

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIA**

**Departamento de Física**



**Implementación de sensores bajo costo en ambientes mineros en Chile.**

**Jorge Orlando Vidal Hernández**

**Profesor Guía: Pedro Oyola Tapia**

**Tesis para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Físico**

**Santiago – Chile**

**2018**

©Jorge Orlando Vidal Hernández, 2017

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial Chile 3.0

# IMPLEMENTACIÓN DE SENSORES BAJO COSTO EN AMBIENTES MINEROS EN CHILE

**JORGE ORLANDO VIDAL HERNÁNDEZ**

Este trabajo de Graduación fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Pedro Oyola T. Director del Centro Premio Nobel Mario Molina Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora

Dr. Ernesto Gramsch \_\_\_\_\_

Dr. Jorge Jiménez \_\_\_\_\_

Dr. Patricio Pérez \_\_\_\_\_

Dra. Yolanda Vargas \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Dr. Pedro Oyola

Profesor Guía

\_\_\_\_\_

Dr. Enrique Cerda Villablanca

Directora del Departamento de Física

# Resumen

Palabras claves: Material Particulado, Minas, Monitoreo, Calidad del Aire, Sensores Bajo Costo.

Dentro de los problemas del mundo actual, uno de los principales es la contaminación ambiental provocada principalmente por la actividad humana. Para reducirla se dictan leyes y se busca innovar dentro de las tecnologías existentes. En Chile, parte importante de esta contaminación es provocada por la minería, actividad que genera perjuicios, a la tierra, a los recursos hídricos y, sobre todo, a sus trabajadores. Para mejorar sus condiciones laborales es necesario llevar un mayor control sobre esto, para lo cual se propone expandir el monitoreo actual con sensores bajo costo, fenómeno que actualmente se desarrolla en todo el mundo para distintos ámbitos.

El sensor que se propone utilizar corresponde a un prototipo bajo costo diseñado por el Instituto Meteorológico Finés (FMI) para la medición en ambientes mineros. Sin embargo, al ser un prototipo requiere una referenciación, es decir, un ajuste con el método referencial para conocer la calidad de esta. Esta referenciación fue realizada en la estación de monitoreo de calidad de aire Kingston College (Región del Biobío), donde se determinó que la correlación entre el sensor prototipo y la colección en filtros correspondiente al método referencial según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) es aceptable.

Una vez realizados el análisis estadístico correspondiente se realizó la medición de concentración de material particulado en la División El Teniente (DET) de Codelco, una de las minas más importantes y la más grande del país, en el sector de Sacapalos de Colón. Lugar donde los operarios retiran el material no chancable de líneas de transporte enviadas desde la mina al proceso de chancado. En este lugar se instaló un sensor en la cabina del operario y otro en las líneas de transporte.

Realizada las mediciones se concluyó que el sensor posee las propiedades necesarias para la medición en ambientes mineros, empero, el sensor requiere mantención periódica dada las condiciones ambientales extremas en el lugar seleccionado, problema importante debido a las normas de seguridad laboral y control existentes en la mina. El comportamiento del sensor en otros ambientes presenta una calidad óptima de medición cumpliendo con estándares de la EPA.

La Tesis forma parte del Proyecto de Investigación Conjunta (PIC) AKA-CONICYT Particulate Matter in mines and mining environments (PARMAT).

# Agradecimientos

Este trabajo no hubiese sido posible de realizar sin el apoyo de:

- Al Ministerio de Educación y Scotiabank, por el financiamiento en los años de carrera.
  - A Pedro Oyola y Ernesto Gramsch, por su guía y conocimiento.
  - Al Proyecto de Investigación Conjunta AKA-CONICYT. “*Particulate matter in mines and mining environments (PARMAT)*”
  - Al Centro Mario Molina Chile, por su aceptación y buenos tiempos ahí. En especial a Yeanice Vásquez, por su aporte en la discusión y en sugerencias y a Claudio Aguilera, por su apoyo en la logística y en las salidas a terreno.
  - Al Instituto Meteorológico Finés, por su conocimiento, experiencia y apoyo con los sensores.
  - Al equipo de higienistas de la División El Teniente de Codelco.
  - A Alejandro Silva, con su ayuda en cuanto al formato.
- ¡Gracias!

# Tabla de Contenidos

Introducción .....	1
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos.....	4
Delimitación.....	4
1 Material Particulado.....	5
1.1 Salud.....	7
1.2 Ambiente.....	8
1.3 Sensores.....	9
2 El Teniente .....	12
3 Equipos.....	14
3.1 <i>Prototype Aerosol Sensor</i> .....	14
3.2 Kleinfiltergerät.....	18
3.3 <i>Beta Attenuator Monitor</i> .....	19
3.4 HOBO .....	20
4 Procedimientos.....	21
4.1 Equipos .....	22
4.1.1 Prototipo FMI.....	22
4.1.2 HOBO.....	22
4.2 Software .....	23
4.3 Actividades .....	23
4.3.1 Calibración.....	23
4.3.2 Equivalencia de sensores.....	27
4.3.3 Medición en mina .....	28
4.4 Métodos estadísticos .....	29
4.4.1 Regresión Lineal Mínimo Cuadrática.....	29
4.4.2 Coeficiente de correlación de Pearson .....	30
4.4.3 Análisis de Varianza.....	30
5 Resultados y Análisis .....	32
5.1 Mediciones de prueba.....	32
5.2 Calibración.....	34
5.2.1 Filtros en paralelo a PAS.....	35

<b>5.2.2 Atenuador beta en paralelo a PAS</b> .....	36
<b>5.2.3 Filtros en paralelo a atenuador beta</b> .....	38
<b>5.2.4 Independencia de humedad</b> .....	39
<b>5.3 Equivalencia de sensores</b> .....	41
<b>5.4 Medición en mina</b> .....	43
<b>5.5 Desempeño de los sensores</b> .....	49
<b>Conclusiones</b> .....	51
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	53
<b>Anexos</b> .....	56

# Índice de Tablas

Tabla 1: Tasa de mortalidad por sector productivo. ....	7
Tabla 2: Coste de la energía para distintos países. Tabla confeccionada mediante datos obtenidos de World Economic Forum.....	9
Tabla 3: Distintos equipos de detección de material particulado con sus precios en dólares y en pesos chilenos. ....	9
Tabla 4: Grados y aplicaciones sugeridas para el desempeño de los sensores.....	10
Tabla 5: Instrumentos ocupados en las campañas. ....	14
Tabla 6: Significado de cada display en valores aproximados. ....	17
Tabla 7: Resumen de campañas. ....	23
Tabla 8: Límite permisible de material particulado fino en 24 horas, distintas normas. ....	26
Tabla 9: Ecuaciones de ANOVA para una regresión lineal. ....	30
Tabla 10: Análisis ANOVA para la regresión de KFG con PAS. ....	36
Tabla 11: Análisis ANOVA para la regresión de BAM con PAS. ....	37
Tabla 12: Análisis ANOVA para la regresión de KFG con BAM. ....	39
Tabla 13: Resumen de medición en KC. ....	39
Tabla 14: ANOVA para efectos de humedad en PAS. ....	39
Tabla 15: ANOVA para efectos de humedad en BAM. ....	40
Tabla 16: ANOVA para efecto de humedad en filtros gravimétricos. ....	40
Tabla 17: Anova para la comparación de prototipos. ....	42
Tabla 18: Estadígrafos de medición con sensores. ....	46
Tabla 19: Medición de flujo para distintos casos, ambos sensores.....	49
Tabla 20: Aspectos favorables y desfavorables de los equipos prototipos. ....	52
Tabla 21: Bitácora de filtros usados en estación Kingston College.....	58



# Índice de Ilustraciones

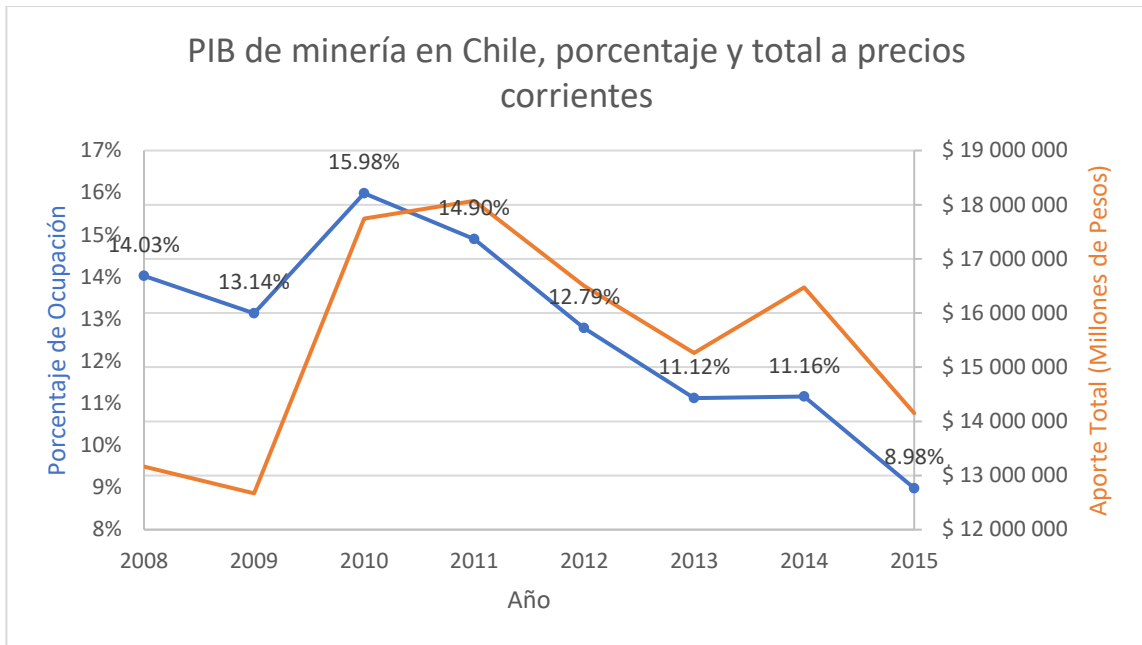
Ilustración 1: Variación PIB 2008-2015 (Elaboración propia a partir de los datos de Banco Central de Chile).....	2
Ilustración 2: Polución intramuro en números.....	6
Ilustración 3: Ubicación de Control de Acceso Maitenes.....	13
Ilustración 4: Zonas principales de la mina El Teniente. ....	13
Ilustración 5: Esquema de componentes ópticos. ....	16
Ilustración 6: Equipo PAS con sus partes. 1 entrada de flujo, 2 LEDs de muestra, 3 placa Arduino, 4 bomba 3 LPM, 5 salida de flujo, 6 Jack 2.1/5.5 mm centro positivo.....	16
Ilustración 7: KFG tal como aparecen en el manual (SVEN LECKEL, 2007).....	18
Ilustración 8: Equipo Thermo 5014i, utilizado para el control de MP 2.5 instalado en una estación de monitoreo de calidad.....	19
Ilustración 9: Equipo HOBO utilizado como apoyo de temperatura y HR. ....	20
Ilustración 10: Esquema del trabajo.....	21
Ilustración 11: Localización de Estación KC (Fuente: GoogleMaps).....	24
Ilustración 12: Estación Kingston College, se observa el contenedor utilizado y sobre él equipos de monitoreo de calidad del aire junto con sensores de variables meteorológicas, .....	25
Ilustración 13: De izquierda a derecha, KFG, HOBO, PAS. Dispuestos en su posición final para realizar la referenciación del sensor prototipo. ....	25
Ilustración 14: Balcón de Pocuro 2905, ahora con medición en paralelo de ambos PAS. ....	27
Ilustración 15: Ubicación del punto de medición Pocuro 2905 (-33.432081, -70.591234). ....	28
Ilustración 16: PAS 2 en sector sacapalos. ....	29
Ilustración 17: Mapa con la ubicación de Pocuro 2905. ....	32
Ilustración 18: PAS en detección de Material Particulado 2.5 en balcón. ....	33
Ilustración 19: Perfil diario de Pocuro de MP fino. ....	33
Ilustración 20: Temperatura y humedad en el periodo de referenciación en Kingston College ..	34
Ilustración 21: Se presenta la comparación entre concentración promedio de 24 horas de filtros con concentración promedio de PAS. Cada dato además contiene el promedio de humedad correspondiente al día.....	35
Ilustración 22: Se presenta la comparación entre concentración promedio de 24 horas de atenuación beta con concentración promedio de PAS. Cada dato además contiene el promedio de humedad correspondiente al día. ....	36
Ilustración 23: Se presenta la comparación entre concentración promedio de 24 horas de filtros con concentración promedio de BAM. Cada dato además contiene el promedio de humedad correspondiente al día.....	38
Ilustración 24: Serie temporal de la medición en paralelo usando los sensores prototipos en Pocuro 2905.....	41

Ilustración 25: Comparación entre las versiones de los sensores prototipos.....	42
Ilustración 26: Concentración de MP2.5 en chancado primario Colón.....	44
Ilustración 27: Perfil temporal en promedio horario. ....	45
Ilustración 28: Relación maquinaria-caseta interior en las primeras 24 horas de medición (26-27 de octubre). ....	47
Ilustración 29: Relación maquinaria-caseta exterior día 29-30 de octubre. ....	48
Ilustración 30: Conexión bomba. ....	50

# Introducción

El interés en la contaminación del aire es tan antiguo como su regulación, el evento catastrófico del año 1952 en Inglaterra, el conocido “Great Smog of 1952”, arrasó con la vida 12 mil personas más el perjuicio a otro tanto (Bell, Davis, & Fletcher, 2004). Un par de años después de este evento se presentó una de las primeras regulaciones a la contaminación el “Clean Air Act” en el año 1956. Aquí se haría un control sobre la emisión del humo negro (dark smoke) y además bajar las dosis de emisiones del humo en general (Parliament of the United Kingdom, 1956). Como la descripción señala, en estos tiempos la emisión era controlada mediante métodos más informales como lo es la visión humana, aún no existía un estándar de calidad y control. El año 1987 la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América promulgó un control estándar para el material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones llamándolo  $MP_{10}$ , 10 años más tarde se aumentaría el control informando también sobre el material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrones.

En Chile actualmente existen variadas leyes en torno al material particulado y gases contaminantes, desde niveles de emisión de fuentes fijas y residenciales, hasta los niveles permisibles de gases para los vehículos motorizados (Ministerio del Medio Ambiente, 2012) (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones; Subsecretaría de Transportes, 2013). Sin embargo, el decreto que provee la salud del trabajador no incluye exposición a material particulado, incluye control sobre químicos, ruido, vibraciones, pero no regulaciones de partículas suspendidas en el aire (Ministerio de Salud, 2015). Esto es preocupante sabiendo los variados trabajos que poseen exposición a material particulado en el país, dando énfasis en una de las áreas que más ha aportado al Producto Interno Bruto en la última década, la minería.



*Ilustración 1: Variación PIB 2008-2015 (Elaboración propia a partir de los datos de Banco Central de Chile).<sup>1</sup>*

Los oficios relacionados a la minería, desde mineros como tal a higienistas y prevencionistas de riesgo, poseen exposiciones diarias en todo el rango respirable sujetas a distintas fuentes. La fuente principal es el levantamiento de polvo proviene del movimiento de vehículos que aporta cerca del 50% del polvo en suspensión, la carga y descarga de estos aportaría con un 20% (Ghose, 2007). El trabajo en minas subterráneas está sometido a 100 veces más material particulado proveniente de diésel que trabajos realizados en exteriores (Cantrell & Watts Jr, 1997).

Según estimaciones, de los fallecidos y accidentados en una mina, el 80% corresponde a enfermedad ocupacional y el 20% restante a accidentes laborales. Junto con esto, del total de trabajadores, un 4% se encuentra permanentemente con licencias médicas debido a complicaciones causadas por la exposición al polvo total suspendido.

El año 1995 la Organización Internacional del Trabajo (ILO) en conjunto con la Organización Mundial de la Salud (WHO), establecieron siguiendo el doceavo Comité de Salud Ocupacional del mismo año el Plan Global para la Eliminación de la Silicosis, GPES por sus siglas en inglés. En las siguientes cumbres se continuaría dando interés en el control de la silicosis y se sugiere la elaboración de planes nacionales de contingencia.

