

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Estudio comparativo del método de Reducción Carbotérmica aplicado a sulfuros
de cobre y molibdeno para la identificación de una mayor reducción de dióxido
de azufre**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA DE MINAS**

AUTOR

Patricia Isabel Astete Huishuita

Manuel Alejandro Mejía Flores

ASESOR:

Adolfo Pillihuaman Zambrano

Lima, Diciembre, 2020

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación para obtener el grado académico de bachiller se presenta un análisis comparativo, en vista a diferentes factores de importancia en el sector minero, del impacto de la aplicación de un método de reducción de emisión de gases de dióxido de azufre en comparación con métodos tradicionales aplicados por la industria en la última década.

Se analiza de forma cuantitativa la variación de la concentración de dióxido de azufre en el aire estudiado en un escenario posible en la provincia de Yauli. Los datos de concentración de dióxido de azufre y PM10 en el aire fueron provenientes de DIGESA.

Se realiza el fortalecimiento teórico metalúrgico del método estudiado por medio de antecedentes, con la finalidad de rectificar y verificar su efectividad teórica. Para ello, se trabajó por medio de diferentes antecedentes nacionales como internacionales de estudios en laboratorios, donde se corrobora la efectividad cinética en la metalurgia de este método de reducción de gases de dióxido de azufre en el proceso de obtención de cobre y molibdeno.

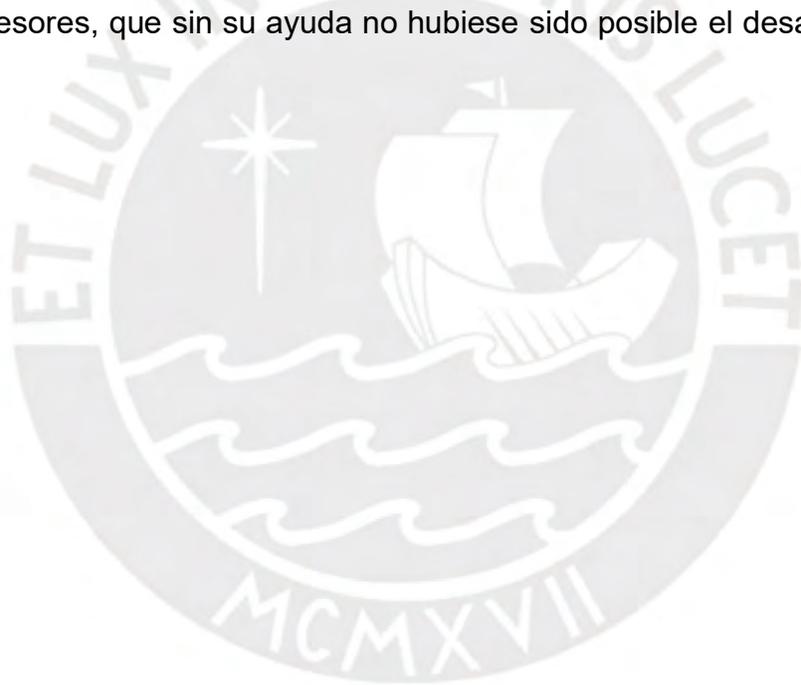
Por consiguiente, en el presente trabajo después del análisis metalúrgico del método estudiado, se aplica la metodología de Grey Clustering para comparar los escenarios de reducción de concentración de dióxido de azufre en el aire de la Oroya, tanto antes como después de aplicar teóricamente el método de reducción carbotérmica con cal.

Finalmente, se muestran los resultados con una significativa mejora en la calidad de aire, principalmente debido a la reducción porcentual de emisión de dióxido de azufre provenientes por causas mineras, generando impacto en aspectos ambiental, social y económico.

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios por guiar nuestros pasos en el difícil camino del aprendizaje, permitiendo levantarnos de cada error y caída, y así poder superarnos; a nuestros padres y hermanos que con su amor, perseverancia y comprensión apoyaron a que seamos consecuentes con nuestros ideales y firme en nuestras decisiones; a todas nuestras amistades que siempre estuvieron a nuestro lado para echarnos una mano en todo lo posible.

Agradecer a todas las personas que nos apoyaron en la elaboración del presente trabajo de investigación, gracias a la Dr. Maribel Guzmán, a nuestro asesor Adolfo Pillihuaman, y a todos los profesores, que sin su ayuda no hubiese sido posible el desarrollo correcto de este trabajo.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	8
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	8
1.2 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.3 OBJETIVOS	9
1.3.1 Objetivo General	9
1.3.2 Objetivo Específico.....	9
1.4 HIPÓTESIS.....	9
2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
2.1.1 Antecedentes Nacionales.....	10
2.1.2 Antecedentes Internacionales	11
2.2 ASPECTOS GENERALES DEL AIRE.....	14
2.2.1 El Aire.....	14
2.2.2 Contaminación del Aire	14
2.2.3 Principales Consecuencias Ambientales.....	18
2.2.3.1 Partículas en suspensión.....	18
2.2.3.2 SMOG	18
2.2.3.3 Efecto invernadero	18
2.2.3.4 Disminución de la capa de ozono.....	18
2.2.3.5 Lluvia ácida	19
2.3 BASES TEÓRICAS DE LA OBTENCIÓN DE METALES SULFURADOS	19
2.3.1 Análisis de Componentes Mineralógicos	19

2.3.2	Análisis de Procesos de obtención de metales sulfurados.....	20
2.4	NORMATIVA DE CONTROL DEL AIRE.....	23
2.4.1	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire.....	23
2.4.2	Estándares Internacionales de Calidad Ambiental del Aire.....	26
3	CAPITULO 3: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO.....	27
3.1	LA OROYA - YAULI.....	27
3.2	GRADO DE CONTAMINACIÓN.....	28
3.3	ACTIVIDAD MINERA.....	29
4	CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	31
4.1	METODOLOGÍA DE GREY CLUSTERING.....	31
5	CAPITULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	35
5.1	MÉTODO DE REDUCCION CARBOTERMICA DE SULFUROS.....	35
5.2	RESULTADOS DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂) ESTACIÓN YAULI.....	37
5.3	ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE.....	42
6	CAPITULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	43
6.1	CALIDAD DE AIRE ANTES DE LA APLICACIÓN TEÓRICA DEL MÉTODO	43
6.2	CALIDAD DE AIRE DESPUÉS DE LA APLICACIÓN TEÓRICA DEL	46
MÉTODO.....		
7	CAPITULO 7: CONCLUSIONES.....	49
7.1	ASPECTO SOCIAL.....	49
7.2	ASPECTO AMBIENTAL.....	49
7.3	ASPECTO ECONÓMICO.....	50
8	CAPITULO 8: RECOMENDACIONES.....	51
	BIBLIOGRAFÍA.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de los procesos de tostación (TSEG) con CaO. Fuente: (Lovera et al., 2015).....	10
Figura 2. Diagrama de flujos de producción de antimonio metálico y trióxido de antimonio. Fuente: (Chambi Viraca, 2011).....	11
Figura 3. Diagrama de flujos conceptual para la reducción carbotérmica de sulfuros metálicos en presencia de CaO. Fuente: (Padilla, 2002)	12
Figura 4. Diagrama de estabilidad para el Mo-CaO-S₂-O₂ a 600 °C para una fracción metálica de $0 < \text{Mo}/\text{Mo}+\text{Ca} < 0.5$. Fuente: (Orozco et al., 2016)	13
Tabla 1. Concentración y ciclos globales de gases atmosféricos. Fuente: Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en lima metropolitana, 2017	14
Figura 5. Escala comparative de tamaño de las partículas. Fuente: United States Environmental Protection Agency / US EPA	17
Figura 6. Partes de la celda de flotación. Fuente: (Gallardo & Esteban, 2019)	21
Figura 7. Metalurgia del Cobre. Fuente: (Aldhair Alvarez, 2015).....	22
Figura 8. Ubicación de la estación de monitoreo Yauli	27
Figura 9. Porcentajes de emisiones de contaminantes procedentes de Fuentes Fijas. Fuente: Planes de Acción a Limpiar el Aire.....	28
Figura 10. Promedio de 24h de SO₂ en Aire (ug/m³), comparado a la ECA actual de 80ug/m³. Fuente: Datos oficiales de las estaciones de monitoreo en La Oroya reportados al Gobierno peruano	29
Figura 11. Representación de una “función de blanqueamiento” general	32
Figura 12. “Función de blanqueamiento” de medida inferior	32
Figura 13. “Función de blanqueamiento” de medida moderada	32
Figura 14. “Función de blanqueamiento” de medida superior.	32

Figura 15. Composición de los gases producidos por la reacción a 1050°C para varias mezclas de reactivos.....35

Figura 16. Efecto de la cantidad de CaO en la velocidad de reducción de molibdenita con carbón en presencia de CaO36

Figura 17. Efecto de la cantidad de CaO en la velocidad de reducción de calcosina37

Figura 18. Gráfico de promedio diaria de dióxido de azufre (SO₂).....40



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentración y ciclos globales de gases atmosféricos. Fuente: Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en lima metropolitana, 2017	14
Tabla 2. Clasificación de los contaminantes atmosféricos. Fuente: Consejería de desarrollo rural, ganadería, pesca, alimentación y medio ambiente. Gobierno de Cantabria	16
Tabla 3. Análisis modal del mineral de cabeza. Fuente: (Manzaneda, 2019)	20
Tabla 4. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2008	23
Tabla 5. Niveles de estado de alerta nacionales para contaminantes del aire. Fuente: DS 012-2005-SA y DS 009-2003-SA.....	25
Tabla 6. Clasificación de los valores del INCA. Fuente: DS 112-2015-MINAM.....	25
Tabla 7. Guía de Calidad del Aire – OMS. Fuente: Organización Mundial de Salud, 2005.....	26
Tabla 8. Composición de las muestras por flotación diferencial aplicadas en el estudio de R. Padilla.....	35
Tabla 9. Resultados de dióxido de azufre (SO₂) estación Yauli. Fuente: DIGESA37	
Tabla 10. Resultados de dióxido de azufre promedio por día.....	40
Tabla 11. Promedio diario de partículas menores a 10 micras – PM₁₀ (ug/m³)....	41
Tabla 12. Resultados de dióxido de azufre (SO₂) aplicando el método de reducción carbotérmica	41
Tabla 13. INCA Dióxido de azufre (SO₂) promedio 24 horas	42
Tabla 14. INCA Dióxido de azufre (SO₂) promedio 24 horas.....	42
Tabla 15. Data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³).....	43
Tabla 16. Data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³) adimensionada	43

Tabla 17. Parámetros.....	43
Tabla 18. Parámetros adimensionados.....	43
Tabla 19. Inversa de los parámetros adimensionados	43
Tabla 20. Peso correspondiente a cada parámetro.....	44
Tabla 21. Evaluación de funciones triangulares para SO₂ (C1).....	44
Tabla 22. Evaluación de funciones triangulares para PM₁₀ (C2).....	44
Tabla 23. Valores de CTWF correspondientes a la estación Yauli	45
Tabla 24. Valores de CTWF multiplicados por su peso correspondiente	45
Tabla 25. Valores de coeficientes de clusterización	45
Tabla 26. Nueva data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³).....	46
Tabla 27. Nueva data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³) adimensionada	46
Tabla 28. Parámetros.....	46
Tabla 29. Parámetros adimensionados.....	46
Tabla 30. Inversa de los parámetros adimensionados	46
Tabla 31. Peso correspondiente a cada parámetro.....	47
Tabla 32. Nueva evaluación de funciones triangulares para SO₂ (C1).....	47
Tabla 33. Nueva evaluación de funciones triangulares para PM₁₀ (C2).....	47
Tabla 34. Nuevos valores de CTWF correspondientes a la estación Yauli	48
Tabla 35. Nuevos valores de CTWF multiplicados por su peso correspondiente	48
Tabla 36. Nuevos valores de coeficientes de clusterización.....	48

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La reducción carbotérmica de sulfuros en presencia de óxidos de calcio fue una investigación realizada en el año 2002 por Rafael Padilla, en la cual se realizaron pruebas experimentales a escala de laboratorio en un aparato termogravimétrico para determinar la factibilidad técnica del proceso de reducción y estudiar su cinética, realizando así una alternativa de reducción de sulfuros.

