

**UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**TESIS  
OXIDACIÓN DEL MONÓXIDO DE CARBONO PRODUCTO DE LA  
COMBUSTIÓN INCOMPLETA A DIÓXIDO DE CARBONO POR  
RADIACIÓN ULTRAVIOLETA MEDIANTE EL USO DE ÓXIDO DE  
ZINC COMO FOTO-CATALIZADOR, AREQUIPA 2018**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**JONATHAN DURAND VILCA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AREQUIPA - PERÚ**

**2019**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi madre Rosmery, por ser el pilar más importante y demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones. A mis adorados hermanos, Yanella y Christian porque les tengo una gran admiración y a Fabrizio que está en el cielo. A toda mi familia y amigos, que siempre me apoyaron incondicionalmente.

A mi Familia, mamá Dora, tía Beatriz, primo Meykell y a mis amigos, Junior y Javier por su apoyo incondicional y estar allí en los mejores y peores momentos.

## RESUMEN

En la ciudad de Arequipa, los niveles de contaminación por gases han ido creciendo y es observable diariamente al salir el sol; se puede visualizar una nube negra que está sobre la ciudad, la cual recibe el nombre de “Smog”, que es producto de los gases de contaminación emitidos por las industrias y sobre todo los gases de combustión de los vehículos. Dentro de los gases emitidos, se encuentra el Monóxido de Carbono (CO) que se ha generado de una combustión incompleta del combustible vehicular (gasolina, gasohol, diésel, GLP, entre otros); dicho gas es altamente tóxico ya que reemplaza al oxígeno en las células, en consecuencia, produce hipoxia (falta de oxígeno) además de otros daños.

Por ello, se evaluó la oxidación del Monóxido de Carbono a Dióxido de Carbono (un gas menos tóxico), por métodos prácticos aplicando energías renovables (sol), agentes inertes y catálisis (que no reaccionen con el gas, pero si promuevan reacciones); dichos agentes son los fotocatalizadores y el que se aplica para la experiencia es el Óxido de Zinc.

El objetivo del presente trabajo es la utilización de la energía solar (radiación ultravioleta) que será aprovechada para activar un fotocatalizador; en este caso, el óxido de zinc impactado por la radiación ultravioleta se activa siendo reactivo o en otras palabras tiene la capacidad de oxidación de otros compuestos que estén a su contacto, por lo tanto serán los gases de combustión incompleta y específicamente para el estudio analizaremos al monóxido de carbono (CO), que en un lapso de tiempo determinado este llegará a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Para lograr desarrollar la experiencia, se establece el proceso para el tratamiento experimental. Se realizó la preparación de los materiales (cemento, arena y óxido de zinc) en diferentes proporciones para la preparación de la materia prima donde se realizaron 5 mezclas, con la finalidad de encontrar cuál era la muestra que optimizaría la conversión de CO en CO<sub>2</sub>; posteriormente, se realizó el acondicionamiento de la cabina, preparación de la superficie fotocatalítica, el aislamiento de gases, fotocatalisis, control en la cabina, control mediante software. El diseño experimental implicó la preparación y ejecución de conjuntos de prueba. El diseño aplicable para la experiencia será “DISEÑO COMPUESTO CENTRAL” de  $2^k$  experimentos + estrellas, donde k = factores (masa de óxido de Zinc y

tiempo de exposición a la luz), cada uno con dos niveles, El diseño factorial tendrá  $N=2^2 + 6 = 10$  experimentos y consideraremos una repetición adicional para corroborar resultados, por lo que el número de experiencias fueron 20. En tal sentido, se trazó un diseño de experimentos para evaluar el tiempo de exposición de la superficie preparada con cemento, arena fina, agua y óxido de zinc en un ambiente totalmente hermético, donde por medio de un detector de gases podremos observar la reducción en concentración del monóxido de carbono. Luego de la experimentación, siendo los resultados positivos, encontramos la interacción de las variables óxido de zinc y tiempo de exposición a la luz solar; juntas lograron una mayor reducción del monóxido de carbono a un promedio de 15ppm.

Se plantearon proyecciones para calcular el costo por estudiar añadiendo la mezcla por un área de  $50 \text{ m}^2$ ; se invierte aproximadamente 537.5 soles, incluyendo el dióxido de zinc sería 485 soles, se observa que existe una diferencia de 52.5 soles.

