252 | 2.233 | 222.5       | Presencia de nubes dispersas |
| 19-Jun-08 | 10:29:40   | 2.056                            | 2.012 | 2.283 | 2.268 | 247.8       | Presencia de nubes dispersas |
| 19-Jun-08 | 11:00:02   | 2.088                            | 2.037 | 2.303 | 2.262 | 239.8       | Presencia de nubes dispersas |
| 19-Jun-08 | 11:29:02   | 2.129                            | 2.057 | 2.307 | 2.256 | 249.2       | Presencia de nubes dispersas |
| 19-Jun-08 | 12:00:00   | 2.188                            | 2.105 | 2.361 | 2.307 | 252.8       | Presencia de nubes dispersas |
| 20-Jun-08 | 9:32:00    | 1.858                            | 1.880 | 2.224 | 2.227 | 150.2       | Presencia de nubes dispersas |
| 20-Jun-08 | 10:00:02   | 1.792                            | 2.014 | 2.329 | 2.306 | 195.3       | Presencia de nubes dispersas |
| 20-Jun-08 | 10:29:44   | 1.948                            | 2.034 | 2.311 | 2.290 | 226.6       | Presencia de nubes dispersas |
| 20-Jun-08 | 10:59:34   | 2.056                            | 2.073 | 2.314 | 2.291 | 245.1       | Presencia de nubes dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP . (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |             |                              |
| 20-Jun-08 | 11:29:00   | 2.166                            | 2.116 | 2.387 | 2.308 | 256.2       | Presencia de nubes dispersas |
| 20-Jun-08 | 11:59:01   | 2.175                            | 2.105 | 2.362 | 2.295 | 268.8       | Presencia de nubes dispersas |
| 25-Jun-08 | 8:59:40    | 1.784                            | 1.794 | 2.211 | 2.236 | 162.2       | Presencia de nubes dispersas |
| 25-Jun-08 | 9:31:02    | 1.967                            | 1.986 | 2.150 | 2.254 | 207.9       | Presencia de nubes dispersas |
| 25-Jun-08 | 10:00:10   | 2.006                            | 2.022 | 2.174 | 2.150 | 230.0       | Presencia de nubes dispersas |
| 25-Jun-08 | 10:29:32   | 2.161                            | 2.114 | 2.259 | 2.277 | 250.1       | Presencia de nubes dispersas |
| 25-Jun-08 | 10:54:33   | 2.121                            | 2.069 | 2.336 | 2.300 | 259.6       | Presencia de nubes dispersas |
| 26-Jun-08 | 9:19:00    | 1.618                            | 1.678 | 1.999 | 2.043 | 192.4       | Presencia de nubes densas    |
| 26-Jun-08 | 9:30:02    | 1.759                            | 1.826 | 2.153 | 2.152 | 182.4       | Presencia de nubes densas    |
| 26-Jun-08 | 10:00:05   | 1.764                            | 1.772 | 2.024 | 2.010 | 226.8       | Presencia de nubes densas    |

### ANEXO N° 3

**Tabla N° 16. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 –  
L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Julio 2015**

| FECHA    | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|          |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 1-Jul-08 | 09:00:02   | 1.550                            | 1.710 | 2.151 | 2.182 | 161.9      | Despejado                    |
| 1-Jul-08 | 09:31:10   | 1.739                            | 1.814 | 2.176 | 2.207 | 193.5      | Despejado                    |
| 1-Jul-08 | 10:00:20   | 1.811                            | 1.799 | 2.098 | 2.206 | 214.5      | Despejado                    |
| 1-Jul-08 | 10:33:05   | 1.892                            | 1.895 | 2.214 | 2.186 | 238.9      | Despejado                    |
| 1-Jul-08 | 11:00:00   | 1.979                            | 1.992 | 2.282 | 2.281 | 242.3      | Despejado                    |
| 1-Jul-08 | 11:29:40   | 1.935                            | 1.922 | 2.222 | 2.200 | 246.6      | Despejado                    |
| 1-Jul-08 | 11:59:30   | 1.957                            | 1.707 | 2.061 | 2.102 | 250.6      | Despejado                    |
| 3-Jul-08 | 09:07:30   | 1.491                            | 1.627 | 2.009 | 2.055 | 152.3      | Presencia de Nubes dispersas |
| 3-Jul-08 | 09:33:31   | 1.680                            | 1.764 | 2.104 | 2.081 | 193.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Jul-08 | 09:58:05   | 1.728                            | 1.759 | 2.094 | 2.121 | 213.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Jul-08 | 10:29:13   | 1.847                            | 1.864 | 2.174 | 2.180 | 229.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Jul-08 | 10:59:03   | 1.938                            | 1.955 | 2.235 | 2.231 | 237.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Jul-08 | 11:29:03   | 1.900                            | 1.924 | 2.190 | 2.320 | 259.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Jul-08 | 11:59:10   | 1.773                            | 1.809 | 2.060 | 2.057 | 252.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 4-Jul-08 | 09:08:25   | 1.691                            | 1.793 | 2.168 | 2.218 | 150.7      | Despejado                    |