En la presente tesis se pretende aplicar esta alternativa de reducción a los sulfuros haciendo uso del carbón y CaO, la cual presenta diferentes ventajas comparado a los procesos pirometalúrgicos tradicionales usados en la industria. Las principales son: menores costos de tratamiento, menores temperaturas de operación, y sobre todo, eliminación de la contaminación ambiental con SO₂.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Diversos metales no ferrosos como el cobre, zinc, plomo, molibdeno, níquel, cobalto, antimonio, etc. se producen principalmente a partir de sulfuros metálicos. Durante las operaciones de oxidación se produce inevitablemente la formación de dióxido de azufre (SO₂) gaseoso, el cual ocasiona serios problemas de contaminación ambiental y severos daños a la salud de la población.

1.2 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

Lo que se busca en el presente estudio es reducir la emisión de gases sulfurados generados en el proceso de tostación en la obtención de metales a partir de sulfuros, detallado de diversos enfoques.

- Económico
Reducir los gastos generados en la mina por conflictos sociales que se producen debido a la contaminación del aire. Así como también la aplicación de un nuevo método económicamente factible para la producción de minerales sulfurados.
- Social

Reducir considerablemente la contaminación del aire en las comunidades aledañas a la empresa producto de la emanación de los gases tóxicos. Mejorar el ambiente y relación social entre mina y la población zonal.

- Salud ocupacional
Mejorar las condiciones ambientales para con la salud y bienestar de los trabajadores reduciendo el impacto negativo generado por el exceso de contaminación del aire en la mina.
- Ambiental
Reducir los niveles de contaminación del aire por dióxido de azufre.

1.3 OBJETIVOS

A continuación, se detallan los objetivos que se desean alcanzar con el desarrollo de la presente tesis.

1.3.1 Objetivo General

El propósito general de este trabajo es comparar los procesos de reducción de gases de azufre contaminantes, su impacto y efecto sobre los niveles de contaminantes del aire en las comunidades aledañas a la mina.

1.3.2 Objetivo Específico

- Determinar los parámetros y condiciones de aplicación del método de reducción carbotérmica de sulfuros.
- Analizar el porcentaje de reducción de gases contaminantes.
- Determinar la ventaja económica y ambiental que representa este método.
- Identificar los efectos que este proceso tiene en las comunidades aledañas con respecto a la calidad del aire.

1.4 HIPÓTESIS

La aplicación del método de reducción carbotérmica con cal muestra teóricamente una disminución considerable en la emisión de dióxido de azufre.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

El método de reducción carbotérmica en sulfuros ha sido estudiado con énfasis en los últimos años, buscando la efectividad de este método en la industria minera para la recuperación del metal. Se ha estudiado en diversos sulfuros, midiendo parámetros que determinen y cumplan con un proceso metalúrgico responsable, por lo que se experimentó la utilización de la cal para reducir la emisión de gases sulfurados contaminantes en el proceso de tostación, desarrollado por estudios nacionales e internacionales.

2.1.1 Antecedentes Nacionales

Modelamiento de la tostación (TSEG) del sulfuro de molibdeno con oxido de calcio (cal) en función de la temperatura

“En el presente trabajo mostramos las investigaciones pirometalúrgicas desarrolladas en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, con la finalidad de encontrar reacciones de tostación sólido – sólido sin emisión de gases (TSEG), para adecuarnos a las normas ambientales prevalecientes en el país. El Ministerio del Ambiente está implementando la metodología (RETC) para estimar las emisiones en la industria no ferrosa, para lo cual la tostación sin emisión gaseosa sería una de las estrategias para abatir el SO_2 . En ese sentido se ha logrado el modelamiento de las condiciones de tostación (TSEG), en función de la temperatura, lo cual nos permitirá hacer distintas simulaciones para minimizar las emisiones fugitivas del SO_2 ” (Lovera et al., 2015).

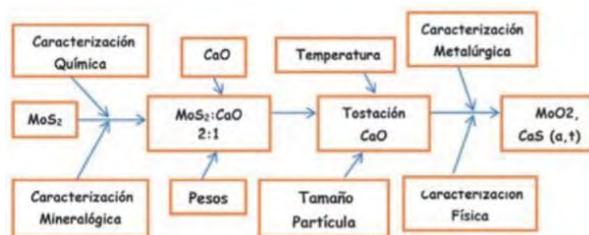


Figura1. Diagrama de los procesos de tostación (TSEG) con CaO. Fuente: (Lovera et al., 2015)

Esta presente investigación se enmarca en formar CaS en lugar de SO₂, con lo cual se estaría minimizando los niveles de los gases efecto invernadero en lo que respecta los gases de tostación. Para ello, realizan el proceso de tostación de sulfuros en presencia de un agente captador de azufre (la cal). Se discuten aspectos termodinámicos y cinéticos de la tostación sin emisión gaseosa de molibdeno en presencia de CaO.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

Reducción carbotérmica de sulfuro de antimonio en presencia de óxido de calcio

“La reducción de antimonita (Sb₂S₃) con carbón en presencia de óxido de calcio fue investigada en el rango de temperatura de 700 a 850 °C. Las pruebas experimentales se realizaron a escala de laboratorio en un aparato termogravimétrico para determinar la factibilidad técnica del proceso de reducción y estudiar su cinética. Se estudió el efecto de la temperatura y razones molares de los reactivos en la velocidad de reducción de antimonita con carbón en presencia de CaO” (Chambi Viraca, 2011).



Figura 2. Diagrama de flujos de producción de antimonio metálico y trióxido de antimonio.

Fuente: (Chambi Viraca, 2011)

Esta alternativa de reducción de antimonita con carbón y CaO presente en esta tesis tiene varias ventajas frente a los procesos pirometalúrgicos tradicionales usados en la industria, tales como menores costos de tratamiento, menores temperaturas de operación y, sobre todo, eliminación de la contaminación ambiental con SO₂.

Reducción carbotérmica de sulfuros metálicos

“Un método alternativo para el tratamiento de concentrados sulfurados que evita la contaminación del aire con SO₂ es la reducción directa del sulfuro metálico con reductores gaseosos o con reductores sólidos. Una alternativa atractiva, explorada en forma limitada, es la reducción carbotérmica de sulfuros en presencia de un agente captador de azufre. Esta interesante alternativa es el tema a discutirse en este trabajo” (Padilla, 2002).

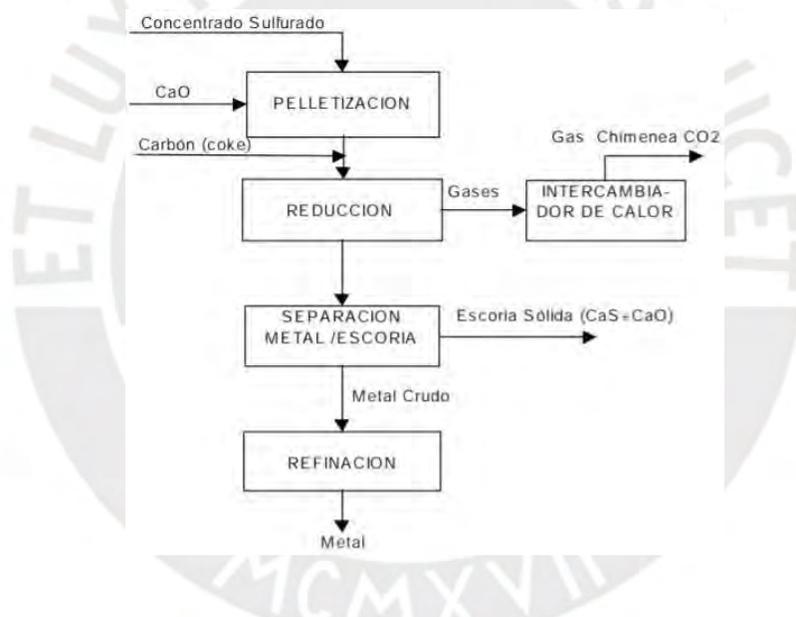


Figura 3. Diagrama de flujos conceptual para la reducción carbotérmica de sulfuros metálicos en presencia de CaO. Fuente: (Padilla, 2002)

El estudio de reducción carbotérmica del presente paper fue aplicado para sulfuros como molibdenita (MoS₂), calcosina (Cu₂S) y calcopirita (CuFeS₂), los cuales tuvieron como resultado, en presencia de CaO (poderoso receptor de azufre), una factibilidad desde el punto de vista de la termodinámica y cinética. Por lo que, se determinó que esta técnica de reducción

un gran potencial de uso para la producción de metales a partir de sulfuros, eliminando la contaminación ambiental con gases tóxicos como es el SO₂.

Tostación de sulfuros por reducción carbotérmica

“En este trabajo se analizan concentrados sulfurados ricos en cobre, hierro y molibdeno, obtenidos por flotación Rougher y flotaciones diferenciales, dando origen a diferentes leyes. Los concentrados se sometieron al proceso de reducción carbotérmica en donde se estudiaron los parámetros de trabajo. Se ajustaron los valores del agente captador y reductor, para retener las mayores concentraciones de azufre. Analizando los resultados obtenidos se fijó la temperatura, el tiempo óptimo de trabajo y optimas relación molar del CaO y C para los cuales se alcanzó la mayor recuperación de metales como el molibdeno” (Orozco et al., 2016).

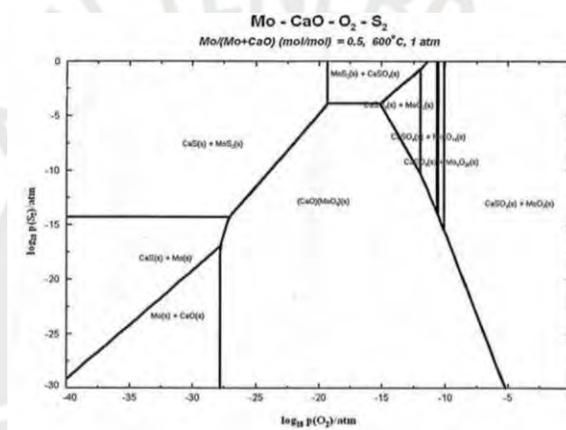


Figura 4. Diagrama de estabilidad para el Mo-CaO-S₂-O₂ a 600 °C para una fracción metálica de $0 < Mo/(Mo+Ca) < 0.5$. Fuente: (Orozco et al., 2016)

En la presente publicación experimental se da énfasis a las reacciones metalúrgicas, como a la cinética y termodinámica en los procesos de tostación y reducción, con la finalidad de obtener la mayor recuperación de metal posible empleando la reducción carbotérmica.

Se destaca de este trabajo que el uso de concentrados obtenidos por procesos de flotación diferencial, en comparación con procesos de flotación Rougher, mejoró considerable en lo que respecta a la recuperación de molibdeno, después de que los concentrados fueran sometidos a tostación por reducción carbotérmica. Por lo que, existe una diferencia notable que favorece el proceso de tostación cuando se reduce la concentración de elementos como Cu y Fe al intentar recuperar Mo.

2.2 ASPECTOS GENERALES DEL AIRE

2.2.1 El Aire

La atmósfera es un sistema dinámico, en el cual grandes cantidades de materiales son añadidas, mediante numerosos procesos naturales y humanos que constituyen las emisiones atmosféricas. El aire atmosférico es una mezcla gaseosa cuya composición principal son gases: oxígeno, nitrógeno y gases nobles como helio, neón, argón y una cantidad variable de dióxido de carbono; con concentraciones de 21%, 78% y 1% respectivamente. A medida que aumenta la distancia entre la superficie de la tierra, las características del aire van variando, así como la densidad del mismo disminuye.