La investigación pretende demostrar la capacidad de tratar los gases de monóxido de carbono que se encuentran en el medio ambiente, los cuales pueden ser reducidos por acción de fotocatalizadores que pueden estar incorporados en las mezclas de tarrajeo, al momento de construir una vivienda, edificio, etc.

**Palabras clave:** Fotocatalizador, oxidación, radiación UV, gases contaminantes, monóxido de carbono, dióxido de carbono.

## ABSTRACT

In the city of Arequipa, the levels of pollution by gases has been growing and is observable daily at sunrise; you can see a black cloud that is over the city, which is called "Smog", which is the product of pollution gases emitted by industries and especially the combustion gases of vehicles. Among the gases emitted, is the Carbon Monoxide (CO) that has been generated from incomplete combustion of vehicular fuel (gasoline, gasohol, diesel, LPG, among others); said gas is highly toxic since it replaces the oxygen in the cells, consequently, it produces hypoxia (lack of oxygen) in addition to other damages.

For this reason, the oxidation of Carbon Monoxide to Carbon Dioxide (a less toxic gas) was evaluated, by practical methods applying renewable energies (sol), inert agents and catalysis (that do not react with the gas, but do promote reactions); These agents are the photocatalysts and the one that is applied for the experience is Zinc Oxide.

The objective of this work is the use of solar energy (ultraviolet radiation) that will be used to activate a photocatalyst; in this case, the zinc oxide impacted by the ultraviolet radiation is activated being reactive or in other words it has the oxidation capacity of other compounds that are in contact with it, therefore it will be the combustion gases incomplete and specifically for the study we will analyze carbon monoxide (CO), which in a certain period of time will reach carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). In order to develop the experience, the process for experimental treatment is established. The preparation of the materials (cement, sand and zinc oxide) in different proportions was carried out for the preparation of the raw material where 5 mixtures were made, in order to find which was the sample that would optimize the conversion of CO to CO<sub>2</sub>; later, the conditioning of the cabin, preparation of the photocatalytic surface, gas isolation, photocatalysis, control in the cabin, control by software was carried out. The experimental design involved the preparation and execution of test sets. The applicable design for the experience will be "CENTRAL COMPOSITE DESIGN" of 2k experiments + stars, where k = factors (zinc oxide mass and exposure time to light), each with two levels, The factorial design will have  $N = 22 + 6 = 10$  experiments and we will consider an additional repetition to

corroborate results, so the number of experiences was 20. In this sense, an experimental design was designed to evaluate the exposure time of the surface prepared with cement, fine sand, water and zinc oxide in a completely hermetic environment, where by means of a gas detector we can observe the reduction in concentration of carbon monoxide. After the experimentation, being the positive results, we find the interaction of the variables zinc oxide and time of exposure to sunlight; together achieved a greater reduction of carbon monoxide to an average of 15ppm.

The research aims to demonstrate the ability to treat the carbon monoxide gases found in the environment, which can be reduced by the action of photocatalysts that can be incorporated in the tarrajeo mixtures, when building a house, building, etc.

**Key words:** Photocatalyst, oxidation, UV radiation, polluting gases, carbon monoxide, carbon dioxide.

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

- 1) **ANOVA:** Análisis de varianza o prueba la hipótesis
- 2) **C:** Carbono
- 3) **(g).** gramos
- 4) **(h):** horas
- 5) **CFC:** Clorofluorcarbonos
- 6) **CO:** Monóxido de carbono
- 7) **CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono
- 8) **DIGESA:** Dirección General de Salud Ambiental
- 9) **DRS:** Dirección General de Salud Ambiental
- 10) **ECA:** Estándar de Calidad Ambiental
- 11) **Gibbs:** Energía libre de Leroy Jethro Gibbs
- 12) **H<sub>2</sub>S:** sulfuro de hidrógeno
- 13) **HT:** Hidrocarburos totales
- 14) **IDEAM:** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
- 15) **kg:** Kilogramos
- 16) **L:** Litros
- 17) **MAE:** Error medio absoluto
- 18) **mg/l:** Miligramos por litro
- 19) **MINAM:** Ministerio del ambiente
- 20) **OMS:** Organización Mundial de la Salud
- 21) **PbO<sub>2</sub>:** Dióxido de plomo
- 22) **POA:** Procesos de oxidación avanzada
- 23) **Ppm:** Partículas por millón
- 24) **SENAMHI:** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
- 25) **STATGRAPHICS:** Programa para analizar datos
- 26) **TIO<sub>2</sub>:** Dióxido de Titanio
- 27) **UV:** Radiación ultravioleta
- 28) **UV-A:** Radiación ultravioleta A
- 29) **UV-B:** Radiación ultravioleta B
- 30) **UV-C:** Radiación ultravioleta C
- 31) **ZnO:** Óxido de Zinc