<sup>1</sup> Datos obtenidos de la dirección de cuentas nacionales:  
<http://si3.bcentral.cl/Siete/secure/cuadros/arboles.aspx>

En Chile el 13 de julio del 2007 se promulgó PLANESI, el Plan Nacional de Erradicación de la Silicosis, que establece que para el año 2030 no existirá silicosis como enfermedad ocupacional. Esta enfermedad es común en los mineros, es producida al estar en exposición constante a sílice, pequeños cristales invisibles al ojo humano que causan una fibrosis pulmonar, un cambio en la constitución del pulmón irreversible y eventualmente progresiva. Dentro de los países que se encuentran en planes nacionales de control de la silicosis se encuentran Brasil, China, India y Tailandia entre otros.

Para combatir la presencia de material particulado, las excavaciones poseen sistemas de ventilación de origen natural con el viento o auxiliar con la implementación de maquinaria (Servicio Nacional de Geología y Minería; Departamento de Seguridad Minera, 2008). El 90% del cobre extraído en Chile corresponden a minas a rajo abierto, donde el flujo natural de aire es el encargado de realizar la ventilación (Consejo Minero, 2015). El restante 10% corresponde a minas del tipo subterráneas donde el suministro de oxígeno viene dado principalmente de ventilación auxiliar eléctrica que corresponde al 50% del consumo energético de la excavación (Rockwell Automation, 2011). Además, la minería en Chile posee una de las energías más caras del mundo.

Por estas razones la innovación es parte fundamental del desarrollo minero, para disminuir las enfermedades presentes en los obreros de los yacimientos, reducir los costos asociados a la energía y también un consumo menor energético para la sustentabilidad del país y mejorar las condiciones de los trabajadores. Todo esto manifestado en la misión del Ministerio de Minería.

Entre los métodos de innovación a nivel mundial, dos de los principales son los conceptos de Ventilation-on-demand (VOD) e Internet of things (IoT). El primero denota que en vez de implementar una ventilación generalizada en las galerías a subsuelo esta se realice solo en los lugares donde sea necesaria. El segundo concepto abarca la conexión a internet de objetos comunes y corrientes, aplicándose a sensores de material particulado como es en este caso. El Proyecto de Investigación Conjunta AKA-CONICYT, "*Particulate matter in mines and mining environments (PARMAT)*" busca crear un sensor de bajo costo, elaborarlo y realizar ensayos para posteriormente implementarlo a VOD e IoT.

Otros métodos utilizados para disminuir la exposición es retirar a los obreros de las zonas con exposición, utilizando telecontrol a distancia. Así, sin necesidad de bajar las emisiones se controla la exposición al polvo, sin embargo, no todos los trabajos son realizables de forma remota, en situaciones es necesaria la participación in situ.

El presente trabajo se realizará mediante la hipótesis de: "¿Pueden los equipos de bajo costo ser utilizables como sistemas de monitoreo de material particulado en minas subterráneas?"

## **Objetivo General**

Determinar la factibilidad de utilizar equipos de bajo costo en mediciones de calidad de aire en el país y su implementación en minas.

## **Objetivos Específicos**

- Comparar experimentalmente los resultados de las mediciones en terreno contra el método referencial-gravimétrico y monitor beta continuo.
- Determinar diferencias estadísticas entre mediciones.
- Implementar los equipos en un monitoreo minero.
- Determinar la factibilidad de usos de estos equipos en la mina.

## **Delimitación**

El hardware no será alterado ni modificado en este trabajo. Se presentarán resultados de su comparación con métodos aceptados por la autoridad ambiental.

# 1 Material Particulado

El término material particulado refiere a las partículas, ya sean sólidas o líquidas, que se encuentran suspendidas en la atmósfera. El rango de tamaños puede variar desde algunos Armstrong hasta varios micrones, esta amplitud establece que la separación por tamaño sea uno de los componentes fundamentales para su estudio y comprensión. Las fuentes de estas partículas pueden ser tanto naturales proviniendo de vientos, volcanes, sismos, como fuentes antropogénicas, quema de biomasa, movimiento de transporte etc. Si la emisión es directamente una partícula se habla de que es aerosol primario, en cambio cuando se habla de que la partícula se formó en la atmósfera mediante un proceso de conversión de gas a partícula se habla de aerosol secundario.

Las partículas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros se conocen como la fracción fina y el diámetro superior a 2.5 como fracción gruesa, además se puede realizar una tercera sección comprendiendo únicamente las partículas de rango menor a 1  $\mu\text{m}$ , el rango ultrafino. El rango grueso comprende principalmente de formación antropogénica y de polvos naturales del globo terráqueo, su deposición en la superficie es un proceso natural por acción de la gravedad o con la adhesión a partículas de agua. El rango fino se forma por procesos de origen químico, combustión y evaporación de sustancias, su aporte en masa es ínfimo y su contribución numérica grande, al ser números mayores que en la gruesa y poseer menor masa, su tiempo de vida en la atmósfera es largo yendo desde días y semanas hasta meses.

A lo largo de los años en Chile y el mundo se han realizado diversos estudios sobre el material particulado, el daño a la salud, daño al ambiente y formas de mejorar su detección. En Chile existen diversas leyes para regular sus emisiones en diversos ámbitos, principalmente en los niveles de emisión de fuentes fijas, fuentes móviles y los niveles permisibles de calidad de aire como se ve manifestados en las alertas, emergencias y preemergencias en distintas ciudades del país. Sin embargo, no hay leyes de la exposición laboral a material particulado.

Los interiores poseen mayores concentraciones de material particulado que en los exteriores, pudiendo ser generaciones in situ o penetración del exterior. Se estima que desde la década de los 80 el interés en el estudio de interiores ha aumentado de un 2 a un 40% en el último tiempo. En los hábitos de la vida moderna se invierte mayoritariamente el tiempo en interiores, lo cual establece la importancia de los estudios intramuro.



Ilustración 2: Polución intramuro en números.<sup>2</sup>

Además de las condiciones normales se hayan casos extremos de contaminación indoor, principalmente en lugares de ciertos tipos de trabajos como lo puede ser la serrería, el área de la construcción y la industria minera. Al tener las fuentes de MP en la misma locación que el trabajador está expuesto a concentraciones en calidad de emisiones durante parte de la jornada laboral.

A diferencia de otros trabajos, el laburo en zonas a subsuelo está a sujeto a condiciones distintas que exteriores o interiores sobre el suelo. En los ambientes subterráneos no se posee radiación UV ni vientos, lo que conlleva a dificultar el ciclo natural de deposición de las partículas y la limpieza del aire. Se entiende que todas o la mayoría de las emisiones son primarias debido a la ausencia de variables atmosféricas, es decir, el material es arrojado al aire y no creado en él.

Dentro de algunos estudios realizados en minas subterráneas se ha encontrado la presencia de dos modos, uno entre 10 y 20 nanómetros y otro cercano a los 70 nm (Saarikoski, et al.), este último peak también es encontrado en mediciones en túneles de tránsito vehicular (Zhu, et al., 2014) pudiendo ser el polvo mineral (D'Almeida & Jaenicke, 1981) encontrado en las galerías a subsuelo. Sin embargo, no se encuentran publicaciones sobre caracterización de las curvas de distribución por tamaño en minas subterráneas como tal para realizar una estimación sobre la división del material suspendido.

<sup>2</sup> Imagen obtenida de: <https://www.airglossproject.com/>



## 1.1 Salud

Las partículas de calidad ultrafina destaca por ser más peligrosas para el ser humano que las partículas gruesas, la fracción más gruesa es filtrada del organismo con las defensas básicas de vello y la mucosa nasal pero esta tarea se dificulta para fracción fina, esta al ser inhalada puede adentrarse hasta llegar al sistema broncopulmonar depositándose en el árbol respiratorio (Andrae, Axelson, Björkstén, Fredriksson, & Kjellman, 1988). Se ha averiguado que la exposición diaria continua a MP aumenta la probabilidad de mortalidad de 0.2 a 0.6% por cada  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP10 y de 6 a 13% por cada  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  de MP2.5 (World Health Organization, 2006) y al nivel contrario, la reducción de algunos de sus componentes representa una extensión en la esperanza de vida (Dominici, et al., 2015). Los componentes de los cuales se tiene más resguardo dentro de la minería del cobre se encuentran la sílice, arsénico, molibdeno, anhídrido sulfuroso y los aerosoles ácidos entre otros.

La enfermedad más común dentro de la minería es la silicosis, también conocida como la enfermedad del minero. Esta surge al estar sometido mucho tiempo a la presencia de sílice en el ambiente, y los mineros al estar expuestos cerca de ocho horas diarias en ambientes cerrados en el interior de la corteza terrestre, son víctimas de este mal (Plant, Voulvoulis, & Ragnarsdottir, 2012). La silicosis entre las décadas de los 30s y 60s fue la enfermedad laboral más común de Chile y ahora se diagnostica una docena de empleados al año (Vergara, 2005). La minería es uno de los sectores productivos con menor tasa de accidentes, sin embargo, posee la mayor tasa de mortalidad debida principalmente a las enfermedades laborales.

*Tabla 1: Tasa de mortalidad por sector productivo.*

Actividad	Tasa de Mortalidad
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura-pesca	11.9
Explotación de minas y canteras	29.6
Industrias Manufactureras	6.1
Suministro de electricidad, gas y agua	9.5
Construcción	14
Comercio	2.7
Transporte, almacenamiento y comunicaciones	19.9
Servicios	2.2

La silicosis se conoce en tres variaciones de dependiendo de las concentraciones y del tiempo de la exposición (NIOSH, 2002).

1. Silicosis crónica simple, la cual ocurre después de 10 o más años de exposición a concentraciones relativamente bajas.
2. Silicosis acelerada, la cual se desarrolla de 5 a 10 años después de la primera exposición.
3. Silicosis aguda, la cual presenta síntomas desde un par de semanas hasta 5 años después de la primera exposición debida a concentraciones altas de sílice respirable.

Las excavaciones no solo causan daños a la salud de sus trabajadores, también es posible observar perjuicios en las comunidades aledañas, sobre todo en los niños y personas jóvenes. Es posible correlacionar la presencia de enfermedades respiratorias en infantes con la proximidad de un yacimiento (Herrera, et al., 2016).

## **1.2 Ambiente**

Entre las regiones con más nivel de emisiones de material particulado en Chile se encuentran Atacama y Antofagasta, ambas destacables por sus yacimientos mineros, sus emisiones anuales son de 14 296 y 8309 respectivamente (Instituto Nacional de Estadísticas - Chile, 2016). Este valor corresponde al 37.5% de la emisión total del país.

Además de la contaminación al aire, las excavaciones necesitan recursos hídricos para su operación en donde el año 2015 el consumo anual promedió 13.07 metros cúbicos por segundo (Dirección de Estudios y Políticas Públicas, 2016), en donde el 52% proviene de fuentes subterráneas y el 31% de fuentes superficiales (Consejo Minero, 2015). Uno de los usos del agua es para limpiar desde botas y camionetas hasta la mina misma, todo para mantener un ambiente más higiénico para esta.

El consumo eléctrico de una mina se estima en un tercio del total del país con un coste de 158 US\$ por MW/h. Junto con esto el 50% de la energía ocupada va dirigida a la ventilación en el caso de las minas subterráneas.

*Tabla 2: Coste de la energía para distintos países. Tabla confeccionada mediante datos obtenidos de World Economic Forum.*

País	Minería	Coste (USD MW/h)
Dinamarca	-	358
Chile	Cobre, Molibdeno, Litio	150
Perú	Plata, Oro, Zinc, Estaño	80
Brasil	Estaño, Litio	160
Bolivia	Estaño, Litio	75
Venezuela	-	8

### 1.3 Sensores

Se conoce como sensor al dispositivo sensible a la variación en cierta variable a examinar, ya sea temperatura, humedad, presión, etc. Los dispositivos que existen para la detección de concentración de partículas se pueden aglomerar en distintas categorías dependiendo de su método de detección de los cuales 3 se utilizaron en el presente trabajo gravimétrico, óptico y radiación. El método gravimétrico corresponde al método referencial para la medición de MP, por esto es el que se considera el valor más cercano a la realidad, los otros métodos son llamados equivalentes con valores más o menos cercanos al referencial dependiendo del equipo (EPA, 1998).

El espectro de precios para instrumentos de detección de MP es grande, empezando en unos cientos hasta miles de dólares. La

Tabla 3 presenta equipos de uso común para la detección de material particulado siendo algunos de uso masivo en el Ministerio de Medio Ambiente. Sin embargo, no existe definición explícita de los límites de bajo, mediano y alto costo; los límites varían de autor a autor. Se considerará como precio límite superior de bajo costo 2000 dólares.

*Tabla 3: Distintos equipos de detección de material particulado con sus precios en dólares y en pesos chilenos.*

Nombre	Costo (USD)	Costo (CLP)
TSI 8520 DustTrak*	8000 - 10 000	5000 000 - 6300 000
Thermo Scientific ADR1500	7300	4600 000
Thermo Scientific PDR1500	5000	3150 000
Thermo TEOM 1405DF#	20 000	12 500 000
Met One BAM 1020+	4000	2500 000

\*Para campañas de monitoreo, #+ en estaciones de monitoreo como Cerrillos, El Bosque y Parque O'Higgins entre otros.

Actualmente en el mundo existe un proceso de sobrepoblación de sensores bajo costo para calidad de aire y otras áreas de estudios. En marco de esto, han surgido planes de regulación y estudios de estos con el fin de llevar un control de calidad y garantía de que estos sensores serán de utilidad. Entre estos planes destaca la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) con su división de la Costa Sur (SC-AQMD) que creo un Centro de Evaluación de Desempeño de Sensor de Calidad de Aire (AQ-SPEC) con los objetivos de realizar una caracterización completa a los sensores bajo costo tanto en terreno como en laboratorios (EPA, 2014).

A partir de la caracterización de sensores la EPA sugiere establecer 5 grados o aplicaciones de los diferentes desempeños que tengan los monitoreos como se presenta en Tabla 4.

Tabla 4: Grados y aplicaciones sugeridas para el desempeño de los sensores.

Grado	Área de Aplicación	Contaminante	Sesgo	Compleitud	Bases
I	Educación e Información	Todos	<50%	≥50%	El error en la medición no es tan importante como el conocer la existencia de los contaminantes con cierto grado de certeza.
II	Caracterización e identificación de <i>puntos calientes</i>	Todos	<30%	≥75%	Una mayor calidad es requerida para garantizar que existe la presencia de los contaminantes con un valor cercano al real.
III	Monitoreo de Apoyo	Contaminantes criterio	<20%	≥80%	El monitoreo de apoyo requiere el nivel suficiente de calidad para asegurar un aporte al monitoreo principal.
IV	Exposición Personal	Todos	<30%	≥80%	El monitoreo de exposición personal está sujeto a numerosas variables, lo que implica

					que es necesario niveles elevados de precisión para entender los procesos ocurridos.
V	Monitoreo Regulatorio	O3 CO, SO2 NO2 MP2.5, MP10	<7% <10% <15% <10%	≥75%	Monitores precisos son requeridos es necesario para asegurar la calidad de la información para ser utilizada en el ámbito regulador.