2.2.2 Contaminación del Aire

La alteración de la constitución de esta capa gaseosa por la incorporación de sustancias en sus diferentes estados se denomina contaminación. Es decir, la contaminación del aire es producto de factores también de emisiones naturales por gases, erupciones, polvo, bacterias, entre otros. Por otro lado, se encuentra también la contaminación antropogénica la cual es la contaminación producida por las personas siendo esta la de mayor riesgo.

El tiempo en que un contaminante puede permanecer en el aire se le denomina tiempo de residencia. Este tiempo depende muchas veces del tipo de contaminante del que se trate y de su estado en la atmósfera. Para el caso de los gases, su residencia depende de su capacidad de reacción siendo los más reactivos los de menor tiempo de permanencia; en el caso de tratarse de partículas, estas dependen directamente de su tamaño. Los contaminantes por partículas son medidos en microgramos de contaminante por metro cúbico, mientras que los gases son medidos en partes por millón. Ello se puede observar con mayor claridad en la siguiente tabla la cual muestra el tiempo de permanencia de los contaminantes en la atmósfera.

Tabla 1. Concentración y ciclos globales de gases atmosféricos. Fuente: Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en lima metropolitana, 2017.

Gas	Concentración Media (ppm)	Tiempo medio de residencia	Ciclo	Estado
Ar	9340	-		Acumulación durante
Ne	18	-	No hay ciclo	la historia de la tierra
Kr	1.1	-	No hay ciclo	
Xe	0.09	-	No hay ciclo	
N ₂	780840	10 ⁶ años	Biológico y microbiológico	-
O ₂	209460	10 años	Biológico y microbiológico	-
CH ₄	1.65	7 años	Biogénico y químico	Estado Cuasi constante
CO ₂	332	15 años	Antropogénico, biogénico	
CO	0.05-0.2a	65 días	Antropogénico, químico	
H ₂	0.58	10 años	Biogénico y químico	o
N ₂ O	0.33	10 años	Biogénico y químico	desequilibrio (H ₂ O, CO ₂)
SO ₂	10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁴	40 años	Antropogénico, químico	
NH ₃	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³	20 días	Biogénico, químico evap.	
NO+NO ₂	10 ⁻⁶ - 10 ⁻²	1 día	Antropogénico, químico, radia.	
O ₃	10 ⁻² - 10 ⁻¹	-	Químico	
HNO ₃	10 ⁻⁵ - 10 ⁻³	1 día	Químico, evaporación	
H ₂ O	variable	10 días	Físico químico	
He	5.2	10 años	Físico químico	

Los óxidos de azufre más relevantes en el proceso de contaminación atmosférica son el trióxido de azufre SO₃ y el dióxido de azufre SO₂. Este último es un gas irritante para las personas porque provoca alteraciones en las vías respiratorias y los ojos, el cual puede permanecer en la atmósfera por alrededor de 40 años. Para el caso del trióxido de azufre pese a que su tiempo de residencia es mucho menor, este puede generar ácido sulfúrico formando así la lluvia ácida. La contaminación atmosférica o contaminación del aire es una de las formas principales en que puede ser degradado o afectado parte del ambiente.

Los contaminantes del aire se clasifican en dos grandes grupos: primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son aquellos que permanecen en la atmósfera tal y como fueron emitidos por la fuente (óxidos de azufre, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, hidrocarburos y partículas), secundarios que son aquellos que han estado sujetos a cambios químicos, o bien, son el producto de la reacción de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera como oxidantes fotoquímicos y algunos radicales de corta existencia como el ozono (Kiely, 1999)

Los principales tipos de contaminantes del aire son los contaminantes gaseosos los cuales varían sus concentraciones dependiendo de la zona de origen. Los principales contaminantes atmosféricos son los compuestos de azufre, de nitrógeno, de carbono, halógenos y compuestos

derivados, y oxidantes fotoquímicos. Su clasificación en contaminante primario y secundario se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2. Clasificación de los contaminantes atmosféricos. Fuente: Consejería de desarrollo rural, ganadería, pesca, alimentación y medio ambiente. Gobierno de Cantabria.

TIPO	CONTAMINANTE PRIMARIO	CONTAMINANTES SECUNDARIOS
Compuestos de S	SO ₂	SO ₃ , SO ₄ H ₂ , SO ₄ M*
Compuestos de N	NO, NH ₃	NO ₂ , NO ₃ M*
Compuestos orgánicos de C	Compuestos C1-C7	Aldehídos, cetonas, ácidos
Oxidos de C	CO, CO ₂	Ninguno
Compuestos de halógenos	HF, HCl	Ninguno
Partículas	Ninguno	Ninguno

Para el caso de las partículas en suspensión también llamado material particulado (PM), este es clasificado según el tamaño de su partícula:

- Partículas gruesas (diámetro menor o igual a 10 micras – μm).
- Partículas finas (tamaño inferior o igual a 2,5 micras – μm).
- Partículas ultrafinas (diámetro inferior a 0,1 micras – μm).

Desde un punto de vista normativo, solo se han establecido valores objetivo y límite para las partículas gruesas (PM₁₀) y las partículas finas (PM_{2.5}). Esto debido a su alto peligro para la salud de las personas, al ser una partícula de menor tamaño tiene la facilidad de penetrar en el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus características fisicoquímicas. El siguiente gráfico es una comparación entre los tamaños de las partículas mencionados en relación con el cabello de una persona.



Figura 5. Escala comparativa de tamaño de las partículas. Fuente: United States Environmental Protection Agency / US EPA

Los efectos que se tienen sobre la salud de las personas son principalmente afecciones respiratorias – pulmonares y aumento en los ataques cardíacos. Niveles altos de contaminación atmosférica según el Índice de Calidad del Aire de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) perjudican directamente a personas que padecen asma y otros tipos de enfermedad pulmonar o cardíaca. El nivel de riesgo depende también de factores como la cantidad de contaminación en el aire, la salud de la persona, contacto con sustancias contaminadas, entre otros.

Así mismo, las emisiones de gases y la generación de polvos en los procesos mineros alteran la seguridad ocupacional de las personas siendo los principales casos los siguientes:

- La cantidad de polvo y gases que se generan en los procesos mineros (dentro de la mina), causan grandes daños a los que laboran en la mina, afectan la visibilidad, impidiendo el desplazamiento y labor del trabajador. También ocurre deposición de polvos en edificaciones, plantas de operación, construcciones, formándose lugares incómodos de trabajo (condiciones inseguras) y descanso. Estos hechos disminuyen la eficiencia de operación en los procesos mineros y en general en todos los procesos industriales.
- Así mismo los polvos y gases que se generan por el transporte en las vías fuera de la mina se constituyen en potenciales factores de inseguridad para la población circundante, debido a que se altera su entorno natural y sus condiciones de vida.

2.2.3 Principales Consecuencias Ambientales

2.2.3.1 Partículas en suspensión

Son todas las partículas líquidas y sólidas presentes en suspensión en el aire. Es una mezcla de polen, humo y gotas que varían en sus tamaños desde gruesos, finos y ultrafinos. Estas partículas que provienen de fuentes naturales o no naturales son arrastradas por acción del aire o por el contrario ser formadas en la atmósfera por la reacción de gases como el SO₂.

Al mezclarse estas partículas con otros gases contaminantes su composición es alterada aumentando así sus efectos nocivos

2.2.3.2 SMOG

Es la contaminación del aire más denominada niebla tóxica o smog la cual es producida por la acción de la luz solar sobre la niebla y el humo siendo nocivo para el ser humano. Existen 2 tipos de smog: smog industrial producto de la mezcla de ácido sulfúrico, partículas en suspensión y dióxido de azufre, y el smog fotoquímico producto de la mezcla de sustancias como aldehídos, nitratos de peroxiacilo (PAN) y cetonas también llamado contaminación fotoquímica el cual es muy frecuente en zonas de industrialización.

2.2.3.3 Efecto invernadero

El efecto invernadero evita que una parte del calor recibido desde el sol deje la atmósfera y vuelva al espacio actuando, así como un invernadero para la tierra. Esto permite que la superficie de la tierra se caliente. Existe una cierta cantidad de gases de efecto de invernadero en la atmósfera que son absolutamente necesarios para calentar la Tierra, pero en la debida proporción. Los procesos internos fisicoquímicos de la atmósfera y su relación con los componentes medio ambientales constituyen el sistema climático de la tierra. Actividades como la quema de combustibles derivados del carbono aumentan esa proporción y el efecto invernadero aumenta.

2.2.3.4 Disminución de la capa de ozono

El ozono es una forma de oxígeno O₃ que se encuentra en la atmósfera superior alrededor de la tierra la cual refleja los rayos del sol evitando así el ingreso de los rayos ultravioletas a la tierra. La capa fina de moléculas de ozono en la atmósfera absorbe y refleja algunos rayos ultravioletas (UV) antes de que lleguen a la superficie de la tierra, con lo cual se hace posible la vida en la tierra. El daño a la capa de ozono se produce principalmente por el uso de clorofluorocarbonos (CFCs) que están presentes en productos sintéticos como desodorantes,

ambientadores, bombas de spray, aerosoles, entre otros. El agotamiento del ozono produce niveles más altos de radiación UV en la tierra, con lo cual se pone en peligro tanto a plantas como a animales.

2.2.3.5 Lluvia ácida

La lluvia ácida es formada principalmente por dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno. Cuando esta se deposita sobre la superficie de las plantas, edificaciones o suelos se le denomina “deposición seca”. La deposición húmeda es producto del vapor de agua atmosférico que transforma los compuestos de azufre y nitrógeno en ácidos sulfúrico y nítrico respectivamente el cual es depositado como granizo, nieve o lluvia.

2.3 BASES TEÓRICAS DE LA OBTENCIÓN DE METALES SULFURADOS

Los sulfuros son minerales constituidos por el enlace entre el azufre y elementos metálicos, tales como el cobre, hierro, plomo, y zinc, entre otros. Los minerales sulfurados más comunes en nuestro país son calcopirita, bornita, calcosina, galena, esfalerita, etc. Un subproducto importante de estos yacimientos es el molibdeno, que está en la forma de molibdenita.

2.3.1 Análisis de Componentes Mineralógicos

Para determinar en lo posible donde se encuentra el metal sulfurado, y en qué especies se presenta, se realiza un estudio mineralógico mediante microscopio petrográfico.

Mediante esta técnica se consigue una superficie del mineral completamente pulida y exenta de rayas, que se observa al microscopio, y entonces se distinguen perfectamente los distintos componentes del mineral.

Para el análisis de los componentes mineralógicos se identifica las características físicas de la muestra de mineral (densidad aparente, peso específico, dureza e índice de abrasión). Este análisis se realiza por microscopía de barrido (TIMA o QEMSCAN) en el mineral de cabeza, de tal modo que detecta la condición de las especies minerales económicamente importante, así como la presencia de sulfuros no valiosos y el posible impacto en la recuperación de sulfuros valiosos por flotación.

Tabla 3. Análisis modal del mineral de cabeza. Fuente: (Manzaneda, 2019)

Modal Full Mineral A (% peso)			
Chalcopyrite	0.20	Quartz	6.15
Pyrrhotite	11.36	K-Feldspar	9.12
Pyrite	9.18	Plagioclase	1.38
Sphalerite/Wurtzita	9.63	Hematite/Magnetite	0.00
Galena	3.63	Other Oxides	0.01
Arsenopyrite	0.00	Rutile	0.03
Other Cu Minerals	0.00	Calcite	9.51
Clinopyroxene	12.84	Other Carbonates	0.26
Garnets	18.02	Titanite	0.31
Biotite	2.07	Zircon	0.01
Chlorite	1.47	Sulfosalts	0.00
Muscovite	2.99	Anhydrite	0.01
Clays	0.02	Apatite	0.39
Amphibol	1.39	Others	0.0033
Tourmaline	0.01		
			100.00

En el análisis de especies mineralógicas en el mineral de cabeza se aplica la liberación de del sulfuro, donde se determina el mayor porcentaje de sulfuro liberado y el porcentaje de muestra apto para la flotación. También se puede determinar las asociaciones de sulfuro con otras especies en el mineral de cabeza, expresado en porcentaje.