- 32) **TAO:** Tecnologías de oxidación avanzada.
- 33) **UMA:** Unidad de masa atómica.
- 34) **PH:** Es una unidad de medida de alcalinidad o acidez de una solución
- 35) **mg:** Microgramos
- 36) **SENAMHI:** Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

## INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental por gases es un tema que se suscita en todo el mundo, y existen ciudades altamente contaminadas por dichos gases, por ejemplo: Pekín en China, Ahvaz en Irán, Ulan Bator en Mongolia, Lahore en Pakistán, Nueva Delhi en la India, Moscú en Rusia, la ciudad de México en México, Nueva York en EE.UU. Son lugares donde la calidad del aire se ve afectado diariamente por los gases producto de las industrias y el parque automotor. En nuestra ciudad de Arequipa, la contaminación del aire también se ve afectada y esta se puede observar como una capa de gases que está sobre la ciudad conocida como smog.

La investigación busca la aplicación de un método que logre o empiece a reducir la contaminación de uno de los gases más tóxicos como es el monóxido de carbono producto de la combustión incompleta, mediante la aplicación de un fotocatalizador inerte al medio ambiente que al tener contacto con la luz solar se activa, y tendrá capacidad de oxidar compuestos que se encuentren a su alrededor. El método ya tiene aplicación en los países europeos y el método es conocido como tecnologías de oxidación avanzada TAO, que son compatibles con el medio ambiente, pues la aplicación de los insumos a utilizar no son tóxicos para el ambiente; siguiendo este método evaluaremos mediante el uso de óxido de zinc (ZnO) como fotocatalizador, su acción sobre el monóxido de carbono en un ambiente preparado.

La necesidad del tratar los gases de smog es una realidad que si no se hace algo por ello, la ciudad se verá afectada gravemente; pues se desarrollarán enfermedades y se tendrá problemas respiratorios a edades tempranas. La presente investigación estudia el comportamiento del gas Monóxido de Carbono (CO) frente a un fotocatalizador, quien será el que promueva la reacción del monóxido de carbono a dióxido de carbono, con la ayuda de la radiación UVA proveniente del sol. Por lo que los resultados que se encuentren podrían servir para poder escalar la experiencia a otro nivel, ya que para demostrar la fotocatalisis, se encierra el gas en una cámara pequeña junto con una superficie impregnada con el fotocatalizador (Óxido de Zinc).

El objetivo principal de la presente investigación es lograr la reducción en concentración del monóxido de carbono, mediante el proceso fotocatalítico usando como fuente de energía los rayos solares, para conseguir la radiación UV que son los causantes de la actividad del fotocatalizador de óxido de zinc.

Para ello, se elaboró una cabina hermética que permitió la comprobación de la reducción en la concentración del CO; por hipótesis, se espera la oxidación del monóxido de carbono a dióxido de carbono por el contacto de fotocatalizador.

Mediante el diseño experimental se encontrará la mejor combinación de las variables consideradas (tiempo de exposición a los rayos UV y la cantidad en masa del óxido de zinc en la mezcla de tarrajeo), para el tratamiento del gas monóxido de carbono.

## **CAPÍTULO I**

### **PLANEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **1.1 Caracterización de la realidad problemática**

La contaminación de aire en la ciudad de Arequipa en lugar de reducir se incrementó considerablemente, informó el director ejecutivo de Salud Ambiental Percy Zacarías Madariaga durante el foro "Propuesta de soluciones a la problemática ambiental de Arequipa" organizada por el congresista Sergio Dávila.

Precisó que esto se debe a que el parque automotor aumentó en 100%. Detalló que en el 2009 había 120 mil vehículos ahora llegan a 245 mil, asimismo hace ocho años se realizó el cálculo de emisiones donde se registró 2 mil toneladas de material particulado (PM10) (materiales pesados y polvo) al año. Asimismo, 8 mil toneladas de monóxido de carbono, pero ahora con el aumento de carros se tendría que volver a calcular, pero sin duda la contaminación aumentó, dijo.