El parámetro de sesgo queda definido por la Ecuación 1.

$$B = \frac{C}{C_r} - 1 \quad 1$$

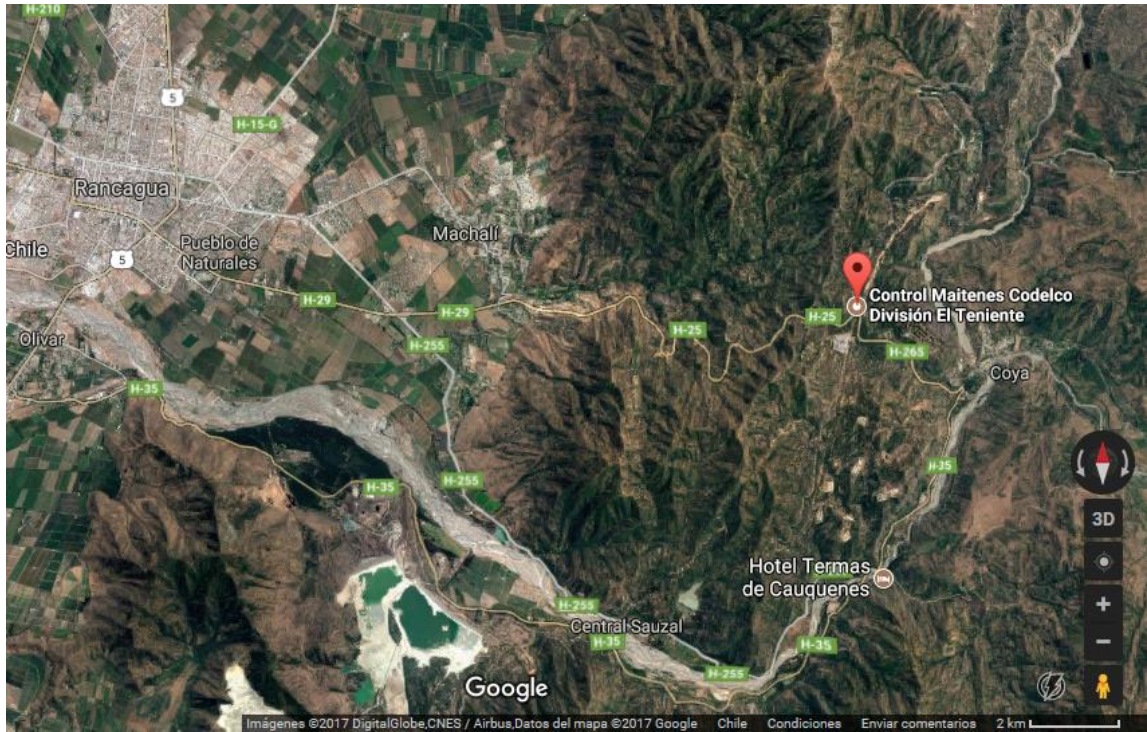
en donde  $B$  representa el sesgo (*bias* en inglés),  $C$  el promedio de las mediciones y  $C_r$  el valor de referencia del contaminante.

## 2 El Teniente

En general, se conoce como mina a la excavación que se realiza para extraer minerales. En Chile, sin contar las excavaciones artesanales, se encuentran dos tipos de minas, a cielo abierto y subterráneas. El primer tipo de minas, las de cielo abierto, constan en yacimientos de minerales que se encuentran en la superficie, lo cual permite que sólo se necesaria las detonaciones para adquirir el mineral como es el caso de Chuquicamata. Las minas a cielo abierto son económicas debido a que además de tener el mineral en la superficie, no es requerida ventilación auxiliar. Sin embargo, al alcanzar cierta profundidad deja de ser factible la expansión de esta forma y es necesario seguir como un yacimiento del segundo tipo. El segundo tipo de minas, las subterráneas, constan en zonas donde el mineral no se encuentra en la superficie si no bajo tierra como su nombre lo indica. El acercamiento al mineral es mediante túneles, lo que conlleva a gastos de excavación, remoción de los desechos generados, iluminación y ventilación para los trabajados más los gastos normales de la mina. El Teniente corresponde a una mina del tipo subterránea.

La mina en la cual se realizarán las mediciones corresponde a El Teniente, es conocida por ser el yacimiento de cobre más grande del planeta, empezando su explotación el año 1905, actualmente cuenta 3000 kilómetros de túneles y se estima que cada día se excavan 10 metros. El control de acceso principal a la excavación, llamado Control Maitenes, está ubicado en las coordenadas (-34.1938498, -70.5631859) en la comuna de Machalí en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins a 50 kilómetros de Rancagua.

Dentro de los terrenos de la mina se encuentran 3 grandes componentes, la excavación en la montaña, el concentrador "Colón" y la fundición "Caletones". Una vez dentro de la mina se distinguen variadas unidades productivas siendo Diablo Regimiento la más contaminada según los higienistas ocupacionales posee los mayores niveles de concentraciones de Polvo No Clasificado Total.



*Ilustración 3: Ubicación de Control de Acceso Maitenes*



*Ilustración 4: Zonas principales de la mina El Teniente.*

### 3 Equipos

A continuación, se presentan los instrumentos a utilizar incluyendo los equipos prototipos, el encargado de la comparación gravimétrica, los encontrados en las estaciones de las redes del Ministerio de Medio Ambiente y los adicionales.

Tabla 5: Instrumentos ocupados en las campañas.

Equipo	Fabricante	Observación	Principio Operacional
PAS	FMI	Elaboración manual por parte de miembros del FMI, con fotómetros Shinyei como componentes ópticos. Equipo prototipo.	Dispersión de la luz*.
KFG	Sven Leckel	Equipo para la colección de material particulado. Equipo referencial.	Colección por filtros de membrana.
BAM	Thermo	Instrumento para la detección de material particulado encontrado en las estaciones de monitoreo de la red SINCA. Equipo equivalente	Principio de atenuación Beta.
HOBO	Onset	Equipo portable para el control de la humedad relativa y la temperatura. Modelo discontinuado.	T°: Termistor*. HR: Higrómetro*.

\* Principios no comunicados explícitamente en los manuales de usuarios respectivos.

#### 3.1 Prototype Aerosol Sensor

El instrumento de nombre “*Prototype Aerosol Sensor*”, de ahora en adelante PAS, consta en una caja metálica negra de 7.5x20x10 centímetros cúbicos y una masa de 500 gramos. En esta se pueden observar una conexión para tomacorriente, una entrada con una bomba de flujo 0.9 litros por minuto, una salida para la expulsión del aire ingresado al equipo y 4 LEDs que cumplen la función de enseñar el muestreo en tiempo real.

Los componentes fundamentales del sensor son los fotómetros, en los cuales recae la responsabilidad de la detección del material particulado. Está compuesto por dos equipos de la marca japonesa Shinyei, el componente PPD60PV detecta partículas superiores a medio micrómetro y PPD42NJ, las superiores a 1 micrómetro. La asignación final es el fotómetro PPD60PV detectará MP<sub>2.5</sub>, debido al bajo aporte de masa de las partículas menores a 0.5 µm y el PPD42NJ el MP<sub>10-2.5</sub> con su detección entre 1 y 5 µm.

El principio de operación básico consta en la dispersión de luz entre un emisor infrarrojo y un fotómetro detector. Una partícula al atravesar el haz de luz provoca un esparcimiento de esta



la cual es detectada por el fotómetro detector. La Ecuación 2 presenta las variables físicas que interfieren en el modelo para determinar la intensidad de la luz, donde se añade el componente de número de partículas sobre volumen al tratarse de una nube de partículas.

$$I_{\theta} = I_0 \frac{\pi^2 \alpha^2 N}{2 \epsilon_0 r^2 \lambda^4 V} (1 + \cos^2 \theta) \quad 2$$

donde  $I_0$  representa la intensidad del emisor,  $\theta$  el ángulo del esparcimiento,  $I_{\theta}$  la intensidad después del esparcimiento,  $\alpha$  la polarizabilidad de las partículas (una relación entre los coeficientes de absorción),  $\epsilon_0$  la permitividad eléctrica del vacío,  $r$  la distancia de la fuente,  $\lambda$  la longitud de onda del emisor,  $N/V$  la concentración numérica. Esta ecuación presenta los componentes que alteran la medición, principalmente que  $\alpha$  y los coeficientes de absorción no son medibles o manipulables por el instrumento. Esto lleva a un error dado que distintos materiales ingresan al sensor poseen distintos coeficientes de absorción y esto provoca también una variabilidad en la intensidad después del esparcimiento. Otros valores como  $r$ ,  $\theta$  y  $\lambda$  están controlados por el fabricante. e. g. el emisor posee un peak de emisión en los 940 nanómetros, lo que se traduce en una detección de aproximadamente 100 nanómetros. La ecuación anterior se puede re-expresar de una forma más simple asumiendo y conociendo los valores constantes en el fenómeno quedando como se presenta en la Ecuación 3.

$$I_{\theta} = I_0 k \frac{N}{V} \quad 3$$

donde el componente fundamental de la variación en la intensidad corresponde a la concentración de las partículas. Posteriormente el sensor realiza una conversión asumiendo partículas esféricas de porosidad cero, esta conversión queda plasmada en la Ecuación 4.

$$PM_{2.5} = I_0 \rho \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad 4$$

con  $PM_{2.5}$  el material particulado fino,  $\rho$  la densidad de las partículas (valor que varía de autor a autor) y  $d$  el diámetro aerodinámico de la partícula. La medición será una señal análoga similar al esquema que se presenta en la Ilustración 5. Según datos del fabricante el sensor tendrá una detección aproximada de 0.5 a 1.6 micrómetros abarcando la mayoría del componente fino del MP.

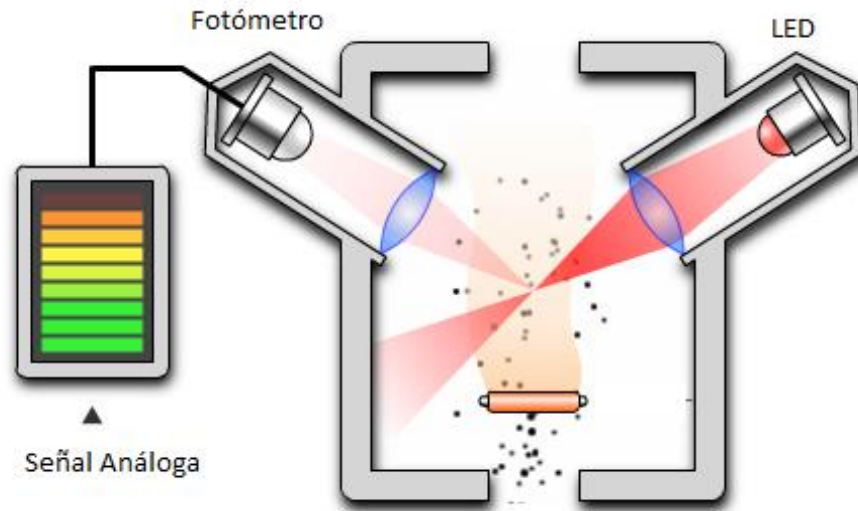


Ilustración 5: Esquema de componentes ópticos.<sup>3</sup>

El resto de los componentes se presentan en la Ilustración 6, donde los componentes ópticos se encuentran debajo de la placa.



Ilustración 6: Equipo PAS con sus partes. 1 entrada de flujo, 2 LEDs de muestra, 3 placa Arduino, 4 bomba 3 LPM, 5 salida de flujo, 6 Jack 2.1/5.5 mm centro positivo.

La Tabla 6: Significado de cada display en valores aproximados. Tabla 6 Tabla 6: Significado de cada display en valores aproximados. presenta el significado de cada LED para la comprensión de este.

<sup>3</sup> Ilustración modificada de la original en: [http://www.shinyei.co.jp/stc/optical/main\\_ppd60pv.html](http://www.shinyei.co.jp/stc/optical/main_ppd60pv.html)

Tabla 6: Significado de cada display en valores aproximados.

Color	MP <sub>2.5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
Verde ●	Menor a 5
Azul ●	Mayor a 5 y menor que 15
Amarillo ●	Mayor a 15 y menor que 25
Rojo ●	Mayor a 25

Además, los LEDs sirven a comunicar otros 3 estados, cuando el equipo inicia y no se detecta ningún error (como ausencia de tarjeta SD o alguna mala conexión) los cuatro LEDs se encenderán durante 2 segundos. Cada vez que se guarde un dato todos los LEDs parpadearán, esto sucederá cada 5 minutos. Si se quema el LED infrarrojo (TSAL 6200) el LED rojo parpadeará cada 30 segundos indicando la falla.

Para iniciar una medición lo único a realizar es conectar el instrumento a alimentación. Esto se consigue conectando el equipo al tomacorriente con un transformador de 7.5 volts a 0.8 amperes, luego de la conexión la bomba se encenderá y comenzará la medición. Cada 5 minutos se obtendrá un dato el cual es el promedio de esos minutos, cuando esto suceda los LEDs parpadearán indicando que la medición es guardada. Los datos son guardados dentro de la tarjeta en un archivo llamado "DATA.TXT" que posee el siguiente formato:

- 1<sup>a</sup> Columna: Fecha con formato MM/dd/aaaa hh:mm:ss.
- 2<sup>a</sup> Columna: MP<sub>2.5</sub> en microgramos por metro cúbico.
- 3<sup>a</sup> Columna: MP<sub>10-2.5</sub> en microgramos por metro cúbico.
- 4<sup>a</sup> Columna: Temperatura de la muestra en grados centígrados.
- 5<sup>a</sup> Columna: Humedad relativa con valor entre 0 y 1.
- 6<sup>a</sup> Columna: Temperatura interna del sensor en grados centígrados.

Para respaldar los datos es necesario retirar la tarjeta en el interior, para esto se retiran los 4 tornillos en la tapa, se extrae la tarjeta y se conecta a un computador, se copian los datos, se vuelve a conectar al sensor y se cierra la tapa atornillando nuevamente. Esta acción puede ser realizada con el dispositivo tanto conectado como no, de estar conectado es necesario reiniciar la placa Arduino.

El coste que tiene el equipo oscila entre 100 y 150 dólares, más de 20 veces menos que un equipo de medición en una estación de monitoreo. Sin embargo, esta reducción de coste podría verse reflejada en una reducción de la calidad de la medición.

## 3.2 KleinfILTERGERÄT

El equipo utilizado para la recolección de material particulado designado es KleinfILTERGERÄT, de ahora en adelante KFG, significa literalmente dispositivo de filtro pequeño. Funciona con una bomba que succiona aire a una tasa de 2.3 metros cúbicos por hora el cual entra por una campana que realiza el corte del material particulado superior a 2.5 micrómetros en este caso, el resto del material es depositado en un filtro de teflón de diámetro 47 milímetros (SVEN LECKEL, 2007). Por su configuración y el método de medición de material particulado, este equipo corresponde a uno referencial.



*Ilustración 7: KFG tal como aparecen en el manual (SVEN LECKEL, 2007).*

El equipo KFG, después de realizada la medición arrojará 4 datos i.e. fecha, tiempo de medición, volumen y volumen normalizado. El valor de volumen normalizado corresponde al volumen ajustado a condiciones normales de presión y temperatura, es decir, una atmósfera y 20 grados centígrados respectivamente.

### 3.3 Beta Attenuator Monitor

Los monitores beta o BAM por sus siglas en inglés, utilizan el principio de atenuación beta para la detección de material particulado 2.5 y 10. El principio de atenuación beta formula que la disminución de los rayos beta o electrones depende de la masa a la que se enfrenta y no de la densidad o el volumen. El flujo de entrada del monitor posee ciclón que produce el corte que se busca, en este caso un corte de 2.5 microgramos, para luego ir a dar a una cinta de material de filtro. Es en esta cinta donde se transporta el material particulado que luego será detectado por el contador Geiger-Müller. El volumen viene determinado por el flujo del equipo, aproximadamente 16.67 LPM (Thermo Fisher Scientific, 2014). Este equipo no fue manipulado y se redujo a la obtención de los datos mediante la plataforma <http://sinca.mma.gob.cl/>. Este equipo, por su método de medición es considerado como un monitor equivalente.