| 4-Jul-08 | 09:30:00   | 1.746                            | 1.835 | 2.188 | 2.227 | 185.1      | Despejado                    |
| 4-Jul-08 | 09:59:10   | 1.857                            | 1.895 | 2.200 | 2.220 | 212.4      | Despejado                    |
| 4-Jul-08 | 10:30:05   | 2.029                            | 2.161 | 2.110 | 2.021 | 223.3      | Despejado                    |
| 4-Jul-08 | 10:59:02   | 1.886                            | 1.926 | 2.228 | 2.207 | 231.5      | Despejado                    |
| 4-Jul-08 | 11:30:20   | 2.014                            | 1.975 | 2.264 | 2.233 | 253.2      | Despejado                    |
| 4-Jul-08 | 12:00:07   | 1.999                            | 1.972 | 2.259 | 2.217 | 264.3      | Despejado                    |
| 7-Jul-08 | 09:04:50   | 1.534                            | 1.665 | 2.077 | 2.158 | 151.1      | Despejado                    |
| 7-Jul-08 | 09:29:45   | 1.621                            | 1.713 | 2.105 | 2.159 | 183.0      | Despejado                    |
| 7-Jul-08 | 10:00:00   | 1.658                            | 1.516 | 1.956 | 2.093 | 211.4      | Despejado                    |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 7-Jul-08  | 10:29:30   | 1.804                            | 1.842 | 2.180 | 2.205 | 234.6      | Despejado                    |
| 7-Jul-08  | 11:00:06   | 1.838                            | 1.722 | 2.183 | 2.153 | 247.6      | Despejado                    |
| 7-Jul-08  | 11:29:51   | 1.875                            | 1.896 | 2.228 | 2.195 | 263.7      | Despejado                    |
| 7-Jul-08  | 12:00:11   | 1.759                            | 1.761 | 2.098 | 2.127 | 272.3      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 09:14:25   | 1.763                            | 1.774 | 2.175 | 2.181 | 164.7      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 09:30:10   | 1.940                            | 1.947 | 2.277 | 2.440 | 197.8      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 09:59:00   | 1.940                            | 1.809 | 2.203 | 2.214 | 239.5      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 10:32:35   | 1.743                            | 1.762 | 2.092 | 2.107 | 258.2      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 10:59:20   | 1.786                            | 1.795 | 2.113 | 2.112 | 272.7      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 11:33:50   | 1.770                            | 1.778 | 2.105 | 2.104 | 285.0      | Despejado                    |
| 11-Jul-08 | 11:59:10   | 1.516                            | 1.486 | 1.655 | 1.654 | 283.9      | Despejado                    |
| 15-Jul-08 | 09:00:30   | 1.529                            | 1.613 | 1.963 | 2.043 | 146.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Jul-08 | 09:30:15   | 1.557                            | 1.667 | 1.968 | 2.026 | 173.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Jul-08 | 10:00:00   | 1.695                            | 2.011 | 2.287 | 2.278 | 208.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Jul-08 | 10:30:50   | 1.808                            | 2.081 | 2.347 | 2.316 | 213.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Jul-08 | 11:00:02   | 2.020                            | 2.093 | 2.330 | 2.308 | 234.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Jul-08 | 11:30:20   | 2.135                            | 2.072 | 2.334 | 2.277 | 241.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Jul-08 | 12:00:03   | 1.865                            | 2.045 | 2.202 | 2.248 | 255.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 16-Jul-08 | 09:03:15   | 1.508                            | 1.551 | 1.881 | 1.980 | 159.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 16-Jul-08 | 09:29:43   | 1.507                            | 1.592 | 1.998 | 2.073 | 166.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 16-Jul-08 | 10:00:35   | 1.739                            | 1.668 | 2.105 | 2.159 | 218.