

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**TESIS:**

**CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, MONÓXIDO DE CARBONO, DIÓXIDO DE AZUFRE Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO PUYLUCANA, CAJAMARCA 2018**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presentada por:

**Bachiller: DANIEL ALEJANDRO ALVA HUAMÁN**

Asesor:

**Dr. VALENTÍN VÍCTOR PAREDES OLIVA**

**Cajamarca – Perú**

**2019**

COPYRIGHT © 2019 by  
**DANIEL ALEJANDRO ALVA HUAMÁN**  
Todos los derechos reservados

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: GESTIÓN AMBIENTAL**

**TESIS APROBADA:**

**CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, MONÓXIDO DE CARBONO, DIÓXIDO DE AZUFRE Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO PUYLUCANA, CAJAMARCA 2018**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Presentada por:

**Bachiller: DANIEL ALEJANDRO ALVA HUAMÁN**

**JURADO EVALUADOR**

Dr. Valentín Víctor Paredes Oliva  
Asesor

Dr. Marco Antonio Rivera Jacinto  
Jurado Evaluador

Dr. Gilberto Cruzado Vásquez  
Jurado Evaluador

M. Cs. Ricardo Uriol Valverde  
Jurado Evaluador

Cajamarca – Perú

2019



**Universidad Nacional de Cajamarca**  
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 080-2018-SUNEDU/CD  
**Escuela de Posgrado**  
CAJAMARCA - PERU




**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

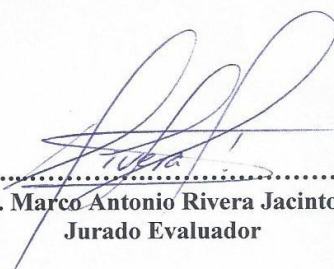
**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**


Siendo las 17:00 horas del día 18 de noviembre de dos mil diecinueve, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **Dr. MARCO ANTONIO RIVERA JACINTO**, **Dr. GILBERTO CRUZADO VÁSQUEZ**, **M. Cs. RICARDO URIOL VALVERDE**, y en calidad de Asesor el **Dr. VALENTIN VICTOR PAREDES OLIVA**. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **“CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, MONÓXIDO DE CARBONO, DIÓXIDO DE AZUFRE Y DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO PUYLUCANA, CAJAMARCA 2018”**, presentada por el **Bach. en Ingeniería Geológica DANIEL ALEJANDRO ALVA HUAMÁN**

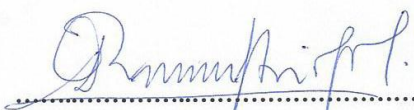
Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó APROBAR con la calificación de DIECISEIS (16) la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Bach. en Ingeniería Geológica DANIEL ALEJANDRO ALVA HUAMÁN**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias, con Mención en **GESTIÓN AMBIENTAL**

Siendo las 18:30 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

  
.....  
**Dr. Valentin Victor Paredes Oliva**  
Asesor

  
.....  
**Dr. Marco Antonio Rivera Jacinto**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**Dr. Gilberto Cruzado Vásquez**  
Jurado Evaluador

  
.....  
**M. Cs. Ricardo Uriol Valverde**  
Jurado Evaluador

## **DEDICATORIA**

Con gratitud a mis padres Antero Francisco Alva León y Eyda Xiomara Huamán Aguirre por su motivación permanente y mostrarme el camino a la superación.

A Mis hijos Daniela Johanna y Alejandro Raúl por ser fuente de mi motivación e inspiración.

A mi esposa Gabriela Comettant Rabanal por su apoyo incondicional

A mi abuela Olga Aguirre Castañeda por cuidarme siempre desde el cielo.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi asesor el Dr. Valentín Paredes Oliva, por su apoyo permanente, y a mi jurado calificador por sus invalorable aportes y conocimientos en la sustentación del presente trabajo de investigación.

Igualmente, a Nicolas Rudas Díaz por su ayuda y compromiso constante; y a todas las personas que, de una u otra manera, me apoyaron para culminar exitosamente el presente trabajo.

EL AUTOR.

No hay camino para la verdad, la verdad es el camino

Mahatma Gandhi

## TABLA DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	vi
<b>EPIÍGRAFE</b> .....	vii
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE ABREVIACIONES</b> .....	xv
<b>RESUMEN</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO II</b> .....	5
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1. Antecedentes de la investigación .....	5
2.2. Bases teóricas .....	13
2.2.1. Contaminación ambiental.....	13
2.2.2. La contaminación atmosférica.....	13
2.2.3. Emisiones típicas de las operaciones mineras .....	14
2.2.4. Minería no metálica .....	14
2.2.5. Oxido de calcio (Cal) .....	15
2.2.6. Proceso de obtención del óxido de calcio .....	15
2.2.7. Medición de contaminantes del aire .....	16
2.2.8. Concentración de los contaminantes en el aire .....	17
2.2.9. Material particulado (PM).....	17
2.2.10. Monóxido de carbono (CO) .....	18



2.2.11. Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	19
2.2.12. Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	20
2.2.13. Dispersión de contaminantes.....	21
2.2.14. Modelo de dispersión gaussiano.....	22
2.2.15. Guías y normas e índice de calidad de aire.....	24
2.2.16. Marco legal en el Perú.....	25
2.2.17. Niveles de Estados de Alerta.....	26
2.2.18. Límites Máximos Permisibles de Emisiones Gaseosas.....	27
2.2.19. Estándares internacionales.....	27
2.2.20. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.....	31
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>32</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1. Ubicación del trabajo de investigación.....	32
3.2. Descripción de la zona de investigación.....	33
3.2.1. Punto de muestreo.....	37
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	38
3.3.1. Fase de campo.....	38
3.3.2. Fase de gabinete.....	38
3.4. Equipos, materiales e insumos.....	38
3.4.1. Equipos.....	38
3.4.2. Programa Screen View 4.0.....	42
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>43</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>43</b>
4.1. Concentración de material particulado PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> , CO, SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub> en boca de hornos y comparación con el ECA.....	43
4.1.1. Concentración de material particulado PM <sub>10</sub> .....	43

4.1.2. Comparación de la concentración de material particulado PM <sub>10</sub> con el ECA.....	44
4.1.3. Concentración de material particulado PM <sub>2.5</sub> .....	45
4.1.4. Comparación de la concentración de material particulado PM <sub>2.5</sub> con el ECA.....	46
4.1.5. Concentración de Monóxido de Carbono (CO) .....	47
4.1.6. Comparación de la concentración de monóxido de carbono (CO) con el ECA .....	48
4.1.7. Concentración del Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	49
4.1.8. Comparación de la concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) con el ECA	50
4.1.9. Concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	51
4.1.10. Comparación de la concentración del dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) con el ECA .....	52
4.2. Rosa de vientos para la planta de producción de óxido de calcio Puyucana.....	53
4.3. Concentración de Material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno a 0,5 y 1 km de la fuente de emisión, usando el modelo de dispersión Gaussiano. ....	55
4.3.1. Concentración de material particulado PM <sub>10</sub> usando el modelo Gaussiano ..	55
4.3.2. Concentración de material particulado PM <sub>2.5</sub> usando el modelo Gaussiano ..	56
4.3.3. Concentración de monóxido de carbono (CO) usando el modelo Gaussiano	57
4.3.4. Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) usando el modelo Gaussiano.....	58
4.3.5. Concentración de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) usando el modelo Gaussiano	59
4.4. Simulación de dispersión de contaminantes.....	60
4.4.1. Simulación de dispersión del Material Particulado PM <sub>10</sub> .....	60
4.4.2. Simulación de dispersión del Material Particulado PM <sub>2.5</sub> .....	61
4.4.3. Simulación de dispersión de Monóxido de carbono (CO).....	63
4.4.4. Simulación de dispersión de Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	63

4.4.5. Simulación de dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) .....	64
<b>CAPÍTULO V CONCLUSIONES</b> .....	66
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	67
<b>APÉNDICE</b> .....	75
<b>ANEXOS</b> .....	84
<b>PLANOS</b> .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Concentración Promedio Diario de PM <sub>10</sub> en Ciudades .....	6
Figura 2.	Umbral de cuidado para PM <sub>10</sub> .....	6
Figura 3.	Concentración Promedio Diario de PM <sub>2.5</sub> en ciudades. ....	7
Figura 4.	Umbral de Cuidado para PM <sub>2.5</sub> .....	7
Figura 5.	Concentración Promedio Diario de SO <sub>2</sub> en Ciudades. ....	8
Figura 6.	Umbral de Cuidado para SO <sub>2</sub> .....	8
Figura 7.	Concentración Promedio Diario de NO <sub>2</sub> en Ciudades.....	9
Figura 8.	Umbral de Cuidado para NO <sub>2</sub> . ....	9
Figura 9.	Proceso de obtención del óxido de calcio .....	16
Figura 10.	Coordenadas espaciales en el modelo gaussiano de Pasquill-Gifford.....	23
Figura 11.	Mapa de ubicación de la calera Puylucana. ....	32
Figura 12.	Relieve de la zona de investigación .....	33
Figura 13.	Formaciones Geológicas del entorno de la planta de producción de cal Puylucana .....	34
Figura 14.	Promedio de temperatura normal para Cajamarca .....	35
Figura 15.	Categorías y porcentaje de nubosidad en Cajamarca .....	35
Figura 16.	Probabilidad diaria de precipitación en Cajamarca.....	36
Figura 17.	Porcentaje de dirección predominante del viento .....	36
Figura 18.	Ubicación del punto de muestreo. ....	37
Figura 19.	Equipo de Monitoreo de gases .....	39
Figura 20.	Equipo contador de Partículas de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	39
Figura 21.	Termómetro Infrarojo .....	40
Figura 22.	Interfaz del programa Screen View 4.0 .....	41
Figura 23.	Concentración de material particulado PM <sub>10</sub> cada 5 minutos.....	43
Figura 24.	Comparación de la concentración de material particulado PM <sub>10</sub> con el ECA. ....	44
Figura 25.	Concentración de material particulado PM <sub>2.5</sub> cada 5 minutos. ....	45
Figura 26.	Comparación de la concentración de material particulado PM <sub>2.5</sub> con el ECA .....	46
Figura 27.	Concentración de monóxido de carbono (CO) cada 5 minutos .....	47
Figura 28.	Comparación de la concentración de monóxido de carbono con el ECA. ....	48
Figura 29.	Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) cada 5 minutos .....	49

Figura 30.	Comparación de la concentración de dióxido de azufre con el ECA....	50
Figura 31.	Concentración de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) cada 5 minutos .....	51
Figura 32.	Comparación de la concentración de dióxido de nitrógeno con el ECA. ....	52
Figura 33.	Rosa de vientos para la planta de producción de óxido de calcio Puylucana. ....	54
Figura 34.	Dirección del viento respecto al centro poblado Puylucana .....	54
Figura 35.	Concentración máxima del material particulado PM <sub>10</sub> a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano.....	55
Figura 36.	Concentración máxima del material particulado PM <sub>2.5</sub> a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano.....	56
Figura 37.	Concentración máxima del monóxido de carbono (CO) a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano.....	57
Figura 38.	Concentración máxima del dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano.....	58
Figura 39.	Concentración máxima del dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) a nivel del suelo usando un modelo Gaussiano.....	59
Figura 40:	Simulación de la dispersión de material particulado PM <sub>10</sub> .....	60
Figura 41:	Simulación de la dispersión de material particulado PM <sub>2.5</sub> .....	61
Figura 42:	Simulación de la dispersión de monóxido de carbono (CO) .....	62
Figura 43:	Simulación de la dispersión de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	63
Figura 44:	Simulación de la dispersión de dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ) .....	64
Figura 45:	Formato Excel para el uso del modelo gaussiano .....	82
Figura 46:	Concentración de las emisiones procesando los datos en Excel usando modelo Gaussiano .....	83
Figura 47.	Planta de producción de óxido de calcio Puylucana .....	85
Figura 48:	Hornos en proceso de calcinación.....	85
Figura 49:	Equipos en el punto de muestreo (boca de hornos).....	86
Figura 50:	Lectura de equipo sensor de gases .....	86
Figura 51.	Certificado de Calibración de contador de partículas (HANDHELD 3016IAQ) .....	87

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clases de estabilidad atmosférica .....	22
Tabla 2. Coeficientes de dispersión en función de la distancia a la fuente.....	24
Tabla 3. Estándares de calidad ambiental para aire.....	26
Tabla 4. Nivel de Estados e Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire .....	27
Tabla 5. Niveles Máximos Permisibles para Emisiones Gaseosas .....	27
Tabla 6. Resumen de los Estándares de Calidad de Aire Ambiental Internacionales .....	29
Tabla 7. National Ambient Air Quality Standards (Normas nacionales de calidad del aire ambiente).....	31
Tabla 8. Datos de la construcción de la rosa de vientos .....	53

## LISTA DE ABREVIACIONES

<b>OMS</b>	: Organización Mundial de la Salud
<b>MINAM</b>	: Ministerio del Ambiente
<b>MEM</b>	: Ministerio de Energía y Minas
<b>INCA</b>	: Índice de Calidad del Aire
<b>VUEC</b>	: Valores umbrales de estados de cuidado.
<b>DIGESA</b>	: Dirección General de Salud
<b>MPC</b>	: Municipalidad Provincial de Cajamarca
<b>SENAMHI</b>	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología.
<b>ECA</b>	: Estándar de Calidad Ambiental
<b>PM<sub>2,5</sub></b>	: Material particulado menor de 2,5 micras
<b>PM<sub>10</sub></b>	: Material particulado menor de 2,5 micras
<b>µg/m<sup>3</sup></b>	: micras por metro cúbico
<b>CaO</b>	: Óxido de Calcio
<b>CO</b>	: Monóxido de carbono
<b>SO<sub>2</sub></b>	: Dióxido de azufre
<b>NO<sub>2</sub></b>	: Dióxido de nitrógeno
<b>D.S.</b>	: Decreto supremo
<b>EPA</b>	: (en inglés) Agencia de Protección Ambiental
<b>GPS</b>	: (en inglés) Sistema de Posicionamiento Global

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue determinar la concentración de material particulado  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , de monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), generado en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, ubicada en el distrito de Baños del Inca, provincia y departamento de Cajamarca. En la fase de campo se estableció el punto de muestreo (P1), ubicado en boca de hornos, posteriormente las emisiones atmosféricas fueron registradas con un contador de partículas HANDHELD 3016 IAQ, y un sensor de gases AEROQUAL S200, durante 8 horas continuas de 8.00 am a 4.00 pm, de los días 13, 14, 15 del mes de julio del año 2018; tomándose en cuenta además las condiciones meteorológicas para elaborar una simulación de dispersión de emisiones por el método gaussiano para luego procesar los datos registrados y compararlos con los estándares de calidad ambiental, planteándose como hipótesis que estas concentraciones sobrepasan estos estándares de calidad ambiental de aire.

La concentración promedio de material particulado  $PM_{10}$  en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana fue de  $12,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $18,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de material particulado  $PM_{2.5}$ ;  $9968,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de monóxido de carbono (CO);  $17,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de dióxido de azufre ( $SO_2$ );  $93.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), estas concentraciones no sobrepasan los estándares de calidad ambiental para el aire. Utilizando el modelo de dispersión Gaussiano para 0,5 km y a 1 km de distancia de la fuente de emisión, las concentraciones descienden a un nivel muy por debajo de los estándares de calidad ambiental debido principalmente a la acción dispersante del viento.

**Palabras Claves:** Material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, Estándares de calidad ambiental.



## ABSTRACT

This research was aimed to determine the concentration of particulate matter  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , carbon monoxide (CO), sulfur dioxide ( $SO_2$ ), nitrogen dioxide ( $NO_2$ ) in the Puylucana calcium oxide production plant, located in Baños del Inca district, Cajamarca province and department. In the field phase, the sampling point (P1), located in the fuenace mouth, was established. Subsequently, the atmospheric emissions were recorded with a HANDHELD 3016IAQ particle counter, and an AEROQUAL S200 gas sensor for 8 continuous hours from 8.00 am to 4.00 pm, on the 13th, 14th and 15th of July, 2018; furthermore, the meteorological conditions were considered to elaborate a simulation of dispersion of emissions by the Gaussian method to then process the recorded data and to compare them with the environmental quality standards, considering as hypotheses that these concentrations exceed these air quality standards.

The average concentration of  $PM_{10}$  particulate matter in the Puylucana calcium oxide production plant was  $12.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $18,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of  $PM_{2.5}$ ;  $9968,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of carbon monoxide (CO);  $17,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of sulfur dioxide ( $SO_2$ );  $93,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of nitrogen dioxide ( $NO_2$ ), these concentrations do not exceed the environmental quality standards for air. Using the Gaussian dispersion model for 0.5 km and 1 km away from the emission source, the concentrations drop to a level far below the environmental quality standards due mainly to the dispersing action of the wind.

**Keywords:** Particulate material, carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen dioxide, Environmental quality standards.

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

La atmósfera es el espacio vital donde se intercambian gases necesarios para los seres vivos, y se producen reacciones fisicoquímicas que influyen en el clima y donde se halla la capa de ozono, medio de protección de los rayos UV; sin embargo, en las últimas décadas la contaminación a este espacio ha sido exponencial (Organización Mundial de la Salud, 2018), afectando los ecosistemas de todo el planeta en un nivel continental o global, así como a cada individuo a un nivel local (Skromulis et al., 2017), aunque un número de actividades físicas (volcanes, incendios, etc.) pueden liberar diferentes contaminantes en el ambiente, las actividades antropogénicas son la mayor causa de contaminación ambiental del aire (Shafaghat et al., 2016), donde elementos químicos pueden escapar al ambiente por accidente, pero un número de contaminantes atmosféricos son liberados por industrias y otras actividades extractivas, y pueden causar efectos negativos sobre la salud y el ambiente (US-EPA, 2015).

Una variedad de estos contaminantes ha sido reportada mundialmente y localmente, difiriendo en su composición química, propiedades de reacción, persistencia en el ambiente, la capacidad para ser transportados a distancias largas o cortas (Kampa y Castanas, 2008). Cuatro categorías son identificadas: (i) gases contaminantes (p.e. SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, ozono, compuestos orgánicos volátiles), producto de la combustión de combustibles fósiles (Katsouyanni, 2003); (ii) contaminantes orgánicos persistentes (p.e. dioxina) como los pesticidas (Schechter et al., 2006); (iii) metales pesados (p.e. plomo, mercurio), los cuales pueden ser transportados por aire y entrar al agua y alimentos (Jarup, 2003). y (iv) material particulado (PM, por sus siglas en inglés), que consiste en mixturas complejas y variadas de partículas suspendidas en las corrientes de aire (Poschl, 2005).

Un reporte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) que se adelanta al año 2050 para estimar el impacto en el medio ambiente si el mundo no adopta políticas verdes más ambiciosas, asevera: “Se prevé que la contaminación del aire se convertirá en la causa ambiental principal de mortalidad prematura, por encima de aguas insalubres y falta de saneamiento” con “una proyección de que se duplique en el mundo el número de muertes prematuras derivadas de la exposición a material particulado, pasando de más de 1 millón hoy en día, a aproximadamente 3.6 millones al año en 2050.” (OCDE, 2012).

El elevado consumo de combustibles fósiles, es uno de los problemas ambientales actuales debido a la contaminación del aire, la generación de todo tipo de residuos, el cambio climático, entre otros. La quema de combustibles fósiles como causa principal de cambio climático es ya, un hecho científico avalado por numerosos estudios, y, además, es preciso destacar la disminución de recursos globales convencionales de petróleo, gas y carbón (González, 2019).

El sector industrial se ha caracterizado siempre por el auge económico, pero también por los impactos ambientales que ocasionan, sobre todo al componente atmosférico. La liberación de gases por parte de este sector, ha sido alarmante en los últimos años (Shan et al., 2015), acelerando el ya conocido efecto invernadero y por ende el cambio climático.

Ajhuacho, (2009), menciona que las industrias de producción de óxido de calcio en Bolivia se caracterizan por tener una tecnología, un proceso productivo, materias primas, insumos y productos de tipo convencional artesanal, que generan residuos contaminantes, principalmente en la etapa de calcinación, molienda, hidratación, cernido y embolsado, y cuya cantidad de residuos, se genera, en función al volumen de producción, siendo el material particulado  $PM_{10}$  el que excede los límites en 45 veces más, causando contaminación atmosférica y efectos a la salud principalmente de tipo respiratorio.

En el Perú, diversas actividades contribuyen a la liberación de gases, agudizando los problemas ya existentes. Toda actividad minera genera riesgos ambientales, en especial si dicha actividad se desarrolla dentro de zonas de expansión urbana, por cuanto, dichas áreas son altamente vulnerables, y ponen en peligro el equilibrio del ecosistema (MEM, 2016).

El proceso productivo de la cal debido a que la antracita es usado como combustible contribuye a la generación de gases como el CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, que pueden repercutir considerablemente a la atmósfera circundante.

En el distrito de Baños del Inca, existen aproximadamente 5 caleras, las cuales probablemente están causando un efecto ambiental considerable, por las emanaciones de partículas de polvo; sin embargo, no existen estudios de medición de los impactos, de modo que se puedan proponer medidas de corrección o mitigación (Martínez, 2018).

La planta de producción de óxido de calcio Puylucana ubicada en el distrito de Baños del Inca, y a una distancia de 1 kilómetro del centro poblado Puylucana, produce alrededor de 25 toneladas diarias de cal, la cual podría generar concentraciones de material particulado (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), gases de efecto invernadero liberados a lo largo de su cadena productiva tales como CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, que no han sido cuantificados, tampoco evaluados ni reportados, siendo estos un parámetro fundamental en el control de la calidad del aire por efectos nocivos sobre la salud, el clima y los ecosistemas, ya que, podrían superar los estándares de calidad ambiental.

En función a lo expuesto, se formuló la interrogante ¿Cuál es la concentración de material particulado (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, que se genera en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, Cajamarca?

La evaluación se realizó en el mes de julio; mes donde hay menor cantidad de viento, el cuál influye en la movilización de los parámetros a evaluados. Los instrumentos de recolección de datos fueron detectores de gases y contador de digitales, además de termómetro infrarrojo, para medir la temperatura de los hornos y de los gases generados durante la producción de óxido de calcio.

El objetivo de la investigación fue determinar la concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de material particulado ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ), así como de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , que se genera en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, para luego compararla con el estándar de calidad ambiental (ECA) del aire. Los objetivos específicos fueron realizar la descripción geológica y meteorológica, de la zona de investigación; además determinar a través del método Gaussiano, las concentraciones de las emisiones a 0.5 km y 1 km de distancia de la fuente de emisión, y realizar la simulación de dispersión de las emisiones de la planta de producción de óxido de calcio Puylucana. De esta forma se planteó como hipótesis que la concentración de material particulado  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, sobrepasa los Estándares de calidad ambiental del aire.

Esta información obtenida sobre la concentración de material particulado,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , emitida a la atmósfera por parte de la calera Puylucana, así como su difusión hará posible una participación más activa por parte de este sector industrial, de las autoridades ambientales encargadas de este sector, en coordinación con las posibles comunidades afectadas para poder elaborar un plan estratégico que disminuya las emisiones de contaminantes en futuros proyectos de implementación, además los resultados pueden servir como referente sobre la contaminación que podrían estar generando las industrias Caleras; de forma adicional, la información y metodología servirá como base para otros estudios en diferentes plantas de producción de óxido de calcio.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

El Clean Air Institute (2012) en su reporte de La Calidad del Aire en América Latina, concluye que, muchos países latinoamericanos no cuentan con estándares nacionales para  $PM_{2.5}$  que para la OMS es de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual y de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media de 24 horas. Los estándares diario y anual para  $PM_{10}$  en todos los países son mayores que los sugeridos en las Guías de Calidad del Aire de la OMS de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media de 24 horas. Los estándares anuales para  $NO_2$  en todos los países son mayores que las guías de la OMS de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media anual y de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media de una hora; y por último que, en todos los países, los estándares de 24 horas para  $SO_2$  son significativamente más altos que las guías de la OMS de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media de 24 horas y  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , media de 10 minutos.

Desamparados (2012), afirma que los factores ambientales como la temperatura y el viento afectan a la dispersión de los contaminantes atmosféricos particulados  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , pues durante los meses más fríos al existir un estancamiento de las masas de aire existe una disminución de los niveles de concentración de partículas en el aire y cuando se interrelacionan con el viento se observa que hay un alejamiento de las fuentes de emisión.

Rojano et al., (2016), aplicó el modelo de dispersión Gaussiano donde concluye que, en la emisión de los turbocompresores y generadores eléctricos a gas, La Guajira, Colombia, se presenta la máxima concentración a una distancia de 100 metros de la fuente con un nivel promedio estimado de  $24,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y se mostraron concentraciones promedios de  $PM_{10}$  menores de  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a distancias de 1400 m. Para

el NO<sub>2</sub>, la concentración máxima fue a 149 metros con un valor de 24,39 µg/m<sup>3</sup>, y de 2164 µg/m<sup>3</sup> para el CO.

El MINAM (2014) Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014, la información de respecto al parámetro PM<sub>10</sub>, se muestra en la Figuras 1 y 2.