Finalmente se realiza un análisis granulométrico de la muestra preparada de mineral de cabeza mediante una distribución por mallas, donde se observa el contenido de sulfuro por malla para determinar la fracción de material flotable.

2.3.2 Análisis de Procesos de obtención de metales sulfurados

Proceso de flotación total de sulfuros

En esencia lo que se busca es flotar inicialmente los minerales sulfurados. Aunque esta es la idea básica, existen complicaciones que pueden aparecer según la complejidad del depósito.

Por lo general en este tipo de depósitos, los minerales suelen contener cantidades interesantes de metal, por lo que el concentrado se beneficia de manera económica por el valor agregado que ofrece la presencia de metal valioso. Una etapa muy importante, antes de efectuar la separación selectiva, es determinar el tamaño óptimo de molienda primaria, y los reactivos químicos necesarios para efectuar la separación. Se requiere de un programa de pruebas para evaluar cuales reactivos son necesarios, y en qué cantidades deben usarse.

Para circuitos de gran tonelaje que mayormente se encuentran en muchas de las operaciones de cobre una celda mecánica tipo Sub-A puede usarse. Las divisiones intermedias son eliminadas y la circulación de la pulpa a través por medio del impulsor está fijada para proporcionar la agitación y aireación deseada para condiciones de flotación. Las máquinas estas dispuestas con hasta seis celdas de flujo libre, de las cuales dos o más celdas son siempre en serie, esto permite un volumen adecuado para absorber las sobrecargas y la fluctuación en el alimento sin ajustes en la celda. Los minerales y los flujos intermedios que se encuentran en la zona quieta de la celda están obligados gradualmente a moverse hacia arriba, hacia la zona de espumas. Solamente el material más grueso en la zona de agitación pasa por el impulsor para un mejor acondicionamiento.

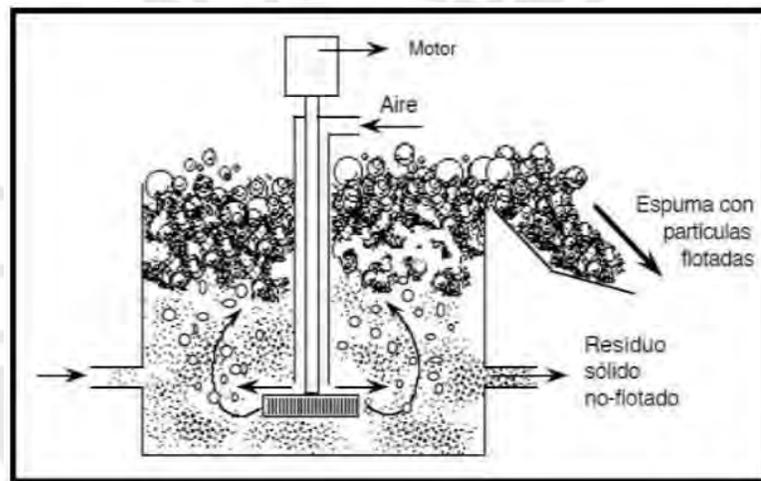


Figura 6. Partes de la celda de flotación. Fuente: (Gallardo & Esteban, 2019)

Proceso de tostación de sulfuros

En el proceso de tostado la temperatura genera reacciones químicas gas-sólido.

La aplicación clásica del proceso de tostación consiste en la oxidación de minerales de sulfuros metálicos. Estos sulfuros son calentados debido a la presencia de aire a una temperatura que permite que el oxígeno del aire reaccione con los sulfuros y así generen dióxido de azufre: SO_2 , gaseoso, y óxidos de metal sólido. Comúnmente al producto sólido del tostado se le denomina calcinado.

Si las condiciones de temperatura y de aire son tales que el sulfuro se pueda oxidar completamente, a este proceso se le conoce como tostado muerto. Suele pasar, como en el caso de pretratamiento para la alimentación de fundición a horno de reverbero o eléctrico, el proceso de tostación se realice

con una cantidad menor de oxígeno que la que necesita para oxidar completamente al mineral, esto debido a que solo en parte se ha retirado el azufre, y para este caso se le denomina tostado parcial.

Finalmente, si ambas condiciones de temperatura y de aire se controlan de tal forma que al suministrar los sulfuros reaccionan para obtener sulfatos de metal en lugar de óxidos metálicos, a este proceso se le conoce como sulfatación por tostado. Comúnmente las condiciones de temperatura y del aire se mantienen de tal forma que un aporte mixto de sulfuros reacciona de tal modo que un metal genera un sulfato y el otro originando un óxido, a este proceso se le conoce como sulfatación selectiva o también como tostado selectivo.

Proceso de piroreducción con carbono

En este proceso se usa como agente reductor una fuente de carbono, como el coque, el carbón. El carbono o el monóxido de carbono generado a partir de él, saca el oxígeno de la mena de los óxidos, dejando el metal en su forma elemental. Para ello, el proceso de oxidación del carbono se basa en dos etapas, primero produciéndose monóxido de carbono y después dióxido de carbono.

La reducción es la etapa final a altas temperaturas de la fundición. Aquí es cuando el óxido se convierte en metal elemental. El ambiente reductor (generalmente proporcionado por el monóxido de carbono que se produce por la combustión incompleta del carbono en el interior del horno poco ventilado) saca a los átomos de oxígeno del mineral puro. Las temperaturas necesarias varían en un amplio rango, tanto en la comparación entre los distintos metales como en la relación con el punto de fusión del propio metal.

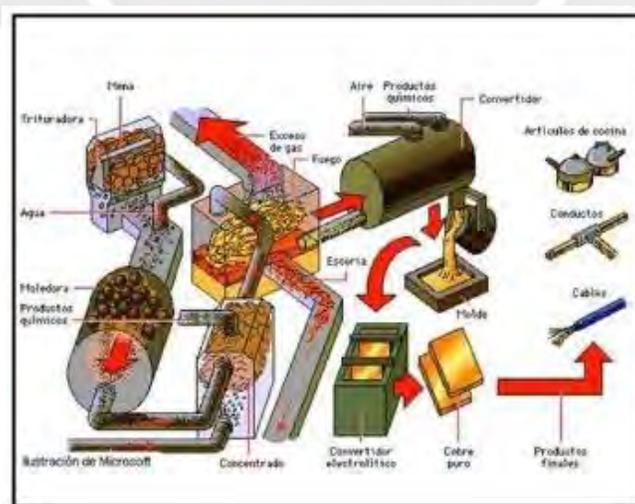


Figura 7. Metalurgia del Cobre. Fuente: (Aldhair Alvarez, 2015)

2.4 NORMATIVA DE CONTROL DEL AIRE

La normativa de control de aire está dada por 2 instrumentos legales: los límites máximos permisibles (LMP) y los estándares de calidad ambiental (ECA). El primero de ellos se rige de la Resolución Ministerial N° 315-96-EM/VMM que indica los niveles máximos permisibles de elementos y compuesto presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas; mientras que los ECA, se rigen del Decreto Supremo N° 074-2001-PCM y el Decreto Supremo N° 069-2003-PCM.

2.4.1 Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire

Los ECA están definidos como los niveles de concentración máxima que pueden haber de determinados contaminantes en el aire, los cuales son establecidos para evitar cualquier tipo de riesgo sobre la salud humana. Los estándares que protegen la salud pública son llamados estándares primarios, mientras que los estándares secundarios son aquellos establecidos para proteger el bienestar público. La siguiente tabla muestra todos los parámetros indicados.

Tabla 4. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire. Fuente: Ministerio del Ambiente, 2008

Contaminante	Periodo	Valor $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Criterios de evaluación	Método de análisis
Benceno (C ₆ H ₆)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de azufre (SO ₂)	24 h	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia UV (método automático)
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1 h Anual	200 100	NE más de 24 veces al año Media aritmética anual	Quimioluminiscencia (método automático)
Material particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM _{2.5})	24 h Anual	50 25	NE más de 7 veces al año Media aritmética anual	Separación inercial filtración (gravimetría)
Material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM ₁₀)	24 h Anual	150 50	NE más de 3 veces al año Media aritmética anual	Separación inercial filtración (gravimetría)

Mercurio gaseoso total (Hg)	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman. (Métodos automáticos)
Monóxido de carbono (CO)	1 h 8 h	30000 10000	NE más de 1 vez al año Media aritmética móvil	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (método automático)
Ozono	8 h	120	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de absorción ultravioleta (método automático)
Plomo (Pb) en PM10	Mensual Anual	1.5 0.5	NE más de 24 veces al año Media aritmética de los valores mensuales	Método para PM10 (Espectrofotometría de absorción atómica)
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	24 h	150	Media aritmética	Fluorescencia UV (método automático)

El DS N° 009-2003-SA y su modificatoria DS N° 012-2005-SA indican el reglamento sobre los niveles de estados de alerta nacionales para contaminantes del aire y define los umbrales de alerta para contaminantes basados en concentraciones de H₂S, CO y SO₂. Su tabla de valores se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 5. Niveles de estado de alerta nacionales para contaminantes del aire. Fuente: DS 012-2005-SA y DS 009-2003-SA

TIPOS DE ALERTA	Material Particulado (PM10)	Dióxido de Azufre (SO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)	Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)
Cuidado	>250 µg/m ³ prom. aritmético 24 horas	>500 µg/m ³ prom. Móvil 3 horas	>15 000 µg/m ³ prom. Móvil 8 horas	>1 500 µg/m ³ prom. aritmético 24 horas
Peligro	>350 µg/m ³ prom. aritmético 24 horas	>1 500 µg/m ³ prom. Móvil 3 horas	>20 000 µg/m ³ prom. Móvil 8 horas	>3 000 µg/m ³ prom. aritmético 24 horas
Emergencia	>420 µg/m ³ prom. aritmético 24 horas	>2 500 µg/m ³ prom. móvil 3 horas	>35 000 µg/m ³ prom. móvil 8 horas	>5 000 µg/m ³ prom. aritmético

Por otro lado, se encuentran también los índices de calidad del aire (INCA), los cuales muestran mediante monitoreo la calidad del aire en cada distrito y según ello son clasificados en categorías que van desde alerta máxima, muy malo, malo, moderado y hasta bueno. Estos valores fueron calculados usando de referencia a los estándares de calidad ambiental. La clasificación de los valores del INCA se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 6. Clasificación de los valores del INCA. Fuente: DS 112-2015-MINAM

Estado de calidad del aire	Valores del INCA	Riesgos	Recomendaciones
BUENO	0 - 50	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de aire. Puede realizar actividades al aire libre.
MODERADO	51 - 100	Las personas de los grupos sensibles (niño, tercera edad, embarazadas, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares crónicas) podrían experimentar algunos síntomas respiratorios.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para los grupos vulnerables.
MALO	101 - valor umbral de contaminante	Las personas de los grupos sensibles podrían experimentar daños a la salud. La población en general podría sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre.
UMBRAL DE CUIDADO	>valor umbral de contaminante	Toda la población puede verse afectada gravemente en la salud.	Implementar estados de alerta.

2.4.2 Estándares Internacionales de Calidad Ambiental del Aire

Los estándares internacionales de calidad ambiental del aire más conocidos son los emitidos por el Banco Mundial y la Organización Mundial de Salud. Estos estándares son elaborados teniendo en cuenta diversos contextos por lo cual no son una representación de los estándares establecidos por otros países. La siguiente tabla muestra las “Guías de Calidad del Aire” de la OMS para los casos de O3, SO2, PM10, PM2.5.