*Ilustración 8: Equipo Thermo 5014i, utilizado para el control de MP 2.5 instalado en una estación de monitoreo de calidad.*

### 3.4 HOBO

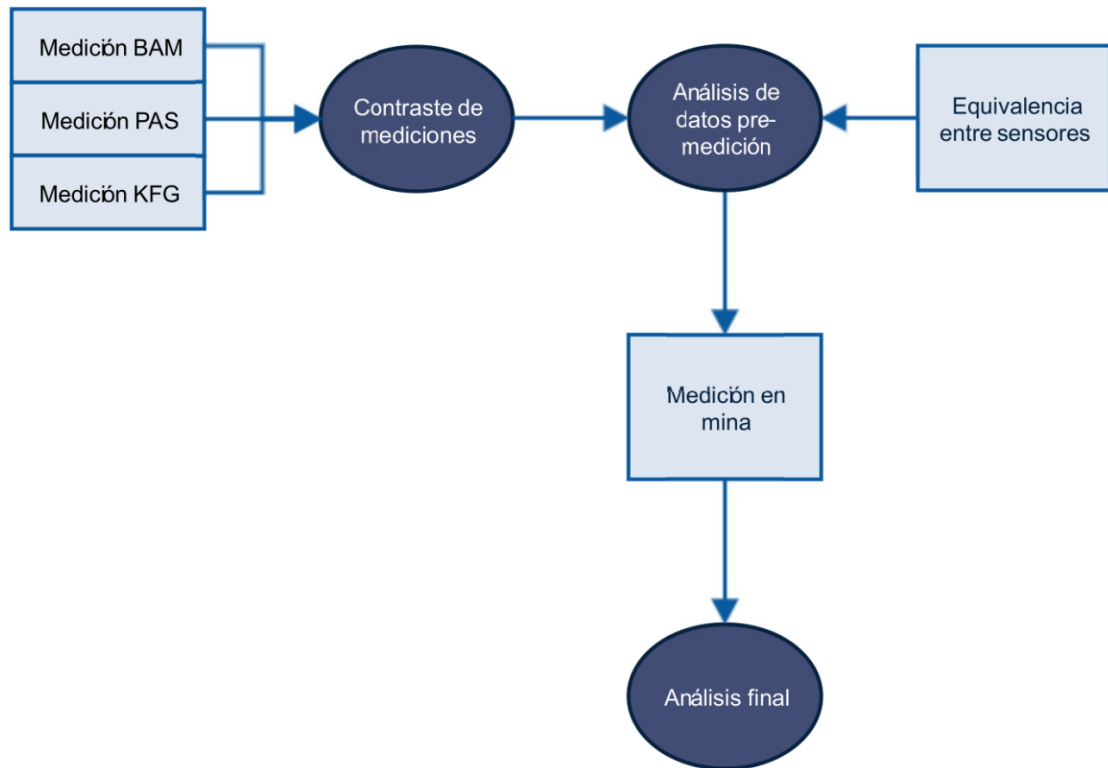
HOBO es un pequeño equipo portátil y portable que posee en su interior dos sensores, uno para detección de temperatura y otro para humedad relativa. El sensor de temperatura tiene un rango óptimo de utilización entre -20 y 70°C, más que suficiente para mediciones de temperatura ambiental. El sensor de humedad relativa cuenta con un rango de operación de 25 a 95%, fuera de esto la medición podría presentar dificultades.



*Ilustración 9: Equipo HOBO utilizado como apoyo de temperatura y HR.*

## 4 Procedimientos

El esquema general de la medición se presenta en la Ilustración 10. En primera instancia se requiere verificar la cercanía y los ajustes necesarios para que los sensores prototipos estén escalados al método gravimétrico; proceso llamo referenciación. El segundo prototipo fue adquirido después del contraste, al no poder realizar mediciones junto al equipo gravimétrico se comparó con el primer prototipo ya escalado para determinar la relación que existiría con el método referencial.



*Ilustración 10: Esquema del trabajo.*

Una vez teniendo los escalados adecuados para los sensores a utilizar, es posible llevarlos a la mina para determinar las concentraciones del material particulado fino en esta. Los procesos de correlacionar son realizados en la etapa previa para poder obtener los resultados en la escala correcta al momento de descargar los datos.

## 4.1 Equipos

### 4.1.1 Prototipo FMI

El prototipo del Instituto Meteorológico de Finlandia posee la característica de sólo tener un botón en el interior para reiniciar en Arduino, lo que conlleva a no tener mayores complicaciones en torno al control del equipo. Para iniciar una medición basta con conectar el instrumento a un transformador que lo pueda alimentar con 7.5 a 12 Volts, una vez conectado los 4 LEDs se encenderán durante 2 segundos si no se detectan errores (tarjeta SD suelta, LED quemado, etc.) y la bomba se encenderá dando comienzo a la medición.

Los datos de Material Particulado se obtendrán cada 5 minutos, siendo el primero detectado estos 5 minutos después del inicio de la bomba. Cada vez que se guarde un dato las luces LED destellarán 3 veces, luego se mantendrá estable la luz del nivel de MP2,5 encontrado hasta el siguiente dato. Para respaldar los datos se debe desatornillar la tapa externa para tener acceso al interior, dentro de este se observará la tarjeta SD donde se almacenan los datos, esta se debe retirar y copiar los datos a un computador. Para retomar la medición se debe volver a colocarla tarjeta y reiniciar Arduino o desenchufar y enchufar del tomacorriente.

### 4.1.2 HOBO

Para iniciar una medición, es necesario disponer de un computador con una entrada de puerto serial o equivalente y contar con el software BoxCar Pro. Una vez conectado el sensor se inicia el programa y dentro de este se selecciona la opción *launch* o el comando "Ctrl+L", si no hay problemas el LED exterior del HOBO parpadeará indicando que está programado. La descarga de datos es idéntica, con la diferencia de que selecciona la opción *readout logger* o el comando "Ctrl+R". Los datos se almacenan en el formato *dtf* y el mismo programa posee exportación a formato *txt*. Debido a la limitada capacidad de almacenamiento y utilizar una pila, es necesario verificar la duración de la medición más el estado de la batería para evitar inconvenientes.



## 4.2 Software

Para el tratamiento de datos, presentación de resultados y apoyo digital general, se utilizaron los softwares de:

1. *Microsoft Excel*. Para la presentación de gráficos y tratamiento de datos. De libre acceso en su licencia 365 para estudiantes.
2. *SciLab*. Para la presentación de gráficos y tratamiento de datos. Licencia gratuita.
3. *BoxCar Pro*. Programa para la utilización del equipo HOBO. Discontinuado pero descargable gratuitamente en la página de ONSET mediante suscripción.
4. *Paint*. Edición de fotografías e ilustraciones. Licencia incluida en las versiones de Microsoft Windows.
5. *GoogleMaps*. Para la georreferenciación de lugares de medición y la utilización de mapas.

## 4.3 Actividades

La Tabla # presenta un resumen con las campañas de la medición.

Tabla 7: Resumen de campañas.

<b>Campaña</b>	<b>Equipos</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Fecha Inicio</b>	<b>Fecha Término</b>
Kingston College (VIII Región)	PAS1 KFG BAM HOBO	Calibración	16 - 05 - 2017	14 - 06 - 2017
Pocuro (Región Metropolitana)	PAS1 PAS2	Equivalencia	30 - 09 - 2017	11 - 10 - 2017
División El Teniente (VI Región)	PAS1 PAS2	Analizar calidad de aire	26 - 10 - 2017	27 - 11 - 2017

### 4.3.1 Calibración

El instrumento, si bien posee la detección eléctrica correcta, es decir la forma del perfil, no se encuentra escalada al nivel correcto encontrándose valores debajo de la detección en comparación a otros equipos de medición de material particulado. Es por esto por lo que para obtener un valor aceptado y concordante con otros dispositivos debe realizarse un proceso de

escalado con otro. En este caso se utilizaron dos equipos para realizar este proceso, un filtro gravimétrico de teflón como equipo primario de calibración y un equipo de atenuación beta como equivalente. En cada caso se presentó la corrección como una función  $y=y(x)$  donde en la variable “x” se ubicaba la medición realizada por el prototipo y en la variable “y” se encuentra el valor del equipo a contrastar y mediante mínimos cuadrados se obtiene la corrección.

Para el caso de los filtros gravimétricos estos son enviados a la Universidad de Harvard al Departamento de Salud Ambiental, donde tienen metodologías y procesos estandarizados para su masaje. Su masa es calculada antes de ser entregados al usuario y posterior a la recolección de muestra, ambos casos con parámetros constantes de presión, temperatura y humedad.

Para el proceso de calibración respecto a un equipo referencial, el sensor fue llevado a la estación de monitoreo de calidad del aire Kingston College de ahora en adelante KC, ubicada en la Región del Biobío en la comuna de Concepción perteneciente y operada por la Subsecretaría del Medio Ambiente. En esta estación junto con los equipos pertenecientes a la estación KC se encontraba el equipo KFG perteneciente a Centro Mario Molina Chile. Junto con esto, la estación posee libre acceso a historial meteorológico mediante el Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire (SINCA) perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente.

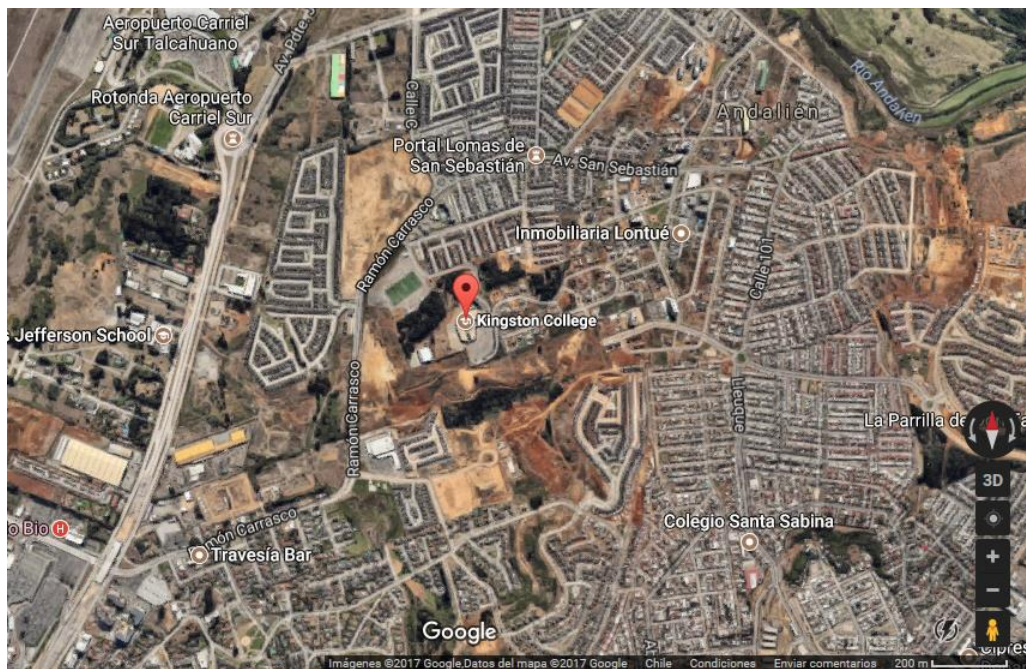


Ilustración 11: Localización de Estación KC (Fuente: GoogleMaps)



*Ilustración 12: Estación Kingston College, se observa el contenedor utilizado y sobre él equipos de monitoreo de calidad del aire junto con sensores de variables meteorológicas,*

Junto a KFG se instaló el equipo PAS con un HOBO aledaño como equipo auxiliar para el control de humedad y temperatura.



*Ilustración 13: De izquierda a derecha, KFG, HOBO, PAS. Dispuestos en su posición final para realizar la referenciación del sensor prototipo.*

La región del Biobío posee condiciones meteorológicas con marcadas precipitaciones en invierno, por lo que fue necesario elaborar un protector para el equipo PAS como se ve en la Ilustración 13: De izquierda a derecha, KFG, HOBO, PAS. Dispuestos en su posición final para realizar la referenciación del sensor prototipo.<sup>6</sup> Este fue construido modificando un pocillo plástico con cierre ergonómico.

La forma de medición escogida es recolección cada 24 horas que es una medida estándar para mediciones de calidad de aire y para la regulación de estas (como se observa en la Tabla 8), además de ser un valor de control de calidad de aire. Para esta referenciación se utilizaron 29 filtros de teflón desde el día martes 16 de mayo de 2017 hasta el miércoles 14 de junio de 2017 incluyendo un día de blanco (colección sin bomba para posterior corrección).

*Tabla 8: Límite permisible de material particulado fino en 24 horas, distintas normas.<sup>4</sup>*

	Norma Chilena	OMS	EPA	China
Límite 24 horas MP <sub>2.5</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	80	25	35	75

La masa de la recolección viene dada conociendo la masa del filtro previo, posterior a la medición más el blanco, donde mediante la sustracción matemática se determina el material particulado promedio de las horas de estudio.

---

<sup>4</sup> Tabla realizada con los datos obtenidos de las páginas Ley Chile, OMS, EPA y KJS.

### 4.3.2 Equivalencia

El segundo sensor fue adquirido después de realizado el proceso de referenciación, por lo que se realizó una medición en paralelo entre ambos equipos para verificar su detección. Esta medición fue realizada en Pocuro 2905, lugar donde ya se habían realizado mediciones de prueba, desde el 30 de septiembre hasta el 11 de octubre de 2017. La semana estuvo marcada por intensas precipitaciones llegando a superar los 25 mm, aun así, los días de 03 y 06 el termómetro superó los 20 grados.



*Ilustración 14: Balcón de Pocuro 2905, ahora con medición en paralelo de ambos PAS.*

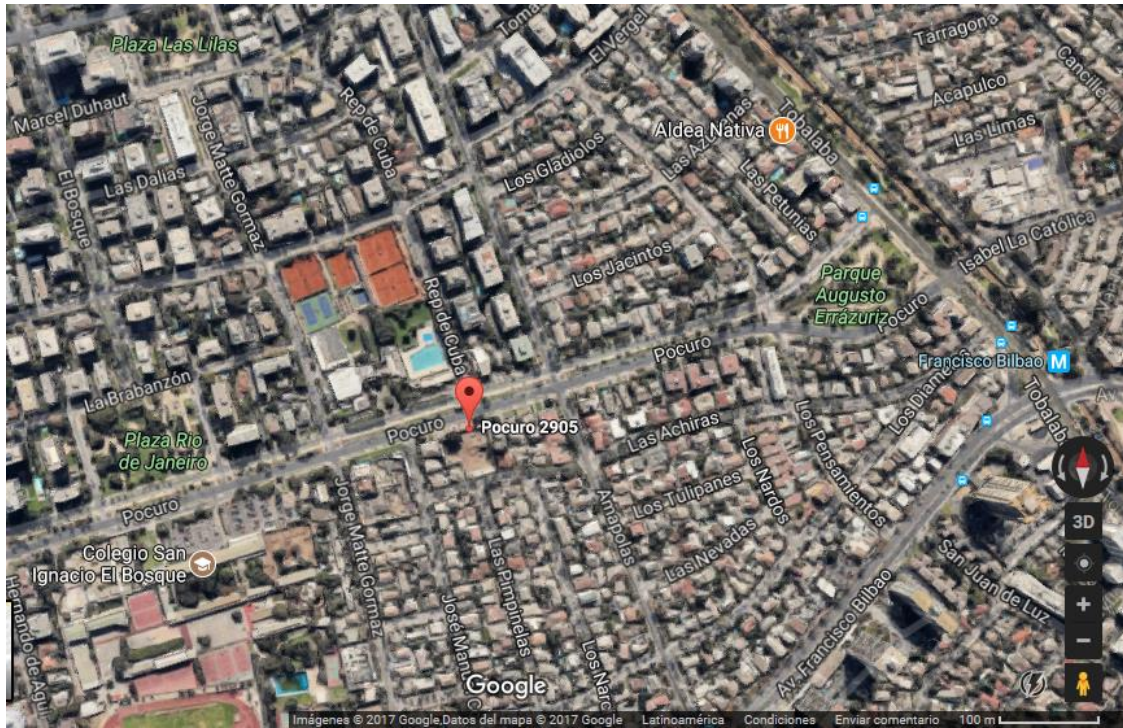


Ilustración 15: Ubicación del punto de medición Pocuro 2905 (-33.432081, -70.591234).

### 4.3.3 Medición en mina

Las mediciones se realizaron en el sector de remoción de no chancables comúnmente conocido como “sacapalos” de línea 3 en Chancado primario Colón. Es llamado sacapalos porque en esta etapa de la línea de producción un supervisor inspecciona que sólo se halle mineral en las huinchas de transporte, de no ser así utiliza maquinaria para retirar los elementos ajenos, generalmente vigas de metal. Según datos reservados de la División, el porcentaje de sílice en el Polvo No Clasificado Total de las cabinas de sacapalos de línea 3 Chancado primario Colón se encuentra ente un 5 y un 10%. En la Ilustración 16 se observa el sensor 2 instalado cercano al punto de medición ambiental.