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 16-Jul-08 | 10:30:05   | 1.667                            | 1.703 | 2.059 | 2.124 | 246.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 16-Jul-08 | 10:59:13   | 1.784                            | 1.823 | 2.152 | 2.191 | 248.5      | Presencia de Nubes Dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 16-Jul-08 | 11:30:00   | 1.939                            | 1.846 | 2.217 | 2.197 | 259.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 16-Jul-08 | 11:59:05   | 1.881                            | 1.883 | 2.188 | 2.188 | 277.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 09:10:33   | 1.649                            | 1.723 | 1.984 | 2.060 | 157.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 09:32:10   | 1.696                            | 1.763 | 2.094 | 2.161 | 174.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 09:58:02   | 1.858                            | 1.872 | 2.186 | 2.187 | 211.0      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 10:29:33   | 1.957                            | 1.914 | 2.183 | 2.222 | 239.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 10:59:22   | 2.054                            | 2.014 | 2.265 | 2.268 | 252.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 11:29:55   | 2.079                            | 1.942 | 2.165 | 2.212 | 262.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Jul-08 | 12:01:10   | 2.196                            | 2.125 | 2.358 | 2.296 | 279.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 09:10:59   | 1.225                            | 1.384 | 1.797 | 1.879 | 156.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 09:29:08   | 1.355                            | 1.493 | 1.883 | 1.987 | 180.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 09:59:10   | 1.652                            | 1.706 | 2.050 | 2.089 | 204.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 10:30:57   | 1.904                            | 1.900 | 2.195 | 2.193 | 228.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 10:59:04   | 1.989                            | 1.965 | 2.254 | 2.250 | 250.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 11:29:04   | 2.047                            | 1.999 | 2.269 | 2.246 | 259.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Jul-08 | 11:59:33   | 2.061                            | 2.014 | 2.296 | 2.253 | 274.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 21-Jul-08 | 09:03:10   | 1.804                            | 1.874 | 2.221 | 2.267 | 164.8      | Despejado                    |
| 21-Jul-08 | 09:35:45   | 1.911                            | 1.844 | 2.003 | 2.088 | 187.8      | Despejado                    |
| 21-Jul-08 | 09:59:45   | 1.959                            | 2.018 | 2.303 | 2.402 | 213.9      | Despejado                    |
| 21-Jul-08 | 10:31:45   | 1.954                            | 1.893 | 1.972 | 1.966 | 235.3      | Despejado                    |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|---------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |               |
| 21-Jul-08 | 11:09:20   | 2.061                            | 2.021 | 2.265 | 2.259 | 253.9      | Despejado     |
| 21-Jul-08 | 11:46:38   | 2.099                            | 2.041 | 2.286 | 2.253 | 270.0      | Despejado     |
| 21-Jul-08 | 12:06:03   | 2.130                            | 2.055 | 2.282 | 2.257 | 279.3      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 09:03:45   | 1.389                            | 1.560 | 2.007 | 2.141 | 150.6      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 09:33:59   | 1.588                            | 1.708 | 2.089 | 2.179 | 178.7      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 09:59:40   | 1.689                            | 1.772 | 2.142 | 2.206 | 181.4      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 10:29:53   | 1.691                            | 1.755 | 2.112 | 2.155 | 216.0      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 10:58:59   | 1.754                            | 1.807 | 2.161 | 2.180 | 238.9      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 11:32:51   | 1.860                            | 1.885 | 2.221 | 2.227 | 245.2      | Despejado     |