Tabla 7. Guía de Calidad del Aire – OMS. Fuente: Organización Mundial de Salud, 2005

Contaminante	Periodo	OMS	PERU ECA µg/m ³	Método de análisis
SO ₂	24 h 10 min	20 500	250 --	Fluorescencia UV (método automático)
NO ₂	1 h Anual	200 40	200 100	Automático Método de Referencia Activo de la EPA Capítulo 1, CFR 40 Parte 53 Apéndice F
PM ₁₀	24 h Anual	50 20	150 50	Método de Referencia Activo de la EPA Capítulo 1, CFR 40 Parte 50 Apéndice J
PM _{2.5}	24 h Anual	25 10	50 25	Separación inercial filtración (gravimetría)
Ozono	8 h	100	120	Fotometría de absorción ultravioleta

3 CAPITULO 3: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

3.1 LA OROYA - YAULI

La ciudad de La Oroya se encuentra ubicada en la provincia de Yauli del departamento de Junín, a 176 km al Este de Lima, en la cuenca alta del río Mantaro, a una altitud de 3750 msnm. De acuerdo con el último censo realizado por INEI, posee una población censal de 18 600 habitantes, de los cuales el 5% no reside permanentemente en ese distrito y el 11% no vivía ahí hace 5 años. La ciudad de la Oroya se ubica a lo largo de la “Carretera Central del Perú” entre los kilómetros 170 y 176 de dicha carretera; siendo esta ubicación estratégica para intercambios de productos entre la sierra y la selva central del país, a su vez para la comunicación de dichas zonas con la capital de la república.

El lugar donde se realizó el monitoreo del aire, en lo que respecta la data de la presenta tesis, es el centro poblado de Yauli. La estación de monitoreo fue colocada en la Plaza Principal YAULI.



Figura 8. Ubicación de la estación de monitoreo Yauli

3.2 GRADO DE CONTAMINACIÓN

Históricamente se puede ver, mediante la siguiente imagen estadística, dos ciudades muy afectadas por la emisión de dióxido de azufre, estas son La Oroya e Ilo. Para el presente trabajo de tesis, se dará enfoque en lo que respecta a La Oroya donde, se puede observar que casi el 100% de la contaminación se debió a dióxido de azufre hasta 2014.

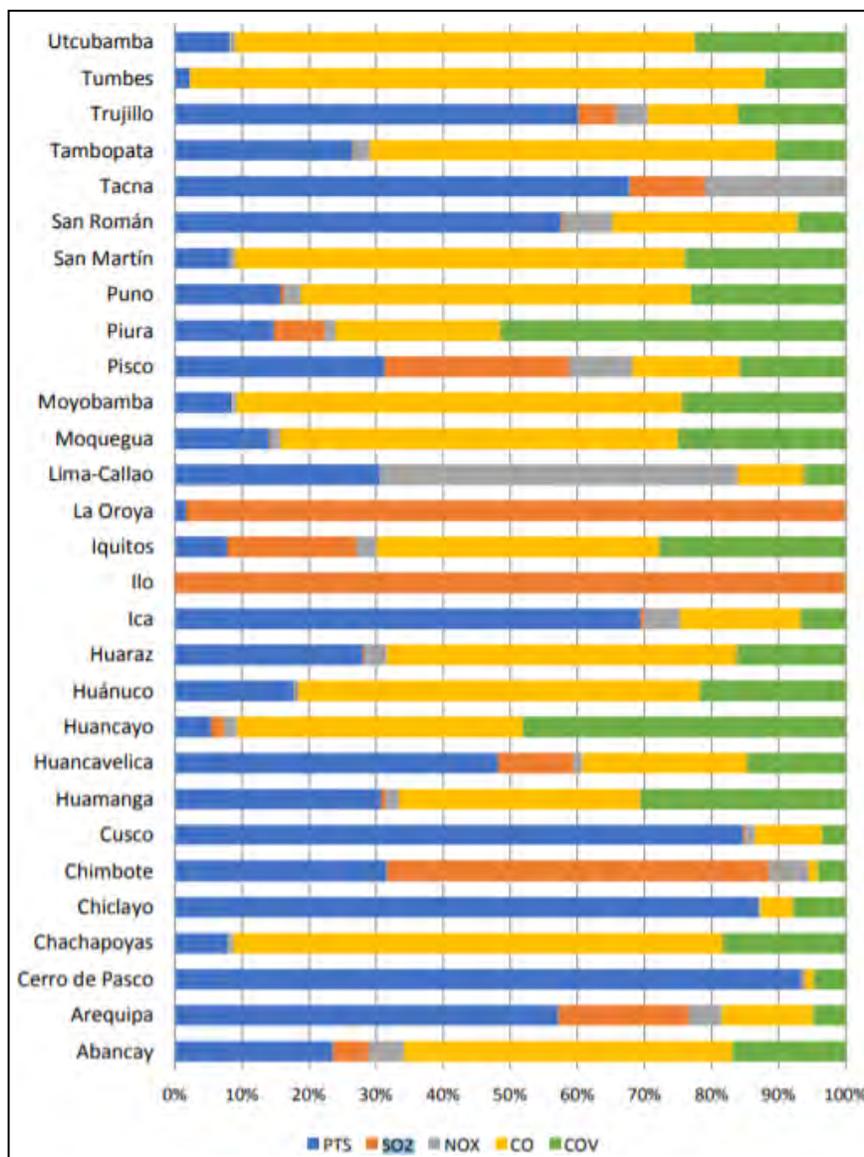


Figura 9. Porcentajes de emisiones de contaminantes procedentes de Fuentes Fijas.

Fuente: Planes de Acción a Limpiar el Aire

Los contaminantes críticos en el aire para La Oroya son: Material Particulado (PM10) y Dióxido de Azufre (SO₂), los cuales han generado durante muchos años problemas emergentes para la población y el ambiente.

En la siguiente imagen se puede observar cómo hasta el 2009, mediante el exceso de emisión de dióxido de azufre por parte del complejo metalúrgico La Oroya por encima de los estándares establecidos, el incremento de la emisión de SO₂ fue crítica.

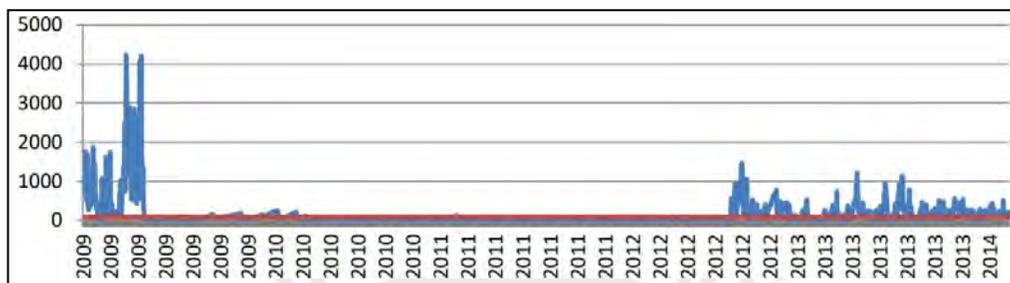


Figura 10. Promedio de 24h de SO₂ en Aire (ug/m³), comparado a la ECA actual de 80ug/m³. Fuente: Datos oficiales de las estaciones de monitoreo en La Oroya reportados al Gobierno peruano.

Cuando el Complejo Metalúrgico La Oroya dejó de operar, tras su cierre en 2009 y hasta que fue reabierto parcialmente en agosto de 2012, los niveles de contaminación por dióxido de azufre en la ciudad fueron muy bajos. Lo anterior implica que la contaminación por SO₂ es casi 100% resultado de las operaciones diarias del Complejo Metalúrgico. Inmediatamente después de ser reabierto, y aunque las operaciones hayan sido muy limitadas, se registraron violaciones muy frecuentes y severas al promedio actual (80ug/m³).

3.3 ACTIVIDAD MINERA

En los alrededores de la zona estudiada, operaron grandes compañías dedicadas a la minería, como Doe Run Perú, Minera Chinalco, Volcan Compañía Minera, Compañía Casapalca, Argentum, entre otras, siendo las más relevantes las primeras tres mencionadas.

- Chinalco, con la unidad minera Toromocho, ubicado a 4600 msnm, consiste en una mina de tajo abierto cuyo producto principal es el concentrado de cobre. El proceso de operaciones consiste en la trituración, molienda, flotación, concentrado y espesado. También produce minerales de molibdeno.

- Volcan, con la mina Yauli, ubicada entre 4,000 y 4,900 msnm. La unidad está conformada por cuatro minas subterráneas y un tajo abierto, cuyo mineral es tratado en tres plantas concentradoras, con una capacidad instalada de 11,400 TPD. Produce minerales de zinc, plomo, cobre y plata.
- Due Run, mediante el Complejo Metalúrgico La Oroya, compuesto de un conjunto único de fundiciones y refinерías especialmente diseñadas para transformar el mineral poli-metálico produciendo minerales de cobre, zinc, plomo y plata



4 CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1 METODOLOGÍA DE GREY CLUSTERING

La metodología de Grey Clustering es usada para poder presentar los resultados del análisis comparativo de los efectos de la reducción carbotérmica de sulfuros. Este método está compuesto de tres elementos principales: muestras de cluster, índices de cluster y grey class o clase gris. La muestra de cluster se representa por i ($i \in [1, n]$); el índice o criterio de cluster se expresa mediante j ($j \in [1, m]$); la clase o categoría del clustering se representa mediante k ($k \in [1, s]$).

De lo anterior, se considera la existencia de n objetos para ser “clusterizados” de acuerdo a m criterios de “clusterización” en s clases o categorías grises. El método de “clusterización” basado en el valor del i -ésimo objeto ($i \in [1, n]$), y el j -ésimo criterio ($j \in [1, m]$), con el i -ésimo objeto clasificado en la k -ésima clase ($k \in [1, s]$), se le denomina grey clustering.

Para seguir desarrollando el método de grey clustering, es necesario considerar el valor x_{ij} como las observaciones del objeto de “clusterización” i respecto al criterio j . La expresión $f_{jk}(\cdot)$ es la “función de blanqueamiento” del criterio de “clusterización” j respecto a la categoría o clase k . El valor n_{jk} es el resultado de la ponderación de la “clusterización” de criterio j respecto a la clase gris k , obtenido a partir de una serie de análisis cualitativos o de cálculos propiamente dichos

A efectos de lograr definir los siguientes parámetros, se asume que la “función de blanqueamiento” $f_{jk}(\cdot)$ se representa en la Figura 11. Los puntos $x_{jk}(1)$, $x_{jk}(2)$, $x_{jk}(3)$ y $x_{jk}(4)$ considerados en la función, se definen como puntos de retorno de $f_{jk}(\cdot)$. Si para la función $f_{jk}(\cdot)$, no se presentan los puntos $x_{jk}(1)$ y $x_{jk}(2)$, se le denomina “función de blanqueamiento” de medida inferior (Figura 12). Si para la función $f_{jk}(\cdot)$, $x_{jk}(2)$ y $x_{jk}(3)$ coinciden, entonces se le denomina “función de blanqueamiento” de medida moderada (Figura 13). Si para la función $f_{jk}(\cdot)$, no se presentan los puntos $x_{jk}(3)$ y $x_{jk}(4)$, se le denomina “función de blanqueamiento” de medida superior (Figura 14).

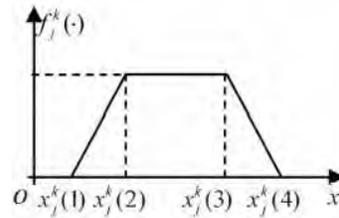


Figura 11. Representación de una “función de blanqueamiento” general.