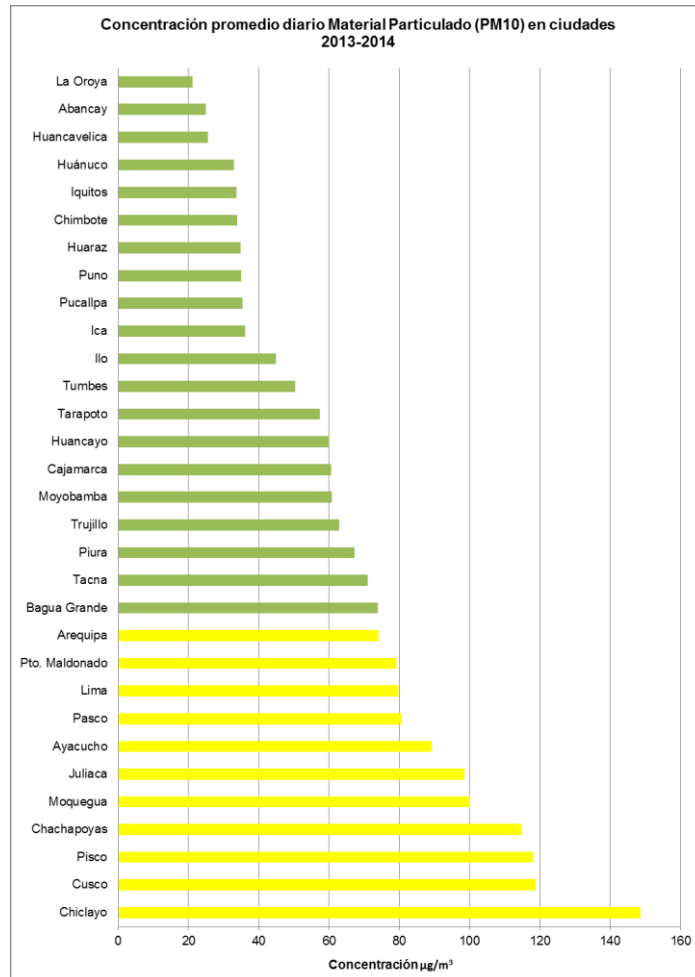


Figura 1. Concentración Promedio Diario de PM<sub>10</sub> en Ciudades

Fuente: MINAM, 2014

INCA	Concentración µg/m <sup>3</sup>
BUENA	0-75
MODERADA	76-150
MALA	151-250
VUEC*	> 250

\*VUEC: Valores umbrales de estados de cuidado

Figura 2. Umbral de cuidado para PM<sub>10</sub>

Fuente: MINAM, 2014.

Para el parámetro PM<sub>2.5</sub>; se muestran tres clases de ciudades, las que presentan niveles bajos con una concentración menor a 12.5 µg/m<sup>3</sup> que pertenecen a la categoría buena (color verde), mientras que 10 ciudades presentan niveles de contaminación moderada (color amarillo) y 6 ciudades pertenecen a la categoría mala, excediendo el valor del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) (para esos años), estas son Chachapoyas, Cajamarca, Tacna y Juliaca, Moquegua y Cusco. (Figuras 3 y 4).

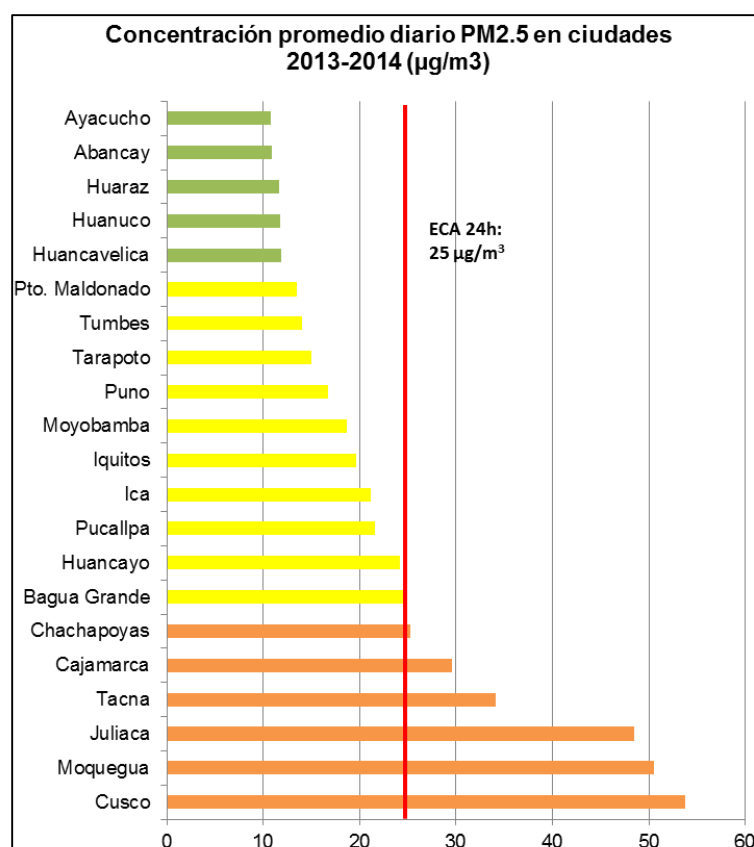


Figura 3. Concentración Promedio Diario de PM<sub>2.5</sub> en ciudades.

Fuente: MINAM, 2014

INCA	Concentración µg/m <sup>3</sup>
BUENA	0-12,5
MODERADA	12.6-25
MALA	25.1-125
VUEC*	>125

\*VUEC: Valores umbrales de estados de cuidado.

Figura 4. Umbral de Cuidado para PM<sub>2.5</sub>

Fuente: MINAM, 2014



Los datos de concentraciones diarias obtenidas para dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se presentan en la figura 5. Tres (3) ciudades presentan concentraciones malas, once (11) ciudades presentan concentraciones moderadas (amarillo) y el resto, 15 ciudades presentan valores bajos (verde), en total 26 ciudades se encuentran con concentraciones por debajo del ECA de 20 µg/m<sup>3</sup>, vigente en ese año.

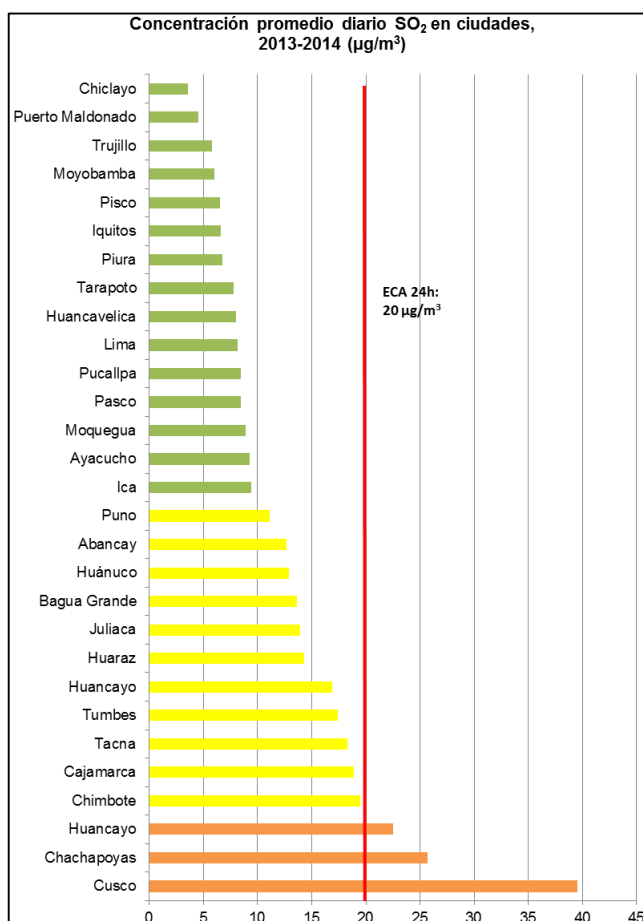


Figura 5. Concentración Promedio Diario de SO<sub>2</sub> en Ciudades.

Fuente: MINAM, 2014

INCA	Concentración µg/m <sup>3</sup>
BUENA	0-10
MODERADA	11-20
MALA	21-500
VUEC*	> 500

\*VUEC: Valores umbrales de estados de cuidado.

Figura 6. Umbral de Cuidado para SO<sub>2</sub>

Fuente: MINAM, 2014

Para los valores referidos al dióxido de nitrógeno, se cuenta con información de monitoreos puntuales de 21 ciudades consideradas como ZAP. Los resultados en general muestran valores bastante bajos, perteneciendo casi todas las ciudades a la categoría buena. Las ciudades que presentan los valores más bajos son Pucallpa, Iquitos, Cajamarca y Ayacucho, en ningún caso se excede el ECA de Aire para NO<sub>2</sub>, valor horario de 200 µg/m<sup>3</sup>.

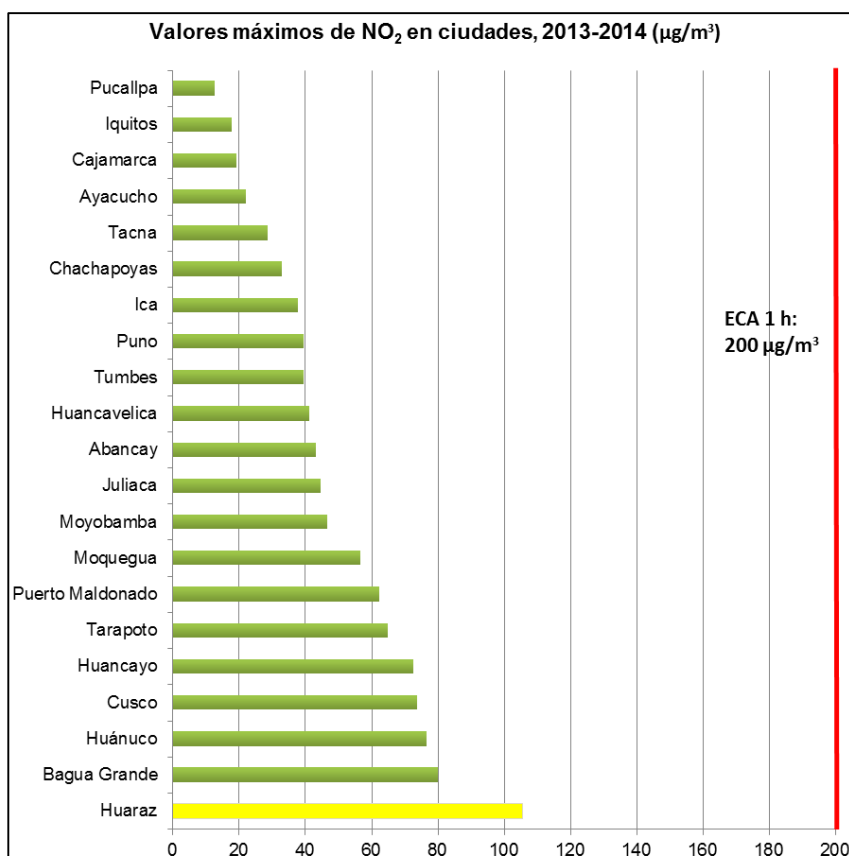


Figura 7. Concentración Promedio Diario de NO<sub>2</sub> en Ciudades.

Fuente: MINAM, 2014

INCA	Concentración µg/m <sup>3</sup>
BUENA	0-100
MODERADA	101-200
MALA	201-300
VUEC*	>300

\*VUEC: Valores umbrales de estados de cuidado.

Figura 8. Umbral de Cuidado para NO<sub>2</sub>.

Fuente: MINAM, 2014

Los resultados de la investigación de Trelles (2018), en el Cuzco arrojan que durante la construcción de la carretera la estación de monitoreo CA-18 en el mes de julio, para material particulado  $PM_{10}$ , la concentración es de  $196,82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , para el  $PM_{2.5}$ , la concentración es de  $221,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , excediendo el ECA de calidad de aire. Para el mes de octubre en las tres (3) estaciones de monitoreo, las concentraciones se encuentran por debajo del ECA tanto en material particulado como en gases ya que para  $\text{NO}_2$  la concentración es menor a  $3.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; para  $\text{SO}_2$ , es menor a  $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y para CO es menor a  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Pinto (2018) determinó que en las ocho estaciones de monitoreo en la construcción de la carretera dv. Papujune camino principal tramo II en la ciudad de Mariscal Nieto, Moquegua, los resultados de la concentración del material particulado  $PM_{10}$  fue entre  $20-26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el mes de febrero; entre  $2-25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el mes mayo y para el mes de agosto entre  $9-37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y para el caso de material particulado  $PM_{2.5}$  en el mes de febrero la concentración fue de  $6-15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en el mes de mayo la concentración fue de  $2-11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y para agosto la concentración entre  $5-14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , situándose por debajo de los estándares de calidad ambiental de aire D.S. 003-2017-MINAM.

Arenas (2017) determinó la concentración del material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el centro poblado de Yura, provincia y región de Arequipa. Para la toma de muestra del material particulado ( $PM_{10}$ ) utilizó un equipo HI-VOL, Para la toma de muestra del material particulado ( $PM_{2.5}$ ) utilizó un equipo LOW-VOL, Para el monitoreo de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) se utilizó un tren muestreo de gases; Los resultados indicaron que las concentraciones están por debajo según el ECA de Aire D.S. 003-2017-MINAM.

Mauricio y Murga (2015) emplearon el modelo Gaussiano para estimar las concentraciones máximas a nivel del suelo de  $PM_{10}$ , CO,  $NO_x$ , y  $SO_2$ , emitidas por las chimeneas de los calderos 17 y 20 de la empresa Cartavio S.A.A., concluyendo que las concentraciones máximas a nivel del suelo son inferiores al ECA del aire, además infieren que, aún existe un gran potencial de deterioro de la calidad del aire de los sectores al norte de Cartavio S.A.A., el cual sería producto de la sinergia de las peores condiciones meteorológicas (atmósfera estable y baja altura de mezclado), que no facilitan la dispersión de contaminantes atmosféricos; y de las peores condiciones de operación por baja eficiencia de combustión, que propicie un mayor ratio de emisión de contaminantes por parte de las chimeneas.

Mosqueira (2018), Utilizó el equipo HANDHELD 3016IAQ, para determinar la concentración de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , generado por el movimiento de tierra, transporte vehicular, transporte de maquinaria pesada y chancado de agregado en la construcción de la carretera Chota-Cochabamba, concluyendo que los valores máximos de la concentración para  $PM_{10}$  es de  $74.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; y para  $PM_{2.5}$  es de  $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  los cuales no sobrepasaron el ECA, pero cuya presencia podría ser peligroso para la salud de la población y el ecosistema.

Briones y Malaver (2015) realizaron una investigación sobre la concentración de material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la cuenca atmosférica de Cajamarca durante los años 2014 y 2015, donde sus resultados menciona que la concentración máxima de  $PM_{10}$  fue de  $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$  inferiores a los establecidos en los Estándares de Calidad Ambiental del Aire, a diferencia de los resultados de  $PM_{2.5}$  cuya concentración mínima y máxima es de  $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, las cuales sobrepasan los ECA del Aire el cual es de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del DS-003-2008-MINAM.

Según la Municipalidad Provincial de Cajamarca, MPC (2010), el monóxido de carbono (CO) es el mayor contaminante de la atmósfera en la ciudad de Cajamarca, con 1250,79 toneladas por año, lo que arroja el 32,81% del total de emisiones de fuentes fijas constituidas por ceramistas dedicados a la producción de utensilios de arcilla (combustión de ceramios con llantas) generan un aporte de más del 60% de partículas sólidas, en comparación con las fuentes áreas, principalmente, ladrilleras, pollerías de carbón, de leña, de llantas y diésel.

Martínez (2018), en su investigación sobre el impacto ambiental causado por la producción de la Calera “J & S Hermanos” en el caserío la Victoria, del Centro Poblado de Otuzco, distrito de Baños del Inca, Cajamarca, obtuvo como resultados que el 53% de muestras tomadas superan los límites máximos permisibles (5 t/km<sup>2</sup>mes) establecidos por la OMS, asimismo las partículas de polvo PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> son las que presentan la concentración más alta con un 36% y 45% respectivamente.

Araujo (2016), en sus resultados muestra que entre los años 2012 y 2013 la concentración máxima de CO es de 81,60 µg/m<sup>3</sup>, para SO<sub>2</sub> es de 16,40 µg/m<sup>3</sup>, del NO<sub>2</sub> es de 4 µg/m<sup>3</sup>, las cuales no sobrepasan los estándares nacionales de calidad ambiental del aire.

Perdíz (2016), aplicó un modelado y simulación de la dispersión de contaminantes en la pluma de una chimenea por el método de dispersión Gaussiano con la aplicación DCPDG donde la altura de chimenea fue 32 metros, la concentración de la emisión fue de 115 g/s, velocidad de salida de 3,8 m/s, elevación de la pluma de 429.67 metros, condición atmosférica moderadamente inestable, y proyectando la concentración a distancias en el eje “X” 5000 m, en el eje “Y” de 2500 m, en el eje “Z” de 5500, obtuvo una concentración del contaminante de 1.87 e<sup>-22</sup> g/s.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Contaminación ambiental**

Santamaría (2000), considera contaminación ambiental a la introducción directa o indirecta en la geósfera, atmósfera, hidrosfera o biosfera de sustancias, materiales o formas de energía, generalmente antropogénicas, que no forman parte o están en concentraciones anormales en dichos ambientes y que producen un efecto perjudicial inmediato o futuro para uno o más componentes de los mismos.

Para cuantificarlos se han elaborado en muchos países estándares que indican los límites a los cuales dichos contaminantes pueden ser tolerados por el ser humano. La más conocida institución reguladora de contaminantes en el mundo es la Environmental Protection Agency (EPA) (Moreano, 2012).

### **2.2.2. La contaminación atmosférica**

La contaminación atmosférica es la impurificación de la atmósfera por inyección y permanencia temporal en ella de materias gaseosas, líquidas o sólidas o radiaciones ajenas a su composición natural o en proporción superior a aquella (González et al., 2011). Existe contaminación cuando en la composición del aire aparecen una o varias sustancias extrañas en determinadas cantidades y durante determinados periodos de tiempo que pueden resultar nocivas para el ser humano, los animales, las plantas o las tierras, así como perturbar el bienestar o el uso de los bienes (OMS, 2006).

Teniendo en cuenta pruebas científicas relativas a la contaminación del aire y sus consecuencias en la salud y múltiples estudios de investigación toxicológicos y epidemiológicos, la Organización Mundial de la Salud (en adelante OMS) actualizó el 2005 las Guías para el O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y PM (de 10 y 2,5 micras de

diámetro), valores que han servido de base en el país, para la actualización y establecimiento de los ECA para el SO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> respectivamente. (MINAM, 2014).

### **2.2.3. Emisiones típicas de las operaciones mineras**

Según el Ministerio de Energía y Minas (MEM) (2007), las actividades mineras generalmente emiten partículas primarias, secundarias y precursores de ozono. Las partículas primarias son emitidas a la atmósfera como partículas sólidas y se componen de: material particulado total (Partículas Totales en Suspensión - PTS); material particulado inhalable (i.e. con un diámetro aerodinámico menor a 10 µm) (PM<sub>10</sub>); material particulado respirable (i.e. con un diámetro aerodinámico menor a 2,5 µm) (PM<sub>2.5</sub>); y metales traza. Las partículas secundarias y los precursores de ozono se definen como aquellas especies que no se emiten ni como material particulado ni como ozono, pero sufren procesos químicos dentro de la atmósfera para convertirse en uno de ellos. Las partículas secundarias y los precursores de ozono contribuyen con el smog e incluyen: óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>); dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); aerosoles ácidos (e.g. sulfatos, nitratos, cloruros); hidrocarburos totales (expresados como metano (CH<sub>4</sub>)); amoníaco (NH<sub>3</sub>); compuestos orgánicos volátiles (VOCs); y compuestos orgánicos semi volátiles (SVOCs). Muchos de estos contaminantes no están regulados en el Perú para el sector minero, pero sí en otros países, ya que poseen el potencial de generar impactos en la salud humana, debiendo considerarse como tóxicos.

### **2.2.4. Minería no metálica**

La minería no metálica comprende las actividades de extracción de recursos minerales que, luego de un adecuado tratamiento, se transforman en productos

aplicables en diversos usos industriales y agrícolas, gracias a sus propiedades físicas y químicas (MEM, 2005). La minería no metálica, el año 2017 Perú produjo en total 47,8 millones de toneladas de mineral no metálico, siendo los más extraídos, la caliza y la dolomita. Es importante destacar que las principales regiones de extracción son Junín, Lima y Cajamarca, desplazando, esta última a Arequipa como la tercera Región con mayor producción de dichos minerales. (MEM, 2017).

#### **2.2.5. Óxido de calcio (Cal)**

Es un material obtenido de la calcinación de la roca caliza que, al desprender anhídrido carbónico, se transforma en óxido de calcio. La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido (Sinaluisa, 2013). Es un producto industrial que en el Perú es usado en diversas industrias, el mayor consumo se da en la minería donde se usa como neutralizador de residuos ácidos, para mantener ambientes alcalinos en celdas de flotación y en los pads de lixiviación (Carreño y Simoni, 2007).

#### **2.2.6. Proceso de obtención del óxido de calcio**

Para Shan (2015), la producción de óxido de calcio (cal), generalmente, se procesa en cinco pasos básicos y se describe de la siguiente manera: la roca caliza se extrae por primera vez; las rocas de cantera se transfieren luego a la unidad de trituración para dimensionar las rocas para la etapa de calcinación; las rocas de tamaño correcto se alimentan al horno y se calientan.

Cuando a una caliza más o menos pura la sometemos a una cocción (900-1000°C) y se verifica la siguiente reacción:  $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$ . El carbonato cálcico  $\text{CO}_3\text{Ca}$  se descompone, dando anhídrido carbónico  $\text{CO}_2$ , que es gaseoso y se desprende junto con los humos del combustible, y óxido de calcio  $\text{CaO}$ . El proceso



implica entonces, un aumento de temperatura desde la temperatura ambiental hasta la temperatura de calcinación; después, se mantiene constante esta temperatura durante el lapso necesario para que la descomposición de toda la caliza se lleve a cabo (Martínez, 2014); La cal viva se muele, se hidrata con agua y se clasifica para aumentar la calidad del producto; y el producto finalmente se empaqueta y almacena (Shan et al., 2015).

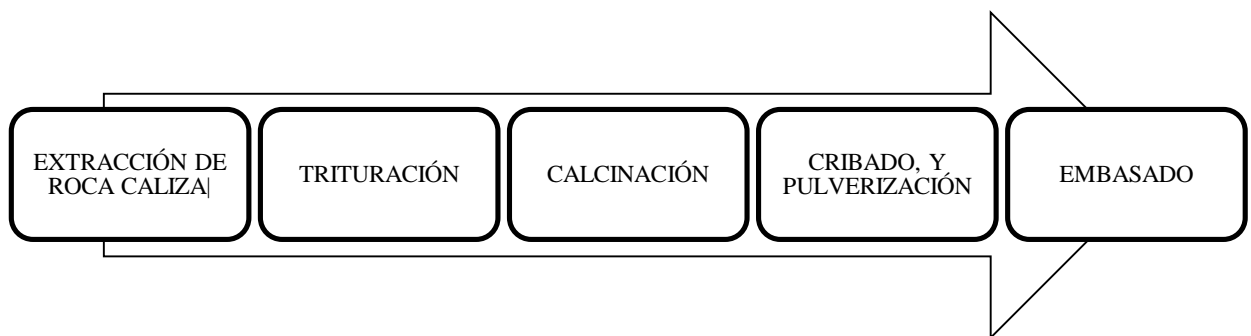


Figura 9. Proceso de obtención del óxido de calcio

### 2.2.7. Medición de contaminantes del aire

Las concentraciones de contaminantes en el aire se deben medir en lugares sometidos a vigilancia que sean representativos de la exposición de la población. Pueden ser más elevadas en la proximidad de fuentes específicas de contaminación del aire, como carreteras, centrales eléctricas y fuentes estacionarias de gran tamaño, de manera que la población que vive en esas condiciones puede requerir medidas especiales para poner los niveles de contaminación por debajo de los valores guía (OMS, 2006).

Inche, (2008) menciona que la medición de los contaminantes puede realizarse mediante técnicas manuales o automáticas, además la elección del método específico de análisis depende de un número de factores, siendo los más importantes las características químicas del contaminante y su estado físico-sólido, líquido o gaseoso. Los métodos a utilizar son: La volumetría donde la

cantidad de producto detectado se deduce del volumen de la disolución que se ha consumido en una reacción; la gravimetría, se refiere a la medición del peso de la cantidad del material particulado en un determinado volumen de aire; La Absorción Atómica, se usa para medir el plomo; la espectrofotometría, donde colorantes y productos químicos se combinan con una solución que contiene SO<sub>2</sub>. El color de la solución da lugar a diferentes cantidades de luz absorbida la cual es medida con un espectrofotómetro, indicando la cantidad presente de dióxido de azufre; la quimiluminiscencia de fase gaseosa; para medir el ozono; ionización de llama, donde se quema la muestra de aire gaseoso con una llama de hidrógeno. El número de iones o electrones que se forma es proporcional al número de átomos de carbono que se encuentra en la muestra y se cuenta electrónicamente.

#### **2.2.8. Concentración de los contaminantes en el aire**

Inche (2008) nos dice que la concentración de los contaminantes atmosféricos suele expresarse en 3 tipos de unidades: la primera, empleada para contaminantes gaseosos, es las partes por millón en volumen (ppm). Algunas veces, las concentraciones se expresan también en partes por mil millones (ppb). La segunda unidad de concentración está basada en el peso por unidad de volumen de aire expresada en microgramos por metro cúbico y cuyo símbolo es  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se utiliza esta medida para las partículas y también para los gases. La tercera unidad, poco usada, es la de miligramos por metro cúbico y el símbolo es  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

#### **2.2.9. Material particulado (PM)**

Según la EPA (2017), PM significa materia particulada, el término se utiliza para una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire.

Las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$  tienden a formar suspensiones mecánicamente estables en el aire, permaneciendo en la atmósfera durante prolongados períodos de tiempo, pudiendo ser trasladados a grandes distancias por la acción del viento (Carciner, 2007).

El material particulado incluye entonces,  $\text{PM}_{10}$  que son partículas inhalables, con diámetros generalmente de 10 micrómetros y más pequeños; y  $\text{PM}_{2.5}$  que abarcan partículas finas inhalables, con diámetros que generalmente son 2.5 micrómetros y más pequeños. Estos provienen en su mayoría del uso de combustibles fósiles que contienen azufre y de los oxidantes fotoquímicos formados en la atmósfera por reacciones químicas complejas entre los HC, óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y CO. Las fuentes móviles contribuyen con un 50% o más en las concentraciones de material particulado en las áreas urbanas (MINAM, 2014).

El material particulado, tiene efecto sobre los ecosistemas, las partículas atmosféricas alteran la cantidad de radiación solar transmitida a través de la atmósfera terrestre. La absorción de radiación solar por partículas atmosféricas junto a la captura de radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre por parte de ciertos gases, intensifica el calentamiento de la superficie terrestre y la baja atmósfera, es el conocido efecto invernadero. Los efectos producidos por el material particulado, incluye la alteración de la cantidad de radiación ultravioleta procedente del Sol que llega a alcanzar la superficie terrestre lo que puede ejercer efectos en la salud humana, la biota y otros componentes ambientales (Sánchez de la Campa & De la Rosa, 2009).