| 22-Jul-08 | 12:01:15   | 1.918                            | 1.932 | 2.225 | 2.252 | 246.1      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 09:02:35   | 1.456                            | 1.554 | 2.036 | 2.144 | 156.3      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 09:30:36   | 1.639                            | 1.717 | 2.130 | 2.197 | 183.0      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 09:58:10   | 1.755                            | 1.818 | 2.160 | 2.194 | 203.5      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 10:29:03   | 1.833                            | 1.867 | 2.181 | 2.195 | 229.6      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 11:01:14   | 1.955                            | 1.960 | 2.256 | 2.249 | 232.3      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 11:31:08   | 1.921                            | 1.931 | 2.221 | 2.223 | 239.5      | Despejado     |
| 23-Jul-08 | 12:00:22   | 1.965                            | 1.957 | 2.236 | 2.238 | 236.8      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 09:05:12   | 1.578                            | 1.716 | 2.108 | 2.196 | 151.7      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 09:30:15   | 1.631                            | 1.742 | 2.114 | 2.183 | 186.4      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 10:04:06   | 1.735                            | 1.813 | 2.159 | 2.202 | 205.4      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 10:32:18   | 1.819                            | 1.849 | 2.168 | 2.201 | 230.5      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 10:59:30   | 1.803                            | 1.839 | 2.163 | 2.176 | 207.5      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 11:33:22   | 1.959                            | 1.964 | 2.265 | 2.254 | 251.5      | Despejado     |
| 24-Jul-08 | 12:01:45   | 1.904                            | 1.920 | 2.227 | 2.228 | 263.9      | Despejado     |
| 31-Jul-08 | 09:03:42   | 1.572                            | 1.710 | 2.078 | 2.131 | 153.9      | Despejado     |
| 31-Jul-08 | 09:33:15   | 1.571                            | 1.618 | 1.891 | 1.917 | 185.2      | Despejado     |
| 31-Jul-08 | 10:29:20   | 1.923                            | 1.924 | 2.190 | 2.140 | 200.8      | Despejado     |
| 31-Jul-08 | 10:57:45   | 2.020                            | 2.015 | 2.265 | 2.261 | 238.2      | Despejado     |
| 31-Jul-08 | 11:33:25   | 2.073                            | 2.047 | 2.221 | 2.268 | 241.8      | Despejado     |
| 31-Jul-08 | 12:05:07   | 2.057                            | 2.035 | 2.278 | 2.251 | 258.1      | Despejado     |

## ANEXO N° 4

**Tabla N° 17. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 –  
L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Agosto 2015**

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 4-Aug-08  | 08:58:24   | 1.423                            | 1.589 | 2.024 | 2.115 | 194.4      | Despejado                    |
| 4-Aug-08  | 09:36:54   | 1.734                            | 1.816 | 2.168 | 2.218 | 224.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 4-Aug-08  | 10:02:34   | 1.791                            | 1.844 | 2.179 | 2.208 | 240.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 4-Aug-08  | 10:32:43   | 1.942                            | 1.949 | 2.261 | 2.255 | 254.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 4-Aug-08  | 11:01:05   | 1.954                            | 1.950 | 2.249 | 2.249 | 260.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 4-Aug-08  | 11:35:29   | 2.079                            | 2.035 | 2.295 | 2.277 | 279.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 4-Aug-08  | 12:07:53   | 2.011                            | 1.986 | 2.260 | 2.246 | 287.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Aug-08 | 09:03:45   | 1.884                            | 1.931 | 2.260 | 2.260 | 163.5      | Despejado                    |
| 11-Aug-08 | 09:29:55   | 2.004                            | 2.016 | 2.303 | 2.286 | 202.0      | Despejado                    |
| 11-Aug-08 | 10:01:32   | 2.117                            | 2.077 | 2.326 | 2.313 | 233.5      | Despejado                    |
| 11-Aug-08 | 10:31:05   | 2.205                            | 2.132 | 2.376 | 2.334 | 251.1      | Despejado                    |
| 11-Aug-08 | 10:59:22   | 2.159                            | 2.096 | 2.355 | 2.295 | 271.6      | Despejado                    |