Ilustración 16: PAS 2 en sector sacapalos.

## 4.4 Métodos estadísticos

Para el análisis de los datos se utilizaron variados métodos estadísticos que abarcaron desde el tradicional coeficiente de Pearson hasta el Análisis de la Varianza. A continuación se describe cada uno de éstos.

### 4.4.1 Regresión Lineal Mínimo Cuadrática

En ocasiones, es interesante para el objeto de estudio encontrar o establecer una línea recta, una parábola o alguna otra función. Para realizar esto se presupone una relación funcional entre las variables siendo comúnmente una relación lineal, además de que otros tipos de funciones son rectificables lo que permite realizar una regresión lineal después de algunas operaciones.

El problema fundamental consta en determinar una recta  $D$  que minimice las desviaciones de cada punto de la. Se establece una recta de la forma  $y'_i = B_1 x_i + B_0$ , donde  $y'$  corresponde al valor de  $y$  que minimiza las desviaciones,  $x$  las variables independientes y  $B_1$  con  $B_0$  el intercepto y la pendiente de la función. Se establece el valor  $e_i = y_i - y'_i$  como *residuo*, la diferencia entre los valores obtenido y el valor estimado.

El siguiente paso es minimizar los valores de  $B_1$  y  $B_0$ , encontrando el valor mínimo que puede poseer la recta  $D$  ( $\partial D/\partial B_{1,0} = 0$ ), donde se obtienen las ecuaciones para el intercepto y para la pendiente.

$$B_1 = \frac{\sum x_i y_i / n - \bar{x} \bar{y}}{\sum x_i^2 / n - \bar{x}^2} \quad 5$$

$$B_0 = \bar{y} - B_1 \bar{x} \quad 6$$

Además, se sugiere realizar un ANOVA; un análisis de varianza; para  $B_1=0$  lo que permitirá saber si efectivamente se posee una relación, si la asociación en la muestra es inferible a la población.

### 4.4.2 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de Pearson mide el grado de correlación entre dos variables  $XY$  tomando valores entre 1 y -1. 1 indica que la correlación es máxima con una asociación positiva, -1 indica una correlación máxima con una asociación negativa y 0 indica ausencia de relación o resultados inconcluyentes. La ecuación que determina el coeficiente de Pearson o  $r$  se presenta en la Ecuación 7.

$$r = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2 \sum y_i^2 - n \bar{y}^2}} \quad 7$$

### 4.4.3 Análisis de Varianza

El análisis de varianza, llamado ANOVA o ANDEVA, es una herramienta estadística que permite determinar si dos variables o un factor con una variable de respuesta son estadísticamente significativos uno para otro. El esquema general es una tabla que se construye con las fuentes de variación, las sumas de cuadrados, los grados de libertad, las varianzas, las medias cuadráticas, el estadígrafo  $F$  y la probabilidad de un error de tipo I (rechazar  $H_0$  siendo verdadera).

Tabla 9: Ecuaciones de ANOVA para una regresión lineal.

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	$F_{1,n-2}$	P
Regresión	$B_1^2 \sum (x_i^2 - n \bar{x}^2)$	1	SC/gl	CMmodelo/CMresiduo	Tabulado
Residuo	$\Delta$	n-2	SC/gl		
Total	$\sum y_i^2 - n \bar{y}^2$	n-1			



El análisis de varianza que contrasta dos o más medidas presenta una dicotomía de hipótesis. Se define una hipótesis nula, en este caso el valor de la regresión igual a cero, para luego verificarla con los valores de la tabla. El valor del estadígrafo  $F$  de Snedecor para el ANOVA presentará un valor, este se contrastará con el valor tabulado de  $F$  para el punto crítico, es decir, el valor mínimo para el cual la hipótesis nula  $H_0$  se mantiene falso. Si valor el calculado de  $F$  es mayor que el punto crítico, se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$ , la hipótesis afirmativa. Para el caso contrario no es posible rechazar la hipótesis nula y se rechaza  $H_1$ .

El valor de  $P$  representa la probabilidad de cometer un error del tipo I, siendo este rechazar  $H_0$  cuando es estadísticamente verídico. Un error de tipo II representa el inverso, aceptar  $H_0$  cuando es estadísticamente falso. Por lo general se considera una posibilidad de 5% de cometer este error como aceptable.

## 5 Resultados y Análisis

### 5.1 Mediciones de prueba

En primera instancia, previo a cualquier calibración, se realizó una medición de prueba esperando observar un comportamiento eléctrico similar a alguna medición anterior. Para esto se llevó el sensor a un edificio departamento ubicado en Pocuro 2905 (-33.432081, -70.591234) en un quinto piso para ver el comportamiento eléctrico. Se midieron 48 horas continuas desde el 11 hasta el 13 de abril.



Ilustración 17: Mapa con la ubicación de Pocuro 2905.

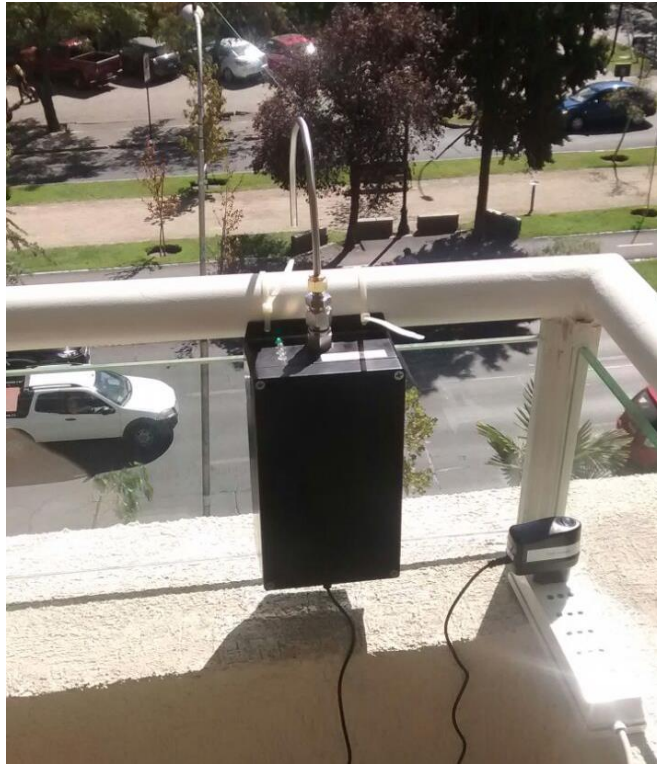


Ilustración 18: PAS en detección de Material Particulado 2.5 en balcón.

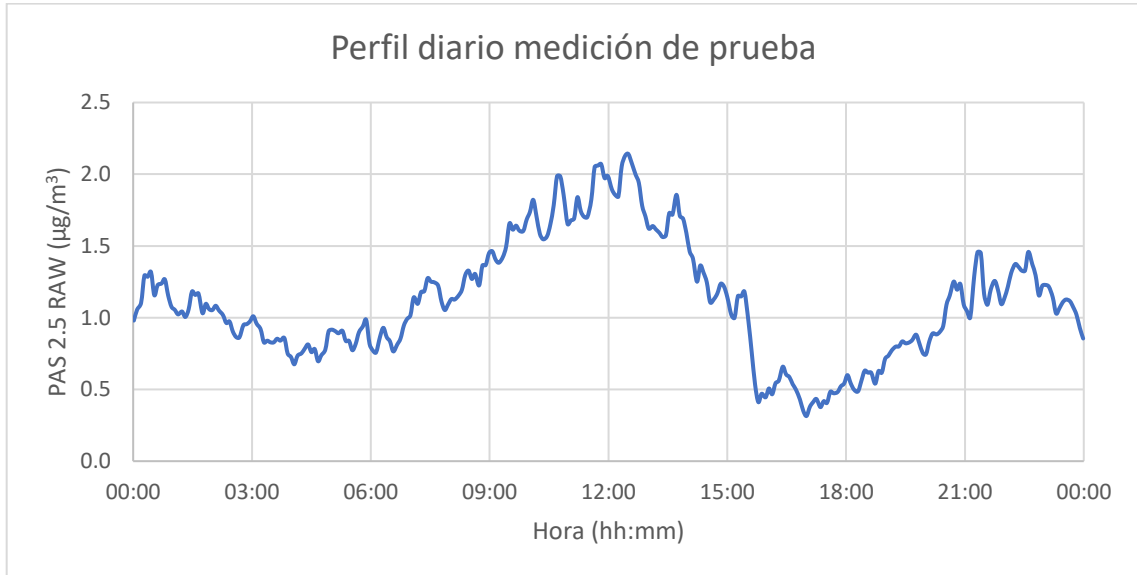
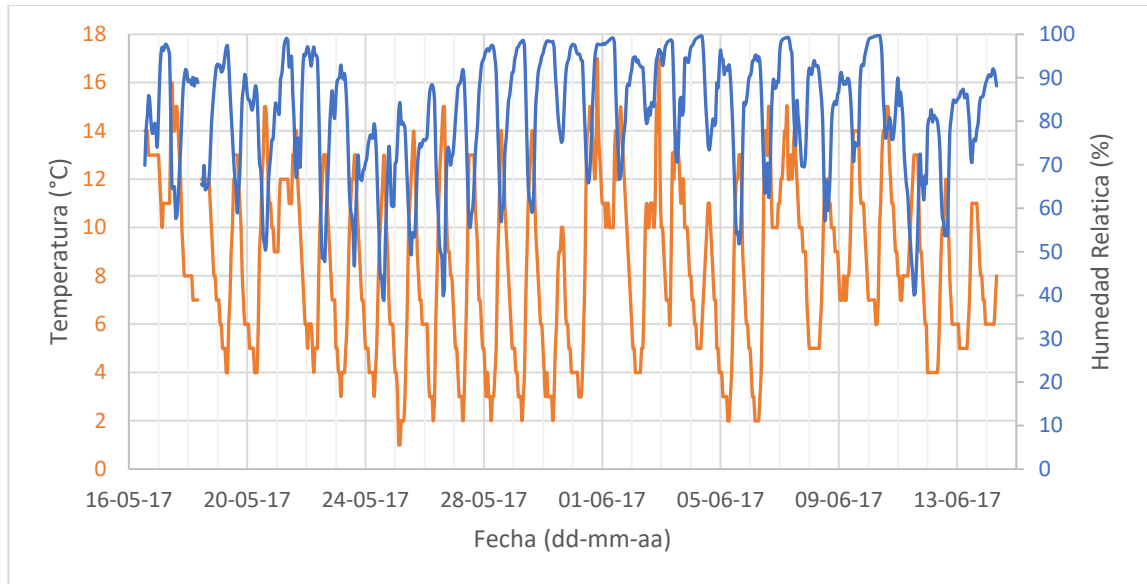


Ilustración 19: Perfil diario de Pocuro de MP fino.

Para la medición de detección eléctrica se observa un perfil cualitativamente esperado, donde se distinguen alzas desde 7 de la mañana hasta mediodía junto con otro entre 6 de la tarde y 10 de la noche, horas principales de flujo vehicular.

## 5.2 Calibración

Las condiciones meteorológicas de la estación Kingston College se observan en la Ilustración 19. En el periodo de muestreo desde el 16 de mayo hasta el 14 de junio se presentaron 4 días de precipitaciones superiores a 10 mm incluyendo el 17 donde cayeron 23 mm de agua.



*Ilustración 20: Temperatura y humedad en el periodo de referenciación en Kingston College*

Los datos obtenidos de las mediciones en paralelo se presentan de las Ilustraciones 21 a 23, donde se encuentran los datos obtenidos de KFG, PAS, BAM y HOB0, acompañados también de las ecuaciones obtenidas por el método de los mínimos cuadrados más tabla del análisis ANOVA. Se establecerá constantemente como la variable dependiente el sensor a escalar y variable dependiente el método referencial o equivalente.

Se practica el análisis de varianza para demostrar o refutar una hipótesis nula, en este caso  $H_0$ : las variables no se correlacionan. El estadígrafo F permitirá saber si efectivamente se rechaza o no esta hipótesis inicial comprándolo con el valor límite calculado mediante la F de Snedecor.

## 5.2.1 Filtros en paralelo a PAS

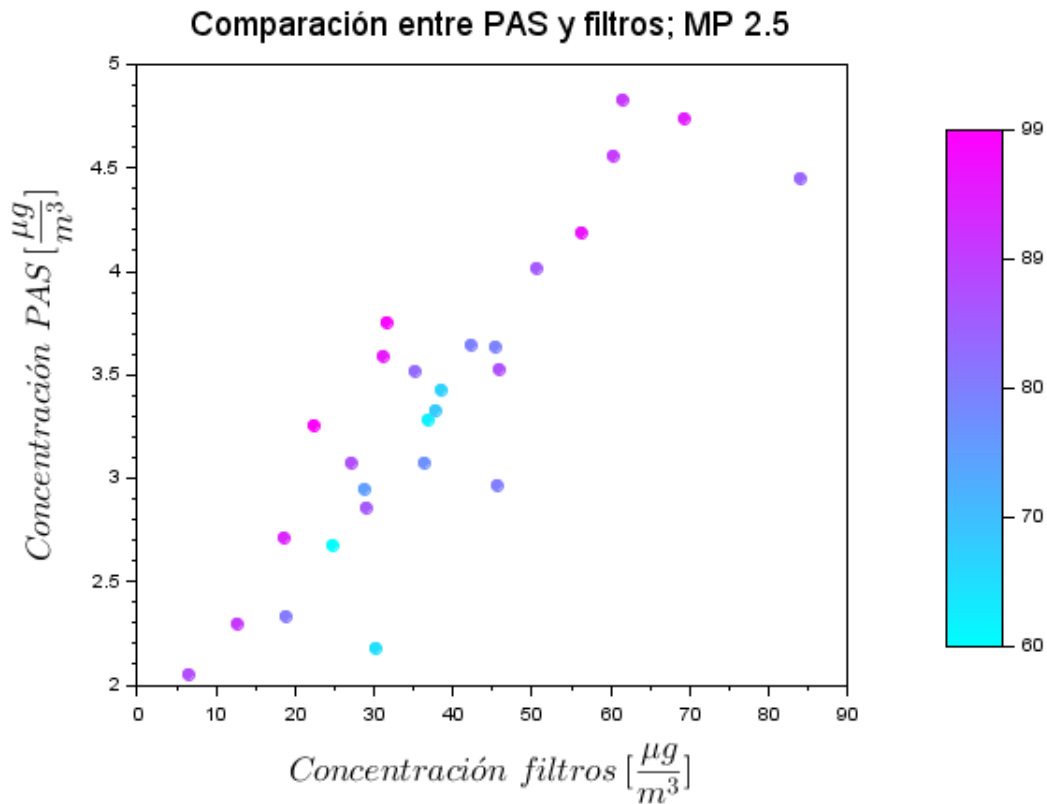


Ilustración 21: Se presenta la comparación entre concentración promedio de 24 horas de filtros con concentración promedio de PAS. Cada dato además contiene el promedio de humedad correspondiente al día.

Donde mediante la regresión se obtiene la Ecuación 8, con un coeficiente de Pearson igual a 0.87.

$$KFG(PAS) = (20.27 \pm 2.20)(PAS) - 30.16 \pm 7.60 \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad 8$$

La tabla de la dócima de ANOVA para hipótesis de que no existe relación se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10: Análisis ANOVA para la regresión de KFG con PAS.

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	6236.021	1	6236.021	84.752	0.000
Residuo	1839.486	25	73.579		
Total	8075.507	26			

Además, se obtiene un sesgo  $B$  de 18%.