#### **2.2.10. Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas incoloro e inoloro que se encuentra en pequeñísimas partes en la composición natural de la atmósfera (menor a

0.00066%). Sus principales fuentes de emisión son los incendios y la combustión de hidrocarburos y sustancias que contienen carbono, tales como gasolina y diesel. Sin embargo, otras actividades humanas también han aumentado la producción de este gas, por lo que en la actualidad representa un peligro para el ambiente y la salud humana (Boubel & Fox, 1994).

Se produce por la oxidación incompleta del carbono en el proceso de combustión (Moragues 2014). En concentraciones elevadas puede ser letal, donde la fuente antropogénica del CO es la combustión incompleta de combustibles (gasolina, gas, carbón, madera, etc). En este sentido, para tener menos emisiones de CO es necesario tener procesos de combustión más completos, lo que requiere de una cantidad adecuada de oxígeno; cuando este es insuficiente, se forma del CO (USEPA, 1995).

CRANA (2018), Centro de Recursos Ambientales de Navarra, nos dice que el CO es el contaminante del aire más abundante y ampliamente distribuido de los que se encuentran en la capa inferior de la atmósfera, denominada troposfera, su principal origen natural es la oxidación del CH<sub>4</sub> y, puesto que todo el metano de la atmósfera se produce por descomposición anaerobia de la materia orgánica, cabe afirmar que estos procesos constituyen una fuente natural de CO. El gas generador se forma por la combustión del carbón con oxígeno a elevadas temperaturas, la reacción es:

$$\text{O}_2 + 2 \text{C} \leftrightarrow 2 \text{CO}.$$

#### **2.2.11. Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

El azufre puede ser conducido muy rápidamente a la atmósfera en estado oxidado, en forma de SO<sub>2</sub>, originado por combustión de carburantes fósiles como es el caso del carbón el cual puede tener hasta un 3% de azufre llegando a ser de esta manera una fuente de contaminación del aire (Spedding, 2012).

El dióxido de azufre es un gas no inflamable que consiste en un átomo de azufre y dos de oxígeno. Es uno de los contaminantes primarios mayoritarios en la atmósfera donde se combina fácilmente con el agua y da lugar al ácido sulfúrico (lluvia ácida). Las erupciones volcánicas representan una fuente natural de SO<sub>2</sub> en la atmósfera; sin embargo, el problema real asociado con la gestación de ácido sulfúrico es la producción antropogénica originada en la ignición de combustibles fósiles (Galvan, 2009). El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro con un olor penetrante que se genera con la combustión de fósiles (carbón y petróleo). La principal fuente antropogénica del SO<sub>2</sub> es la combustión de fósiles que contienen azufre usados para la calefacción doméstica, la generación de electricidad y los vehículos a motor (OMS, 2006). Se genera por oxidación del azufre contenido en los combustibles al quemarse estos (Moragues, 2014).

Tanto el carbón como el petróleo que se queman contienen azufre como impureza, cuya oxidación produce este dióxido de azufre:  $S + O_2 \rightarrow SO_2$ .

El SO<sub>2</sub> es de una sustancia reductora que con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad se convierte en trióxido de azufre. La velocidad de esta reacción en condiciones normales es baja (CRANA, 2018).

#### **2.2.12. Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

El nitrógeno es el elemento más común del aire que respiramos (78 %), y conforma un grupo de óxidos como el óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>); el primero es relativamente inofensivo, pero el segundo puede causar efectos adversos en la salud y bienestar (MINAM 2014).

El NO es oxidado formando dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ( $2NO + O_2 \rightarrow 2 NO_2$ ) El NO<sub>2</sub> no sólo es tóxico, sino también corrosivo y altamente oxidante. Pequeña cantidad de NO<sub>2</sub>, usualmente menor que décimas por ciento, son formadas

directamente durante la combustión a temperatura elevada. Menos del 10 % del  $\text{NO}_2$  se forma por oxidación directa del  $\text{NO}$  en el corto intervalo entre la eyección de  $\text{NO}$  como un producto de la combustión y el tiempo en que este diluye su concentración debajo de 1 ppm. La mayoría del  $\text{NO}_2$  que se encuentra en la atmósfera resulta por la oxidación del  $\text{NO}$  en presencia de luz solar, ozono e hidrocarburos. Aún en la ausencia de luz solar, se continúa formando el  $\text{NO}_2$  a partir del  $\text{NO}$  por acción del ozono, hasta que el aporte del  $\text{O}_3$  se agota (Moragues 2014).

La principal fuente antropogénica es la quema de combustibles fósiles. En presencia de hidrocarburos y luz ultravioleta se convierte, mediante reacciones fotoquímicas, en  $\text{NO}_2$  ( $\text{O}_3$ ) (Sbarato, 2006), siendo la principal fuente de ozono troposférico (precursor de  $\text{O}_3$ ) y de aerosoles de nitratos que constituyen una fracción importante de la masa de Material Particulado del aire. Al igual que el  $\text{SO}_2$  contribuye en la formación de la lluvia ácida (ácido nítrico), con los subsecuentes efectos adversos para el ambiente, vida animal e infraestructura (MINAM 2014).

### **2.2.13. Dispersión de contaminantes**

Las emisiones antropogénicas están alterando la dinámica natural de la atmósfera y aunque es la troposfera, donde se dispersan y emiten la mayoría de los contaminantes, es la capa más afectada, también otras capas superiores están siendo alteradas (Gallego et al., 2012). Los contaminantes introducidos en el aire, sufren procesos de autodepuración debido a fenómenos de transporte, mezcla, transformación química o física y depósito; variando las características y concentración del efluente gaseoso con el tiempo y el espacio. (Gonzales et al. 2012 p 103). Los factores meteorológicos, topográficos y geográficos inciden de

una forma decisiva en los complejos procesos de dispersión de los contaminantes atmosféricos. Los vientos aumentan el efecto de barrido, reduciendo la contaminación a nivel del suelo en la zona afectada por la emisión (Gallego et al., 2012).

La clasificación (Gifford, 1961; Turner, 1970), modificada de Pasquill (1961), es uno de los indicadores y criterios de estabilidad atmosférica basados en parámetros meteorológicos (Pradana, 2012).

**Tabla 1.** *Clases de estabilidad atmosférica (Turner, 1970)*

Velocidad del viento a 10 m (m/s)	Día			Noche	
	Radiación solar (cal.cm <sup>2</sup> .h <sup>-1</sup> )			Nubosidad	
	Fuerte <sup>a</sup>	Moderada <sup>b</sup>	Débil <sup>c</sup>	> 4/8 (en su mayoría nublado)	< 3/8 (en su mayoría despejado)
< 2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

A: muy inestable. B: moderadamente inestable. C: ligeramente inestable. D: neutra. E: ligeramente estable.

F: estable.

a Corresponde a un día de verano claro con una altura del sol de 60° sobre el horizonte o más.

b Corresponde a un día de verano con algunas nubes, o un día de verano claro con una altura del sol de 35 a 60° sobre el horizonte.

c Corresponde a un atardecer, o a un día de verano nublado, o un día de verano claro con una altura del sol de 15 a 35° sobre el horizonte.

d La nubosidad se define como fracción del cielo cubierto por las nubes.

#### 2.2.14. Modelo de dispersión gaussiano

Los modelos gaussianos se basan en hipótesis relativamente sencillas de acuerdo con la naturaleza estocástica de la turbulencia y la dispersión del contaminante. Estos modelos de difusión son válidos sólo en el límite de largos tiempos de difusión y en condiciones estacionarias y homogéneas. Se presuponen para su desarrollo condiciones meteorológicas estacionarias, una turbulencia homogénea y vientos constantes. Asumen que la distribución del contaminante dentro de la

emisión sigue una distribución gaussiana (campana de Gauss). El modelo de Pasquill-Gifford o de penacho gaussiano se basa en una expresión tridimensional sencilla que supone que la distribución de las concentraciones de contaminantes, según las hipótesis anteriores se ajusta a una función de distribución normal (gaussiana) con la máxima concentración localizada en el eje del penacho (Gallego et al., 2012, p. 125).

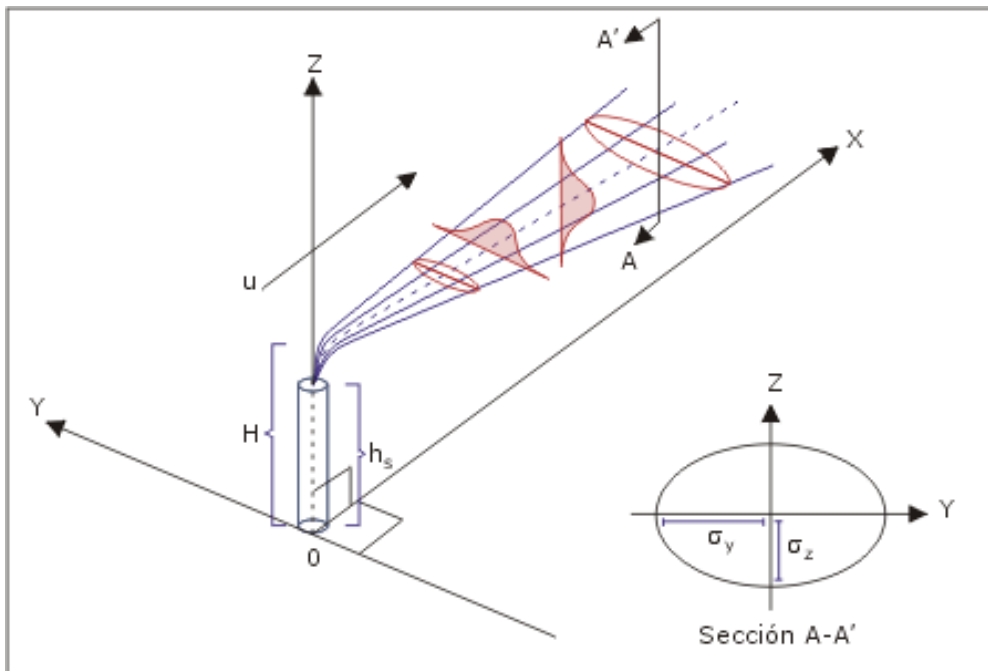


Figura 10. Coordenadas espaciales en el modelo gaussiano de Pasquill-Gifford

Fuente: Gallego et al., 2012.

Para la investigación se utilizó la siguiente Ecuación del modelo de difusión Gaussiano

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \left[ \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left[ \exp\left(-\frac{(z - H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$



$C(x,y,z)$  es la concentración del contaminante en un punto dado.

$x, y, z$ , son las coordenadas, en metros, siendo  $x$  la dirección del viento.

El origen de coordenadas se supone en el suelo bajo la fuente.

$Q$  es el caudal de la emisión en  $g \cdot s^{-1}$

$\sigma_y, \sigma_z$ , son las desviaciones típicas de la distribución de contaminantes según los tres ejes (longitudinal, transversal y vertical) expresados en metros.

$u$  es la velocidad del viento en  $m \cdot s^{-1}$

**Tabla 2.** *Coefficientes de dispersión en función de la distancia a la fuente*

Distancia $x$ (km)	Clase de estabilidad y $\sigma_y$ (m)						Clase de estabilidad y $\sigma_z$ (m)					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0,2	51	37	25	16	12	8	29	20	14	9	6	4
0,4	94	69	46	30	22	15	84	40	26	15	11	7
0,6	135	99	66	43	32	22	173	63	38	21	15	9
0,8	174	128	85	56	41	28	295	86	50	27	18	12
1	213	156	104	68	50	34	450	110	61	31	22	14
2	396	290	193	126	94	63	1953	234	115	51	34	22
4	736	539	359	235	174	117		498	216	78	51	32
8	1367	1001	667	436	324	218		1063	406	117	70	42
16	2540	1860	1240	811	602	405		2274	763	173	95	55
20	3101	2271	1514	990	735	495		2904	934	196	104	59

Fuente: Pasquill (1961)

### 2.2.15. Guías y normas e índice de calidad de aire

Se entiende por guía de calidad del aire al valor estimado del nivel de concentración de un contaminante del aire al cual pueden estar expuestos los seres humanos durante un tiempo determinado sin riesgos apreciables para la salud pero que no se encuentran respaldados por normas legales. Mientras que la norma de calidad del aire trata de un instrumento legal que establece el límite máximo

permisible de concentración de un contaminante del aire durante un tiempo promedio de muestreo determinado, definido con el propósito de proteger la salud y el ambiente (Sbarato, 2006). El índice de calidad ambiental es una herramienta usada por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) y otras agencias para proveer al público información oportuna y fácil de comprender sobre la calidad del aire local. También indica si los niveles de polución son perjudiciales para la salud e informa al público si la condición del aire debe ser preocupante a su salud. (Bermúdez et al., 2010).

#### **2.2.16. Marco legal en el Perú**

La Ley General del Ambiente, Ley N° 28611, establece en el Art. 118 de la Protección de la calidad del aire, que las autoridades públicas, adoptan medidas para la prevención, vigilancia y control ambiental y epidemiológico, a fin de asegurar la conservación, mejoramiento y recuperación de la calidad del aire.

Es importante señalar el numeral 31.1 del artículo 31, de la ley, define al Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua y suelo, en condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente; (MINAM, 2017).

El Decreto supremo N°003-2017-MINAM, aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire; que son un referente para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental a cargo de los titulares de actividades productivas y extractivas.

**Tabla 3.** *Estándares de calidad ambiental para aire.*

<b>Parámetros</b>	<b>Período</b>	<b>Valor (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Criterios de Evaluación</b>	<b>Método de Análisis</b>
Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM <sub>2,5</sub> )	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación Inercial/filtración
	Anual	25	Media aritmética anual	(Gravimetría)
Material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM <sub>10</sub> )	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Separación Inercial/filtración
	Anual	50	Media aritmética anual	(Gravimetría)
Monóxido de Carbono (CO)	8 horas	10000	Media aritmética móvil	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método Automático)
	1 hora	30000	NE más de 1 vez/año	

Fuente: MINAM 2017

**2.2.17. Niveles de Estados de Alerta**

Mediante DS 009-2003-SA, se aprobó el Reglamento sobre los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire.

**Tabla 4.** Nivel de Estados e Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire

Tipos de Alerta	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO(µg/m <sup>3</sup> )
De cuidado	>250 Prom. Aritmético de 24 h	>500 Prom. Móvil de 3 h consecutivas	>15000 Prom. Móvil de 8 h
De peligro	>350 Prom. Aritmético de 24 h	>1500 Prom. Móvil de 3 h	>20000 Prom. Móvil de 8 h
De emergencia	>420 Prom. Aritmético de 24 h	>2500 Prom. Móvil de 3 h	>35000 Prom. Móvil de 8 h

Fuente: DIGESA 2006

### 2.2.18. 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 son aplicables únicamente a fuentes puntuales.

**Tabla 5.** Niveles Máximos Permisibles para Emisiones Gaseosas

Parámetro	Valor en cualquier momento (mg/m <sup>3</sup> )
Material particulado total	100

Fuente: MINAM 1996

### 2.2.19. Estándares internacionales

Existe una gran diversidad de estándares de calidad de aire y emisiones en las diferentes jurisdicciones. Además, existen estándares emitidos por entidades de nivel supranacional, tales como el Grupo del Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los estándares han sido diseñados para alcanzar una

calidad del aire que proteja la salud pública en diversos contextos y como tal no reflejan necesariamente los estándares de calidad del aire ambiental de los países en forma individual. Únicamente la Corporación Financiera Internacional (Grupo del Banco Mundial) define límites de emisión para las actividades minero-metalúrgicas.

### **Organización Mundial de la Salud (OMS)**

La Organización Mundial de la Salud (OMS) es una agencia especializada de las Naciones Unidas que funciona como la autoridad guía y de coordinación para los asuntos de salud internacional y salud pública.

En 2006, la OMS publicó las Guías de Calidad del Aire de la OMS para Material Particulado, Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Dióxido de Azufre – Actualización Global 2005 (OMS, 2006).

**Tabla 6. Resumen de los Estándares de Calidad de Aire Ambiental Internacionales**

	Monóxido de Carbono (CO)			Material Particulado						
				Totales en Suspensión (PTS)		PM <sub>10</sub> (diámetro nominal <10 µm)		PM <sub>2.5</sub> (diámetro nominal < 2.5 µm)		
	Máximo promedio de 1/2 -h	Máximo promedio de 1-h	Máximo promedio de 8-h	Máximo promedio de 24 h	Media Aritmética anual	Media Geométrica anual	Máximo promedio de 24-h	Media Aritm anual	Máximo promedio de 24-h	Media Aritm anual
	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>
Guías del banco Mundial										
<b>Guías Ambientales Generales</b>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	70	50	-----	-----
<b>Valores de Umbral</b>	-----	-----	-----	230	90	-----	125	50	-----	-----
<b>Calidad de Aire Moderadamente Degradada</b>	-----	-----	-----	-----	80	-----	150	50	-----	-----
<b>Minería y Procesamiento - Tajo Abierto</b>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	500	100	-----	-----
<b>Minería y Procesamiento - Subterránea</b>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	500	100	-----	-----
Organización Mundial de la Salud										
<b>Guías de Calidad del Aire para Europa</b>	60 000	30 000	10 000	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
<b>Guía</b>	-----	-----	-----	-----	-----	-----	50	20	25	10
Criterios Federales Canadienses										
<b>Deseable</b>	-----	15 000	8 000	-----	-----	60	-----	-----	-----	-----
<b>Aceptable</b>	-----	35 000	15 000	120	-----	70	50(1)	-----	-----	-----
<b>Tolerable</b>	-----	-----	20 000	400	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fuente DEGAAM 2007

**Tabla 6. Resumen de los Estándares de Calidad de Aire Ambiental Internacionales (continuación)**

	DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO <sub>2</sub> )				DIÓXIDO DE AZUFRE (SO <sub>2</sub> )			
	Máximo promedio de 1-h	Máximo promedio de 24 h	Máximo promedio de 1/2-h	Máximo promedio de 1 h	Máximo promedio de 1/2 -h	Máximo promedio de 24 h	Media Aritmética anual	
	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	
Guías del banco Mundial								
Guías Ambientales Generales	-----	150	-----	-----	-----	-----	125	50
Valores de Umbral	400	150	100	350	350	-----	150	80
Calidad de Aire Moderadamente Degradada	-----	150	100	-----	-----	-----	150	80
Minería y Precesamiento - Tajo Abierto	-----	200	100	500	500	-----	-----	100
Minería y Precesamiento - Subterránea	-----	200	100	500	500	-----	-----	100
Organización Mundial de la Salud								
Guías de Calidad del Aire	200	-----	40	-----	-----	500	125	50
Guías de Calidad del Aire para Europa	200	-----	40	-----	-----	500	125	50
Guía	200	-----	40	-----	-----	500	20	-----
Criterios Federales Canadienses								
Deseable	-----	-----	60	450	-----	-----	150	30
Aceptable	400	200	100	900	-----	-----	300	60
Tolerable	1000	300	-----	-----	-----	-----	800	-----

Fuente: DGAAM 2007

## 2.2.20. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

**Tabla 7.** *National Ambient Air Quality Standards (Normas nacionales de calidad del aire ambiente)*

Contaminante	Primaria / secundaria	Tiempo promedio	Nivel	Forma
Monóxido de carbono (CO)	primario	8 horas 1 hora	9 ppm 35 ppm	No debe excederse más de una vez al año.
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	primario	1 hora	100 ppb	98 percentil de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediado durante 3 años
Material particulado (PM)	primaria y secundaria	1 año	53 ppb	Media anual
	PM <sub>2.5</sub> primario	1 año	12,0 µg / m <sup>3</sup>	media anual, promedio de 3 años
	secundario	1 año	15,0 µg / m <sup>3</sup>	media anual, promedio de 3 años
	primaria y secundaria	24 horas	35 µg / m <sup>3</sup>	Percentil 98, promedio de 3 años
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	PM <sub>10</sub> primaria y secundaria	24 horas	150 µg / m <sup>3</sup>	No debe excederse más de una vez por año en promedio durante 3 años
	primario	1 hora	75 ppb	99 percentil de concentraciones máximas diarias de 1 hora, promediado durante 3 años
	secundario	3 horas	0,5 ppm	No debe excederse más de una vez al año.

Fuente: USEPA 2012



# CAPÍTULO III

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Ubicación del trabajo de investigación

La investigación fue realizada en la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana, distrito de Baños del Inca, ubicada a 12 km al noreste de la ciudad de Cajamarca, a 2760 msnm, con temperatura promedio anual de 15 °C, precipitación promedio anual que va de 600 mm a 700 mm, humedad relativa promedio anual de 67%. Geográficamente se localiza en las coordenada centroide UTM WGS 84: Este: 782285, Norte: 9208953. La figura 11 muestra la ubicación de la zona de investigación (Plano 01)

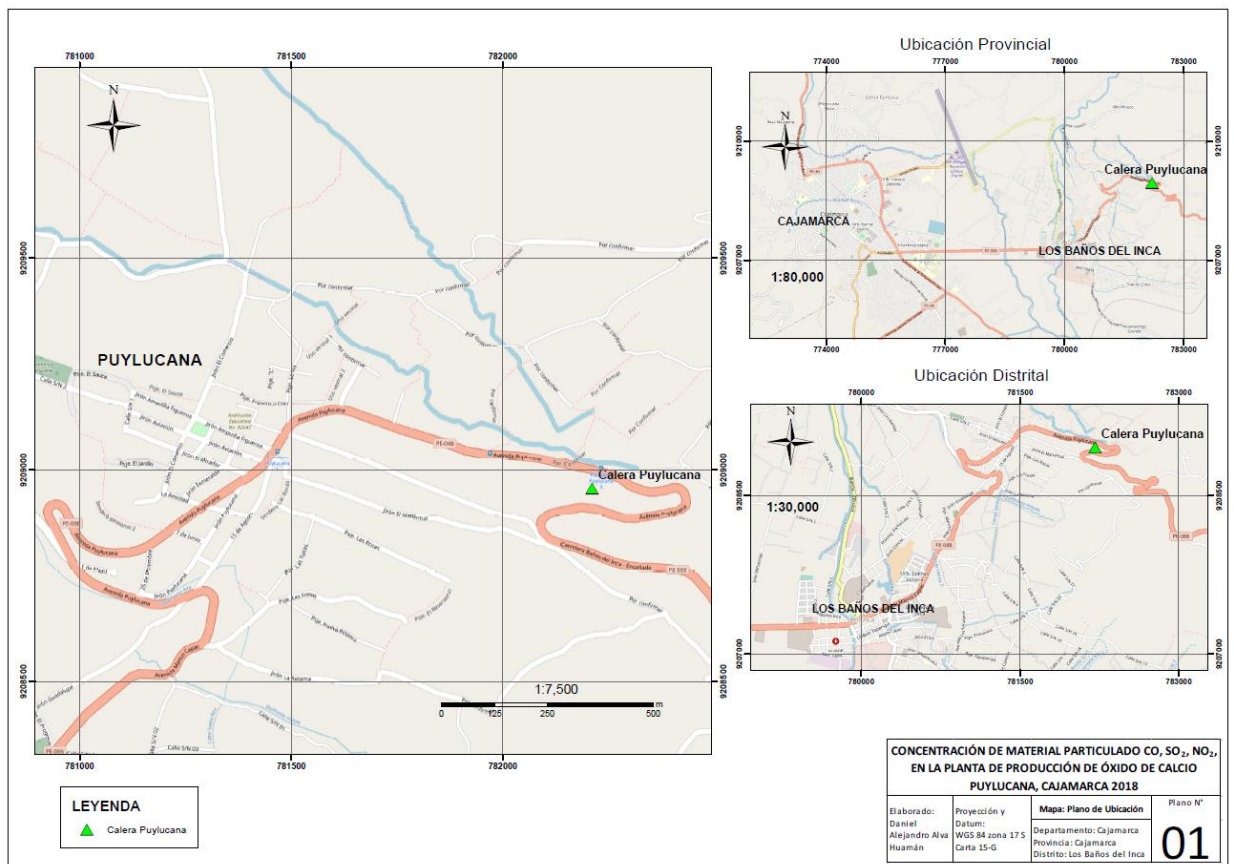


Figura 11. Mapa de ubicación de la calera PuyLucana (Plano 01)

### 3.2. Descripción de la zona de investigación

En la zona se pueden encontrar unidades geomorfológicas como colinas, y lomadas, con pendientes entre fuertes y moderadas, las cuales han sido formadas por la actividad tectónica de subducción que dio origen al levantamiento de la cordillera de los Andes, generando un esfuerzo compresivo a gran escala, deformando corteza peruana. Que es modelada por acción del viento, lluvia, etc. La figura 12 muestra las pendientes en la zona de investigación, para mayor detalle ver Plano 02.