De acuerdo al Decreto Supremo N°003- 2017 del Ministerio del Ambiente, las principales avenidas de Arequipa sobrepasan los límites permisibles de contaminación del aire, refirió. Por ejemplo, la escala límite de material particulado (PM10) es de 100 microgramos por m<sup>3</sup>, pero en la avenida Andrés Avelino Cáceres llega a los 180 microgramos por metro cúbico (m<sup>3</sup>).

En el Cono Norte, señaló, este material particulado que daña las vías respiratorias llega a los 190 microgramos por m<sup>3</sup>. En las avenidas Parra y Goyeneche llega a 140

microgramos por m<sup>3</sup>. Señaló además que de acuerdo al último informe epidemiológico de Salud, en Arequipa se registran 900 casos de asma entre octubre y noviembre debido a la contaminación.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para el Perú su producto bruto interno (PBI) para el año 2018 fue el 22%, asimismo la inversión en Salud fue de S/. 16,856.00 millones el cual equivale al 2.4% del PBI. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo recomendable está por encima del 6 %.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿Será posible la oxidación del monóxido de carbono a dióxido de carbono aplicando el óxido de zinc como fotocatalizador y la RUV del sol?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- a) ¿Cuáles son los parámetros para la Oxidación del monóxido de carbono?
- b) ¿Cuál será el diseño experimental **que permita combinar los valores de la cantidad de óxido de zinc y tiempo de exposición a la radiación UV para una mayor oxidación de monóxido de carbono?**
- c) ¿Cuál será la mezcla de óxido de zinc para la oxidación monóxido de carbono?
- d) ¿Cuál es la influencia de las variables para la oxidación del monóxido de carbono?

## **1.3 Objetivos de investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Oxidar el monóxido de carbono producto de la combustión incompleta a dióxido de carbono por radiación ultravioleta mediante el uso de óxido de zinc como fotocatalizador.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- a) Identificar los parámetros para la oxidación del monóxido de carbono.
- b) Determinar un diseño de experimental para encontrar la mayor oxidación del monóxido de carbono, tomando como variables a interactuar la cantidad de óxido de zinc y el tiempo de exposición a la radiación UV.

- c) Determinar un modelo matemático que pueda predecir la oxidación del monóxido de carbono.
- d) Establecer la cantidad de mezcla de óxido de zinc para la oxidación del monóxido de carbono.
- e) Analizar la influencia de las variables para la oxidación del monóxido de carbono.

## **1.4 Justificación de la investigación**

### **1.4.1 En cuanto a lo social**

El propósito de la investigación es lograr un aporte a la sociedad en lo que respecta a reducir uno de los gases más contaminantes que son perjudiciales para la salud humana en general.

### **1.4.2 En el aspecto académico**

A través de esta investigación, se podrá tener mayor conocimiento sobre las tecnologías de oxidación avanzada, que son tecnologías de tratamiento de contaminantes compatibles con el medio ambiente ya que usan energías renovables y sustancias amigables con el ambiente; además, será un aporte para los estudiantes de ingenierías para posteriores investigaciones.

### **1.4.3 En el aspecto ambiental**

La reducción de los contaminantes de monóxido de carbono mediante el uso de óxido de zinc como fotocatalizador utilizando tecnologías limpias.

## **1.5 Importancia**

- Permite dar alcance sobre tecnologías limpias y la aplicación del óxido de zinc como fotocatalizador para la reducción de los contaminantes de monóxido de carbono.
- La investigación pretende lograr probar un tipo de tecnología para el tratamiento de gases que contaminan el medio ambiente, con una solución que puede participar desde la edificación de una vivienda, ya que si se pudiese incluir este reactivo podría estar descontaminando el medio ambiente de gases tóxicos.
- Permite el incremento del precio en cuanto a los materiales estándar; asimismo, el beneficio de retorno en ahorro sanitario puede ser mucho mayor a la inversión.