## 5.2.2 Atenuador beta en paralelo a PAS

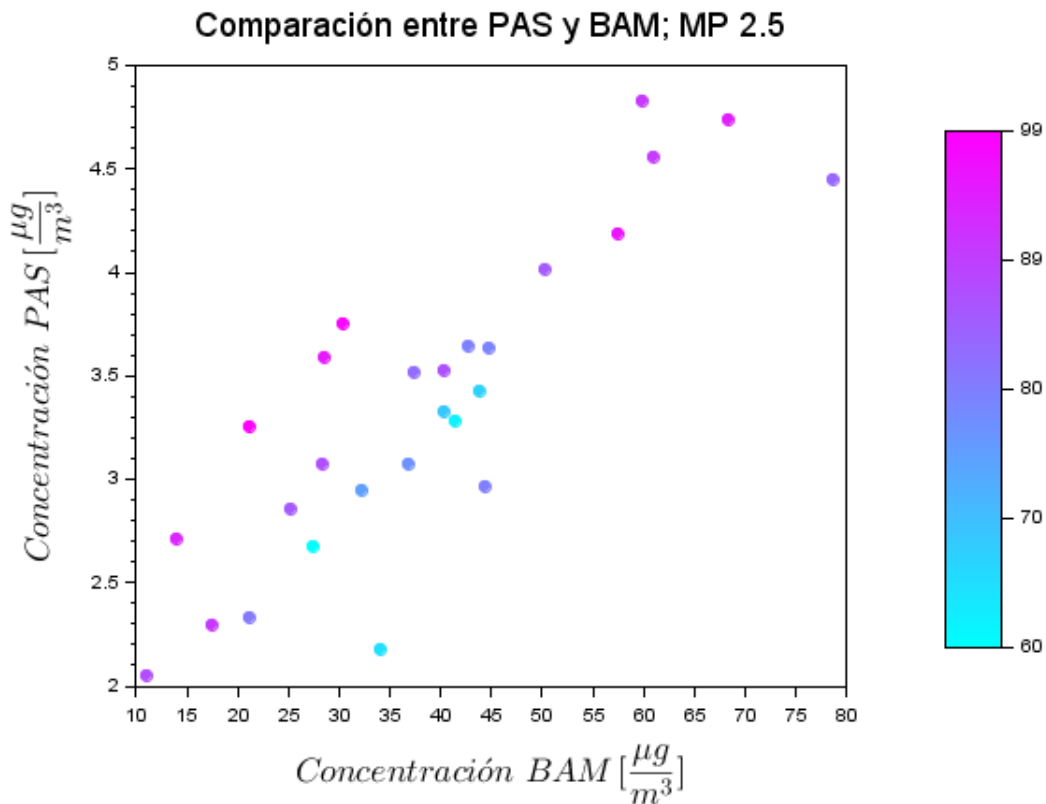


Ilustración 22: Se presenta la comparación entre concentración promedio de 24 horas de atenuación beta con concentración promedio de PAS. Cada dato además contiene el promedio de humedad correspondiente al día.

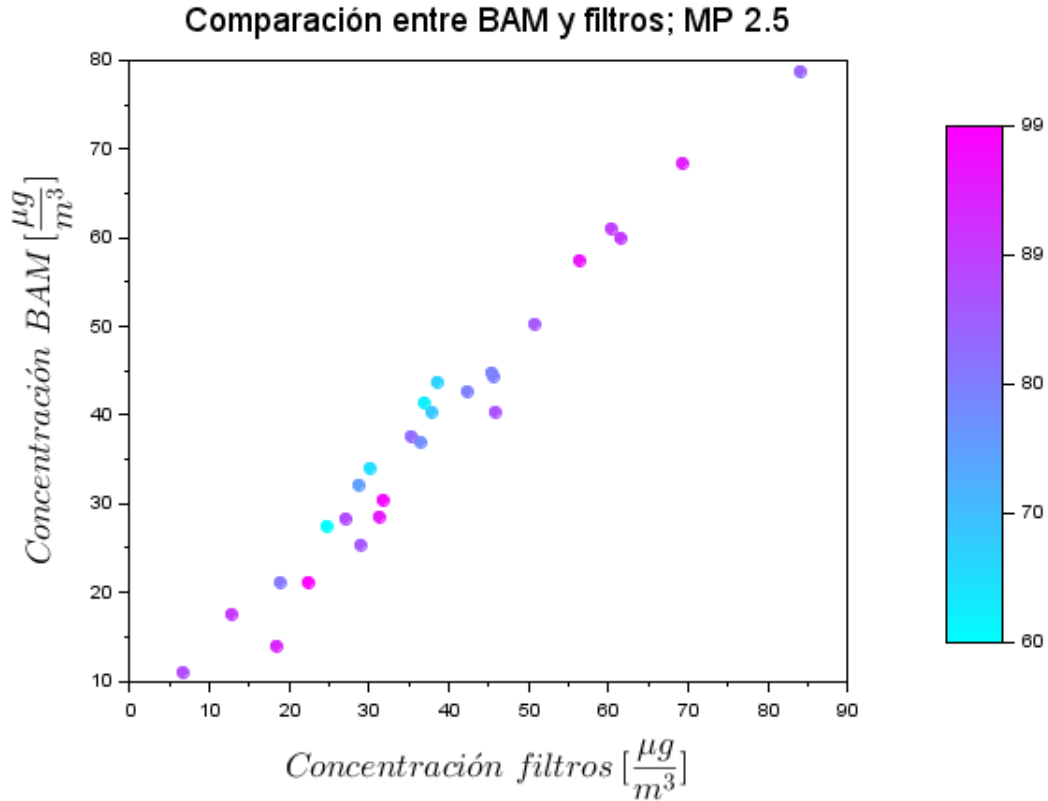
Donde mediante la regresión se obtiene la Ecuación 9, con un coeficiente de Pearson igual a 0.86.

$$BAM (PAS) = (18.57 \pm 2.24)(PAS) - 24.08 \pm 7.74 \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] \quad 9$$

Tabla 11: Análisis ANOVA para la regresión de BAM con PAS.

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	5234.739	1	5234.739	68.561	0.000
Residuo	1908.786	25	76.351		
Total	7143.525	26			

### 5.2.3 Filtros en paralelo a atenuador beta



*Ilustración 23: Se presenta la comparación entre concentración promedio de 24 horas de filtros con concentración promedio de BAM. Cada dato además contiene el promedio de humedad correspondiente al día.*

Donde mediante la regresión se obtiene la Ecuación 10, con un coeficiente de Pearson igual a 0.98.

$$KFG (BAM) = (1.05 \pm 0.04)(BAM) - 2.20 \pm 1.51 \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right] \quad 10$$



Tabla 12: Análisis ANOVA para la regresión de KFG con BAM.

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	7841.649	1	7841.649	838.289	0.000
Residuo	233.859	25	9.354		
Total	8075.508	26			

Además, se obtiene un sesgo  $B$  de 8%.

## 5.2.4 Independencia de humedad

Posterior a la comparación del material particulado de los distintos instrumentos, se buscará determinar si la humedad tiene incidencia en la medición. Para esto se realiza el análisis ANOVA para cada uno de los monitores.

Tabla 13: Resumen de medición en KC.

Grupo	Cantidad	Suma	Promedio	Variancia	Mínimo	Máximo
RH %	27	2228.76	82.55	62.18	66.17	93.98
PAS	27	90.90	3.37	0.58	2.05	4.83
BAM	27	1038.11	38.45	274.75	10.95	78.73
KFG	27	1028.32	38.08	310.60	6.59	84.08

Tabla 14: ANOVA para efectos de humedad en PAS.

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	1.887	1	1.887	3.551	0.071
Residuo	13.289	25	0.531		
Total	15.176	26			

Tabla 15: ANOVA para efectos de humedad en BAM.

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	0.328	1	0.328	0.001	0.973
Residuo	7143.197	25	285.728		
Total	7143.525	26			

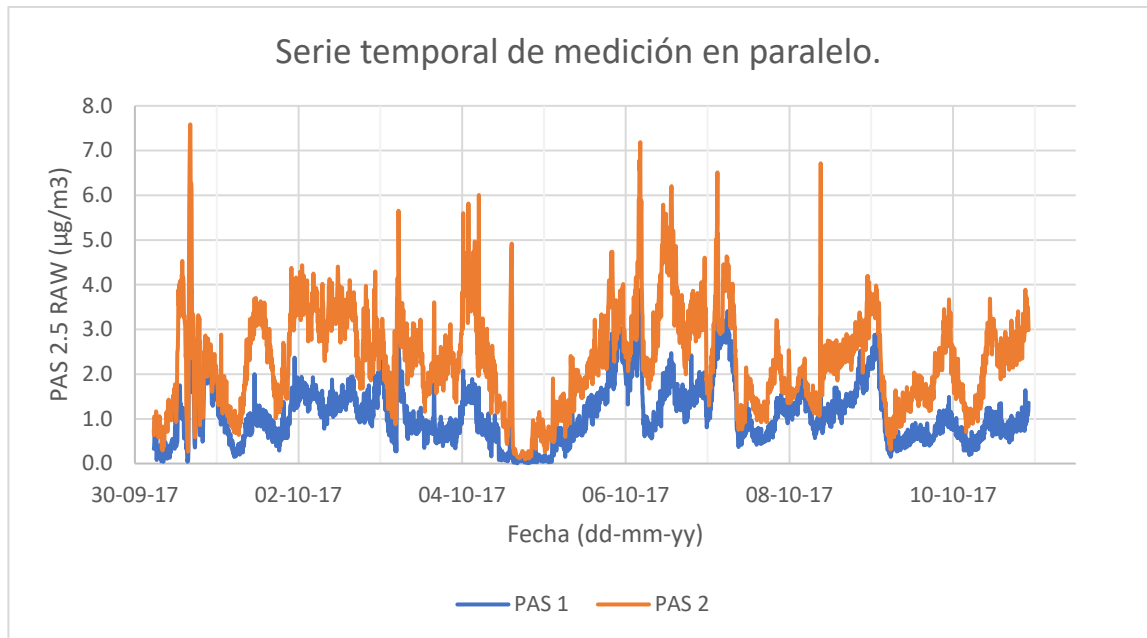
Tabla 16: ANOVA para efecto de humedad en filtros gravimétricos.

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	82.266	1	82.266	0.257	0.616
Residuo	7993.241	25	319.730		
Total	8075.507	26			

Evaluando el punto crítico de la  $F$  de Snedecor con 1 y 25 grados de libertad con una probabilidad de 0.05, se obtiene un valor crítico de 4.242. Se observa que en todos los casos se observa un valor menor crítico menor a este. 3.551 para el caso de PAS, 0.257 para filtros y 0.001 para BAM, por lo cual en todos los casos no se descarta la hipótesis de pendiente distinta de cero y se confirma que los sensores son mayoritariamente invariables frente a la humedad. Dentro del grupo de los instrumentos, el equipo PAS posee el valor más cercano al punto crítico.

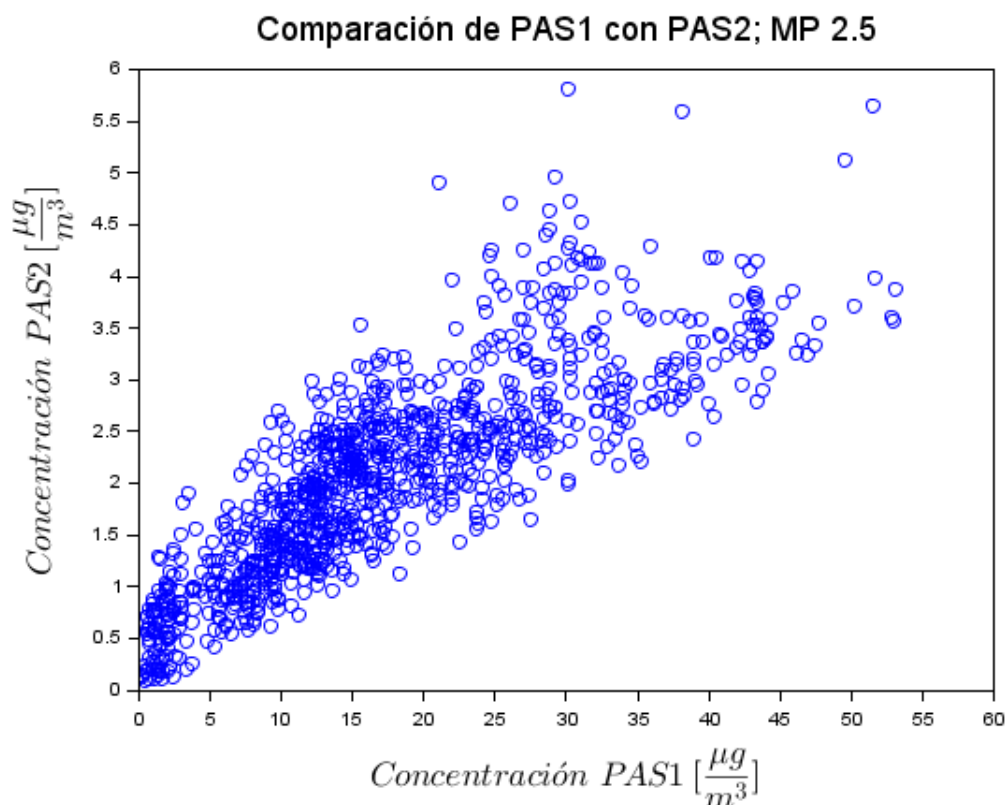
## 5.3 Equivalencia de sensores

Las mediciones se presentan en las Ilustraciones 24 y 25, mostrando la serie temporal y la comparación efectiva. Para este caso se consideró el sensor 1 como variable independiente puesto que este había sido previamente calibrado y el segundo sensor como variable dependiente.



*Ilustración 24: Serie temporal de la medición en paralelo usando los sensores prototipos en Pocuro 2905.*

Se observa que ambos sensores se encuentran en el mismo orden, sin embargo, el segundo prototipo presenta valores mayores que el primero; aproximadamente el doble. Se observan varios picos en la semana sin correlación con fenómenos de origen vehicular, por lo que se considera como eventos domiciliarios e intramuros. El valle que se presenta el día 04 de octubre se correlaciona con las lluvias ocurridas en la noche de ese día.



*Ilustración 25: Comparación entre las versiones de los sensores prototipos.*

Mediante el método de los mínimos cuadrados se determina la Ecuación 11 con una “r” de Pearson de 0.84. Donde el ajuste de la señal para la obtención de un valor aproximado del método referencial es 8.96, alrededor de la mitad para el primer prototipo.

$$PAS1 (PAS2) = (8.96 \pm 0.16)(PAS2) - 0.91 \pm 0.40 \left[ \frac{\mu g}{m^3} \right] \quad 11$$

*Tabla 17: Anova para la comparación de prototipos.*

Fuente Variación	Suma cuadrada	Grados de libertad	Cuadrados Medios	F	P
Regresión	128923.475	1	128923.475	3069.208	0.000
Residuo	71451.279	1701	42.005		
Total	200374.755	1702			

Al observar los sesgos, en primera instancia el obtenido para el método de atenuación beta en paralelo a filtros arroja un valor de 8%, valores esperados al tratarse de equipos de regulación instalados en estaciones de monitoreo de calidad de aire. Para el caso del sensor prototipo se obtiene un sesgo de 18%, un valor que lo encasilla dentro de los grados I, II, III y IV. El sensor no presenta los estándares para un muestreo de grado V regulatorio.

## **5.4 Medición en mina**

Ya teniendo el ajuste a MP2.5 para ambos equipos, se tiene todo lo necesario para las mediciones en ambientes mineros. En el yacimiento no se tuvo control sobre los sensores, debido a las normas de seguridad solo personal autorizado puede realizar la conexión al tomacorriente. Esto tuvo repercusión en la actividad ya que no se pudo realizar seguimiento al instrumento como se tenía planeado, sólo se conocieron resultados una vez terminado el monitoreo.

Los datos obtenidos de la medición en la línea 3 de sacapalos en el Chancado primario Colón se presentan en la Ilustraciones 26 y 27. El primer día de muestreo el prototipo 1 se ubicó dentro de la cabina sacapalos, luego fue llevado al exterior de esta. Frente a esta, el equipo prototipo 2 fue instalado a 20 metros en el pilar de separación de correas en un Punto de Medición Ambiental, cercano a la tenaza de extracción de no chancables. El cambio de ubicación fue debido a molestias dentro de los operarios de la cabina, junto con esto, el día 16 de noviembre el prototipo 2 presentó un corte en la energía de ahí en adelante.