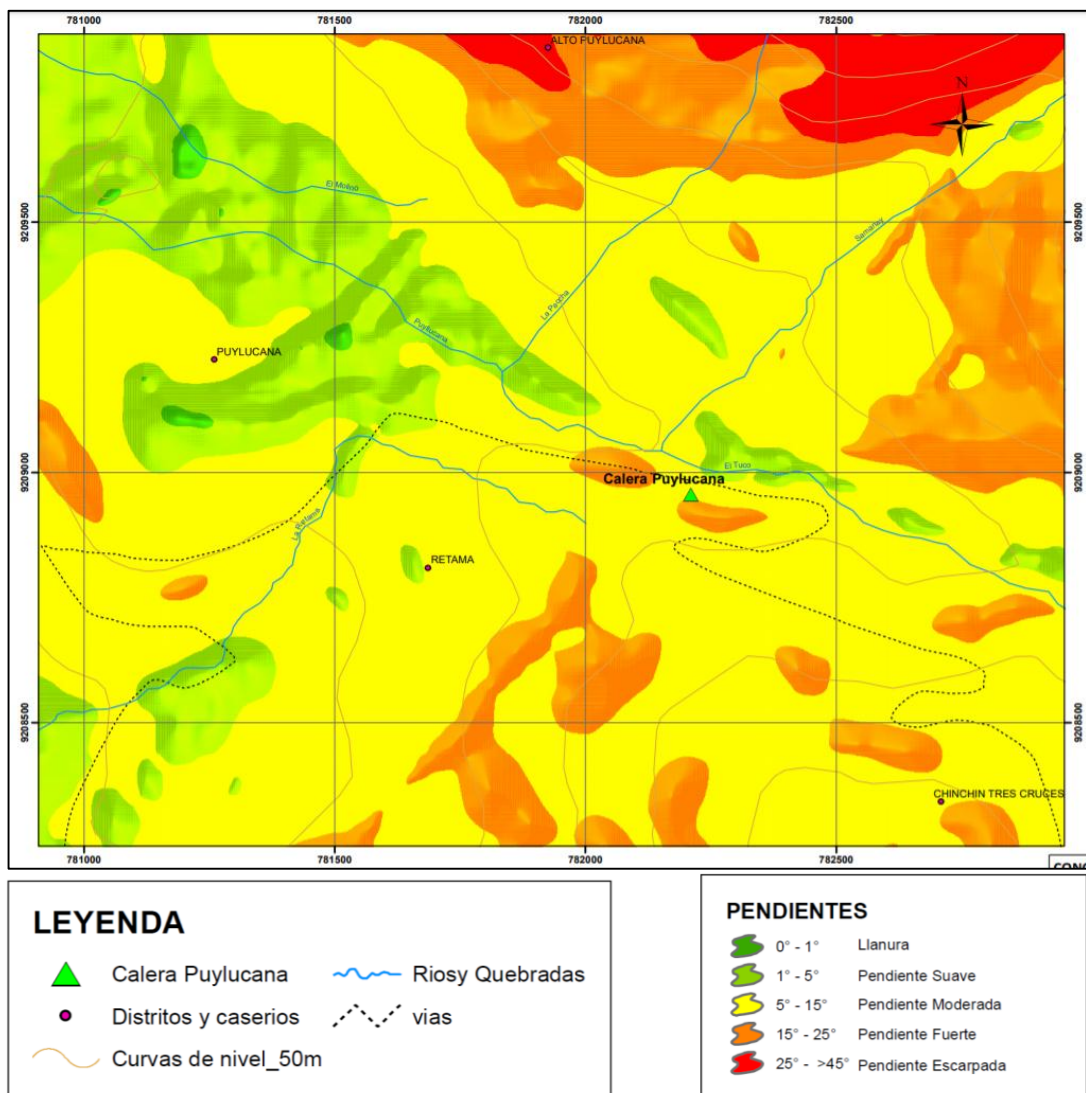


Figura 12. Pendientes de la zona de investigación (Plano 02).

Geológicamente el entorno de la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana está conformada por la formación Farrat (Ki- f), la cual consiste de areniscas blancas de grano medio a grueso, tiene un grosor promedio de 500 m (Cruzado 2011); Formación Inca (ki-in) conformada por areniscas calcáreas, lutitas ferruginosas, limolitas y lutitas; Formación Chúlec (ki-chu) conformada por calizas arenosas nodulares, lutitas calcáreas y margas fosilíferas amarillentas, de mar poco profundo; Cabe mencionar que la caliza utilizada para la producción de cal pertenece a la formación Cajamarca la cual es extraída de la zona de Otuzco. La figura 13 (Plano 03), presenta las formaciones geológicas del entorno de la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana.

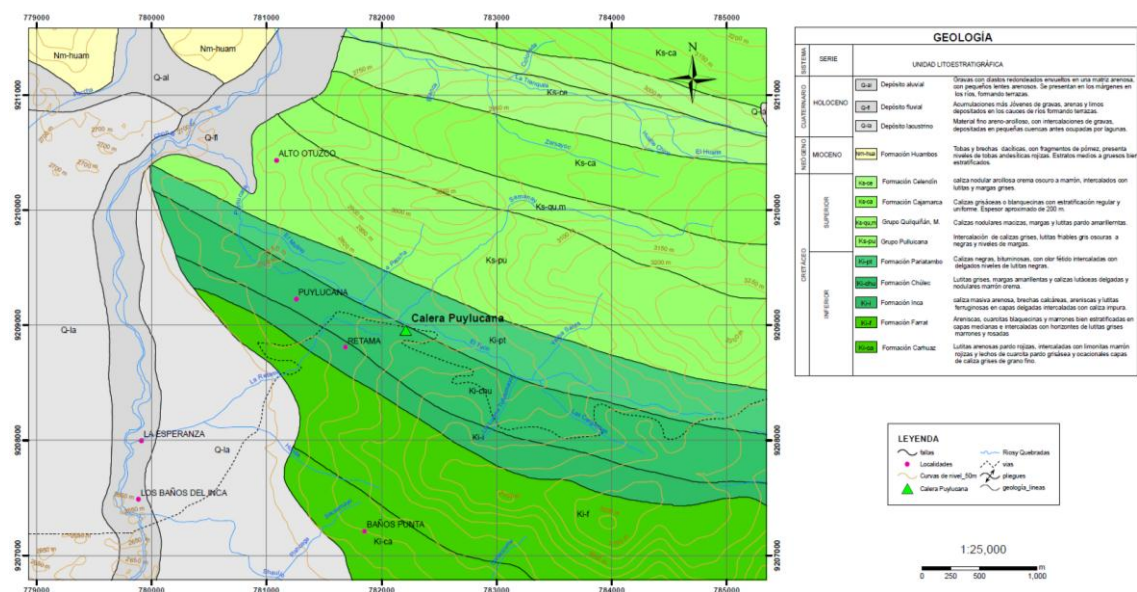


Figura 13. Formaciones Geológicas del entorno de la planta de producción de cal PuyLucana

En cuanto a la clasificación de climas de Werren Thornthwaite, la zona presenta dos estaciones características: Lluviosa: de diciembre a marzo, Seca: de abril a noviembre, con sus respectivas etapas transaccionales, (SENAMHI, 2018)

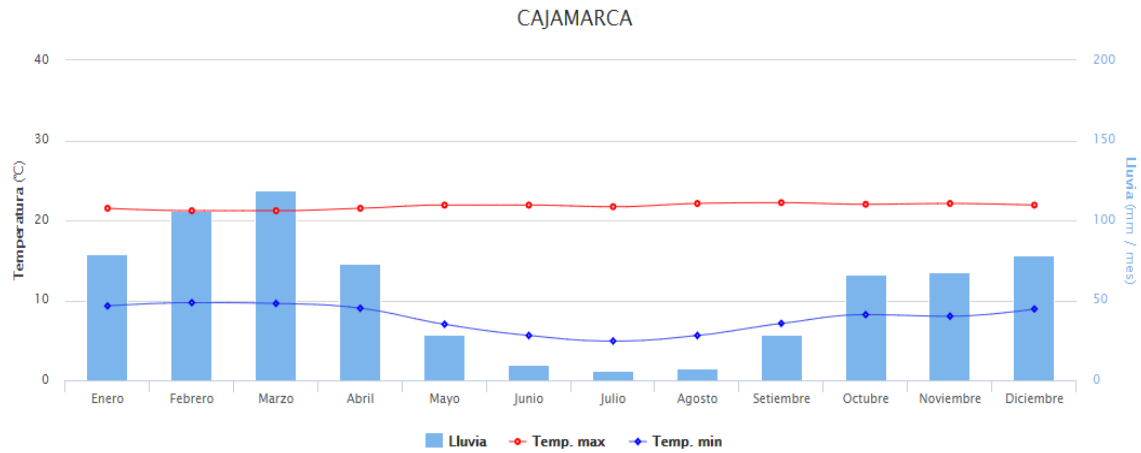


Figura 14. Promedio de temperatura normal °C para Cajamarca

Fuente SENAMHI, 2018

En la figura 15 se observa que la parte más despejada del año en Cajamarca comienza aproximadamente el 1 de mayo; y se termina aproximadamente el 28 de septiembre

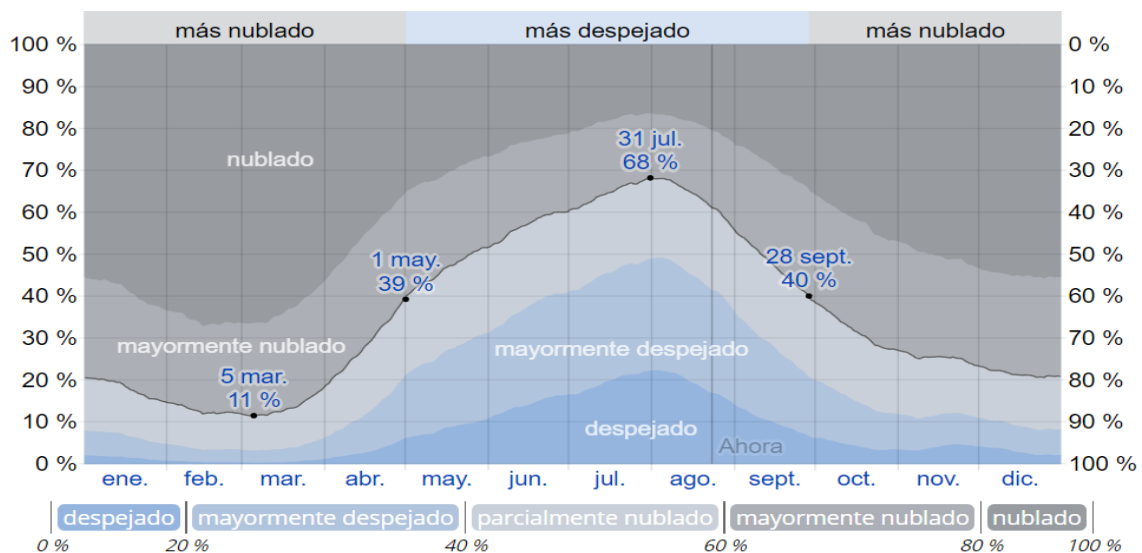


Figura 15. Categorías y porcentaje de nubosidad por mes en Cajamarca

Fuente: WEATHER SPARK 2018

En la figura 16 notamos que la temporada mojada dura del 6 de octubre al 29 de abril; y la temporada seca dura del 29 de abril al 6 de octubre.

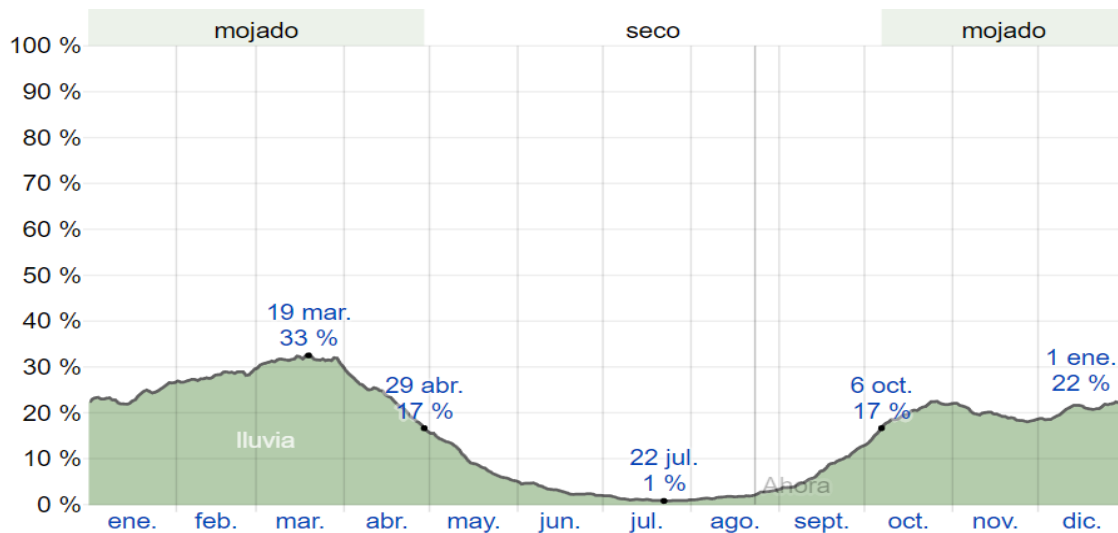


Figura 16. Probabilidad diaria de precipitación en Cajamarca

Fuente: WEATHER SPARK 2018

En la figura 17, se muestra el porcentaje de horas en las que la dirección media del viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales, excluidas las horas en que la velocidad media del viento es menos de 1,6 km/h, para el mes de julio la dirección predominante proviene del Este.

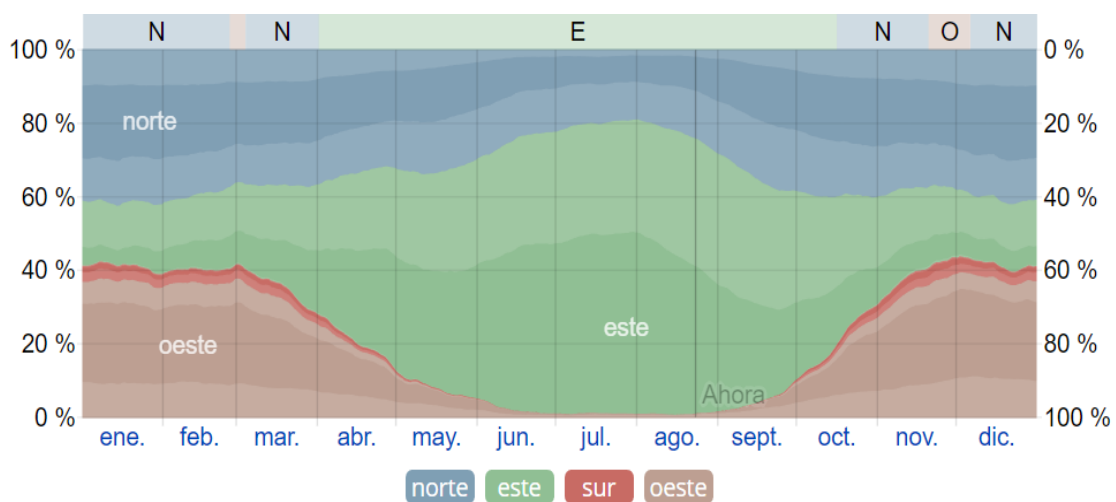


Figura 17. Porcentaje de dirección predominante del viento

Fuente: WEATHER SPARK 2018

### 3.2.1. Punto de muestreo

El punto de muestreo se ubicó en boca de hornos (P1), Coordenadas UTM, WGS 84

P1: Este 782296; Norte: 9208949 (Anexo)

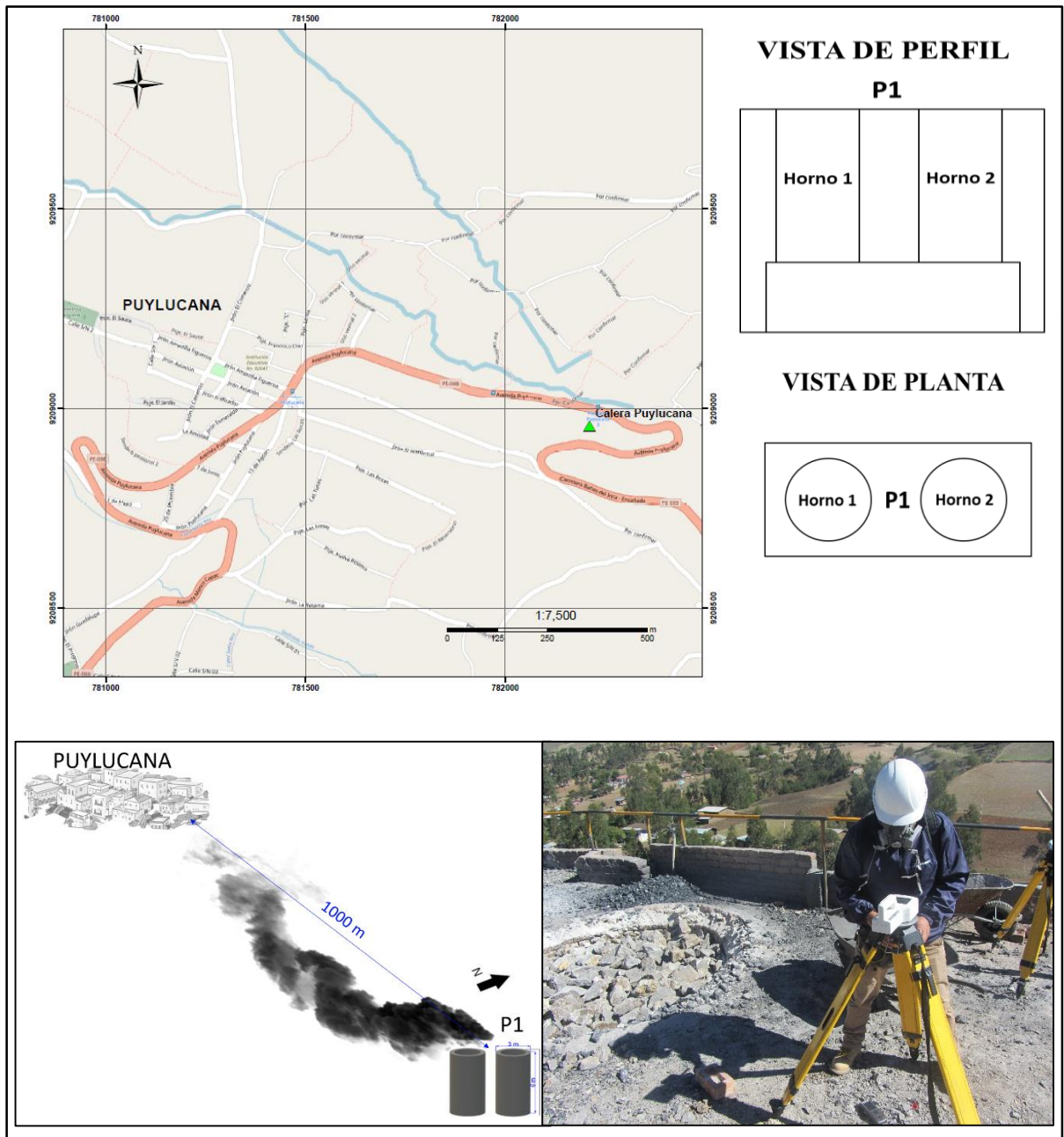


Figura 18. Ubicación del punto de muestreo.

### **3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

El presente estudio se desarrolló en 2 fases:

#### **3.3.1. Fase de campo**

##### **a) Ubicación de los puntos de muestreo**

Se identificó el punto para la toma de muestras (P1) y se estacionaron los equipos especializados en el punto de emisión (boca de hornos) de la planta de producción de óxido de calcio Puyucana (Figura 18).

##### **b) Medición de las emisiones atmosféricas**

Se realizó una medición continua durante 08 horas de 8:00 am a 4:00 pm, (tiempo de calcinación) con registro de información cada cinco minutos, en los días 13 de julio para el material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  y monóxido de carbono; 14 de julio para el Dióxido de azufre, y 15 de julio para el dióxido de nitrógeno, en el año 2018.

#### **3.3.2. Fase de gabinete**

La información obtenida se procesó para realizar la comparación con los estándares de calidad ambiental.

### **3.4. Equipos, materiales e insumos**

#### **3.4.1. Equipos**

- **Sensor de gases:**

Marca Aeroqual, modelo S200 para los gases  $SO_2$ ,  $CO$  y  $NO_2$ .

Los componentes principales de este modelo son el equipo medidor y los tres cabezales o sensores de gas para el muestreo de los diferentes gases como el Monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno.



Figura 19. Equipo de Monitoreo de Gases

• **Contador de partículas:**

Marca Lighthouse Worldwide Solutions, modelo HANDHELD 3016 IAQ

Es un medidor que recoge una muestra integrada durante un determinado periodo y mide la concentración de partículas en el aire, como son el polvo, el hollín, el polen y muchos otros aerosoles desde partículas (0.3, 0.5, 1, 2.5, 5, y 10  $\mu\text{m}$ ) con un flujo de 0.1 CFM y una interfaz “pantalla táctil”. El instrumento usa una fuente de luz diodo láser para conteo de partículas, y el número de partículas es mostrado en pantalla.



Figura 20. Equipo contador de Partículas de PM10 y PM<sub>2.5</sub>.



- **Termómetro infrarrojo**

Marca: HANNA H

Modelo: HI 99550

La radiación infrarroja es emitida desde un objeto dependiendo de su temperatura. El termómetro infrarrojo HANNA HI 99550 tiene la tecnología para medir temperaturas de superficie. Para medir la temperatura, simplemente se apunta al producto y se mantiene oprimida la llave de medir. El valor medido es inmediatamente puesto en pantalla.

- Rango: 10 a 300°C.
- Resolución: 1°C.
- Precisión:  $\pm 2\%$  de lectura o  $\pm 2^\circ\text{C}$ .



*Figura 21.* Termómetro infrarrojo

### **3.4.2. Programa Screen View 4.0**

SCREEN View es una interfaz que sirve para estimar las concentraciones de emisiones atmosféricas diferentes distancias de una fuente continua o puntual.

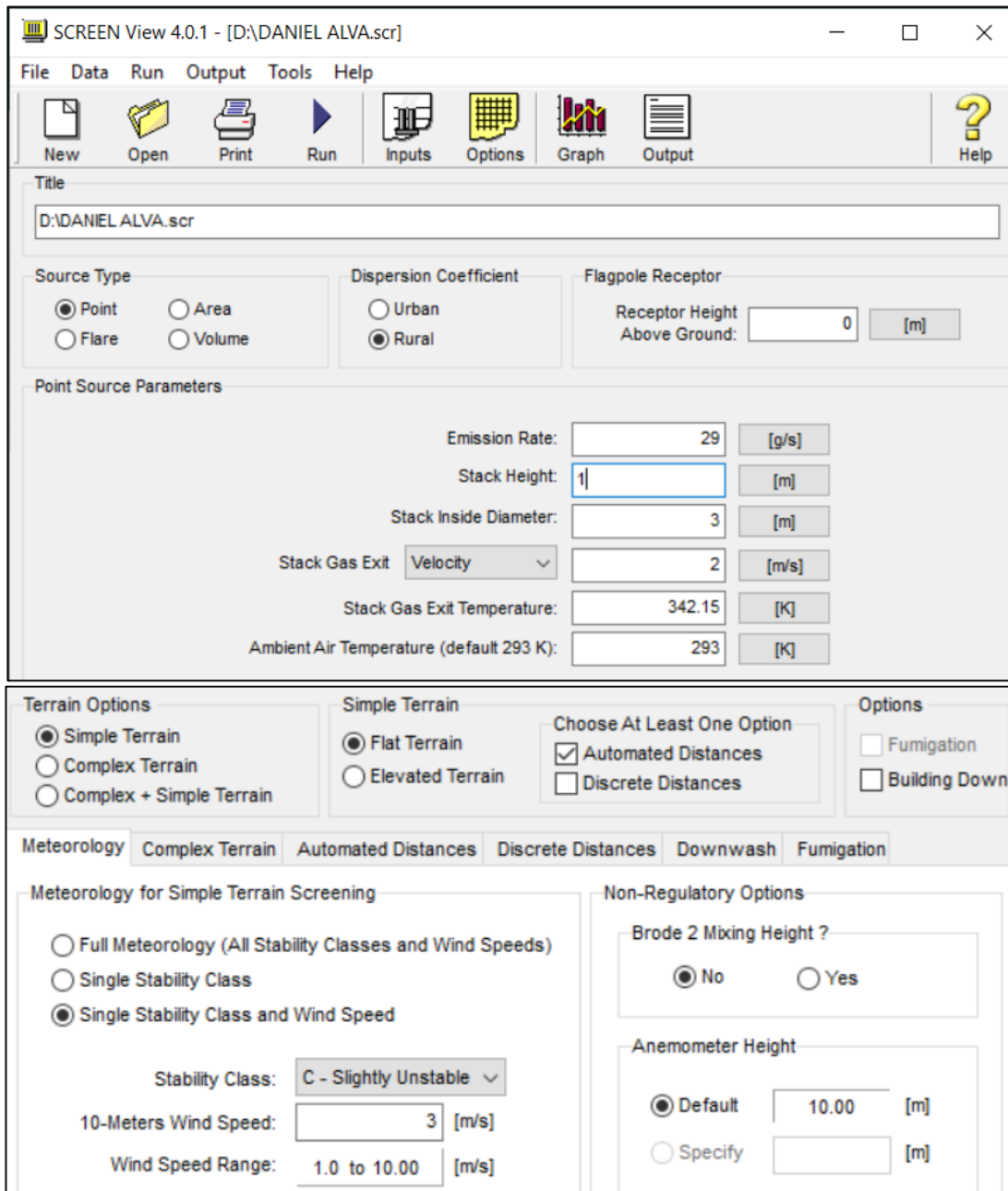


Figura 22. Interfaz del programa Screen View 4.0

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En función a los objetivos planteados y los resultados obtenidos, se determinó la concentración del material particulado PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana.

El muestreo del material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, se realizó el 13 de julio del 2018; el muestreo de CO, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>2</sub> se realizó los días 13, 14, 15 de julio del 2018 respectivamente, todos estos fueron medidos de 8:00 am a 4:00 pm, horario en el cual se realiza la calcinación, con lecturas registradas cada cinco minutos, obteniéndose el promedio de todas las lecturas y el promedio por hora para compararlo con el ECA según el decreto supremo N° 003-2017-MINAM vigente. Se tomó en cuenta además, información meteorológica tales como temperaturas promedio (°C), vientos (m/s) para determinar las concentraciones a distancias de 0.5 km y 1 km de la fuente de emisión, usando el modelo de dispersión Gaussiano.

## 4.1. Concentración de material particulado PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en boca de hornos y comparación con el ECA

### 4.1.1. Concentración de material particulado PM<sub>10</sub>

En la figura 23 se observa que durante la producción de óxido de calcio en un periodo de 8 horas de medición de 8:00 am a 4:00 pm, y con registro de lectura cada cinco minutos, la concentración máxima fue de 20,30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 2:05 pm y la concentración mínima fue de 10,23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 9:25 am; la concentración promedio fue de 12,64  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de material particulado PM<sub>10</sub>.

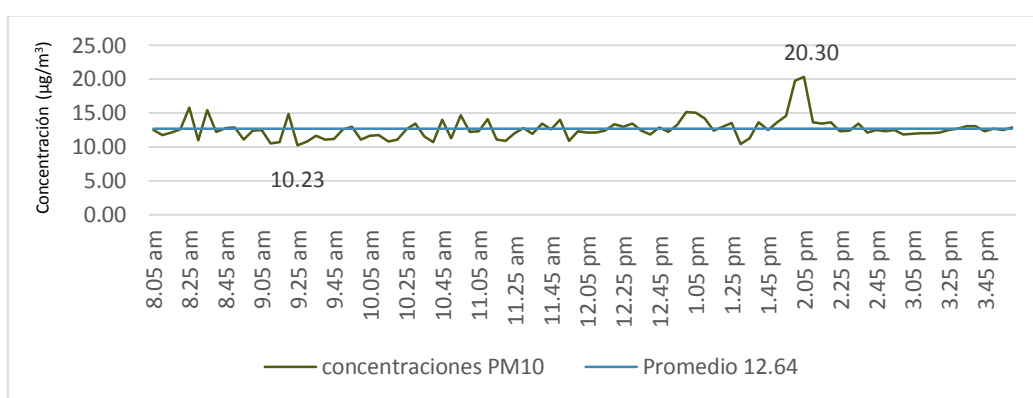


Figura 23. Concentración de material particulado PM<sub>10</sub> cada cinco minutos.