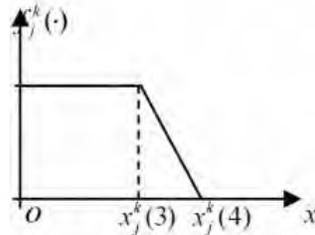


Figura 12. “Función de blanqueamiento” de medida inferior.

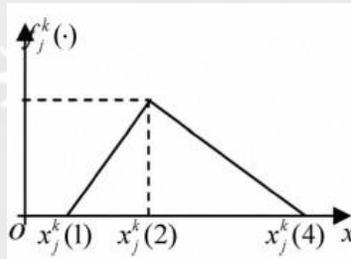


Figura 13. “Función de blanqueamiento” de medida moderada.

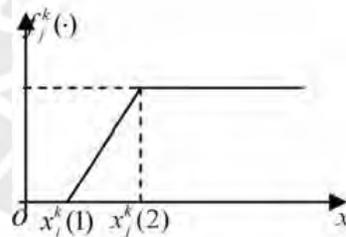


Figura 14. “Función de blanqueamiento” de medida superior.

Las “funciones de blanqueamiento” son definidas mediante:

En el caso mostrado en la Figura 13:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [x_j^k(1), x_j^k(4)] \\ \frac{x - x_j^k(1)}{x_j^k(2) - x_j^k(1)}, & x \in [x_j^k(1), x_j^k(2)] \\ 1, & x \in [x_j^k(2), x_j^k(3)] \\ \frac{x_j^k(4) - x}{x_j^k(4) - x_j^k(3)}, & x \in [x_j^k(3), x_j^k(4)] \end{cases}$$

Para el caso de la “función de blanqueamiento” de medida inferior:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [0, x_j^k(4)] \\ 1, & x \in [0, x_j^k(3)] \\ \frac{x_j^k(4) - x}{x_j^k(4) - x_j^k(3)}, & x \in [x_j^k(3), x_j^k(4)] \end{cases}$$

Para el caso de la “función de blanqueamiento” de medida moderada:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [x_j^k(1), x_j^k(4)] \\ \frac{x - x_j^k(1)}{x_j^k(2) - x_j^k(1)}, & x \in [x_j^k(1), x_j^k(2)] \\ 1, & x = x_j^k(2) \\ \frac{x_j^k(4) - x}{x_j^k(4) - x_j^k(2)}, & x \in [x_j^k(2), x_j^k(4)] \end{cases}$$

Para la definición de la “función de blanqueamiento” de medida superior se tiene:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x < x_j^k(1) \\ \frac{x - x_j^k(1)}{x_j^k(2) - x_j^k(1)}, & x \in [x_j^k(1), x_j^k(2)] \\ 1, & x \geq x_j^k(2) \end{cases}$$

Se tiene el valor λ_{jk} , denominado valor crítico para la subclase k-ésima del criterio j, el cual es determinado mediante:

Para el caso mostrado en la Figura 11 (general):

$$\lambda_j^k = \frac{1}{2} [x_j^k(2) + x_j^k(3)]$$

En el caso mostrado en la Figura 12 (de medida inferior):

$$\lambda_j^k = x_j^k (3)$$

Para los casos determinados en la Figura 13 y Figura 14 (de medida moderada y medida superior, respectivamente):

$$\lambda_j^k = x_j^k (2)$$

Se define η_{jk} como la ponderación o peso de la clase k respecto al criterio j :

$$\eta_j^k = \frac{\lambda_j^k}{\sum_{j=1}^m \lambda_j^k}$$

El coeficiente de "clusterización" σ_{ik} de un objeto i respecto a la clase k se obtiene a partir de:

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j^k$$

Para la determinación de la pertenencia de un objeto i a una clase "clusterizada" k^* , se asigna en base a los valores máximos permitidos en dicha clase. En caso que una variedad de objetos pertenezca a la misma clase "clusterizada" k^* , se tendrán que realizar cálculos respectivos o en todo caso verificar su orden respectivo en la serie (mayores valores poseen mayor rango).

$$\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$$

5 CAPITULO 5: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5.1 MÉTODO DE REDUCCION CARBOTERMICA DE SULFUROS

La efectividad teórica del presente método se llevó a cabo en diversos estudios, algunos principales mencionados en los antecedentes.

Tabla 8. Composición de las muestras por flotación diferencial aplicadas en el estudio de R. Padilla

Mtras.	Mo (%)	Cu (%)	S (%)	Fe (%)	CaO (%)	MgO (%)	Other (%)
D1	1,22	9,54	33,57	17,00	7,59	5,89	24,34
D2	2,11	9,98	19,53	17,51	6,49	7,69	36,17
D3	2,89	10,5	25,06	11,35	7,75	6,45	35,25

La finalidad era determinar la no emisión de gas de dióxido de azufre. Por ello, como primer resultado de los estudios sobre el método de reducción carbotérmica con cal, según análisis cromatográfico de los gases de la reacción de reducción de sulfuros de cobre y molibdeno, se mostró que CO y CO₂ eran las únicas especies presentadas en la fase gaseosa, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

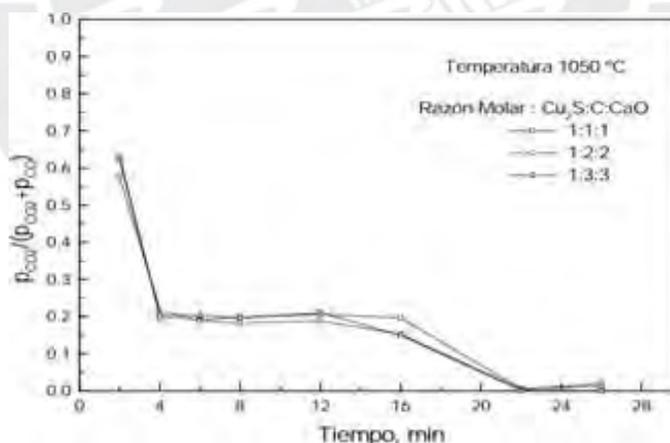
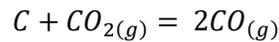
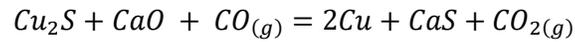


Figura 15. Composición de los gases producidos por la reacción a 1050°C para varias mezclas de reactivos

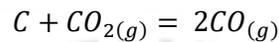
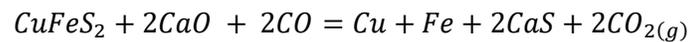
Puesto que el análisis de la fase gaseosa mostró que CO y CO₂ eran las únicas especies gaseosas en los gases emitidos por la reacción, se plantea que la reducción de estos sulfuros a

metal ocurre indirectamente a través de los gases CO y CO₂ como las especies que transportan el oxígeno según las siguientes reacciones.

Para la calcosina



Y para la calcopirita



La presencia de la fase CaS se mantiene estable en todo el rango de tiempo de calcinado. Lo contrario sucede con la fase CaO que desaparece completamente.

La formación de sulfuro de calcio es ventajosa en este sistema porque elimina la contaminación ambiental con SO₂.

Como último punto a destacar de este análisis del método de reducción carbotérmica, es que el uso de una cantidad de CaO mayor que la estequiométrica no afecta la velocidad de reducción de los sulfuros analizados. Entonces significa que no será necesario gastar más en cal para optimizar la reducción, puede ser una ventaja económica.

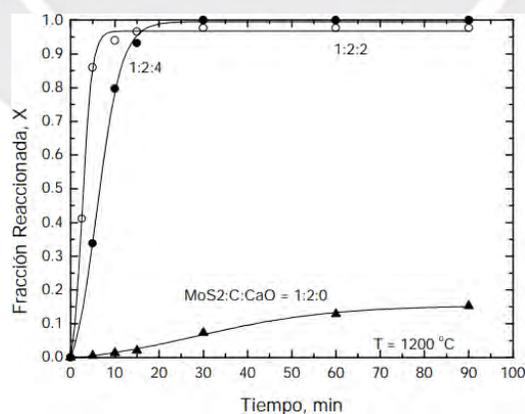


Figura 16. Efecto de la cantidad de CaO en la velocidad de reducción de molibdenita con carbón en presencia de CaO

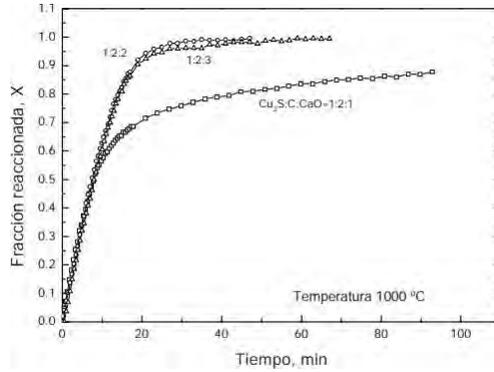


Figura 17. Efecto de la cantidad de CaO en la velocidad de reducción de calcosina

5.2 RESULTADOS DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) ESTACIÓN YAULI

La data a utilizar para el presente estudio comparativo son los resultados de dióxido de azufre (SO₂) tomados por DIGESA en el centro de Yauli en La Oroya en el año 2014.

Se presenta a continuación la data mostrada en una tabla, la cual consta de tiempos tomados cada 15 minutos en un total de 24 horas desde el 23/09/2014 al 28/09/2014.

Tabla 9. Resultados de dióxido de azufre (SO₂) estación Yauli. Fuente: DIGESA

Hora	23/09/2014	24/09/2014	25/09/2014	26/09/2014	27/09/2014	28/09/2014
00:00		0	0	0	5.24	0
00:15		0	0	2.62	5.24	0
00:30		0	0	0	5.24	0
00:45		0	0	0	5.24	0
01:00		0	0	0	2.62	0
01:15		0	2.62	0	2.62	0
01:30		0	0	0	2.62	0
01:45		0	2.62	0	2.62	2.62
02:00		0	0	2.62	2.62	0
02:15		0	2.62	0	2.62	0
02:30		0	0	0	2.62	0
02:45		0	0	0	2.62	0
03:00		0	2.62	0	0	0
03:15		0	0	0	2.62	0
03:30		15.72	0	0	0	0
03:45		170.3	2.62	0	0	0
04:00		107.42	0	2.62	0	0
04:15		49.78	0	0	0	0

04:30		23.58	0	0	0	0
04:45		13.1	0	0	0	0
05:00		13.1	2.62	2.62	0	0
05:15		23.58	2.62	0	2.62	0
05:30		96.94	0	2.62	10.48	0
05:45		96.94	0	0	13.1	0
06:00		149.34	0	0	10.48	0
06:15		99.56	0	0	7.86	0
06:30		28.82	0	2.62	7.86	0
06:45		18.34	0	0	60.26	0
07:00		10.48	0	0	96.94	0
07:15		7.86	2.62	2.62	52.4	0
07:30		7.86	2.62	0	125.76	2.62
07:45		5.24	0	0	290.82	0
08:00		5.24	2.62	2.62	1213.06	2.62
08:15		5.24	86.46	2.62	296.06	2.62
08:30		5.24	461.12	13.1	193.88	3
08:45		26.2	531.86	178.16	138.86	5.24
09:00		75.98	1561.52	49.78	131	2.62
09:15		141.48	361.56	31.44	90.56	2.62
09:30		199.12	73.36	285.58	55.02	2.62
09:45	0	767.66	23.58	322.26	26.2	2.62
10:00	20.96	885.56	15.72	102.18	26.2	2.62
10:15	18.34	919.62	10.48	343.22	31.44	
10:30	10.48	301.3	3	366.8	34.06	
10:45	7.86	73.36	5.24	529.24	18.34	
11:00	5.24	28.82	5.24	343.22	15.72	
11:15	2.62	18.34	5.24	1574.62	13.1	
11:30	2.62	10.48	2.62	1027.04	10.48	
11:45	2.62	7.86	2.62	1802.56	10.48	
12:00	2.62	7.86	2.62	1700.38	5.24	
12:15	2.62	7.86	2.62	634.04	5.24	
12:30	2.62	5.24	2.62	277.72	2.62	
12:45	2.62	5.24	2.62	251.52	5.24	
13:00	2.62	5.24	2.62	44.54	5.24	
13:15	2.62	2.62	2.62	15.62	2.62	
13:30	2.62	2.62	2.62	13.1	2.62	
13:45	2.62	5.24	2.62	10.48	2.62	
14:00	2.62	2.62	0	7.86	2.62	
14:15	0	2.62	0	2.62	2.62	
14:30	0	5.24	0	5.24	0	
14:45	0	2.62	2.62	5.24	0	
15:00	0	0	2.62	5.24	2.62	