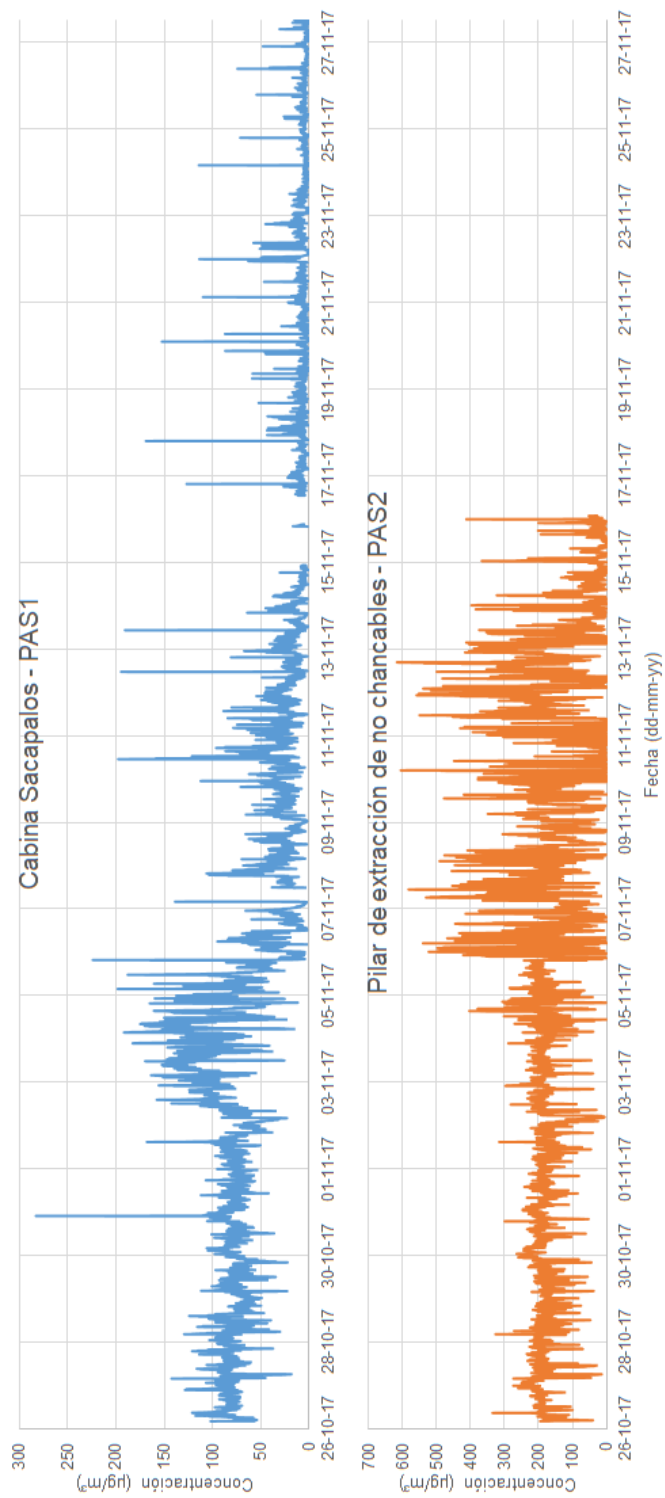


Ilustración 26: Concentración de MP2.5 en chancado primario Colón.

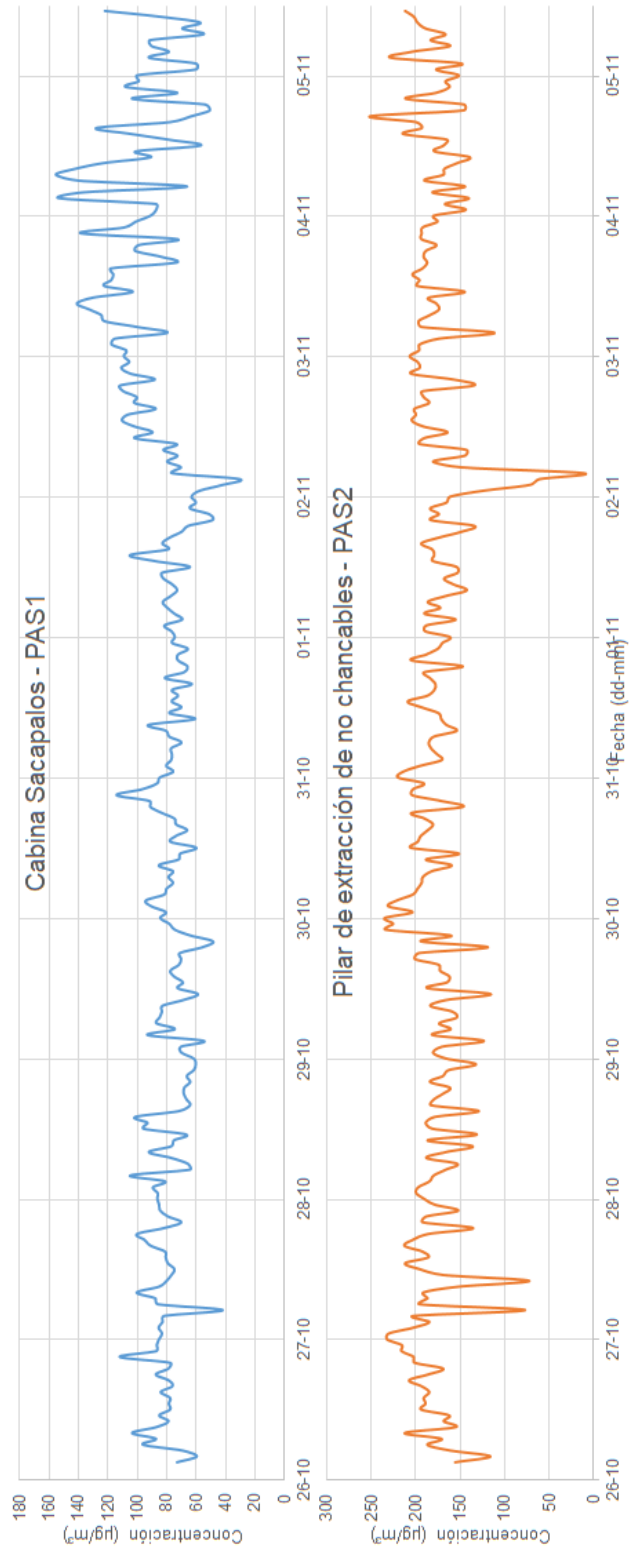


Ilustración 27: Perfil temporal en promedio horario.

Observando la Ilustración 26 se observa que ambos sensores poseen un valor mayoritariamente constante cercano a los primeros 10 días de medición. Posterior a esto en el sensor 1 se observa un aumento del ruido en la medición acompañada de una disminución en la concentración. En el sensor 2 también se observa un aumento del ruido hasta el final de la medición.

Para observar con mayor precisión la serie temporal, se re-graficará en promedio horario desde el día 26 de octubre hasta 6 de noviembre como se observa en la Ilustración 27. Ahora se observa con mayor claridad el valor promedio de la medición, esto significa que corresponden a procedimientos mayoritariamente monótonos como es en el caso de una mina. Todos los días se repiten los mismos procesos con excepción de mantenciones y/o fallas en el funcionamiento normal. En torno a esto, se observa mínimos relativos y absolutos los días 27 de octubre y 2 de noviembre respectivamente. Esto fue debido principalmente a que esos días se realizaron mantenciones de línea programadas e implicó una detención del proceso productivo.

Los valores estadísticos más importantes se muestran en la Tabla 18, donde se encuentra el promedio, mínimo, máximo y desviación estándar.

*Tabla 18: Estadígrafos de medición con sensores.*

Estadígrafo	PAS1	PAS2
Mínimo [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	30	12
Máximo [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	155	252
Promedio [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	84	178
Desviación Estándar [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	20.4	29.6

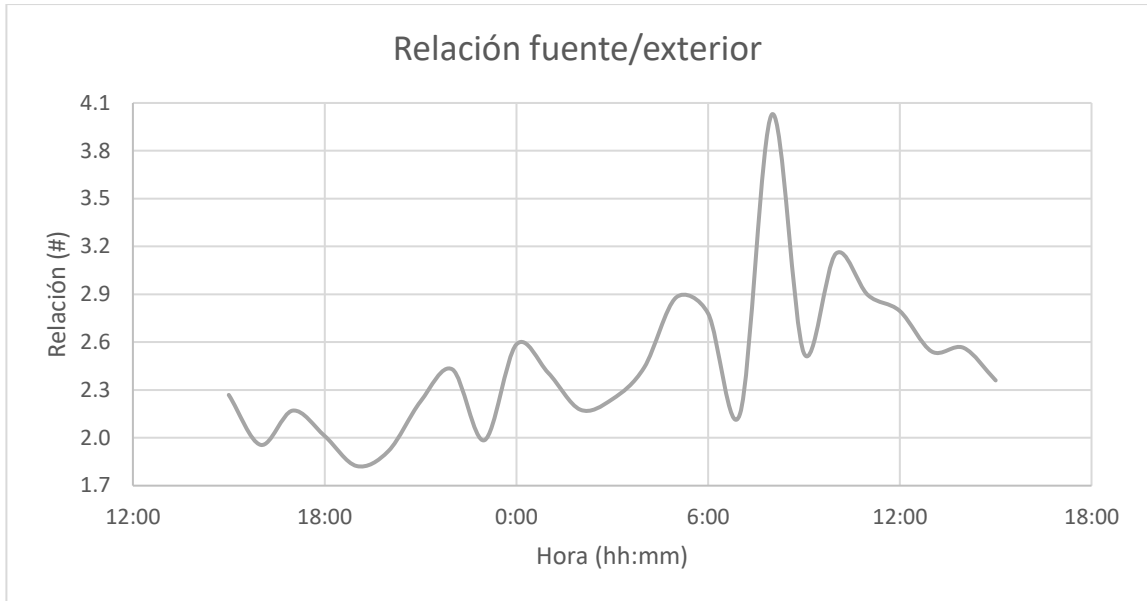
Al no tener en paralelo mediciones de interior y exterior de la cabina, se optó por comparar las relaciones entre interior/fuente y exterior/fuente para tener independencia del tiempo. En la Ilustración 28 se presenta la relación existente entre las primeras 24 horas de MP fino en el interior de la cabina y el cercano a la fuente.





*Ilustración 28: Relación maquinaria-caseta interior en las primeras 24 horas de medición (26-27 de octubre).*

Se observa que la relación entre el interior y el cercano a la fuente es mayor a 1.7 en el todo el periodo. Las concentraciones del exterior son de al menos 0.8 veces más alta que en el interior. Esto resume que la caseta sacapalos si posee un componente importante de aislación al material particulado aportando una disminución de 180 a 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , un valor comparable a pasar de un estado de emergencia a alerta ambiental. Sin embargo, hay que tener en cuenta la distancia existente entre los dos puntos de medición que implica también aporte de disminución de la concentración. Para observar este factor también se grafica la relación entre los pilares cercanos a la fuente sobre el hallado al exterior de la caseta.



*Ilustración 29: Relación maquinaria-caseta exterior día 29-30 de octubre.*

Se observa que la relación entre el exterior de la cabina y el cercano a la fuente tiene un mínimo similar al encontrado en el interior con los 1.7. Sin embargo, la diferencia más notoria se encuentra en el máximo llegando a superar 4 de relación. En contrario, los promedios de ambas relaciones se encuentran en el mismo orden y como se infiere lógicamente, el exterior posee una relación promedio mayor con 2.5 versus el 2.3 del interior. Esta aislación no es significativamente grande en relación con el promedio, sino, su aporte importante consta en la protección de los máximos de material que existen. Ambas figuras tienen perfiles similares, lo que es concordante con el conocimiento de que los procesos son rutinarios y las actividades se realizan a las mismas horas.

Considerando el valor previo que se posee respecto al porcentaje de sílice en el sector de sacapalos y reemplazándolo en los valores de material particulado, la cabina número 3 y las tenazas de extracción de no chancables tendrían 6.3 y 13.35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de sílice en el aire. Este valor se mantiene inferior al valor permisible por NIOSH de 0.05  $\text{mg}/\text{m}^3$ , además los operarios usan mascarillas con filtros para bajar el nivel del polvo respirable.

## 5.5 Desempeño de los sensores

Una vez terminada la medición final para conocer el estado de los sensores. Desde los componentes físicos hasta la duración de la medición. Lo primero en percatarse fue que PAS1 presentaba alarma del emisor infrarrojo comunicando que estaba quemado. Ambos sensores tenían un flujo menor al medido antes de la medición final, la succión en ambas bombas llegó a casi cero (0.02 LPM).

Para revisar el estado de las bombas y saber el origen del problema de flujo, se realizó una prueba con la bomba. Se midió el flujo directamente de las bombas y posteriormente a través del filtro. Los resultados se presentan en la Tabla 19, donde es posible determinar.

1. Las bombas continúan operativas después de la medición, por lo que la baja de flujo no es atribuible a ésta.
2. El filtro si está en su mayoría tapado, se observa una baja de flujo notable en ambos casos; de 0.16 y 0.41 para PAS1 y 2 respectivamente. Aporta a la disminución mas no es el único problema.

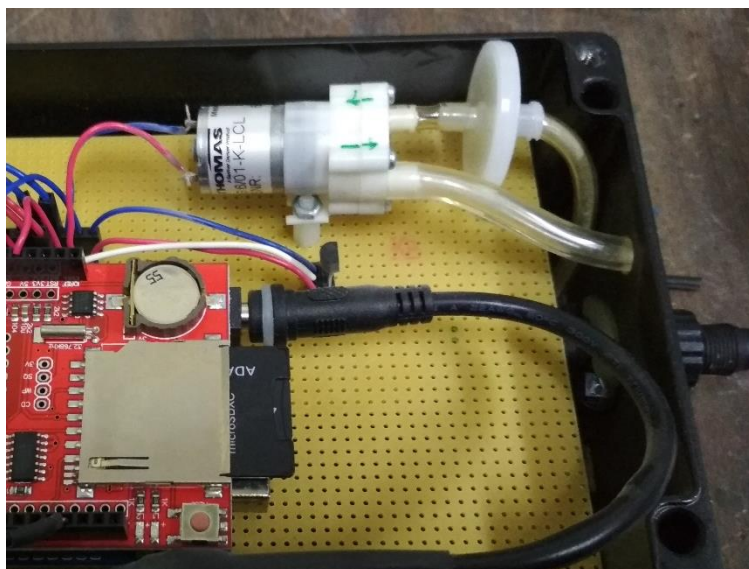
Tabla 19: Medición de flujo para distintos casos, ambos sensores.

Sensor	Flujo PAS1 [LPM]	Flujo PAS2 [LPM]
Previa medición DET	0.72	0.65
Post medición DET	0.02	0.02
Bomba sin filtro*	0.60	0.91
Bomba con filtro*	0.44	0.50

\*No se midió el flujo directamente en el filtro ni en la bomba previo a la campaña en DET.

Al observar los conectores entre los componentes ópticos y la bomba, las mangueras de ambos equipos tienen la notoria presencia de polvillo como se observa en la Ilustración 30, siéndole atribuible la responsabilidad de la falta de flujo. Para la siguiente refacción es necesario cambiar la manguera por una antiestática o una de mayor grosor para evitar o disminuir la adhesión de estas a las paredes internas.

El primer sensor presentó mayor presencia de polvo en el interior, no sólo en los componentes ópticos, sino también en las paredes internas y en el exterior de la bomba. Esto puede ser debido a alguna conexión deteriorada en el flujo del aire.



*Ilustración 30: Conexión bomba.*

## Conclusiones

Los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo de esta tesis indican que los monitores de material particulado de bajo costo entregan resultados similares y del mismo orden de magnitud que los que entrega un monitor de material particulado comercial, considerando las diferencias de precio entre ellos.