| 11-Aug-08 | 11:32:58   | 2.179                            | 2.103 | 2.343 | 2.288 | 287.2      | Despejado                    |
| 11-Aug-08 | 12:02:58   | 2.161                            | 2.095 | 2.343 | 2.289 | 284.1      | Despejado                    |
| 12-Aug-08 | 09:33:38   | 1.945                            | 1.955 | 2.250 | 2.253 | 188.2      | Despejado                    |
| 12-Aug-08 | 10:02:50   | 2.097                            | 2.060 | 2.309 | 2.303 | 231.3      | Despejado                    |
| 12-Aug-08 | 10:33:20   | 2.119                            | 2.063 | 2.309 | 2.280 | 250.8      | Despejado                    |
| 12-Aug-08 | 11:03:05   | 2.183                            | 2.105 | 2.324 | 2.295 | 271.2      | Despejado                    |
| 12-Aug-08 | 11:30:39   | 2.097                            | 2.035 | 2.268 | 2.252 | 282.7      | Despejado                    |
| 12-Aug-08 | 12:07:13   | 2.066                            | 2.018 | 2.255 | 2.236 | 292.9      | Despejado                    |
| 15-Aug-08 | 09:37:52   | 1.639                            | 1.717 | 1.989 | 2.116 | 152.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Aug-08 | 10:03:45   | 1.784                            | 1.834 | 2.160 | 2.190 | 156.3      | Presencia de Nubes Dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 15-Aug-08 | 10:31:35   | 1.862                            | 1.876 | 2.187 | 2.209 | 154.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Aug-08 | 11:02:28   | 2.025                            | 1.995 | 2.282 | 2.278 | 165.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Aug-08 | 11:33:39   | 1.936                            | 1.922 | 2.209 | 2.224 | 183.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Aug-08 | 12:05:13   | 1.983                            | 1.962 | 2.245 | 2.248 | 191.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Aug-08 | 09:35:58   | 1.400                            | 1.528 | 1.934 | 2.363 | 185.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Aug-08 | 10:00:10   | 1.451                            | 1.573 | 1.804 | 1.820 | 173.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Aug-08 | 10:30:00   | 1.375                            | 1.423 | 1.633 | 1.771 | 169.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Aug-08 | 11:03:10   | 0.959                            | 1.016 | 1.273 | 1.287 | 170.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 09:07:28   | 1.457                            | 1.604 | 2.008 | 2.129 | 172.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 09:29:45   | 1.524                            | 1.644 | 2.051 | 2.138 | 164.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 09:59:05   | 1.854                            | 1.888 | 2.238 | 2.267 | 165.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 10:31:14   | 1.932                            | 1.940 | 2.259 | 2.278 | 157.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 11:09:08   | 1.936                            | 1.939 | 2.264 | 2.271 | 166.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 11:34:06   | 1.887                            | 1.911 | 2.214 | 2.247 | 184.0      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 19-Aug-08 | 12:00:00   | 1.929                            | 1.937 | 2.249 | 2.256 | 197.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 20-Aug-08 | 09:15:03   | 1.524                            | 1.673 | 2.117 | 2.192 | 197.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 20-Aug-08 | 09:37:11   | 1.652                            | 1.759 | 2.170 | 2.226 | 178.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 20-Aug-08 | 10:07:22   | 1.750                            | 1.826 | 2.211 | 2.267 | 161.5      | Presencia de Nubes Dispersas |



| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 20-Aug-08 | 10:38:31   | 1.812                            | 1.858 | 2.213 | 2.242 | 161.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 20-Aug-08 | 11:00:40   | 1.782                            | 1.830 | 2.126 | 2.187 | 200.0      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 20-Aug-08 | 11:38:02   | 1.673                            | 1.738 | 2.063 | 2.101 | 200.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 20-Aug-08 | 12:07:40   | 1.582                            | 1.645 | 1.978 | 2.051 | 210.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 26-Aug-08 | 09:30:15   | 1.743                            | 1.806 | 2.174 | 2.218 | 178.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 26-Aug-08 | 10:00:50   | 1.832                            | 1.865 | 2.217 | 2.245 | 149.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 26-Aug-08 | 10:33:35   | 1.874                            | 1.885 | 2.211 | 2.238 | 159.0      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 26-Aug-08 | 11:03:30   | 1.919                            | 1.914 | 2.207 | 2.246 | 168.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 26-Aug-08 | 11:38:50   | 2.078                            | 2.039 | 2.316 | 2.488 | 178.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 26-Aug-08 | 11:59:38   | 1.909                            | 1.915 | 2.201 | 2.261 | 188.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 09:09:48   | 1.459                            | 1.561 | 1.952 | 1.959 | 182.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 09:30:38   | 1.555                            | 1.645 | 1.994 | 2.050 | 196.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 09:59:00   | 1.831                            | 1.868 | 2.086 | 2.079 | 173.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 10:29:30   | 1.844                            | 1.857 | 2.217 | 2.204 | 167.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 11:00:00   | 1.935                            | 1.926 | 2.227 | 2.242 | 179.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 11:31:35   | 1.688                            | 1.737 | 2.081 | 2.136 | 196.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 27-Aug-08 | 11:59:30   | 1.624                            | 1.688 | 2.069 | 2.133 | 208.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 28-Aug-08 | 09:04:15   | 1.637                            | 1.711 | 2.117 | 2.180 | 169.3      | Presencia de Nubes Dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 28-Aug-08 | 9:33:43    | 1.612                            | 1.694 | 2.084 | 2.147 | 162.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 28-Aug-08 | 10:00:00   | 1.766                            | 1.815 | 2.104 | 2.148 | 160.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 28-Aug-08 | 10:30:00   | 1.866                            | 1.872 | 2.211 | 2.229 | 163.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 28-Aug-08 | 11:05:10   | 1.955                            | 1.933 | 2.249 | 2.256 | 190.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 28-Aug-08 | 11:30:40   | 1.916                            | 1.886 | 2.207 | 2.233 | 195.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 28-Aug-08 | 12:00:00   | 1.917                            | 1.897 | 2.214 | 2.212 | 205.0      | Presencia de Nubes Dispersas |

## ANEXO N° 5

**Tabla N° 18. Mediciones de Radiación Visible con el Fotómetro Solar SP02 –  
L - Ciudad de Huancayo - Base de Datos del mes de Septiembre 2015**

| FECHA    | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|          |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 1-Sep-08 | 09:00:00   | 1.572                            | 1.713 | 2.114 | 2.138 | 166.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 1-Sep-08 | 9:31:15    | 1.600                            | 1.714 | 2.172 | 2.172 | 168.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 1-Sep-08 | 10:00:25   | 1.633                            | 1.754 | 2.187 | 2.182 | 170.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 1-Sep-08 | 10:30:04   | 1.704                            | 1.809 | 2.213 | 2.194 | 171.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 1-Sep-08 | 11:02:16   | 1.755                            | 1.849 | 2.248 | 2.253 | 174.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 1-Sep-08 | 11:30:12   | 1.813                            | 1.855 | 2.256 | 2.268 | 186.0      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 1-Sep-08 | 12:01:00   | 1.817                            | 1.864 | 2.261 | 2.274 | 194.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Sep-08 | 9:30:00    | 1.647                            | 1.724 | 2.169 | 2.158 | 166.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Sep-08 | 10:00:15   | 1.674                            | 1.748 | 2.184 | 2.173 | 169.