15:15	0	2.62	2.62	5.24	0	
15:30	0	2.62	5.24	5.24	0	
15:45	2.62	2.62	2.62	5.24	2.62	
16:00	2.62	2.62	0	5.24	2.62	
16:15	0	0	0	2.62	2.62	
16:30	2.62	0	0	5.24	2.62	
16:45	0	0	2.62	0	2.62	
17:00	0	0	0	2.62	2.62	
17:15	0	0	0	5.24	2.62	
17:30	0	0	0	2.62	2.62	
17:45	0	0	0	2.62	0	
18:00	0	0	0	2.62	0	
18:15	0	0	0	5.24	2.62	
18:30	2.62	2.62	0	416.58	0	
18:45	2.62	2.62	0	167.68	0	
19:00	0	2.62	2.62	172.92	2.62	
19:15	0	2.62	0	191.26	0	
19:30	0	2.62	0	822.68	0	
19:45	0	2.62	0	558.06	2.62	
20:00	0	2.62	2.62	136.24	0	
20:15	0	0	0	170.3	0	
20:30	0	0	0	99.56	0	
20:45	0	2.62	0	99.56	2.62	
21:00	0	0	2.62	191.26	2.62	
21:15	0	0	2.62	131	0	
21:30	0	0	0	47.16	0	
21:45	0	2.62	2.62	36.68	0	
22:00	0	2.62	0	28.82	2.62	
22:15	0	0	0	36.68	0	
22:30	0	2.62	0	23.58	2.62	
22:45	2.62	0	2.62	13.1	0	
23:00	0	0	2	10.48	0	
23:15	0	0	2.62	5.24	0	
23:30	0	0	2.62	5.24	0	
23:45	0	2.62	2.62	5.24	0	

Como resultado se pudo tomar el promedio por día, hallando sus valores máximos y mínimos durante el día, los cuales se muestran a continuación.

Tabla 10. Resultados de dióxido de azufre promedio por día

PROM	1.93	46.94	33.76	139.43	32.36	0.78
MIN	0	0	0	0	0	0
MAX	20.96	919.62	1561.52	1802.56	1213.06	5.24

A partir de la tabla se obtiene como promedio de emisión de dióxido de azufre una concentración de 42.53 ug/m³, en lo que respecta al año 2014 sin la aplicación del método estudiado.

Se puede observar que, para este caso, solo un valor excede el ECA (24h) permitido de 80 ug/m³.

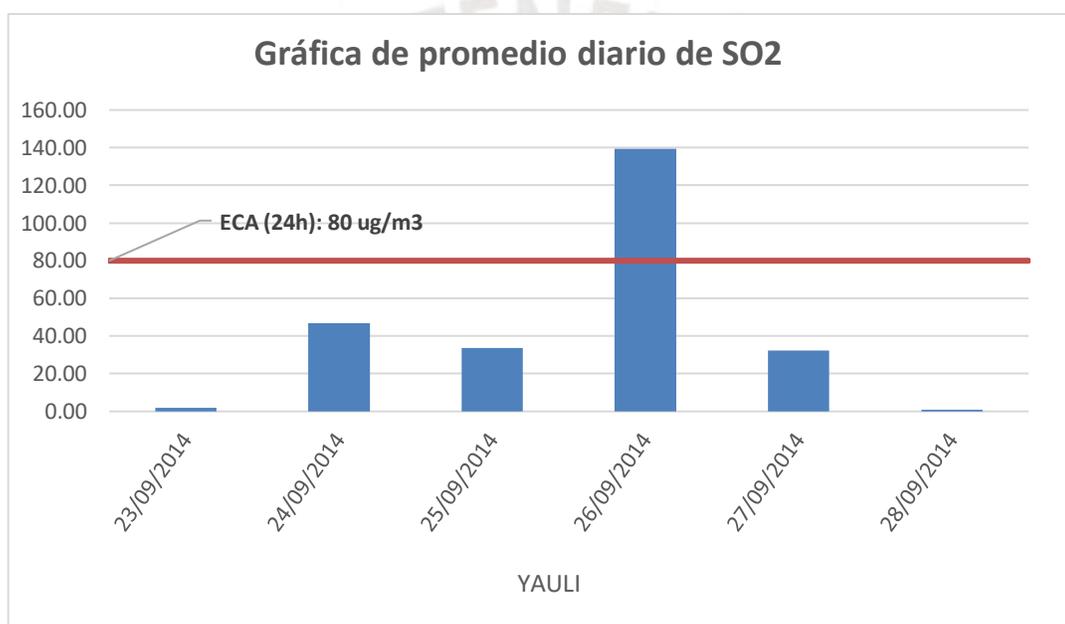


Figura 18. Gráfico de promedio diaria de dióxido de azufre (SO₂)

El otro objeto a evaluar será las partículas menores a 10 micras – PM₁₀ (ug/m³), ya que se aplicará la metodología de grey clustering para la evaluación de la calidad de aire en Yauli.

A continuación, se presenta la data correspondiente a el promedio diario de PM₁₀, con promedio correspondiente y picos de emisión de PM₁₀ correspondiente, donde también se toma en cuenta el ECA correspondiente de 150 ug/m³ de PM₁₀.

Tabla 11. Promedio diario de partículas menores a 10 micras – PM10 (ug/m3)

Fecha	E - Yauli	ECA (24h)
23/09/2014	37.5	150
24/09/2014	16.4	
25/09/2014	21.5	
26/09/2014	24.6	
27/09/2014	11.8	
PROMEDIO	22.36	
MIN	11.8	
MAX	37.5	

Debido a que la fuente del SO₂ no es originada en su totalidad por la industria minera, sin embargo, según estudios correspondientes hasta el año 2014 en Yauli, el 80% de la emisión de SO₂ provenía de la industria minera. Para ello, se estimará una de efectividad del método de reducción carbotérmica con cal de un 94%, como se verificó en los estudios realizados, a excepción de sulfuros de plomo; por lo que esto generaría en un aproximado de 75% de reducción en la presencia de dióxido de azufre gaseoso en el aire aplicando el método.

Por lo que se obtendría los siguientes nuevos resultados de concentración de SO₂ en el aire de la estación Yauli estudiada.

Tabla 12. Resultados de dióxido de azufre (SO₂) aplicando el método de reducción carbotérmica

Fecha	E - Yauli	ECA (24h)
23/09/2014	0.39	80
24/09/2014	9.39	
25/09/2014	6.75	
26/09/2014	27.89	
27/09/2014	6.47	
28/09/2014	0.16	
PROMEDIO	8.51	

5.3 ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE

Los valores del Índice de Calidad del Aire (INCA) fueron calculados tomando como referencia los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de Aire y como rango final, el valor umbral de aplicación de los Niveles de Estados de Alerta. El INCA se elaboró sobre la base de información de calidad del aire que se generaron en las zonas de atención prioritaria correspondiente.

El cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante se muestra a continuación, como del objeto asignado (C1, C2) para el tratamiento posterior de la data mediante el método de grey clustering.

Tabla 13. INCA Dióxido de azufre (SO₂) promedio 24 horas

Dióxido de azufre (SO ₂) promedio 24 horas			C1
Intervalo del INCA	Intervalo de Concentraciones (µg/m ³)	Ecuación	
0 - 50	"0 - 10"	$I(SO_2) = [SO_2] * 100 / 20$	Puntos Medios
51 - 100	"11 - 20"		5
101 - 625	"21 - 500"		15
> 625	> 500		260
			505

Tabla 14. INCA Dióxido de azufre (SO₂) promedio 24 horas

Material particulado (PM ₁₀) promedio 24			C2
Intervalo del INA	Intervalo de Concentraciones (µg/m ³)	Ecuación	
0 - 50	"0 - 75"	$I(NO_2) = [NO_2] * 100 / 200$	Puntos Medios
51 - 100	"76 - 150"		37.5
101 - 167	"151 - 250"		112.5
> 167	> 250		200
			287.5

6 CAPITULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el presente capítulo se dará el tratamiento de la data de concentraciones de SO₂ y PM₁₀ del año 2014, mediante la aplicación del método de grey clustering para calcular la calidad del aire en zona estudiada, en escenarios antes y después de la aplicación teórica del método de reducción carbotérmica de sulfuros con cal.

6.1 CALIDAD DE AIRE ANTES DE LA APLICACIÓN TEÓRICA DEL MÉTODO

Como parte inicial del método de grey clustering, se procedió a calcular los parámetros adimensionados de los objetos estudiados (SO₂, PM₁₀).

Tabla 15. Data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³)

2014	C1 (µg/m ³)	C2 (µg/m ³)
Yauli	42.53	22.36

Tabla 16. Data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³) adimensionada

2014	C1 (µg/m ³)	C2 (µg/m ³)
Yauli	0.22	0.14

Tabla 17. Parámetros

	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄
C1	5	15	260	505
C2	37.5	112.5	200	287.5

Tabla 18. Parámetros adimensionados

	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄
C1	0.025	0.076	1.325	2.573
C2	0.235	0.706	1.255	1.804

A continuación, se procede a calcular las inversas de los parámetros.

Tabla 19. Inversa de los parámetros adimensionados

	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄
C1	39.250	13.083	0.755	0.389
C2	4.250	1.417	0.797	0.554
	43.500	14.500	1.552	0.943

Para así determinar el peso que le corresponde a cada parámetro.

Tabla 20. Peso correspondiente a cada parámetro

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
C1	0.902	0.902	0.486	0.412
C2	0.098	0.098	0.514	0.588

El resultado de las funciones triangulares en función al rango de valores de los parámetros adimensionados, se muestra a continuación. Se puede observar los valores subrayados equivalente a la evaluación de cada data de concentración de SO₂ y PM₁₀ adimensionada.

Tabla 21. Evaluación de funciones triangulares para SO₂ (C1)

	0.22		
f1	1	0	0.025
	-		
	2.75322845	0.025	0.076
	0	0.076	∞
f2	3.75322845	0.025	0.076
	0.88762333	0.076	1.325
	0	0.025	1.325
f3	0.11237667	0.076	1.325
	1.88762333	1.325	2.573
	0	0.076	2.573
f4	-	1.325	2.573
	0.88762333	2.573	∞
	1	0	1.325
	0		

Tabla 22. Evaluación de funciones triangulares para PM₁₀ (C2)

	0.14		
f1	1	0	0.235
	1.20186667	0.235	0.706
	0	0.706	∞
f2	-	0.235	0.706
	0.20186667	0.706	1.255
	2.03017143	0.235	1.255
	0		

	-		
f3	1.03017143	0.706	1.255
	3.03017143	1.255	1.804
	0	0.706	1.804
	-		
f4	2.03017143	1.255	1.804
	1	1.804	∞
	0	0	1.255

Tabla 23. Valores de CTWF correspondientes a la estación Yauli

Yauli	C1	C1
f1	0.0000	1.0000
f2	0.8876	0.0000
f3	0.1124	0.0000
f4	0.0000	0.0000

Tabla 24. Valores de CTWF multiplicados por su peso correspondiente

f.n C1	f.n C2
0.000	0.098
0.801	0.000
0.055	0.000
0.000	0.000

Tabla 25. Valores de coeficientes de clusterización

2014	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Yauli	0.098	0.801	0.055	0.000

λ_1	Buena
λ_2	Moderada
λ_3	Mala
λ_4	Umbral de cuidado

Se obtiene como resultado una calidad de aire "Moderada" para la data correspondiente a Yauli en el año 2014 antes de la aplicación teórica del método de reducción carbotérmica de sulfuros con cal.