Las variaciones en las concentraciones podrían deberse a la cantidad y velocidad del viento, haciendo que el material particulado se disperse. Dichos resultados de material particulado PM<sub>10</sub> coinciden con los expuesto por Aguilar (2002), donde menciona: que “la concentración de los contaminantes se reduce al dispersarse éstos en la atmósfera, proceso que depende de factores climatológicos como la temperatura, la velocidad del viento, el movimiento de sistemas de altas y bajas presiones y la interacción de éstos con la topografía local, por ejemplo, las montañas y valles.”

#### 4.1.2. Comparación de la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> con el ECA

En la figura 24, se aprecia que, durante la producción de óxido de calcio, en una hora, la concentración promedio de material particulado PM<sub>10</sub> fue de 12,64 µg/m<sup>3</sup> y no sobrepasó los ECA de aire del Perú de 100 µg/m<sup>3</sup>.

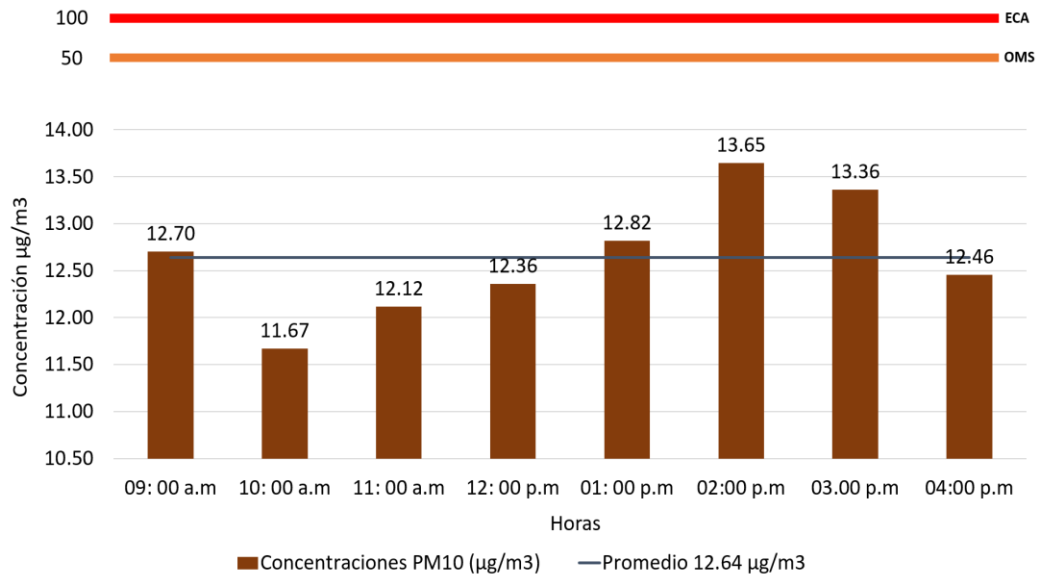


Figura 24. Comparación de la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> con el ECA

Las industrias de producción de óxido de calcio se caracterizan por tener una tecnología, un proceso de elaboración, materias primas, insumos de tipo convencional artesanal que generan residuos contaminantes, cuya cantidad está en función de su volumen de producción (Ajhuacho, 2009), de igual manera, la planta de producción de óxido de calcio Puyucana vienen trabajando con hornos convencionales artesanales los cuales generan emisiones de material particulado PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, que no sobrepasaron los ECA para el aire.

#### 4.1.3. Concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub>

En la figura 25, se observa que, en la producción de óxido de calcio durante 8 horas de medición de 8:00 am a 4:00 pm, con lectura cada cinco minutos, la concentración máxima es de PM<sub>2.5</sub> fue de 30,12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 2:05 pm, misma hora que se dio la máxima concentración de material particulado PM<sub>10</sub>, y la concentración mínima de PM<sub>2.5</sub> fue de 5,91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 8:20 am. La concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> fue de 18,13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

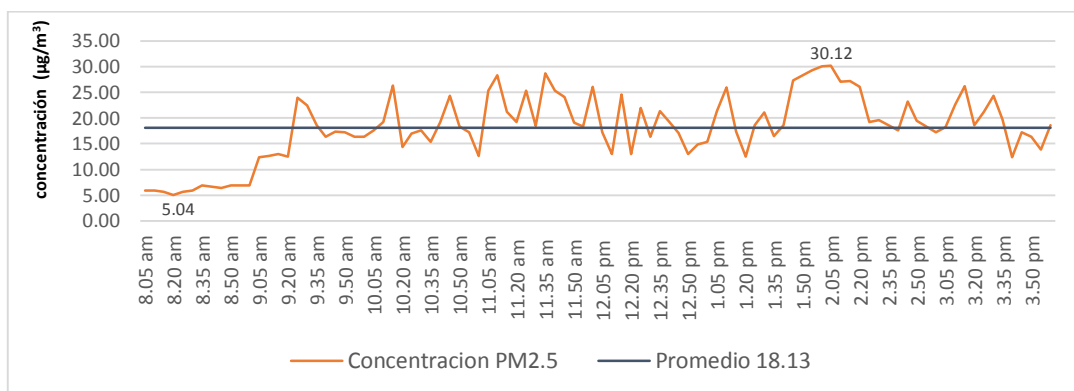


Figura 25. Concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub> cada 5 minutos

Desamparados (2012), afirma que los factores ambientales como la temperatura y el viento afectan a la dispersión de los contaminantes atmosféricos particulados PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, pues durante los meses más fríos al existir un estancamiento de las masas de aire existe una disminución de los niveles de concentración de partículas en el aire y cuando se interrelacionan con el viento se observa que hay un alejamiento de las fuentes de emisión, lo mismo ocurre con las emisiones de material particulado generadas en la planta de óxido de calcio PuyLucana, que al interactuar con el viento, éstas emisiones se dispersan a medida que se alejan de la fuente de emisión. Vale mencionar se registró mediciones superiores a los 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  los cuales sobrepasan los estándares de la OMS, pudiendo a largo plazo impactar a largo plazo la salud de los trabajadores. Por tal motivo, se deben tomar medidas de mitigación para este gas.

#### 4.1.4. Comparación de la concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub> con el ECA

En la figura 26, se observa que, para una hora, la concentración promedio de material particulado PM<sub>2.5</sub> fue de 18,13 µg/m<sup>3</sup> a las 12:00 pm. y no sobrepasó los estándares de calidad ambiental del aire de la normativa peruana de 50 µg/m<sup>3</sup>, pero está cerca de sobrepasar los estándares de la OMS.

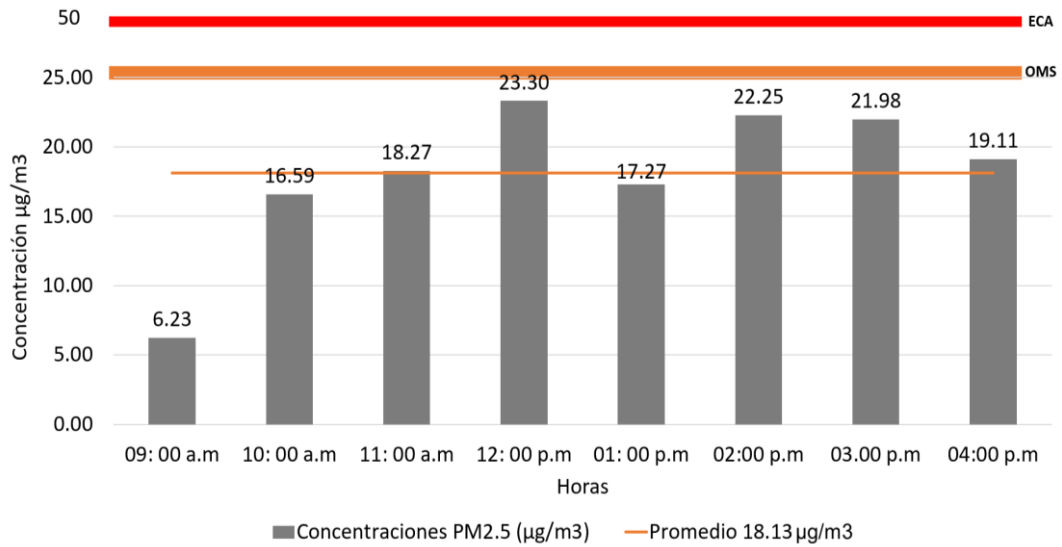


Figura 26. Comparación de la concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub> con los ECA del aire del Perú.

Los contaminantes liberados a la atmósfera se dispersan en volúmenes crecientes del aire, tanto por el transporte vertical como horizontal, que se ve afectado por diferentes escalas de movimiento (Lagzi et al. 2013). En la investigación se trata de una microescala la cual se refiere al movimiento de aire en las cercanías de una fuente, la cual dispersa al material particulado PM<sub>2.5</sub>, disminuyendo la concentración a medida que se aleja de la fuente de emisión.

#### 4.1.5. Concentración de Monóxido de Carbono (CO)

En la figura 27, se observa que en la producción de óxido de calcio durante 8 horas de medición de 8:00 am a 4:00 pm, la concentración máxima fue de 14997  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 2:10 pm, hora cercana que se dio la máxima concentración de material particulado  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ , y la concentración mínima fue de 5651  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 12:10 am; la concentración promedio de todas las lecturas de monóxido de carbono (CO) fue de 10251.11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

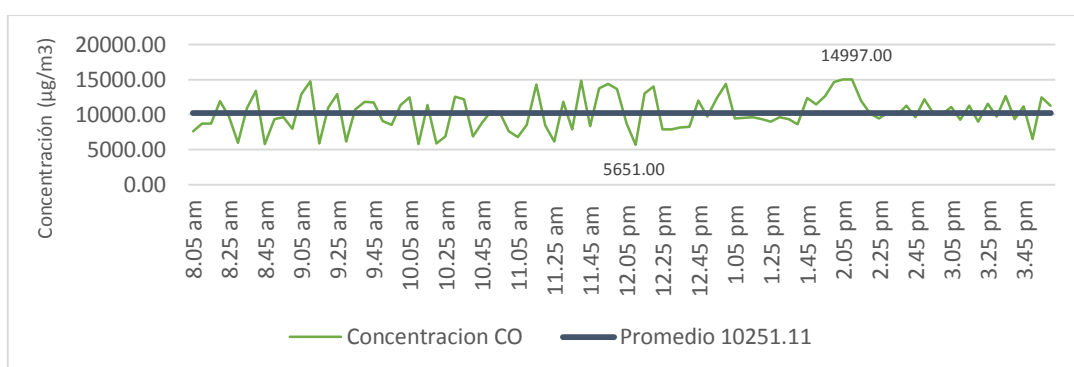


Figura 27. Concentración de monóxido de carbono (CO) cada 5 minutos

La cuantificación de gases como el CO,  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_2$ , es poco estudiada en compañías mineras no metálicas tales como Puyucana donde se produce óxido de calcio, por lo que existe poca información de estas investigaciones. El contaminante gaseoso liberado en el aire (tales como el CO y el  $\text{CO}_2$ ), es atribuido principalmente al incinerar el  $\text{CaCO}_3$ , el cual se desdobra en CaO y  $\text{CO}_2$  (Shan et al., 2015). Esto se corrobora en los resultados obtenidos, donde las emisiones de CO son liberadas también en boca de horno y cuantificados durante el periodo de ocho horas en la compañía minera Puyucana.



#### 4.1.6. Comparación de la concentración de monóxido de carbono (CO) con el ECA

En la figura 28, notamos que la concentración promedio de monóxido de carbono para una hora fue de  $9968.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la cual no sobrepasó los ECA de  $30000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

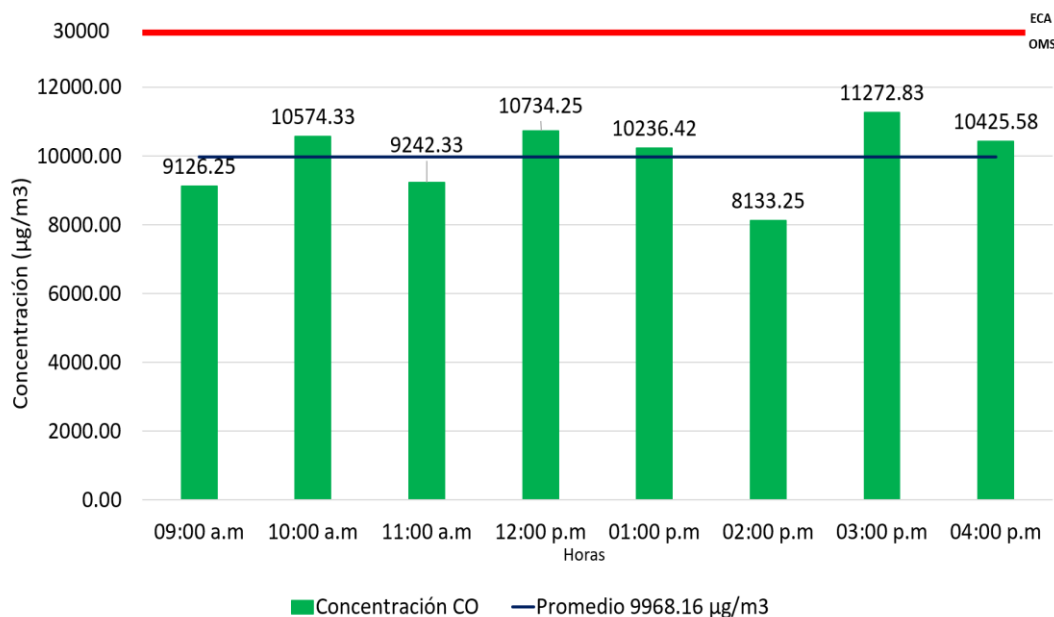


Figura 28. Comparación de la concentración de monóxido de carbono con el ECA del aire del Perú.

La emisión de CO, al no ser controlada afectaría la calidad del aire circundante. La calidad del aire en general puede definirse como la medida de la contaminación atmosférica ambiental en relación con el potencial de infligir daño ambiental o afectar negativamente la salud humana. La calidad del aire es muy vulnerable porque, a diferencia del agua u otros desechos, el aire no puede, en la práctica, reprocesarse en algún lugar central y posteriormente distribuirse para su reutilización (Jain et al. 2012). En la atmósfera, aumenta la captura de la radiación de onda larga, lo que hace que la atmósfera se caliente.

#### 4.1.7. Concentración del Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

En la figura 29 se observa que, con una lectura del sensor de gases cada cinco minutos, la concentración máxima de dióxido de azufre fue de 23 µg/m<sup>3</sup> valor que se repite a las 11:10 am, a las 12:35 pm, 2:05 pm, hora que se dio la máxima concentración de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, y la concentración mínima de dióxido de azufre fue de 12 µg/m<sup>3</sup> a las 10:15 am, la concentración promedio fue de 17.54 µg/m<sup>3</sup>.

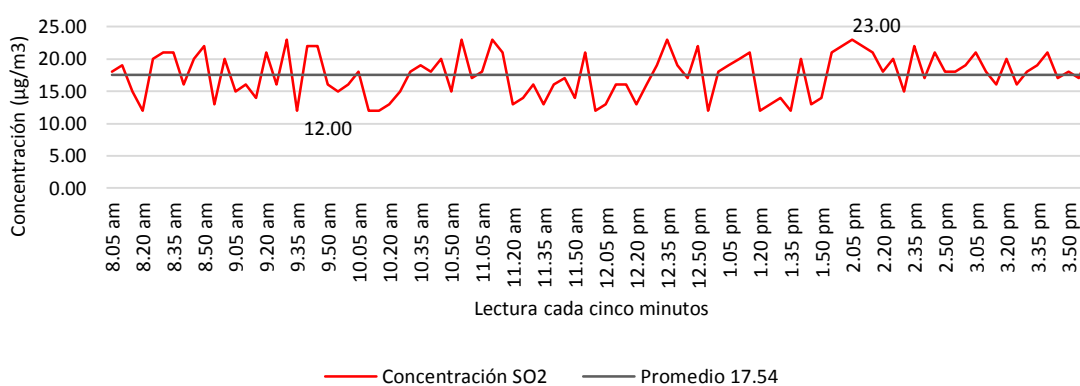


Figura 29. Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) cada 5 minutos

La medición de SO<sub>2</sub> toma importancia debido a los impactos directos en la salud humana, pues es responsable de una variedad de problemas respiratorios. Al igual que la mayoría de los contaminantes atmosféricos, el dióxido de azufre representa una mayor amenaza para los grupos sensibles, como los ancianos asmáticos y los niños pequeños. Al contribuir a la lluvia ácida, el dióxido de azufre puede tener un impacto significativo en las plantas, las aguas superficiales y los edificios. Sin embargo, no se considera que la lluvia ácida tenga un impacto directo en la salud humana (US-EPA, 2012a). Se registraron lecturas que sobrepasaron el estándar de la OMS de 20 µg/m<sup>3</sup>. Por tal motivo se deberían tomar medidas para minimizar las emisiones de este gas.

#### 4.1.8. Comparación de la concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) con el ECA

En la figura 30, se aprecia que la concentración promedio en una hora de SO<sub>2</sub> es de 17,01 µg/m<sup>3</sup> y no sobrepasaron el ECA del aire, pero vale mencionar que está las concentraciones cerca de sobrepasar el valor máximo establecido por la OMS de 20 µg/m<sup>3</sup>.

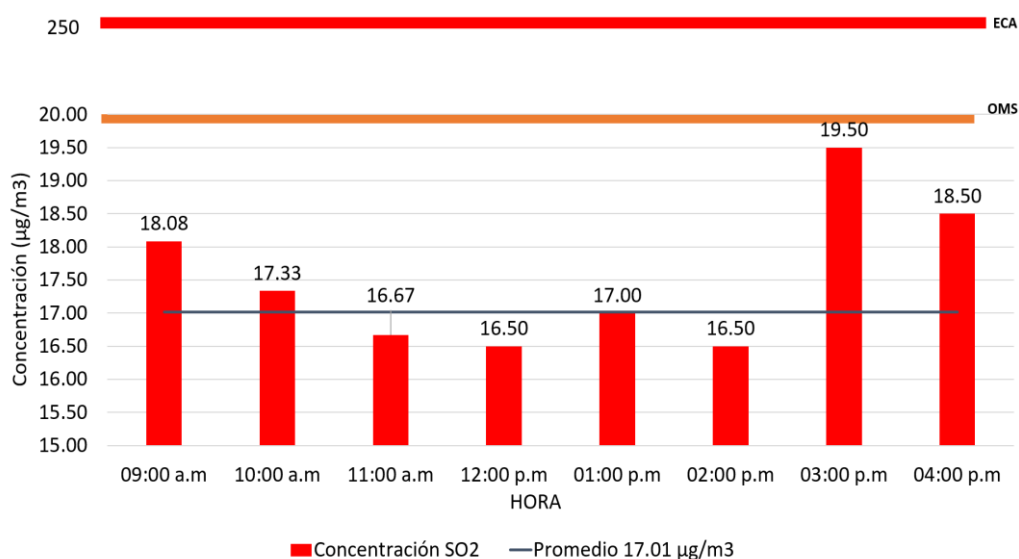


Figura 30. Comparación de la concentración de dióxido de azufre en µg/m<sup>3</sup> con el ECA del aire del Perú

Durante las actividades mineras como el procesamiento de minerales, las fuentes de emisiones de dióxido de azufre incluyen el escape de los vehículos en la combustión de combustible y la fundición de metales. Estos vehículos suelen utilizar combustible diésel, cuya combustión produce SO<sub>x</sub>, así como otros contaminantes atmosféricos tales como CO, NO<sub>x</sub>, VOC y PM (Jain et al., 2016), en la calera Puyucana el SO<sub>2</sub>, se produce por la oxidación del azufre durante la combustión del carbón antracita en el proceso de calcinación. El valor de SO<sub>2</sub> no sobrepasó los límites máximos permisibles, pudiendo ser la razón la baja cantidad de vehículos que albergan y realizan operaciones de carguío, (MEM 2017).

#### 4.1.9. Concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

En la figura 31, se observa que durante 8 horas de medición de 8:00 am a 4:00 pm, con lectura cada cinco minutos, la concentración máxima de dióxido de nitrógeno fue de 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 2:10 pm, y la concentración mínima fue de 61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a las 10:30 am; hora cercana a la hora donde se registró la concentración mínima del SO<sub>2</sub>; La concentración promedio de dióxido de nitrógeno fue de 90,42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

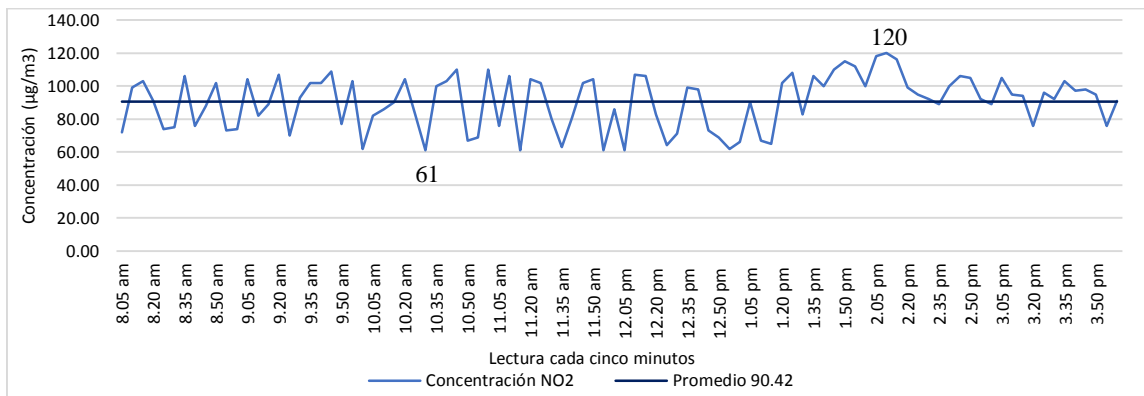


Figura 31. Concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) cada 5 minutos

En cuanto a los óxidos de nitrógeno, estos son particularmente nocivos para la salud humana, siendo una de las principales preocupaciones de la salud humana ya que el NO reacciona fácilmente en la atmósfera para formar NO<sub>2</sub> (Jain et al., 2016). Además de los efectos directos sobre la salud, los óxidos de nitrógeno pueden reaccionar para formar otros contaminantes que afectan la calidad del aire. Además, el dióxido de nitrógeno puede reaccionar con agua y oxígeno en la atmósfera para formar ácido nítrico, un componente de la lluvia ácida (Lashgari et al., 2013). La máxima lectura se dio a la misma hora en que se registró la máxima concentración de material particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, las variaciones en las concentraciones se deben a la cantidad y velocidad del viento que hace que los gases se dispersen.

#### 4.1.10. Comparación de la concentración del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) con el ECA

En la figura 32 se observa que la concentración promedio en una hora de Dióxido de nitrógeno fue de 93,03  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  la cual no sobrepasó el estándar de calidad ambiental para el aire de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

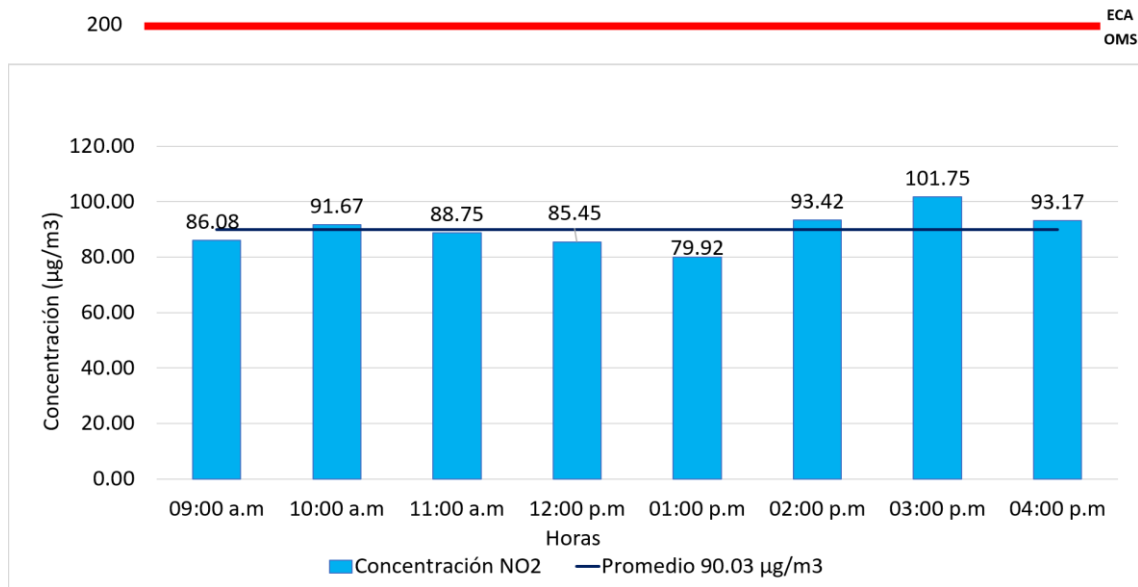


Figura 32. Comparación de la concentración de dióxido de nitrógeno en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con los ECA del aire del Perú.

Las operaciones de voladura emiten NO<sub>x</sub> a la atmósfera. Los explosivos, como el nitrato de amonio/crudo de petróleo, a menudo se contaminan con agua y recortes de perforación antes de la detonación, rompiendo parte del nitrato de amonio (Lashgari et al., 2013). Al analizar los resultados obtenidos durante los análisis, el NO<sub>2</sub> no sobrepasa los límites máximos permisibles. Esto se explicaría también debido al volumen de producción que tiene la minera Puylucana, ya que la voladura se realiza en la cantera de roca caliza que se encuentra en un sector alejado de la planta de producción de óxido de calcio.