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Sep-08 | 10:32:15   | 1.707                            | 1.770 | 2.200 | 2.192 | 172.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Sep-08 | 11:00:16   | 1.752                            | 1.786 | 2.207 | 2.205 | 173.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Sep-08 | 11:33:00   | 1.800                            | 1.822 | 2.251 | 2.235 | 181.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 3-Sep-08 | 12:00:50   | 1.850                            | 1.873 | 2.285 | 2.275 | 194.5      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 5-Sep-08 | 09:00:45   | 1.435                            | 1.523 | 1.660 | 1.751 | 160.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 5-Sep-08 | 9:31:10    | 1.623                            | 1.714 | 2.316 | 1.953 | 163.7      | Presencia de Nubes Dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 5-Sep-08  | 10:03:25   | 1.674                            | 1.749 | 2.369 | 2.062 | 175.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 5-Sep-08  | 10:30:05   | 1.726                            | 1.782 | 2.386 | 2.168 | 183.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 5-Sep-08  | 11:00:00   | 1.788                            | 1.801 | 2.386 | 2.206 | 185.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 5-Sep-08  | 11:30:00   | 1.754                            | 1.754 | 2.340 | 2.181 | 186.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 5-Sep-08  | 12:00:00   | 1.722                            | 1.744 | 2.305 | 2.132 | 186.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 9-Sep-08  | 09:05:30   | 1.422                            | 1.420 | 1.660 | 1.851 | 165.9      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 9-Sep-08  | 9:30:00    | 1.567                            | 1.526 | 1.711 | 2.134 | 167.1      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 9-Sep-08  | 10:04:05   | 1.623                            | 1.603 | 1.833 | 2.212 | 172.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 9-Sep-08  | 10:32:45   | 1.607                            | 1.576 | 1.799 | 1.989 | 173.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 9-Sep-08  | 11:30:00   | 1.601                            | 1.572 | 1.792 | 1.988 | 181.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 9-Sep-08  | 12:05:00   | 1.624                            | 1.598 | 2.012 | 2.027 | 184.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 09:00:00   | 1.434                            | 1.416 | 1.659 | 1.721 | 154.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 9:30:20    | 1.445                            | 1.424 | 1.669 | 1.729 | 157.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 10:00:00   | 1.458                            | 1.436 | 1.676 | 1.744 | 162.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 10:31:00   | 1.474                            | 1.463 | 1.694 | 1.741 | 166.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 11:02:35   | 1.513                            | 1.491 | 1.709 | 1.760 | 168.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 11:30:40   | 1.561                            | 1.527 | 1.734 | 1.784 | 172.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 11-Sep-08 | 12:05:25   | 1.594                            | 1.553 | 1.753 | 1.803 | 174.9      | Presencia de Nubes Dispersas |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES                |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|------------------------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |                              |
| 15-Sep-08 | 9:31:10    | 1.443                            | 1.437 | 1.666 | 1.696 | 161.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Sep-08 | 10:03:25   | 1.459                            | 1.439 | 1.674 | 1.726 | 162.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Sep-08 | 10:30:05   | 1.482                            | 1.470 | 1.694 | 1.745 | 165.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Sep-08 | 11:00:00   | 1.522                            | 1.490 | 1.711 | 1.762 | 167.7      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Sep-08 | 11:30:00   | 1.555                            | 1.515 | 1.743 | 1.783 | 174.