6.2 CALIDAD DE AIRE DESPUÉS DE LA APLICACIÓN TEÓRICA DEL MÉTODO

De igual manera, se procedió primero a calcular los parámetros adimensionados de los objetos estudiados (SO₂, PM₁₀) con la nueva data calculada con el 75% de reducción de emisión de SO.

Tabla 26. Nueva data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³)

2014	C1 (μg/m ³)	C2 (μg/m ³)
Yauli	8.51	22.36

Tabla 27. Nueva data de concentración de SO₂ y PM₁₀ (ug/m³) adimensionada

2014	C1 (μg/m ³)	C2 (μg/m ³)
Yauli	0.04	0.14

Tabla 28. Parámetros

	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄
C1	5	15	260	505
C2	37.5	112.5	200	287.5

Tabla 29. Parámetros adimensionados

	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄
C1	0.025	0.076	1.325	2.573
C2	0.235	0.706	1.255	1.804

Los parámetros mantienen el mismo valor, al igual que las inversas, por lo tanto, el peso que le corresponde a cada parámetro se mantiene con el mismo valor.

Tabla 30. Inversa de los parámetros adimensionados

	λ ₁	λ ₂	λ ₃	λ ₄
C1	39.250	13.083	0.755	0.389
C2	4.250	1.417	0.797	0.554
	43.500	14.500	1.552	0.943

Tabla 31. Peso correspondiente a cada parámetro

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
C1	0.902	0.902	0.486	0.412
C2	0.098	0.098	0.514	0.588

El nuevo resultado de las funciones triangulares en función al rango de valores de los parámetros adimensionados, se muestra a continuación. Se puede observar los valores subrayados equivalente a la evaluación de cada data de concentración de SO₂ y PM₁₀ adimensionada.

Tabla 32. Nueva evaluación de funciones triangulares para SO₂ (C1)

	0.04			
f1	1	0	0.025	
	0.64935431	0.025	0.076	
	0	0.076	∞	
f2	0.35064569	0.025	0.076	
	1.02650426	0.076	1.325	
	0	0.025	1.325	
f3	-	0.076	1.325	
	0.02650426	1.325	2.573	
	2.02650426	0.076	2.573	
	0	0.076	2.573	
f4	-	1.325	2.573	
	1.02650426	2.573	∞	
	1	0	1.325	
	0	0	1.325	

Tabla 33. Nueva evaluación de funciones triangulares para PM₁₀ (C2)

	0.14			
f1	1	0	0.235	
	1.20186667	0.235	0.706	
	0	0.706	∞	
f2	-	0.235	0.706	
	0.20186667	0.706	1.255	
	2.03017143	0.235	1.255	
	0	0.235	1.255	

f3	-		
	1.03017143	0.706	1.255
	3.03017143	1.255	1.804
	0	0.706	1.804
f4	-		
	2.03017143	1.255	1.804
	1	1.804	∞
	0	0	1.255

Tabla 34. Nuevos valores de CTWF correspondientes a la estación Yauli

Yauli	C1	C1
f1	0.6494	1.0000
f2	0.3506	0.0000
f3	0.0000	0.0000
f4	0.0000	0.0000

Tabla 35. Nuevos valores de CTWF multiplicados por su peso correspondiente

f.n C1	f.n C2
0.586	0.098
0.316	0.000
0.000	0.000
0.000	0.000

Tabla 36. Nuevos valores de coeficientes de clusterización

2014	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Yauli	0.684	0.316	0.000	0.000

↓

λ_1	Buena
λ_2	Moderada
λ_3	Mala
λ_4	Umbral de cuidado

Se obtiene como resultado una calidad de aire “Buena” para la data correspondiente a Yauli en el año 2014 después de la aplicación teórica del método de reducción carbotérmica de sulfuros con cal.

7 CAPITULO 7: CONCLUSIONES

7.1 ASPECTO SOCIAL

Las relaciones comunitarias en Perú juegan un papel importante en todo aspecto de la actividad minera, especialmente en el área operacional. En este sentido, que una compañía minera cambie sus métodos de obtención de mineral de planta, de un proceso de tostación por un proceso de reducción carbotérmica, con el objetivo de reducir el impacto ambiental que genera la planta por la liberación de gases sulfurosos y al mismo tiempo manteniendo sus porcentajes de recuperación del concentrado, no solo es beneficioso para la empresa sino también para el ambiente donde trabajan los operadores, comunidades aledañas y sus trabajadores en general.

Teniendo como consecuencia un mejor impacto en las relaciones que la empresa sostiene con las comunidades, creando también nuevas oportunidades para incrementar la comunicación entre empresa y comunidad. Pues se mejora la imagen y la percepción que tienen los comuneros acerca de la empresa, mostrando mediante acciones su responsabilidad y compromiso social y ambiental.

7.2 ASPECTO AMBIENTAL

Como se pudo observar mediante la aplicación de grey clustering para la evaluación de la calidad de aire, efectivamente se obtuvo una mejora pasando de una calidad moderada del aire a una calidad nueva después de aplicar teóricamente el método de reducción carbotérmica de sulfuros con cal, por lo que resultaría en un impacto positivo para el bienestar ambiental en lo que respecta a la emisión de dióxido de azufre.

Ya que el dióxido de sulfuro es uno de los componentes más conocidos por su formación de lluvia ácida, al mezclarse con agua esto provoca una reacción que produce ácido sulfúrico teniendo así efectos devastadores sobre la agricultura, el estilo de vida de las personas, los bosques y el agua en general, la aplicación de este método reduce la contaminación por dióxido de sulfuro en alrededor del 75% de forma teórica, evitando así la generación de la lluvia ácida producto dióxido de sulfuro. Por ello, la aplicación de este método cambiará gradualmente la calidad de aire para mejor. Esto puede ser probado haciendo uso del índice de calidad del aire. Así mismo, este cambio mejorará la imagen de la empresa pues esta se preocupa también del bienestar social y ambiental.

7.3 ASPECTO ECONÓMICO

A diferencia de un método tradicional de reducción de sulfuros, no se requiere de gran inversión para tratamiento de gases de dióxido de azufre, como las plantas de tratamiento de sulfuro aplican comúnmente, por lo que estaríamos al frente de un método aparentemente viable económicamente en comparación a métodos tradicionales.

Como se pudo determinar, mediante el análisis cinemático de las reacciones metalúrgicas, la cantidad de cal excesiva que se fuera a utilizar no generará una mayor velocidad cuando se pase la cantidad indicada por estequiometría, por lo que no se requerirá invertir en la mayor cantidad de cal para mejorar la reacción, si no solo en la cantidad necesaria indicada.



8 CAPITULO 8: RECOMENDACIONES

- Como resultado de las reacciones aplicando el método de reducción carbotérmica para sulfuros, se obtendrá sulfuro de calcio (CaS) en estado sólido, en vez de generar dióxido de azufre gaseoso. Este sulfuro en estado sólido resulta estable por lo que no tendría ningún efecto negativo en el ambiente. Sin embargo, se recomendaría darle un uso de tal forma que se pueda aprovechar al máximo su formación y estabilidad, por lo que se debería invertir en futuros análisis sobre este sulfuro de calcio (CaS) en estado sólido.
- Debido a que nuestro país es de variedad polimetálica; especialmente en la presencia de galena para la reducción de plomo, se debería a raíz del presente estudio y antecedentes basados para su realización, elaborar futuros análisis metalúrgicos de la efectividad del método de reducción carbotérmica para sulfuro de plomo (galena) con cal para la obtención de plomo, ya que actualmente se carece de ese estudio.



BIBLIOGRAFÍA

- Bustamante Rúa, M., Restrepo Baena, O., & Gaviria Cartagena, A. (2008). Notas de clase de la asignatura: Pirometalurgia. 1–109.
- Chambi Viraca, L. C. (2011). Reducción carbotérmica de sulfuro de antimonio en presencia de óxido de calcio. <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/1518>
- El Peruano. (2005, Abril 24). Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad del Aire. D.S. 074-2001-PCM.
- F. Dong, J. Liu, and B. Liu, "Study on improved grey integrated clustering method and its application," 2009 IEEE Int. Conf. Grey Syst. Intell. Serv. GSIS 2009, pp. 702–707, 2009, doi: 10.1109/GSIS.2009.5408220.
- Gallardo, B., & Esteban, P. (2019). Propuesta para recuperación con técnicas de mantenimiento de celda de flotación minera.
- G. Li and P. Guo, "Reaearch on the innovation evaluation of industry-university- research cooperation based on the grey clustering analysis," Proc. IEEE Int. Conf. Grey Syst. Intell. Serv. GSIS, vol. 2015-October, pp. 420–424, 2015, doi: 10.1109/GSIS.2015.7301894.
- Kiely, G. (1999). Ingeniería Ambiental, fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Madrid: Limusa.
- Lovera, D., Quiñones, J., Landauro, C., Arias, V., Castañeda, J., Sánchez, A., & Mendoza, J. (2015). Modelamiento de la tostación (TSEG) del MoS₂ con CaO en función de la temperatura Modeling of the roasting process of MOS₂ with CaO as a function of temperature. 18, 141–148.
- Manzaneda Cabala, J. (2019). Caracterización mineralógica en procesamiento de minerales. Horizonte Minero. Revista Internacional de Minería y Energía.
- MAPFRE. (2015). Enfermedades obstructivas de las vías respiratorias. Lima. Obtenido de <http://www.mapfre.com/salud/es/cinformativo/enfisema-pulmonar.shtml>
- Meza, L., Quintero, M., & García, R. (2010). Estimación de factores de emisión de PM₁₀ y PM_{2.5}, en vías urbanas en Mexicali, Baja California, México. Información Tecnológica, 21(4), 45-56.

- MINAM. (2003). DS 009-2003-SA. Aprueban el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire. Obtenido de <http://www.minam.gob.pe>
- MINAM. (2008, Mayo 5). Estándares Nacionales de calidad Ambiental del Aire: D.S. 003-2008-MINAM. Obtenido de http://www.minam.gob.pe/dmdocuments/d.s_003-2008-pcm_eca_para_aire.pdf
- MINAM. (2010). Sistema Nacional de Información Ambiental-SINIA. Obtenido de <Http://www.sinam.gob.pe>
- MINEM. (1996). RM 315-96-EM. Aprueban niveles máximos de elementos y compuestos presentes en emisiones gaseosas provenientes de las unidades minero-metalúrgicas. Obtenido de <http://www.minem.gob.pe>
- OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Organización Mundial de la Salud.
- OMS. (2014). Salud y medio ambiente - impacto sanitario de la contaminación del aire.
- Orozco, I. M., Bazan, V. L., Diaz, A. A., & Lara, R. F. (2016). Roasting of sulphide using carbothermal reduction. *DYNA (Colombia)*, 83(198), 229–235.
- Padilla, R. (2002). Reducción Carbotérmica De Sulfuros Metálicos. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalurgica y Geográfica*, 5(9), 59–65.
- S. Li, Z. Zhong, R. He, and B. Ai, "Application of grey clustering evaluations in coal railway transportation," *Kybernetes*, vol. 41, no. 5, pp. 714–724, 2012, doi: 10.1108/03684921211243365.
- X. Qian, "A grey cluster analysis of livability in residential district planning," *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Grey Syst. Intell. Serv. GSIS 2007*, pp. 356–359, 2007, doi: 10.1109/GSIS.2007.4443296.