#### 4.2. Rosa de vientos para la planta de producción de óxido de calcio Puylucana.

En la tabla 8 se aprecia que la velocidad del viento para el mes de julio fue de 3 m/s a 5 m/s, para determinar las concentraciones de material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, usando el modelo Gaussiano se trabajó con una velocidad de 3 m/s.

Tabla 8. *Datos de la construcción de la rosa de vientos.*

Año	Mes	Día	Velocidad (m/s)	Dirección del Viento (Azimut)
2018	7	1	5	135°
2018	7	2	2	135°
2018	7	3	5	45°
2018	7	4	2	90°
2018	7	5	5	135°
2018	7	6	3	135°
2018	7	7	3	135°
2018	7	8	3	135°
2018	7	9	2	90°
2018	7	10	5	90°
2018	7	11	3	135°
2018	7	12	4	90°
2018	7	13	4	90°
2018	7	14	3	90°
2018	7	15	3	45°
2018	7	16	3	90°
2018	7	17	3	45°
2018	7	18	4	90°
2018	7	19	1	90°
2018	7	20	5	90°
2018	7	21	3	90°
2018	7	22	4	135°
2018	7	23	3	90°
2018	7	24	3	90°
2018	7	25	2	90°
2018	7	26	3	45°
2018	7	27	4	0°
2018	7	28	5	135°
2018	7	29	3	180°
2018	7	30	3	45°
2018	7	31	4	45°

En las figuras 33 y 34, se observa que la dirección predominante del viento es de Este a Oeste, siendo esta dirección paralela a la que se encuentra el centro poblado PuyLucana (N 275°), ubicado una distancia de 1 kilómetro.

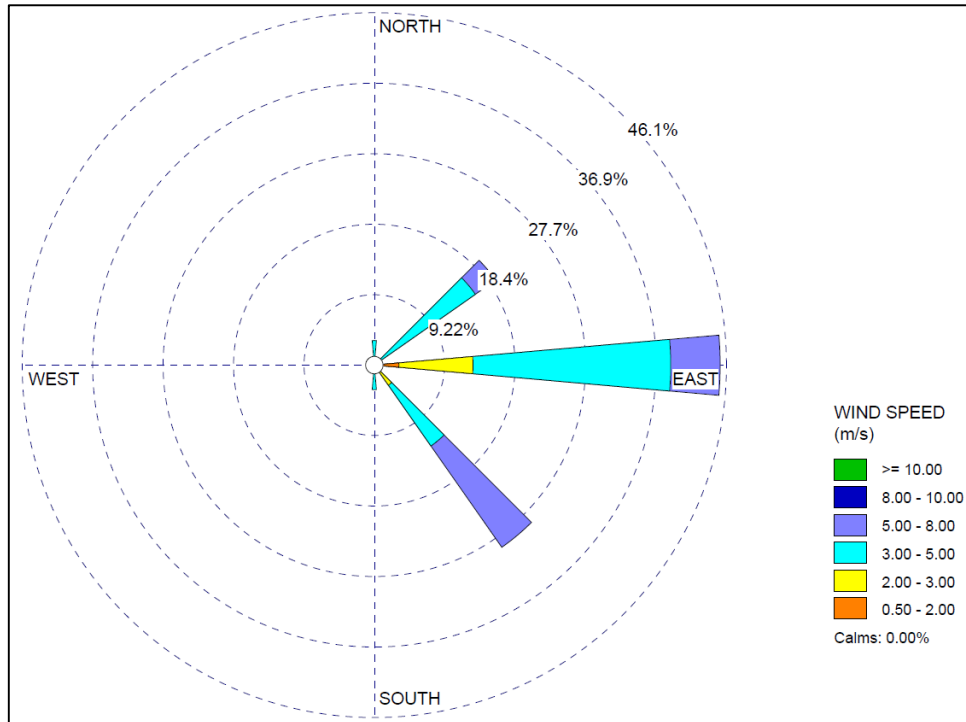


Figura 33. Rosa de vientos para la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana

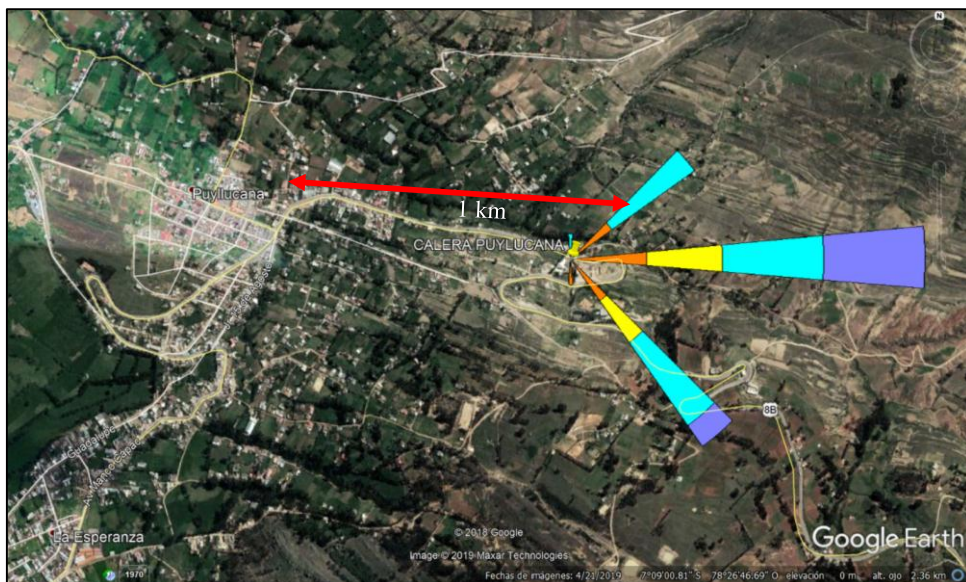


Figura 34. Dirección del viento respecto al centro poblado PuyLucana

### 4.3. Concentración de Material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno a 0,5 y 1 km de la fuente de emisión, usando el modelo de dispersión Gaussiano.

#### 4.3.1. Concentración de material particulado PM<sub>10</sub> usando el modelo Gaussiano

En la figura 35, se muestra que, usando el modelo de dispersión gaussiano, haciendo uso del programa SCREEN View, a una distancia de 0,5 km y 1 km, la concentración máxima de material particulado PM<sub>10</sub> descendió a 1.6 µg/m<sup>3</sup>.

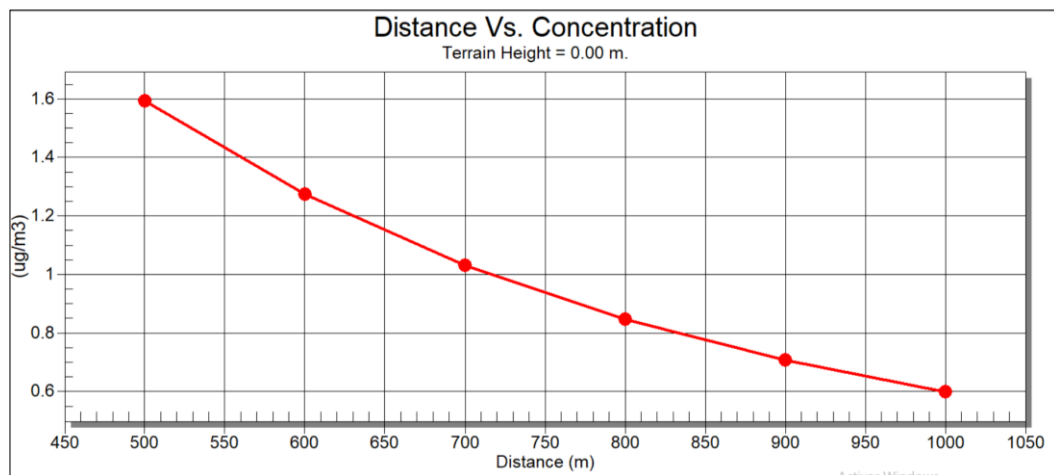


Figura 35. Concentración máxima del material particulado PM<sub>10</sub> a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano.

En función a la velocidad del viento que es de 3 a 5 m/s, y a la radiación la cual corresponde a un día de verano con algunas nubes, para la clasificación de Turner (1970) tenemos una atmósfera ligeramente inestable, formando un penacho serpenteante donde las concentraciones a 0,5 y 1 km de distancia de la fuente de emisión descendieron por debajo del ECA de 100 µg/m<sup>3</sup>.



#### 4.3.2. Concentración de material particulado $PM_{2.5}$ usando el modelo Gaussiano

En la figura 36, se observa que la concentración máxima de material particulado  $PM_{2.5}$  a una distancia de 0,5 km y 1 km, desciende a  $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el centro poblado de Puylucana,

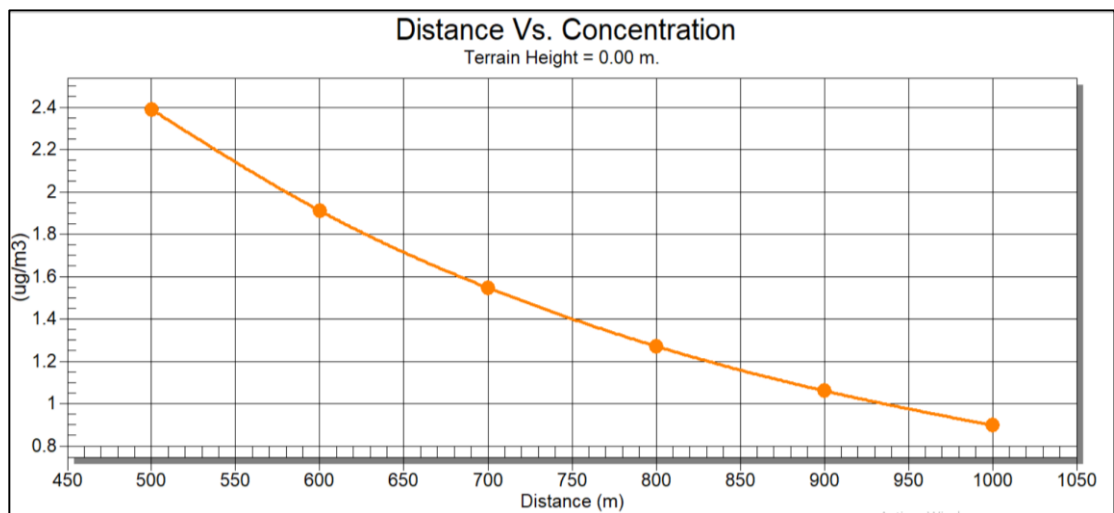


Figura 36. Concentración máxima del material particulado  $PM_{2.5}$  a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano.

De igual manera que para el material particulado  $PM_{10}$ , debido a la acción del viento, considerando una velocidad de  $3 \text{ m/s}$ , el material particulado  $PM_{2.5}$ , se dispersa, reduciendo su concentración a medida que se aleja de la fuente, y, en donde, estas concentraciones no sobrepasan los ECA.

#### 4.3.3. Concentración de monóxido de carbono (CO) usando el modelo Gaussiano

En la figura 37, se observa que la concentración máxima de monóxido de carbono a una distancia de 0,5 km llega a los 1034  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a medida que se aleja de la fuente, a una distancia de 1 km, en el centro poblado de PuyLucana, la concentración de monóxido de carbono desciende a 369  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

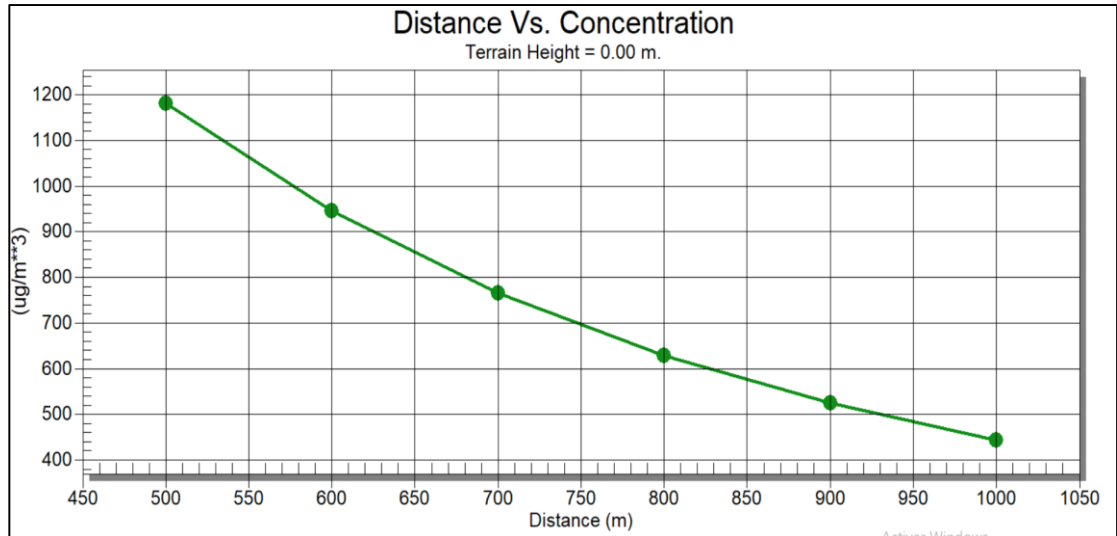


Figura 37. Concentración máxima del monóxido de carbono (CO) a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano

Según Turner (1970), al tener una atmósfera ligeramente inestable por la acción del viento, y la diferencia de temperatura a la que salen los gases y la temperatura del ambiente, la concentración del monóxido de carbono a medida que se aleja de la fuente de emisión, decrece significativamente, encontrándose ésta muy por debajo de los ECA.

#### 4.3.4. Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) usando el modelo Gaussiano

En la figura 38, se observa que la concentración máxima de dióxido de azufre a una distancia de 0,5 km llega a 2,4 µg/m<sup>3</sup>, y, a una distancia de 1 km, en el centro poblado PuyLucana, la concentración de dióxido de azufre desciende a 0.9 µg/m<sup>3</sup>.

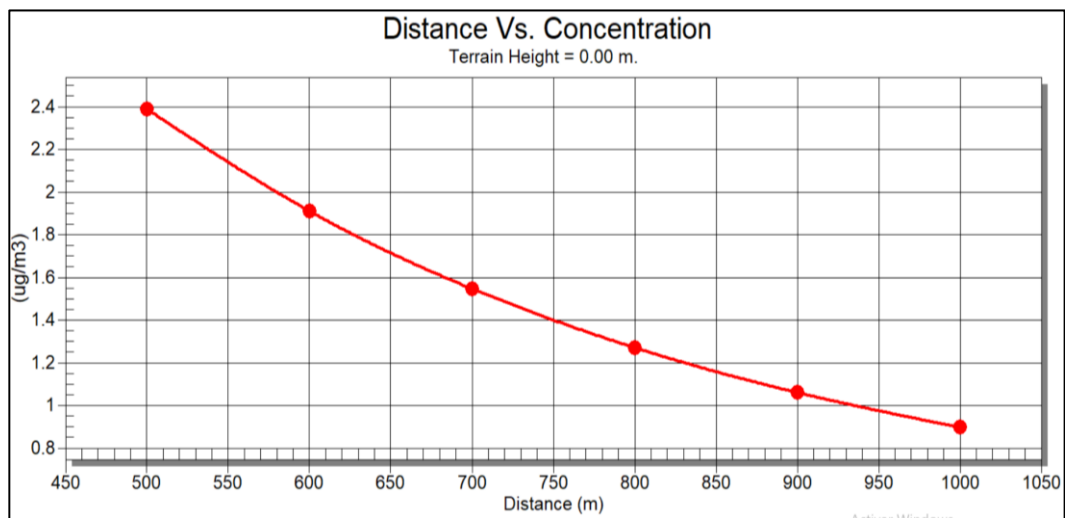


Figura 38. Concentración máxima del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano

Con estabilidades atmosféricas desde condiciones inestables (A, B, C) se tiene una concentración que decrece con la distancia viento abajo (García 2003). Esto se evidencia en la investigación, ya que, la concentración de SO<sub>2</sub>, al llegar al centro poblado PuyLucana decrece a menos de 3 µg/m<sup>3</sup>. Con lo cual no supera los ECA.

#### 4.3.5. Concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) usando el modelo Gaussiano

En la figura 39, se observa que la concentración máxima de dióxido de nitrógeno a una distancia de 0,5 km llega a 12 µg/m<sup>3</sup>, a medida que se aleja de la fuente, a una distancia de 1 km, en el centro poblado de Puylucana, la concentración de dióxido de nitrógeno desciende a 4,5 µg/m<sup>3</sup>. Determinando así que la concentración de este contaminante no supera los Estándares de Calidad Ambiental.

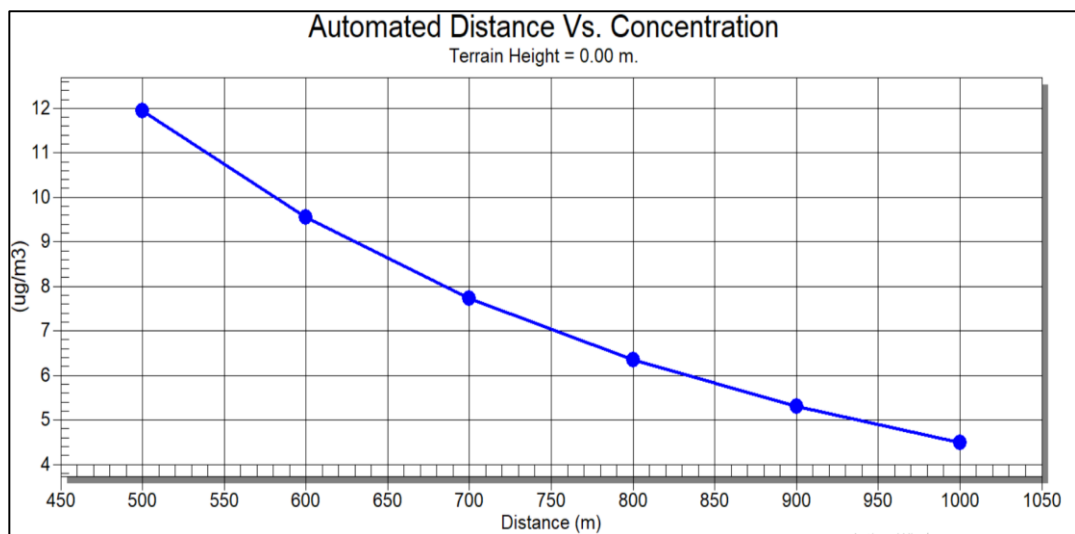


Figura 39. Concentración máxima del dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) a nivel del suelo usando el modelo Gaussiano

Tal como mencionan Venegas y Mazzeo (2013), los contaminantes, luego de ser emitidos a la atmósfera, se diluyen debido a su mezcla con el aire limpio, generando plumas que un tiempo después de su emisión y, en la mayoría de los casos, son casi horizontales. Esto se aprecia en la investigación que a medida que el contaminante se aleja de la fuente, las concentraciones decrecen a nivel del suelo.

#### 4.4. Simulación de dispersión de contaminantes

##### 4.4.1. Simulación de dispersión del Material Particulado PM<sub>10</sub>

En la figura 40, se observa que a medida que aumenta la distancia a la planta de producción de óxido de calcio las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>, disminuyen.

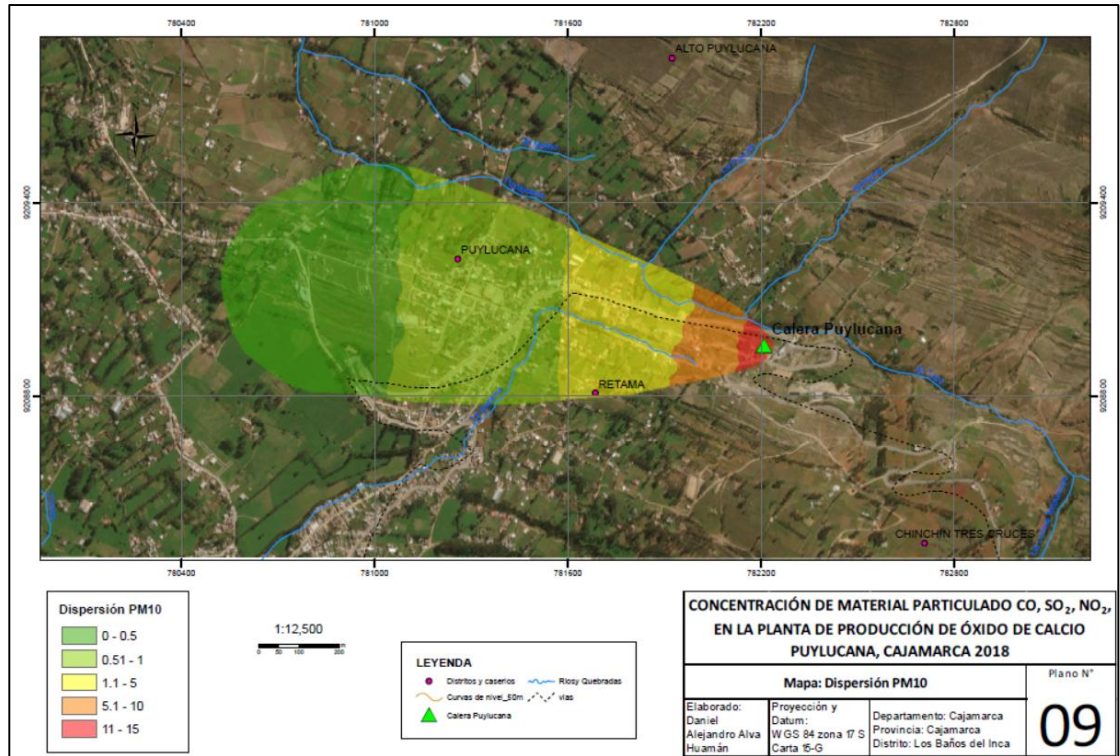


Figura 40. Simulación de la dispersión de material particulado PM<sub>10</sub>

Tras la emisión o formación en la atmósfera del material particulado PM<sub>10</sub>, se produce la extracción del contaminante por vía seca o húmeda; este proceso se llama deposición atmosférica se define como la masa total de contaminante transferida desde la atmósfera a la superficie en un área y periodo determinados (Jomolca et al, 2013). La concentración de PM<sub>10</sub> a una distancia de 0.5 km y 1 km, fueron inferiores a 2 µg/m<sup>3</sup> muy por debajo de los estándares de calidad ambiental.

#### 4.4.2. Simulación de dispersión del Material Particulado $PM_{2.5}$

La figura 41 nos muestra que a medida que aumenta la distancia a la planta de producción de óxido de calcio las concentraciones de material particulado  $P_{2.5}$ , disminuyen.

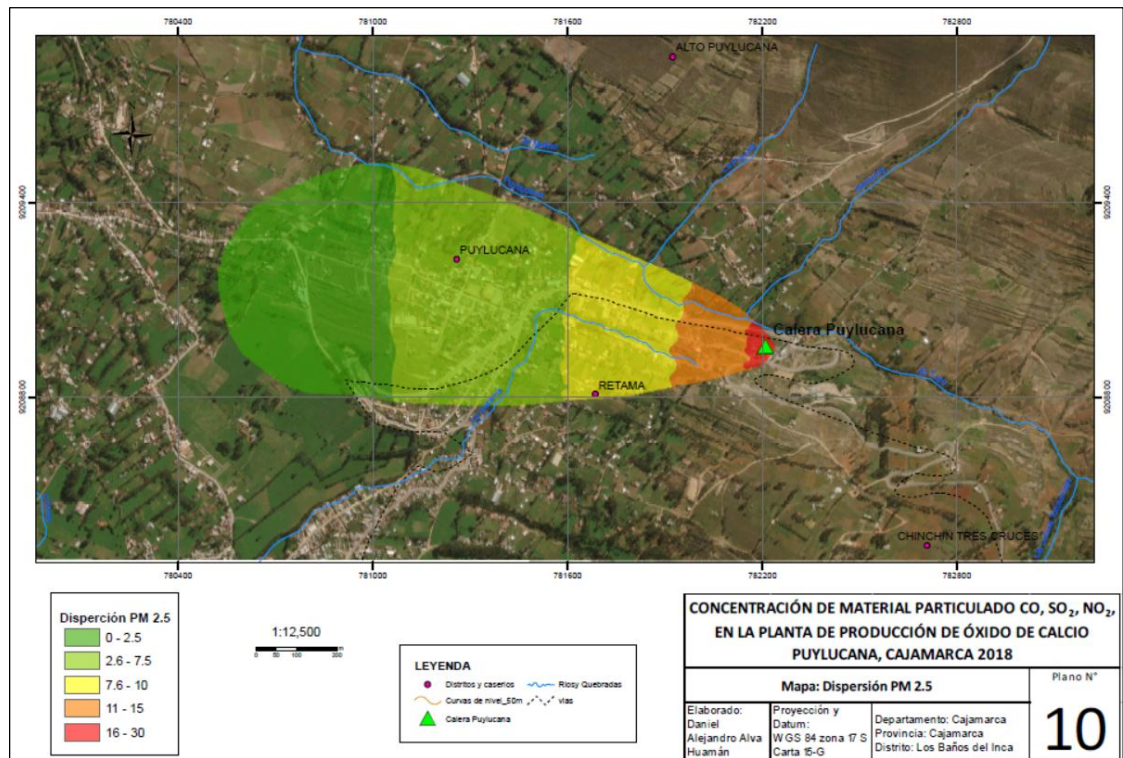


Figura 41. Simulación de la dispersión de material particulado  $PM_{2.5}$

La dispersión de contaminantes en la atmósfera, está influenciada significativamente por la variabilidad de la dirección del viento. Si la dirección del viento es constante, la misma área estará continuamente expuesta a contaminación. (Venegas, 2013). Para esta investigación se tomó la dirección promedio del viento para el mes de julio del año 2018, el cual según WEATHER SPARK (2018) viene del Este en dirección al centro poblado Puyucana.

#### 4.4.3. Simulación de dispersión de Monóxido de carbono (CO)

En la figura 42 se observa que a medida que aumenta la distancia a la planta de producción de óxido de calcio las concentraciones de monóxido de carbono (CO), disminuyen.