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 15-Sep-08 | 12:00:00   | 1.590                            | 1.555 | 1.771 | 1.801 | 175.2      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Sep-08 | 10:06:00   | 1.438                            | 1.415 | 1.653 | 1.742 | 164.8      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Sep-08 | 10:33:46   | 1.457                            | 1.430 | 1.671 | 1.744 | 168.6      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Sep-08 | 11:01:57   | 1.470                            | 1.458 | 1.702 | 1.772 | 170.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Sep-08 | 11:30:00   | 1.497                            | 1.488 | 1.737 | 1.799 | 172.3      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 17-Sep-08 | 12:04:13   | 1.445                            | 1.452 | 1.712 | 1.760 | 174.4      | Presencia de Nubes Dispersas |
| 18-Sep-08 | 10:03:25   | 2.098                            | 2.055 | 2.366 | 2.341 | 204.1      | Despejado                    |
| 18-Sep-08 | 10:30:05   | 2.148                            | 2.085 | 2.389 | 2.359 | 207.2      | Despejado                    |
| 18-Sep-08 | 11:00:00   | 2.208                            | 2.123 | 2.399 | 2.367 | 202.4      | Despejado                    |
| 18-Sep-08 | 11:30:00   | 2.276                            | 2.176 | 2.433 | 2.389 | 204.7      | Despejado                    |
| 18-Sep-08 | 12:00:00   | 2.244                            | 2.156 | 2.412 | 2.383 | 223.4      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 09:00:00   | 1.885                            | 1.925 | 2.258 | 2.257 | 161.5      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 9:30:08    | 2.005                            | 2.013 | 2.319 | 2.449 | 189.8      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 10:00:52   | 2.095                            | 2.065 | 2.368 | 2.305 | 202.0      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 10:32:46   | 2.132                            | 2.092 | 2.390 | 2.363 | 206.1      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 11:00:10   | 2.187                            | 2.126 | 2.400 | 2.367 | 205.4      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 11:30:20   | 2.217                            | 2.171 | 2.405 | 2.399 | 206.5      | Despejado                    |
| 22-Sep-08 | 12:00:00   | 2.242                            | 2.188 | 2.425 | 2.400 | 209.5      | Despejado                    |
| 24-Sep-08 | 09:00:18   | 1.904                            | 1.950 | 2.170 | 2.269 | 169.4      | Despejado                    |

| FECHA     | HORA LOCAL | VOLTAJE POR LONGITUD DE ONDA (V) |       |       |       | TEMP. (mV) | OBSERVACIONES |
|-----------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|------------|---------------|
|           |            | 412                              | 500   | 675   | 862   |            |               |
| 24-Sep-08 | 9:38:43    | 1.959                            | 1.992 | 2.193 | 2.298 | 179.0      | Despejado     |
| 24-Sep-08 | 10:00:03   | 2.001                            | 2.026 | 2.260 | 2.330 | 206.2      | Despejado     |
| 24-Sep-08 | 10:30:36   | 2.072                            | 2.088 | 2.330 | 2.368 | 206.7      | Despejado     |
| 24-Sep-08 | 11:00:00   | 2.213                            | 2.121 | 2.390 | 2.376 | 207.4      | Despejado     |
| 24-Sep-08 | 11:31:05   | 2.267                            | 2.149 | 2.403 | 2.400 | 208.6      | Despejado     |
| 24-Sep-08 | 12:00:14   | 2.271                            | 2.172 | 2.419 | 2.401 | 212.6      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 09:00:00   | 1.958                            | 1.969 | 2.164 | 2.268 | 166.6      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 9:30:30    | 2.009                            | 1.999 | 2.197 | 2.291 | 173.9      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 09:58:25   | 2.077                            | 2.026 | 2.314 | 2.171 | 198.0      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 10:30:15   | 1.945                            | 1.929 | 2.247 | 2.211 | 209.4      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 10:59:35   | 2.213                            | 2.093 | 2.351 | 2.341 | 231.1      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 11:30:00   | 2.248                            | 2.141 | 2.304 | 2.355 | 232.1      | Despejado     |
| 26-Sep-08 | 12:00:00   | 2.280                            | 2.169 | 2.326 | 2.382 | 232.8      | Despejado     |