Importante es destacar, que el análisis estadístico de Varianza realizado para las variables Humedad Relativa versus Concentración no indica dependencia/relación entre ellas, aun cuando la humedad relativa alcanza valores sobre el 90% (promedio 24 horas).

Teniendo en cuenta que los monitores de bajo costo aún no tienen una producción estandarizada, son pocos prototipos los producidos, por ende, exigen un mayor dedicación y cuidado en el procesamiento de los datos.

La correlación observada entre el método referencial gravimétrico (KFG) con el instrumento de bajo costo (PAS) es aceptable aun considerando las imprecisiones en las mediciones que entrega el PAS.

El coeficiente de Pearson igual a 0.89 observado entre el KFG vs PAS indica una buena linealidad entre ellos (intercepto de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y pendiente de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) indicando un elemento aleatorio en la relación entre ambos instrumentos. Mejores resultados se obtendrían si, previo al inicio de las mediciones en zonas de altas concentraciones de material particulado, se realizara una calibración en el mismo lugar entre el método referencial KFG y el monitor de bajo costo PAS. Esta calibración no fue posible realizarla debido a la regulación interna de seguridad existente en la mina El Teniente.

Al comparar el método referencial 24 horas - KFG con el método equivalente continuo - Atenuación Beta, que entrego una pendiente de 1.05 y un coeficiente de Pearson de 0.98, hace que este último pueda ser usado para calibrar el monitor continuo PAS, ya que al ser ambos de medición continua, se observan con mayor claridad las discrepancias de corta duración que se observan en las mediciones del monitor de material particulado continuo de bajo costo.

Al comparar 2 ambientes en los cuales se realizaron mediciones con PAS, Sacapalos en la mina El Teniente, diez días de monitoreo continuo y Kingston College en zona urbana de Concepción, 60 días de monitoreo continuo, indican que el seguimiento periódico de las mediciones del monitor PAS son fundamentales, ya que se observó un deterioro importante en el flujo del monitor PAS producto de las altas concentraciones de material particulado, afectando el flujo de aire al cual debiera funcionar el instrumento.

Este tipo de problema también se observa si se usa un monitor Thermo Scientific ADR1500 Air QualityDust Monitor, modelo usado en Sacapalos, el cual producto de la alta concentración de material particulado en la zona, funcionó sólo durante una semana, es decir, ambos instrumentos presentaron los mismos problemas.

El uso de cabinas protectoras para operarios de la mina demostró beneficios desde el punto de vista concentración de material particulado en su interior, pero debido a la forma en que funciona la operación minera en el lugar, hace que la cabina se contamine al entrar y salir de los operarios, lo que exige el uso de mascarillas protectoras para el personal.

La Tabla 20 presenta un resumen de los pros y los contras de los sensores prototipos.

Tabla 20: Aspectos favorables y desfavorables de los equipos prototipos.

Pro	Contra
Bajo costo	Menor precisión en los datos
Portable	Confección manual
Portátil	Problemas en indoor extremo
Alimentación sencilla (220v)	Variación interna en el flujo
Fácil operación	Visión tiempo real limitada.

Debido a las restricciones para el ingreso a la mina El Teniente del personal que maneja los PAS o monitor beta, hace inviable el uso de monitores continuos de material particulado, de alto o bajo costo, al interior de la mina. Esta situación debe manejarse de una forma tal que permita al propio personal de la mina hacer uso en forma correcta de este tipo de instrumentos ya que estos han demostrado funcionar en ambientes similares (mina Outokompu, Finlandia).

## Referencias bibliográficas

- Andrae, S., Axelson, O., Björkstén, B., Fredriksson, M., & Kjellman, N.-I. (1988). Symptoms of bronchial hyperreactivity and asthma in relation to environmental factors. *Archives of Disease in Childhood*, 473-478.
- Bell, M. L., Davis, D. L., & Fletcher, T. (2004, Enero). A Retrospective Assessment of Mortality from the London Smog Episode of 1952; The Role of Influenza and Pollution. *Environmental Health Perspective*, 112(1), 6-8. doi:10.1289/ehp.6539
- Cantrell, B. K., & Watts Jr, W. F. (1997). Diesel Exhaust Aerosol: Review of Occupational Exposure. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 12(12), 1019-1027. doi:10.1080/1047322X.1997.10390643
- Consejo Minero. (25 de Septiembre de 2015). *Libro Minería en Números*. Recuperado el 23 de Febrero de 2017, de Consejo Minero: <http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2015/09/Libro-Consejo-Minero-miner%C3%ADa-en-n%C3%BAmeros.pdf>
- D'Almeida, G., & Jaenicke, R. (1981). The Size Distribution of Mineral Dust. *Journal of Aerosol Science*, 12(3), 160-162. doi:10.1016/0021-8502(81)90071-9
- Dirección de Estudios y Políticas Públicas. (junio de 2016). *Cochilco*. Recuperado el 28 de abril de 2017, de Comisión Chile del Cobre: <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202015.pdf>
- Dominici, F., Wang, Y., Correia, A. W., Ezzati, M., Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2015). Chemical Composition of Fine Particulate Matter and Life Expectancy. *Epidemiology*, 556-564.
- EPA. (1998). *GUIDANCE FOR USING CONTINUOUS MONITORS IN PM2.5 MONITORING NETWORKS*. doi:EPA-454/R-98-012
- EPA. (Junio de 2014). *Air Sensor Guidebook*. Recuperado el 20 de 01 de 2018, de [cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=519616](http://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=519616)
- Ghose, M. (2007). Generation and Quantification of Hazardous Dusts from Coal Mining in the Indian Context. *Environ Monit Assess* 130, 130, 35-45. doi:10.1007/s10661-006-9451-y

- Herrera, R., Radon, K., von Ehrenstein, O. S., Cifuentes, S., Moraga Muñoz, D., & Berger, U. (2016). Proximity to minning industry and respiratory diseases in children in a community in Northern Chile: A cross-sectional study. *Environmental Health*. doi:10.1186/s12940-016-0149-5
- Instituto Nacional de Estadísticas - Chile. (18 de Febrero de 2016). *Medio Ambiente - Informe Anual 2015*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas | INE 2016: [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/estadisticas\\_medio\\_ambiente/2015/informe-medio-ambiente2015.pdf](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_medio_ambiente/2015/informe-medio-ambiente2015.pdf)
- Instituto Nacional de Estadísticas - Chile. (Diciembre de 2016). *Medio Ambiente - Informe Anual 2016*. Recuperado el 31 de Marzo de 2017, de Instituto Nacional de Estadísticas | INE 2017: [http://www.ine.cl/medioambiente/descargas/2016/medio\\_ambiente\\_2016.pdf](http://www.ine.cl/medioambiente/descargas/2016/medio_ambiente_2016.pdf)
- Ministerio de Salud. (23 de Julio de 2015). *APRUEBA REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS Y AMBIENTALES BÁSICAS EN LOS LUGARES DE TRABAJO*. Recuperado el 13 de Febrero de 2017, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=167766>
- Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones; Subsecretaría de Transportes. (25 de Enero de 2013). *ESTABLECE NORMA DE EMISION DE NO, HC Y CO PARA EL CONTROL DEL NOx EN VEHICULOS EN USO, DE ENCENDIDO POR CHISPA (CICLO DE OTTO), QUE CUMPLEN CON LAS NORMAS DE EMISION ESTABLECIDAS EN EL DS. Nº 211 DE 1991 Y DS. Nº 54, DE 1994*. Recuperado el 07 de Febrero de 2017, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=260350>
- Ministerio del Medio Ambiente. (30 de Julio de 2012). *ESTABLECE NORMA DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, PARA LOS ARTEFACTOS QUE COMBUSTIONES O PUEDAN COMBUSTIONAR LEÑA Y PELLET DE MADERA*. Recuperado el 07 de Febrero de 2017, de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/N?i=1042254&f=2014-03-04&p=>
- NIOSH. (2002). Health Effects of Occupational. *NIOS Hazard Review*, 129. Retrieved 10 23, 2017, from <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2002-129/pdfs/2002-129.pdf>
- Parliament of the United Kingdom. (1956). *Clean Air Act, 1956*. Recuperado el 03 de Marzo de 2017, de [legislation.gov.uk](http://www.legislation.gov.uk): [http://www.legislation.gov.uk/ukpga/1956/52/pdfs/ukpga\\_19560052\\_en.pdf](http://www.legislation.gov.uk/ukpga/1956/52/pdfs/ukpga_19560052_en.pdf)
- Plant, J. A., Voulvoulis, N., & Ragnarsdottir, K. V. (2012). *Pollutants, Human Health and the Enviroment; A Risk Based Approach*. Wiley-Blackwell.



- Rockwell Automation. (2011, Agosto). *BESTECH Delivers New Ventilation-on-Demand System for Underground Mines, Saves Significant Energy Costs*. Retrieved Febrero 23, 2017, from Rockwell Automation:  
[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ap/mfgvp-ap008\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ap/mfgvp-ap008_-en-p.pdf)
- Saarikoski, S., Teinilä, K., Timonen, H., Aurela, M., Laaksovirta, T., Reyes, F., . . . Hillamo, R. (n.d.). Particulate matter characteristics, dynamics and sources in an underground mine. *Aerosol Science & Technology*.
- Seinfeld, J. N., & Pandis, S. N. (1997). *Atmospheric Chemistry and Physics* (1st ed., Vol. 1). New York, United States of America: Wiley.
- Servicio Nacional de Geología y Minería; Departamento de Seguridad Minera. (2008). *Guía de Ventilación de Minas 2008*. Recuperado el 23 de Febrero de 2017, de Servicio Nacional de Geología y Minería:  
<http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/200812GuiaVentilacionMinas.pdf>
- Soneja, S., Chen, C., Tielsch, J. M., Katz, J., Zeger, S. L., Checkley, W., . . . Breyse, P. N. (2014, Junio 19). Humidity and Gravimetric Equivalency Adjustments for Nephelometer-Based Particulate Matter Measurements of Emissions from Solid Biomass Fuel Use in Cookstoves. *International Journal of Environmental Research and Public Health*(11), 6400-6416. doi:10.3390/ijerph110606400
- SVEN LECKEL. (2007, Junio 29). INSTRUCTION MANUAL. Berlín, Alemania.
- Thermo Fisher Scientific. (2014, abril 02). Model 5014i Beta - Instruction Manual. Franklin. Retrieved octubre 02, 2017, from  
<https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/5014I>
- Vergara, A. (2005). The Recognition of Silicosis: Labor Unions and Physicians in the Chilean Copper Industry, 1930s-1960s. *Bulletin of the History of Medicine*, 79(4), 723-748. doi:10.1353/bhm.2005.0176
- World Health Organization. (2006). *WHO Air quality guidelines*. Retrieved from WHO/Europe | Home:  
[http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf)
- Zhu, C., Li, J. G., Wang, L., Morawska, L., Zhang, X., & Zhang, Y. L. (2014). Size-resolved particle distribution and gaseous concentrations by real-world road tunnel measurement. *Indoor and Built Environment*, 23(2), 225-235. doi:10.1177/1420326X13509290

## Anexos

Se adjuntan los programas utilizados para el tratamiento de datos realizados en el software SciLab.

### Ajuste a hora filtro.

PAS\_diafiltro.m

```
// Promediar a filtros
```

```
// datos;      matriz de datos, primera columna hora, segunda columna MP2.5
```

```
// ref;   matriz de hora de inicio y fin de filtro; primera columna hora inicio, segunda columna hora término
```

```
for l=1:28;
```

```
    diafiltro= []; n=0;
```

```
    for i=1: length(hora);
```

```
        if datos(i,1) <=ref(l,2) && datos(i,1)>=ref(l,1);
```

```
            n=n+1;
```

```
            diafiltro(n,1) =datos(i,1); %Columna hora
```

```
            diafiltro(n,2) =datos(i,2); %Columna dato
```

```
        end
```

```
    end
```

```
    ref(l,3) =mean(diafiltro(:,2));
```

```
end
```

## Ajuste a hora filtro.

PAS\_igualdad.m

// Promediar tiempos de PAS 2 contra PAS 1

// original matriz de tiempo, MP2.5 PAS 2

// PAS tiempo PAS 1

for i=1: length(PAS(:,1))-1;

    n=0; aux= [];

    for j=1: length(original(:,1));

        if original(j,1) <=PAS(i+1,1) && original(j,1)>PAS(i,1);

            n=n+1;

            aux(n)=original(j,2);

        end

    end

    prom(i,1) =mean(aux); // variable vacía a ajustar

end

## Tabla de filtros KC.

Tabla 21: Bitácora de filtros usados en estación Kingston College.

Bitácora KFG								
#	Código Filtro	Inicio		Duración [hh:mm]	Fin [dd-MM-aaaa hh:mm]	Volumen Normalizado [Nm <sup>3</sup> ]	Variación masa [mg]	Concentración [mg/m <sup>3</sup> ]
		Fecha [dd-MM]	Hora [HH:MM]					
1	3C4 087-MS	16-may	13:50	21:54	17-05-2017 11:44	47.84	0.302	0.006
2	3C4 070-MS	17-may	11:49	23:05	18-05-2017 10:54	50.95	0.950	0.019
3	3C4 088-MS	18-may	13:14	24:00	19-05-2017 13:14	53.71	1.546	0.029
4	3C4 089-MS	19-may	13:26	22:44	20-05-2017 12:10	50.89	1.841	0.036
5	3C4 090-MS	20-may	12:19	24:00	21-05-2017 12:19	52.76	2.394	0.045
6	PY4 674-MS	21-may	14:58	22:00	22-05-2017 12:58	49.12	1.318	0.027
7	PY4 673-MS	22-may	13:05	24:00	23-05-2017 13:05	53.51	1.524	0.028
8	PY4 675-MS	23-may	13:40	24:00	24-05-2017 13:40	53.50	1.306	0.024
9	PY4 672-MS	24-may	14:35	22:01	25-05-2017 12:36	49.42	1.808	0.037
10	PY4 661-MS	25-may	12:41	24:00	26-05-2017 12:41	53.77	2.059	0.038
11	PY4 662-MS	26-may	13:25	24:00	27-05-2017 13:25	53.67	2.015	0.038
12	PY4 663-MS	27-may	16:33	18:42	28-05-2017 11:15	42.19	2.913	0.069
13	PY4 664-MS	28-may	14:27	18:39	29-05-2017 09:06	41.89	2.512	0.060
14	PY4 665-MS	29-may	12:47	14:55	30-05-2017 03:42	33.27	2.784	0.084
15	PY4 666-MS	30-may	14:55	18:56	31-05-2017 09:51	42.91	2.404	0.056
16	PY4 667-MS	31-may	11:56	23:30	01-06-2017 11:26	51.98	1.610	0.031
17	PY4 668-MS	01-jun	11:30	24:00	02-06-2017 11:30	53.48	2.434	0.046
18	PY4 669-MS	02-jun	13:10	24:00	03-06-2017 13:10	53.13	0.969	0.018
19	PY4 670-MS	03-jun	17:00	20:09	04-06-2017 13:09	45.12	0.999	0.022
20	PY4 651-MS	04-jun	13:14	23:03	05-06-2017 12:17	51.94	2.619	0.050
21	PY4 652-MS	05-jun	12:51	00:00	06-06-2017 12:51	53.82	2.260	0.042
22	PY4 653-MS	06-jun	12:55	00:00	07-06-2017 12:55	52.64	0.658	0.013
23	PY4 654-MS	07-jun	13:23	00:00	08-06-2017 13:23	53.98	1.887	0.035
24	-	08-jun	-		-	-		-
25	PY4 655-MS	09-jun	16:24	00:00	10-06-2017 16:24	53.34	1.676	0.031
26	PY4 656-MS	10-jun	17:15	00:00	11-06-2017 17:15	-		-
27	PY4 657-MS	11-jun	14:53	00:00	12-06-2017 14:53	53.65	1.608	0.030
28	PY4 658-MS	12-jun	15:08	00:00	13-06-2017 15:08	53.58	2.417	0.045
29	PY4-659-MS	13-jun	16:07	16:20	14-06-2017 08:27	36.47	2.230	0.061