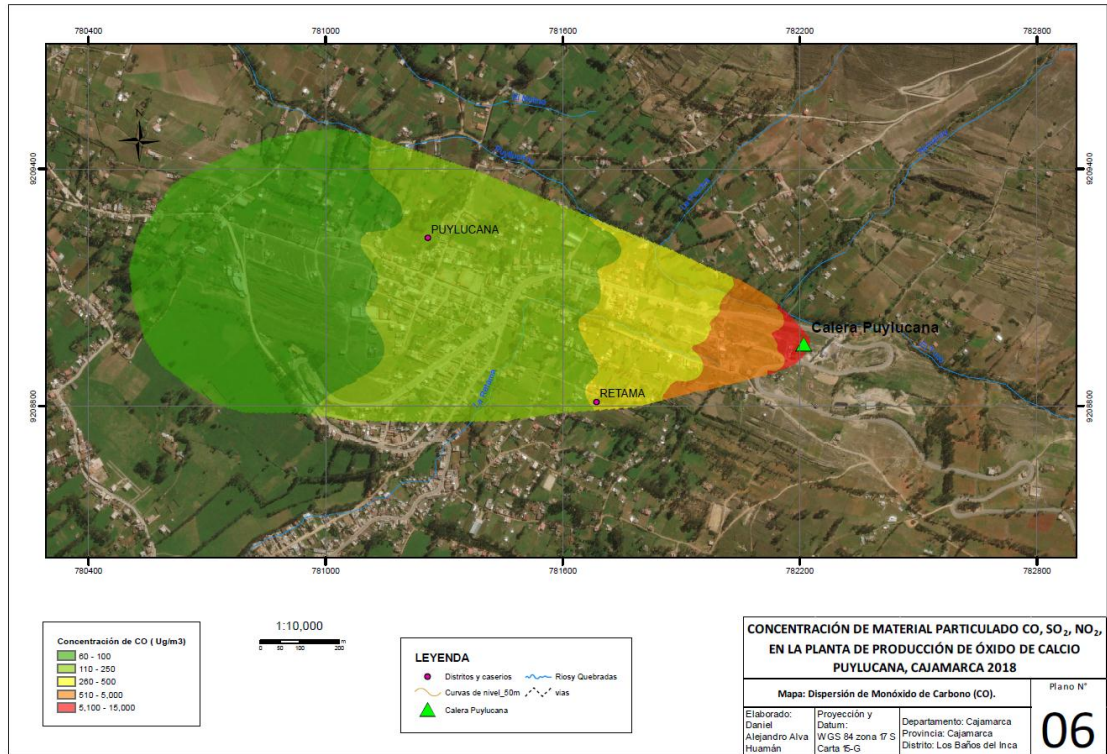


Figura 42. Simulación de la dispersión de monóxido de carbono (CO)

Los modelos de calidad del aire usan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes en su dispersión y transformación en la atmósfera. Basados en datos meteorológicos e información de las fuentes de emisión, tales como tasas de emisión y parámetros de chimenea, estos modelos caracterizan la dispersión de los contaminantes (Ordoñez & Reinoso, 2017). El modelo de dispersión Gaussiana nos permitió determinar las concentraciones de CO a 0.5 km y a 1 km. De 1034  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 369  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente.

#### 4.4.4. Simulación de dispersión de Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

En la figura 43 se observa que a medida que aumenta la distancia a la planta de producción de óxido de calcio las concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), disminuyen.

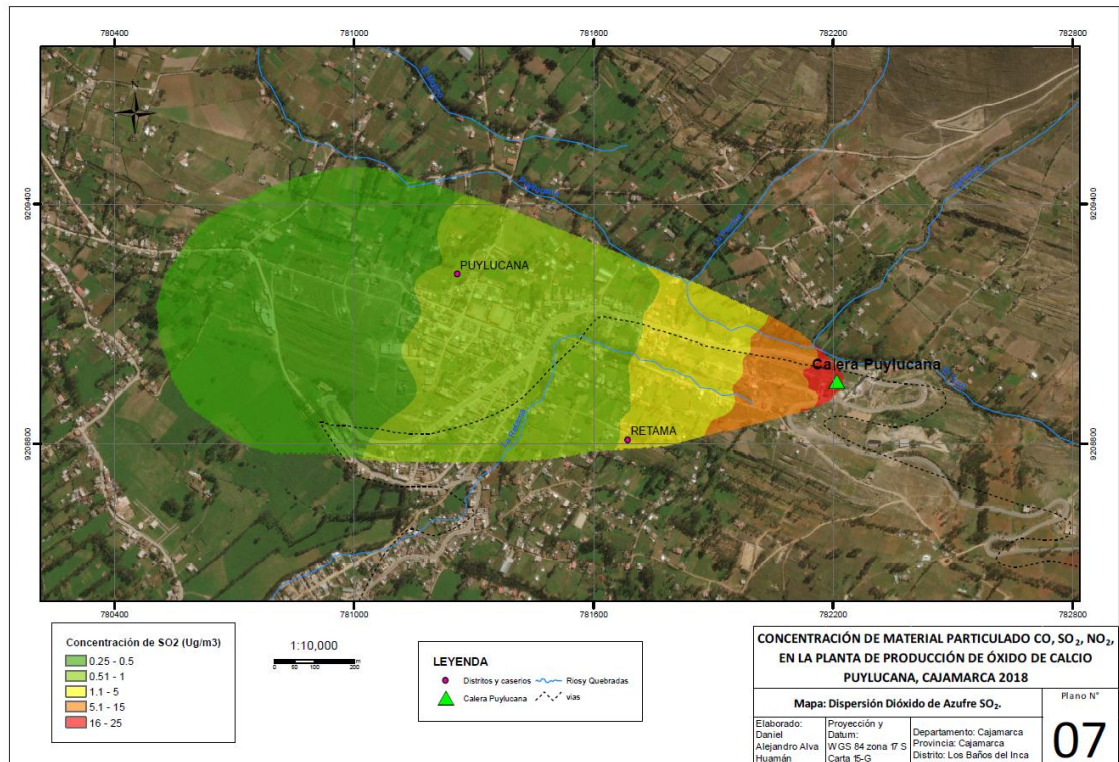


Figura 43. Simulación de la dispersión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

La ecuación de difusión gaussiana relaciona los niveles de inmisión en un punto con la cantidad de contaminantes vertidos a la atmósfera desde el foco emisor, teniendo en cuenta las condiciones de emisión de los gases y las características climáticas y topográficas del medio receptor (González et al., 2008). La zona de estudio presenta pendientes de moderadas a fuertes las cuales influyen en la dispersión de las emisiones debido a que los vientos pueden ser retenidos por estas formaciones montañosas, favoreciendo a que los contaminantes viajen entre ellas. Este modelo nos permitió determinar las concentraciones de SO<sub>2</sub> a 0.5 km y a 1 km, que fueron de 2 µg/m<sup>3</sup> y 1 µg/m<sup>3</sup> respectivamente.



#### 4.4.5. Simulación de dispersión de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

En la figura 44, se observa la disminución de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) a medida que aumenta la distancia a la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana.

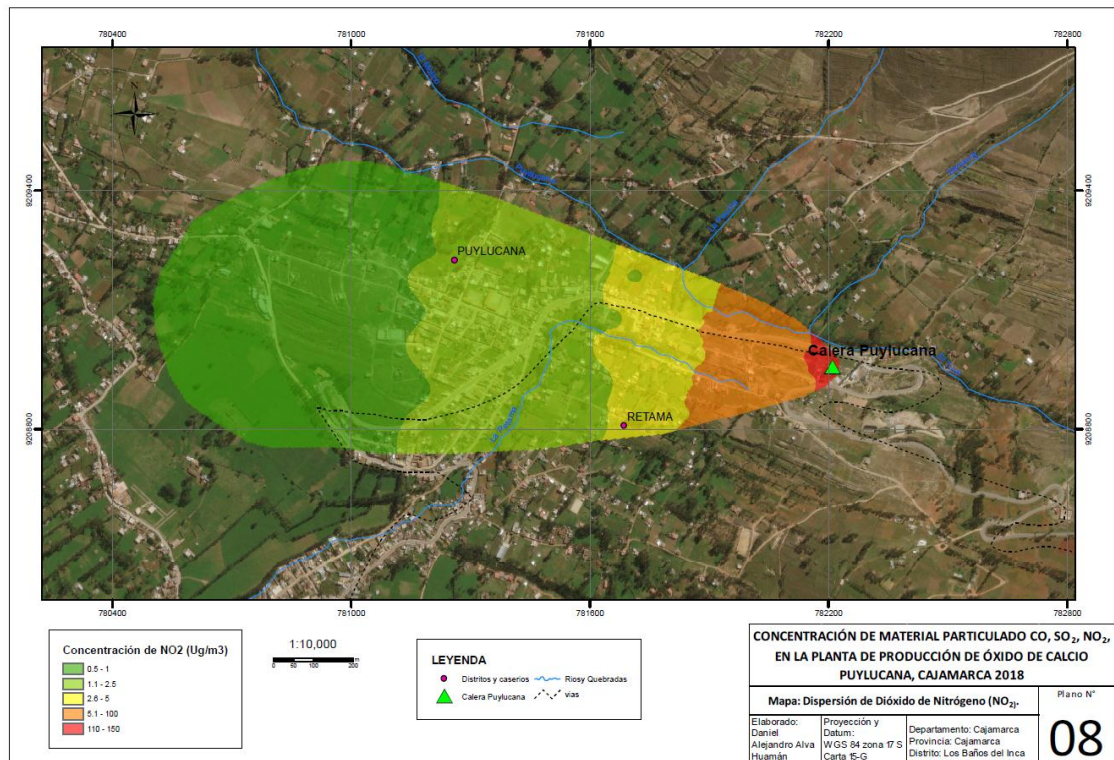


Figura 44. Simulación de la dispersión de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

La simulación de concentración de contaminantes permite estimar la calidad de aire ambiental en una zona industrial, cuyos habitantes podrían estar expuestos a concentraciones que constituyen peligro para la salud humana (Manzur et al, 2012). Para relacionar los vientos con las concentraciones de dióxido de nitrógeno se requiere conocer los puntos de emisión de las muestras de acuerdo a los datos que se proporcionaron. Esto nos permitió construir de una manera gráfica real, el escenario sobre el que se está produciendo la emisión.

Se debe mencionar que se tuvo como limitación la falta de datos en otras épocas del año, principalmente por la accesibilidad durante las horas de producción de la cal, pero se tiene que tomar en cuenta que, la cantidad de gases generados será la misma para todo el año ya que para la producción de óxido de calcio en la planta calera Puyucana, se utiliza siempre seis toneladas diarias de carbón antracita. A la vez no se midió la concentración con los equipos especializados en el centro poblado Puyucana, se utilizó para esto el modelo gaussiano, como método predictivo. También debe considerarse que alrededor del centro poblado Puyucana existen otras caleras que generan material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno, pero de las cuales no se conoce la cantidad de emisiones que generan ni la cantidad de contaminantes que llegarían a concentrarse en el centro poblado. Por lo mencionado esta investigación es un referente para continuar profundizando en este tema de vital importancia socioambiental.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

1. La concentración promedio de material particulado  $PM_{10}$  en la planta de producción de óxido de calcio Puyucana fue de  $12,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $18,13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de material particulado  $PM_{2.5}$ ;  $9968,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de monóxido de carbono (CO);  $17,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ );  $93,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), las cuales no sobrepasaron los Estándares de calidad ambiental del aire, según DS 003-2017-MINAM.
2. Usando el modelo de dispersión Guassiano, a distancias de 0.5 y 1 km; la concentración de material particulado  $PM_{10}$  descendieron a  $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; la de  $PM_{2.5}$  descendieron a  $2,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $0,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el monóxido de carbono descendió a menos de  $1034 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $450 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el dióxido de azufre, descendió a menos de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y el dióxido de nitrógeno descendió a menos de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; pudiendo deberse principalmente a la acción del viento que actúa como dispersante de las emisiones.
3. Las emisiones generadas por la planta de producción de óxido de calcio no sobrepasan los estándares de calidad ambiental, pero se registraron lecturas para el  $PM_{2.5}$  y Para el  $\text{SO}_2$  que sobrepasan los estándares de la OMS, y su presencia podría ser a largo plazo, peligroso para la salud de la población y el ecosistema. Por esta razón se recomienda establecer medidas de reducción de estas emisiones como podría ser la instalación de filtros de mangas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajhuacho, I. (2009). Diagnóstico ambiental de las industrias de producción de cal en el municipio de Sucre: En respuesta al Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero, RASIM / Irma Corina Ajhuacho López. La Paz, Bolivia: LIDEMA.
- Araujo, J. (2016). Costos externos de la contaminación ambiental del aire en la ciudad de Cajamarca. (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca.
- Arenas, J. (2017). Determinación del Material Particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, Dióxido De Azufre y Dióxido de Nitrógeno En El Distrito Yura – Arequipa. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa.
- Arrieta-Fuentes, A. (2016). Dispersión de material particulado (PM<sub>10</sub>), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería Investigación Y Desarrollo*, 16(2), 43-54. Colombia.
- Boubel, R. y Fox D. (1994). Fundamentals of Air Pollution . 3° Ed. Academic Press, San Diego, California.
- Briones, E. Malaver, C. (2015). Concentración De Material Particulado PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en La Cuenca Atmosférica de Cajamarca durante los años 2014 y 2015. Universidad Cesar Vallejo. Cajamarca.
- Carciner, J. (2007). Contaminación atmosférica. Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua. Escuela de Negocios. Colombia.

- Carreño, P; Simoni, J. (2007). Plan de negocios para la instalación de una fábrica de Cal en el sur del Perú. - Lima: Universidad ESAN, 159 p.
- Clean Air Institute (2012). La calidad del aire en América Latina: Una visión Panorámica. Washington D.C.
- CRANA (2018). Contaminación atmosférica. Centro de Recursos Ambientales de Navarra. [http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion\\_3/diaxido-azufre-so2](http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/diaxido-azufre-so2).
- Cruzado, G. (2011). Estudio de geología. Gobierno regional de Cajamarca. Gremio Regional de Planeamiento, presupuesto y acondicionamiento territorial.
- Desamparados, R. (2012). Contaminantes atmosféricos particulados: Evaluación de las fuentes de origen y de su contribución a la contaminación atmosférica en el clúster cerámico de Castellón. (Tesis de pregrado) Universidad JAUME I. Castellón, España.
- Galvan, F. (2009). Diccionario ambiental y de asignaturas afines. Ediciones Arlequín, México.
- Gallego, A. (2012). Contaminación atmosférica. Universidad Nacional de Educación a distancia. Madrid.
- García, C. (2003). Análisis integral de chimeneas como medio de dispersión del dióxido de azufre. Ciencia 11(2), 177-192, 2003, Red Universidad del Zulia., Venezuela.
- Gifford, F. (1960). Air resources atmospheric turbulence and difusión laboratory, Oak Ridge, Tennessee. Nuclear Safety 2 (2): 56-68. Tennessee. Estados Unidos.

- González, P. 2019. Impacto ambiental en las actividades humana. Ed. Tutor Formación, La Rioja, España.
- González, M., Orozco, C., Pérez, A., Alfayate, J., Rodriguez, F. (2012). Contaminación ambiental. Una visión desde la química. Ed. Paraninfo. Madrid, España.
- Inche, J. (2008). Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones. Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM. Lima.
- Jain, R., Urban, L., Stacey, G.S., Balbach, H., Webb, M.D., 2012. Handbook of Environmental Engineering Assessment: Strategy, Planning, and Management. Elsevier, Waltham, MA.
- Jain, R. K., Cui, Z. “Cindy”, & Domen, J. K. (2016). Environmental Impacts of Mining. Environmental Impact of Mining and Mineral Processing, Elsevier, Waltham, MA.
- Jarup, L., 2003. Hazards of heavy metal contamination. Br. Med. Bull. 68, 167.
- Jomolca, Y., Lima, L., & Manduca, M. (2013). Determinación de concentraciones y flujos atmosféricos de metales pesados y radionucleidos de interés ambiental en deposiciones atmosféricas totales. Revista Cubana de Química, 25(3), 19.
- Kampa M. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151;362-367.
- Katsouyanni, K. (2003). Ambient air pollution and health. Br. Med. Bull. 68, 143.
- Lashgari, A., Johnson, C., Kecojevic, V., Lusk, B., Hoffman, J.M., 2013. NOx emission of equipment and blasting agents in surface coal mining. Min. Engin. 65, 34–41.

- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, G., LeelQssy, A. (2013). Atmospheric chemistry. Hungary : Eötvös Loránd University.
- López G. (2004). El dióxido de nitrógeno como contaminante. México.
- Manzur, M., Benzal, G., González, S. (2012). Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Setimo congreso de medio ambiente. La Plata, Argentina.
- Martinez, I. (2014). Simulación de una planta de captura de CO<sub>2</sub> basada en ciclos de carbonatación-calcinación. (Tesis doctoral). Universidad de Zaragoza, España.
- Martinez, G. (2018). Impacto ambiental producido por la calera “J&S hermanos” en la calidad del aire y la salud de las personas en el distrito de Baños del inca, Cajamarca (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Mauricio, J. Murga, L. (2015). Empleo de un modelo Gaussiano para estimar las concentraciones máximas a nivel del suelo de CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub> emitidas por las chimeneas de los calderos 17 y 20 de la empresa Cartavio S.A.A. – 2014. Universidad Nacional de Trujillo.
- Ministerio del Ambiente (2014). Informe de la calidad del aire, Perú. 2013-2014.
- Ministerio de Energía y Minas (2005). Guía Minera Minería No Metálica. 35 p. Perú.
- Ministerio de Energía y Minas (2017). Anuario Minero. Dirección de promoción Minera. Perú
- Moragues, J. (2014). Manual de tecnologías de medición de concentración de gases y material particulado en chimeneas y atmósfera. Ministerio del desarrollo y medio ambiente. Argentina.

- Moreano D. Palmisano, A. 2012. Nivel de afectación de la contaminación atmosférica y sus efectos en la infraestructura del campus universitario debido a la emisión de partículas PM<sub>10</sub> y CO. Universidad Católica del Perú.
- Mosqueira, H. (2018). Evaluación de las partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la construcción de la carretera Chota – Cochabamba (Cajamarca) (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca.
- Municipalidad Provincial de Cajamarca 2008. Sub Gerencia de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2011. Avances de la calidad del aire en la ciudad de Cajamarca. Cajamarca.
- OCDE (2012). OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- OMS (2006) Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de riesgos. Ginebra, Suiza.
- Ordoñez, Y. Reinoso, M. (2017). Aplicación de modelos simplificados para la dispersión de contaminantes atmosféricos. Caso de estudio. Rev. Cubana de Química. vol.30 no.1. Santiago de Cuba.
- Pasquill F. (1961). F. Pasquill, The Estimation of The Dispersion of Wind- borne Material, The Meteorological Magazine, Vol. 90, No. 1063, pp. 33-49.
- Perdíz, J. (2016). Modelado y simulación de la dispersión de contaminantes en la pluma de una chimenea por el método de dispersión gaussiano. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo.



- Pinto, R. (2018). Determinación del material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y metales en la construcción de la carretera dv. Papujune camino principal tramo II en la ciudad de Mariscal Nieto Moquegua. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa.
- Poschl, U., 2005, Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 44, 7520.
- Pradana, J. (2012). Contaminación atmosférica. Universidad Nacional de Educación a distancia. Madrid.
- PHUYUYURAQ (2018). <http://phuyuyuraq.pe/>
- Rojano,R. Mendoza, E. Arregoces, H. & Restrepo, G. (2016). Dispersión de Contaminantes del Aire (PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, COV y HAP) emitidos desde una Estación Modular de Compresión, Tratamiento y Medición de Gas Natural. *Información tecnológica*, 27(5), 99-110.
- Sánchez de la Campa, A., & De la Rosa, J. (2009). Caracterización del material particulado atmosférico de la provincia de Huelva. Tesis, Universidad de Huelva, Huelva - España.
- Santamaría, J. M. (2000). Diccionario terminológico de contaminación ambiental. Universidad de Navarra.
- Sbarato, D, and Sbarato, V. (2006) Contaminación del aire, Editorial Brujas, España.

- Schechter, A. (2010). Perfluorinated compounds, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticide contamination in composite food samples from Dallas, Texas, USA. 18: 796-802.
- Shafaghat A., M. G. (2016). Street Geometry Factors Influence Urban Climate Microclimate in Tropical Coastal Cities: A Review. *Environ Clim Technol*, 17;61-65.
- Shan, Z. L. (2015). CO<sub>2</sub> emissions from China's lime industry. *Applied Energy*.
- Skromulis, A. B. (2017). Effect of atmospheric pollution on air ion concentration. *Energy Procedia, IntenChOpen* 231-237.
- Sinaluisa M. (2013). Estudio de factibilidad para la creación de una Planta de producción de cal viva e hidratada en la parroquia San Juan” (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politecnica de Chimborazo. Ecuador.
- Spedding, d. (2012). Contaminación atmosférica. Ed. Reverté. Barcelona.
- Trelles R. (2018). Determinación del material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO) en el distrito de Ocoruro-provincia Espinar- región Cusco. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de San Agustín. Cusco.
- Turner, B. (1970) *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates-An Introduction to Dispersion Modeling*, CRC Press, Florida (USA), pp. 108.
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 1995a. *Compilation of Air Pollutant Emission Factors: Volume I: Stationary Point and Area Sources – Zinc Smelting*. Retrieved from: <http://www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch12/final/c12s07.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 1995. Compilation of Air Pollutant Emission Factors: Volume I: Stationary Point and Area Sources – Western Surface Coal Mining. Retrieved from: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s09.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 2015. National Greenhouse Gas Emissions Data: Draft Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990– 2013. Retrieved from: <http://www.epa.gov/climatechange/pdfs/usinventoryreport/US-GHG-Inventory-2015-Chapter-3-Energy.pdf>.

Venegas, L. Mazzeo, N. (2013). La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Universidad Tecnológica de Argentina. Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda.

Weatherspark. (2018). Tiempo promedio en julio, Cajamarca. Extraído de <https://es.weatherspark.com/m/19956/7/Tiempo-promedio-en-julio-en-Cajamarca-Per%C3%BA>

## **APÉNDICE**

## Apéndice 1

### Ficha de identificación y control para medición de emisiones atmosféricas

Nombre de la empresa: \_\_\_\_\_

Nombre de la unidad operativa: \_\_\_\_\_

Nombre de punto de monitoreo: \_\_\_\_\_

Clase de punto de control: \_\_\_\_\_

Tipo de muestra: \_\_\_\_\_ L= Líquido, G=Gas, S=sólido

Ubicación:

Distrito/Provincia/Departamento:

Cuerpo receptor:

#### Coordenadas UTM – WGS 84

Este	Norte	Altitud	Zona (17,1 8 ó 19)

Fuente: Adaptado de MINAM, 2010

## Apéndice 2

Capacidad de producción de óxido de calcio calera Puylucana

Capacidad y producción de óxido de calcio	Horno 1	Horno 2	Total
<b>Consumo de roca caliza por día (toneladas)</b>	20	30	50
<b>Consumo de carbón por día (toneladas)</b>	2.4	3.6	6
<b>Producción de óxido de calcio/día (toneladas)</b>	10	15	25

Fuente: Phuyuyuraq 2018

### Apéndice 3

#### Registro de datos de concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>,

#### Monóxido de carbono, Dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno.

#### Registro de concentraciones de material Particulado PM<sub>10</sub> y Pm<sub>2.5</sub>, 13 de julio 2018.

HORA	PM 10 (µg/m3)	PM 2.5 (µg/m3)	HORA	PM 10 (µg/m3)	PM 2.5 (µg/m3)	HORA	PM 10 (µg/m3)	PM 2.5 (µg/m3)
8.05 am	12.51	5.91	11.00 am	12.20	12.62	2.00 pm	19.80	30.10
8.10 am	11.70	5.95	11.05 am	12.28	25.36	2.05 pm	20.30	30.12
8.15 am	12.10	5.62	11.10 am	14.10	28.36	2.10 pm	13.62	27.10
8.20 am	12.57	5.04	11.15 am	11.03	21.23	2.15 pm	13.45	27.20
8.25 am	15.82	5.64	11.20 am	10.91	19.26	2.20 pm	13.65	26.10
8.30 am	10.98	5.95	11.25 am	12.01	25.34	2.25 pm	12.32	19.20
8.35 am	15.44	6.85	11.30 am	12.81	18.46	2.30 pm	12.41	19.58
8.40 am	12.17	6.61	11.35 am	11.93	28.63	2.35 pm	13.41	18.65
8.45 am	12.81	6.45	11.40 am	13.42	25.34	2.40 pm	12.13	17.58
8.50 am	12.89	6.87	11.45 am	12.61	24.11	2.45 pm	12.45	23.15
8.55 am	11.07	6.90	11.50 am	13.97	19.12	2.50 pm	12.31	19.50
9.00 am	12.39	6.93	11.55 am	10.91	18.36	2.55 pm	12.45	18.32
9.05 am	12.46	12.35	12.00 pm	12.32	26.01	3.00 pm	11.85	17.26
9.10 am	10.51	12.62	12.05 pm	12.09	17.26	3.05 pm	11.95	18.25
9.15 am	10.65	13.00	12.10 pm	12.10	13.01	3.10 pm	11.98	22.56
9.20 am	14.84	12.45	12.15 pm	12.37	24.62	3.15 pm	12.05	26.24
9.25 am	10.23	23.98	12.20 pm	13.32	13.05	3.20 pm	12.09	18.62
9.30 am	10.79	22.45	12.25 pm	12.94	22.01	3.25 pm	12.45	21.15
9.35 am	11.63	18.64	12.30 pm	13.45	16.35	3.30 pm	12.66	24.36
9.40 am	11.07	16.32	12.35 pm	12.37	21.32	3.35 pm	13.01	19.68
9.45 am	11.21	17.32	12.40 pm	11.79	19.32	3.40 pm	13.04	12.35
9.50 am	12.61	17.23	12.45 pm	12.89	17.12	3.45 pm	12.30	17.25
9.55 am	12.96	16.35	12.50 pm	12.19	13.01	3.50 pm	12.65	16.38
10.00 am	11.10	16.34	12.55 pm	13.22	14.85	3.55 pm	12.45	13.84
10.05 am	11.60	17.63	1.00 pm	15.09	15.36	4.00 pm	12.85	18.65
10.10 am	11.71	19.25	1.05 pm	15.02	21.36			
10.15 am	10.78	26.34	1.10 pm	14.23	25.96			
10.20 am	11.03	14.35	1.15 pm	12.35	17.34			
10.25 am	12.57	16.98	1.20 pm	12.95	12.53			
10.30 am	13.43	17.62	1.25 pm	13.50	18.65			
10.35 am	11.56	15.32	1.30 pm	10.40	21.03			
10.40 am	10.68	19.23	1.35 pm	11.23	16.48			
10.45 am	13.98	24.32	1.40 pm	13.62	18.62			
10.50 am	11.23	18.34	1.45 pm	12.45	27.31			
10.55 am	14.65	17.25	1.50 pm	13.64	28.36			
			1.55 pm	14.58	29.31			

Fuente: Propia

## Registro de concentraciones de monóxido de carbono, 13 de julio 2018

HORA	CO (µg/m3)
8.05 am	7598.00
8.10 am	8681.00
8.15 am	8723.00
8.20 am	11930.00
8.25 am	9719.00
8.30 am	5916.00
8.35 am	10893.00
8.40 am	13377.00
8.45 am	5769.00
8.50 am	9315.00
8.55 am	9659.00
9.00 am	7935.00
9.05 am	12949.00
9.10 am	14788.00
9.15 am	5875.00
9.20 am	11012.00
9.25 am	12888.00
9.30 am	6099.00
9.35 am	10716.00
9.40 am	11818.00
9.45 am	11771.00
9.50 am	9115.00
9.55 am	8525.00
10.00 am	11336.00
10.05 am	12448.00
10.10 am	5732.00
10.15 am	11350.00
10.20 am	5845.00
10.25 am	6837.00
10.30 am	12552.00
10.35 am	12199.00
10.40 am	6836.00
10.45 am	8754.00
10.50 am	10430.00
10.55 am	10308.00
11.00 am	7617.00

HORA	CO (µg/m3)
11.05 am	6766.00
11.10 am	8542.00
11.15 am	14317.00
11.20 am	8458.00
11.25 am	6157.00
11.30 am	11828.00
11.35 am	7847.00
11.40 am	14835.00
11.45 am	8357.00
11.50 am	13707.00
11.55 am	14350.00
12.00 pm	13647.00
12.05 pm	8680.00
12.10 pm	5651.00
12.15 pm	12969.00
12.20 pm	14050.00
12.25 pm	7861.00
12.30 pm	7895.00
12.35 pm	8198.00
12.40 pm	8205.00
12.45 pm	11986.00
12.50 pm	9718.00
12.55 pm	12354.00
1.00 pm	14367.00
1.05 pm	9422.00
1.10 pm	9532.00
1.15 pm	9623.00
1.20 pm	9375.00
1.25 pm	8945.00
1.30 pm	9612.00
1.35 pm	9356.00
1.40 pm	8644.00
1.45 pm	12358.00
1.50 pm	11489.00
1.55 pm	12655.00
2.00 pm	14655.00

HORA	CO (µg/m3)
2.05 pm	14988.00
2.10 pm	14997.00
2.15 pm	12024.00
2.20 pm	10211.00
2.25 pm	9456.00
2.30 pm	10244.00
2.35 pm	10023.00
2.40 pm	11234.00
2.45 pm	9624.00
2.50 pm	12231.00
2.55 pm	10146.00
3.00 pm	10096.00
3.05 pm	11122.00
3.10 pm	9224.00
3.15 pm	11248.00
3.20 pm	8954.00
3.25 pm	11523.00
3.30 pm	9671.00
3.35 pm	12623.00
3.40 pm	9324.00
3.45 pm	11224.00
3.50 pm	6521.00
3.55 pm	12441.00
4.00 pm	11232.00

Fuente: Propia



### Registro de concentraciones de dióxido de azufre, 14 de julio 2018

HORA	SO2 (µg/m3)	HORA	SO2 (µg/m3)	HORA	SO2 (µg/m3)
8.05 am	18.00	11.05 am	18.00	2.05 pm	23.00
8.10 am	19.00	11.10 am	23.00	2.10 pm	22.00
8.15 am	15.00	11.15 am	21.00	2.15 pm	21.00
8.20 am	12.00	11.20 am	13.00	2.20 pm	18.00
8.25 am	20.00	11.25 am	14.00	2.25 pm	20.00
8.30 am	21.00	11.30 am	16.00	2.30 pm	15.00
8.35 am	21.00	11.35 am	13.00	2.35 pm	22.00
8.40 am	16.00	11.40 am	16.00	2.40 pm	17.00
8.45 am	20.00	11.45 am	17.00	2.45 pm	21.00
8.50 am	22.00	11.50 am	14.00	2.50 pm	18.00
8.55 am	13.00	11.55 am	21.00	2.55 pm	18.00
9.00 am	20.00	12.00 pm	12.00	3.00 pm	19.00
9.05 am	15.00	12.05 pm	13.00	3.05 pm	21.00
9.10 am	16.00	12.10 pm	16.00	3.10 pm	18.00
9.15 am	14.00	12.15 pm	16.00	3.15 pm	16.00
9.20 am	21.00	12.20 pm	13.00	3.20 pm	20.00
9.25 am	16.00	12.25 pm	16.00	3.25 pm	16.00
9.30 am	23.00	12.30 pm	19.00	3.30 pm	18.00
9.35 am	12.00	12.35 pm	23.00	3.35 pm	19.00
9.40 am	22.00	12.40 pm	19.00	3.40 pm	21.00
9.45 am	22.00	12.45 pm	17.00	3.45 pm	17.00
9.50 am	16.00	12.50 pm	22.00	3.50 pm	18.00
9.55 am	15.00	12.55 pm	12.00	3.55 pm	17.00
10.00 am	16.00	1.00 pm	18.00	4.00 pm	21.00
10.05 am	18.00	1.05 pm	19.00		
10.10 am	12.00	1.10 pm	20.00		
10.15 am	12.00	1.15 pm	21.00		
10.20 am	13.00	1.20 pm	12.00		
10.25 am	15.00	1.25 pm	13.00		
10.30 am	18.00	1.30 pm	14.00		
10.35 am	19.00	1.35 pm	12.00		
10.40 am	18.00	1.40 pm	20.00		
10.45 am	20.00	1.45 pm	13.00		
10.50 am	15.00	1.50 pm	14.00		
10.55 am	23.00	1.55 pm	21.00		
11.00 am	17.00	2.00 pm	22.00		

Fuente: Propia

### Registro de concentraciones de dióxido de Nitrógeno, 15 de julio 2018

HORA	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	HORA	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	HORA	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
8.05 am	72.00	11.05 am	76.00	2.05 pm	118.00
8.10 am	99.00	11.10 am	106.00	2.10 pm	120.00
8.15 am	103.00	11.15 am	61.00	2.15 pm	116.00
8.20 am	91.00	11.20 am	104.00	2.20 pm	99.00
8.25 am	74.00	11.25 am	102.00	2.25 pm	95.00
8.30 am	75.00	11.30 am	80.00	2.30 pm	92.00
8.35 am	106.00	11.35 am	63.00	2.35 pm	89.00
8.40 am	76.00	11.40 am	81.00	2.40 pm	100.00
8.45 am	88.00	11.45 am	102.00	2.45 pm	106.00
8.50 am	102.00	11.50 am	104.00	2.50 pm	105.00
8.55 am	73.00	11.55 am	61.00	2.55 pm	92.00
9.00 am	74.00	12.00 pm	86.00	3.00 pm	89.00
9.05 am	104.00	12.05 pm	61.00	3.05 pm	105.00
9.10 am	82.00	12.10 pm	107.00	3.10 pm	95.00
9.15 am	89.00	12.15 pm	106.00	3.15 pm	94.00
9.20 am	107.00	12.20 pm	83.00	3.20 pm	76.00
9.25 am	70.00	12.25 pm	64.00	3.25 pm	96.00
9.30 am	93.00	12.30 pm	71.00	3.30 pm	92.00
9.35 am	102.00	12.35 pm	99.00	3.35 pm	103.00
9.40 am	102.00	12.40 pm	98.00	3.40 pm	97.00
9.45 am	109.00	12.45 pm	73.00	3.45 pm	98.00
9.50 am	77.00	12.50 pm	69.00	3.50 pm	95.00
9.55 am	103.00	12.55 pm	62.00	3.55 pm	76.00
10.00 am	62.00	1.00 pm	66.00	4.00 pm	91.00
10.05 am	82.00	1.05 pm	90.00		
10.10 am	86.00	1.10 pm	67.00		
10.15 am	90.00	1.15 pm	65.00		
10.20 am	104.00	1.20 pm	102.00		
10.25 am	83.00	1.25 pm	108.00		
10.30 am	61.00	1.30 pm	83.00		
10.35 am	100.00	1.35 pm	106.00		
10.40 am	103.00	1.40 pm	100.00		
10.45 am	110.00	1.45 pm	110.00		
10.50 am	67.00	1.50 pm	115.00		
10.55 am	69.00	1.55 pm	112.00		
11.00 am	110.00	2.00 pm	100.00		

Fuente: Propia

**Apéndice 4.** Concentración de Material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno usando modelo Gaussiano.

MODELO GAUSSIANO PARA UNA FUENTE PUNTUAL													
3	Altura de la chimenea (m)				6					Velocidad de salida del gas (m/s)			2
4	Diámetro de la chimenea (m)				3					Temperatura de salida del gas (C)			69
5	Tasa de emisión (g/s)				0.04					Temperatura ambiente (C)			21
7	Categoría de la condición Atmosférica:									1 = Muy inestable			4 = Neutral
8					3					2 = Moderadamente inestable			5 = Ligeramente estable
9										3 = Ligeramente inestable			6 = Estable
11	Velocidad del viento	Altura efectiva de la chimenea	Concentración máxima a nivel del suelo (ug/m3)										
12	(m/s)		Distancias seleccionadas de la fuente (km)										
13			0	0.5	1	1.5	3	5	10	20	35	60	100
14	1	90.02499	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
15	2	48.01249	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
16	3	34.00833	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	4	27.00625	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	5	22.805	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	6	20.00416	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	7	18.00357	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	8	16.50312	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	9	15.33611	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	10	14.4025	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 45. Formato Excel para el uso del modelo gaussiano

## Apéndice 5. Concentración de emisiones con procesamiento en Excel para el modelo

### Gaussiano

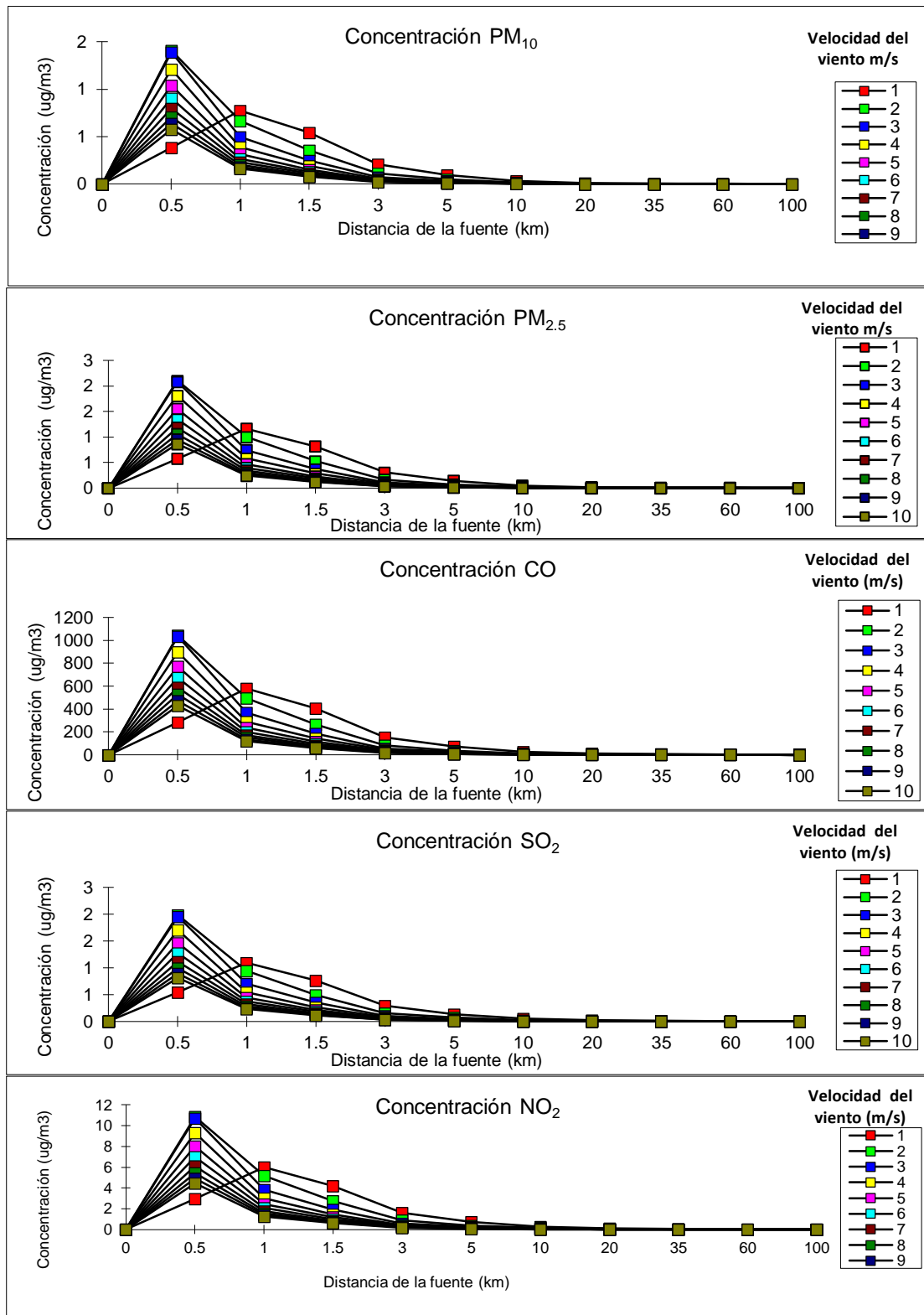


Figura 46. Concentración de las emisiones procesando los datos en Excel usando modelo Gaussiano

## **ANEXOS**

**Anexo1.** Fotografías de la planta de producción de óxido de calcio PuyLucana



*Figura 47.* Planta de producción de óxido de calcio PuyLucana



*Figura 48.* Hornos en proceso de calcinación




Figura 49. Equipos en el punto de muestreo (boca de hornos).



Figura 50. Lectura del equipo sensor de gases.

**Anexo 2.** Certificado de Calibración de contador de partículas (HANDHELD 3016IAQ)

**Manufacturer's  
Calibration Certificate**



**LIGHTHOUSE**  
WORLDWIDE SOLUTIONS  
*Technology That Counts*

**REPORT OF CALIBRATION**

---

**Model:** H3016 IAQ  
**Serial Number:** 130144015  
**Sensor ID:** 130102-045  
**TRH Probe:** 126257

**LWS Location:** 1221 Disk Drive, Medford OR 97501

This certifies the above named instrument conforms to the original specifications in effect at date of manufacture and test.

Calibration has been accomplished by comparison with standards maintained by LIGHTHOUSE WORLDWIDE SOLUTIONS and the size calibration is accomplished in accordance with the ISO 21501-4 standard. The accuracy and stability of standards maintained by LIGHTHOUSE WORLDWIDE SOLUTIONS are traceable to the National Institute of Standards and Technology, or have been derived from acceptable values of natural physical constants. A record of all work performed is maintained by LIGHTHOUSE WORLDWIDE SOLUTIONS, INC.

The combined standard uncertainty of the size calibration for the above instrument is: **2.5%**  
 The combined standard uncertainty of the size calibration is calculated using Root Sum Square method (RSS).

**Test Equipment:**

Flow Meter	119494	Calibration Due: June 14, 2013
DMM	22520443	Calibration Due: December 5, 2013
MCA	2207	Calibration Due: October 11, 2013
TRH STD 2	0573	Calibration Due: October 13, 2013
GOLD	111244010	Calibration Due: January 28, 2014

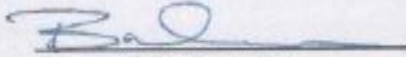
Calibration was performed under the following controlled conditions:

Temperature: 73.4 °F	Relative Humidity: 35.0 %	Flow Rate: <b>0.100 CFM</b>
UUT: 73.3 °F	UUT: 35.1 %	

**Final Test Date:** January 31, 2013

**Threshold Voltage Settings:**

Particle Size: 0.30 µm	Lot # 39644	Channel 1 Threshold Voltage: 45 mV
Particle Size: 0.50 µm	Lot # 40270	Channel 2 Threshold Voltage: 340 mV
Particle Size: 1.00 µm	Lot # 40060	Channel 3 Threshold Voltage: 896 mV
Particle Size: 2.50 µm	Lot # 39697	Channel 4 Threshold Voltage: 1490 mV
Particle Size: 5.00 µm	Lot # 40421	Channel 5 Threshold Voltage: 3188 mV
Particle Size: 10.00 µm	Lot # 40284	Channel 6 Threshold Voltage: 3788 mV

Signature:   
 Quality Assurance

Certification Date: January 31, 2013

**Next calibration on this instrument is due: January 31, 2014**

---

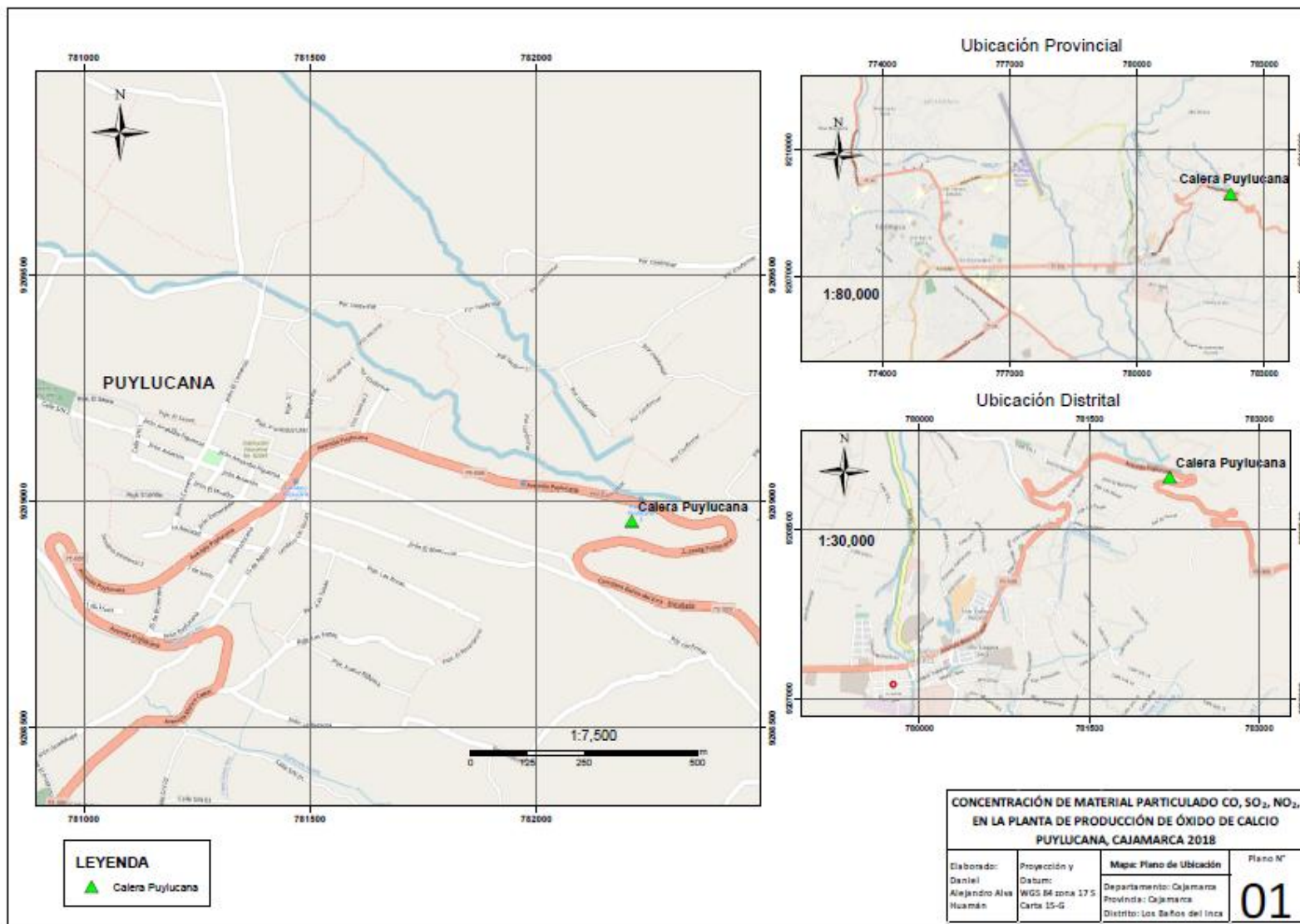
**LIGHTHOUSE WORLDWIDE SOLUTIONS**

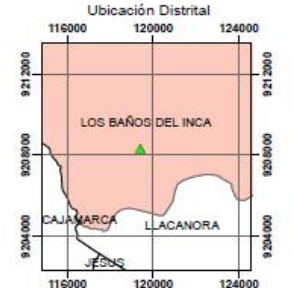
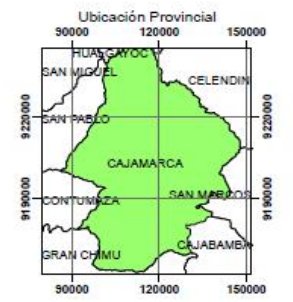
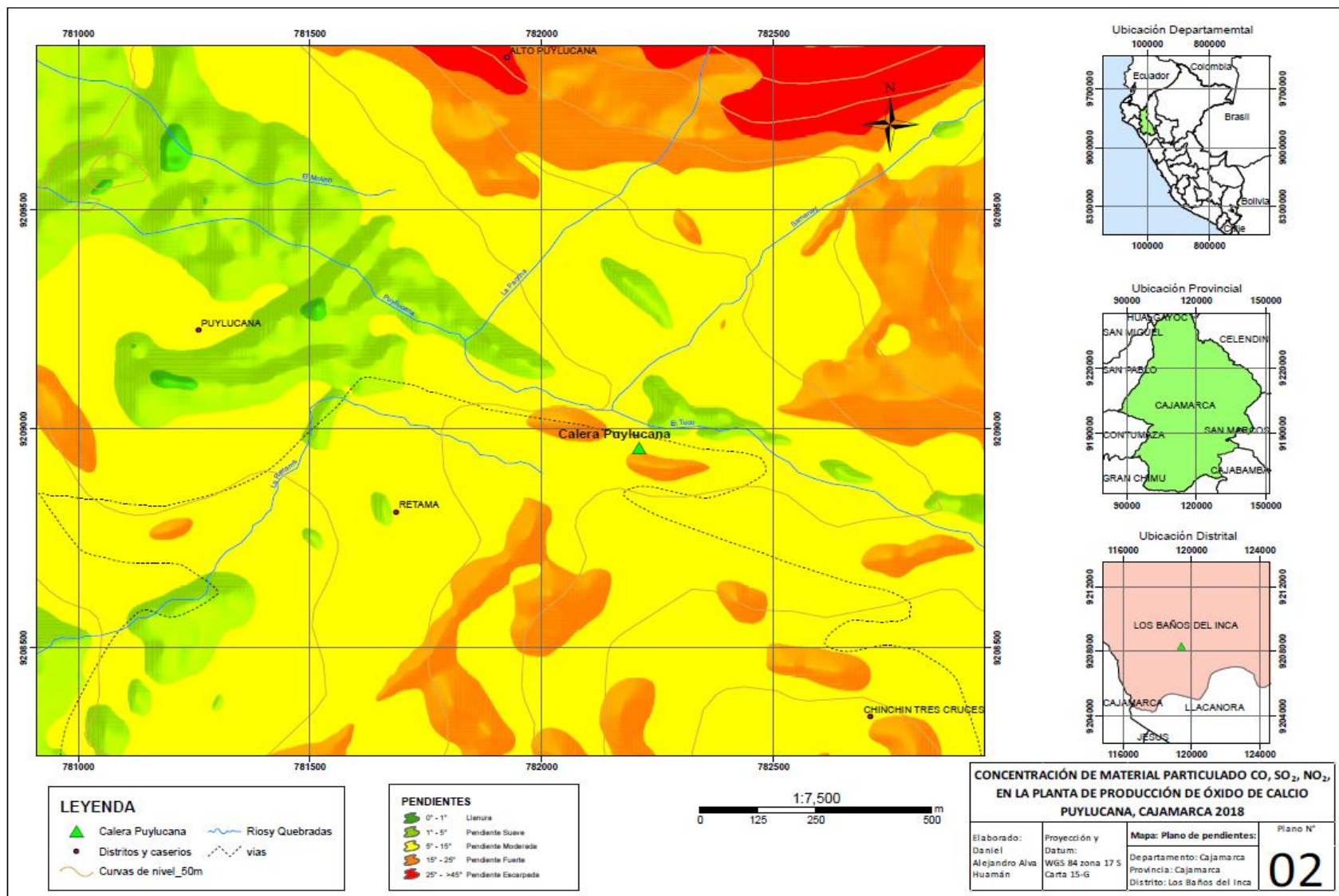
422348905-1 RB16      47300 Kato Road . Fremont, CA . 94538 (510) 438-0500 / (510) 438-3840 fax

Figura 51. Certificado de Calibración de contador de partículas (HANDHELD 3016IAQ)



## **PLANOS**



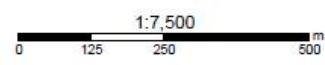


**LEYENDA**

	Calera Puyllucana		Rios y Quebradas
	Distritos y caseríos		vías
	Curvas de nivel_50m		

**PENDIENTES**

	0° - 1°	Llanura
	1° - 5°	Pendiente Suave
	5° - 15°	Pendiente Moderada
	15° - 25°	Pendiente Fuerte
	25° - >45°	Pendiente Escarpada



**CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, EN LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÓXIDO DE CALCIO PUYLLUCANA, CAJAMARCA 2018**

Elaborado: Daniel Alejandro Alva Huamán	Proyección y Datum: WGS 84 zona 17 S Carta 15-G	Mapa: Plano de pendientes: Departamento: Cajamarca Provincia: Cajamarca Distrito: Los Baños del Inca	Plano N° <b>02</b>
--	---	---	-----------------------