## **1.6 Limitaciones de la investigación**

- Las tecnologías de oxidación avanzada se están desarrollando lentamente en el Perú, pero no se han aplicado a escala para el tratamiento de contaminantes. La información local se encuentra en trabajos realizados a nivel de laboratorio referente a medios líquidos; pero no a contacto de gases, por lo que el material encontrado es reducido respecto al tema de la investigación.
- El costo en cuanto a la adquisición de equipos y/o sensores para la medición de gases.
- La cuantificación de la proporción adecuada de la masa de óxido de zinc para la experimentación.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.1. Marco referencial**

##### **2.1.1 Antecedentes de la investigación**

- Corzo Lucioni & Vega Baudrit (Arequipa, 2012) ,“ESTUDIO CINETICO DE LA DEGRADACION FOTOCATALITICA OXIDATIVA DE COLORANTES EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA TEXTILERA”, anuncia que realizaron experiencia sobre la degradación foto catalítica de colorantes utilizando el óxido de zinc (ZnO) como el semiconductor o foto catalizador y la exposición a la luz ultravioleta proveniente del sol en un equipo expuesto al medio ambiente. El equipo está provisto de sistema de agitación constante para la mayor activación de las partículas de óxido de zinc y contacto con el colorante, de acuerdo al estudio para lograr la foto degradación encontraron que la concentración efectiva tanto del óxido de zinc y el colorante, fueron de 0.3g/ml y 20mg/l respectivamente. La investigación demuestra que la fotocatalisis por la aplicación del Óxido de zinc (ZnO) es efectiva en la remoción de los colorantes en los efluentes líquidos provenientes de industrias textiles, ya que los resultados de la cinética de degradación del colorante Rodamina B son de  $0.1\text{min}^{-1}$ .
  
- David Adrián Ochoa Fajardo (Quito , 2015), “DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPOSITO DE OXIDO DE ZINC IMPREGNADO EN UN SOPORTE GRANULAR QUE PRESENTE ACTIVIDAD FOTOCATALITICA”, sustenta: La fotocatalisis en contaminantes acuosos, para los colorantes industriales emanados



por industrias textiles. La fotocatalisis heterogénea es parte de un proceso fotoquímico que hace uso de las nuevas tecnologías avanzadas de oxidación. Tal tecnología se basa en una reacción catalítica que involucra la absorción de luz por parte de un fotocatalizador, con el fin de degradar los contaminantes orgánicos, asegurando el suministro de oxígeno, a dióxido de carbono, agua y ácidos minerales, inocuos para el medio ambiente.

- Juliana Gonzales Tabon (Medellin, 2015), “EL DIÓXIDO DE TITANIO COMO MATERIAL FOTOCATALITICO Y SU INFLUENCIA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS”, sustenta: Esta investigación se enfoca en el uso del Dióxido de Titanio, en adelante  $TiO_2$ , y su influencia en la resistencia a la compresión y su aspecto estético como material fotocatalítico para la fabricación de morteros lo cual, se logra mediante la elaboración de ensayos donde se substituyó de manera gradual el cemento por dióxido de titanio en morteros.

### 2.1.2 Referencias históricas

La actividad foto catalítica del dióxido de titanio ha sido extensamente estudiada en aplicaciones de esterilización, desinfección y descontaminación. Estudios previos indican que los materiales de construcción que contienen dióxido de titanio, cuando son expuestos a la radiación solar, pueden oxidar eficientemente los contaminantes adsorbidos sobre su superficie (óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, COVs, formaldehído, emisiones industriales, etc). Especialmente relevantes son los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) que representan algunos de los agentes contaminantes del aire más abundante, directamente relacionado con la formación de smog, generación de ozono y efectos directos sobre la salud humana. Los procesos de oxidación heterogénea foto catalítica representan una vía prometedora para solventar los problemas causados por los  $NO_x$  mediante su conversión fotoquímica a nitratos, compuestos solubles que pueden ser arrastrados por el agua de lluvia o riego (*Dalton y col. 2002*). Las concentraciones de  $NO_x$  suelen ser suficientemente bajas para que, incluso con elevados niveles de conversión a nitratos, no represente un problema para el tratamiento del agua en las EDAR (Estaciones depuradoras de aguas residuales).

Para que estas reacciones de oxidación fotocatalítica sean eficientes son necesarias concentraciones relativamente bajas de dióxido de titanio, recubrimientos fotocatalíticos del orden de 600 nm - 1  $\mu$ m ya demuestran elevada actividad. (*Olabarrieta y col. 2012, Faraldos y col. 2012*).

## **2.2 Marco legal**

- Ministerio de Ambiente (MINAM). Decreto Supremo N° 003 – 2017 – MINAM. “Aprueban estándares de calidad ambiental (ECA) para aire y establecen el anexo donde se encuentra el parámetro para Monóxido de Carbono.
- Ministerio de Ambiente (MINAM). Resolución Ministerial N° 201-2016–MINAM. “Protocolo nacional de sistemas de monitoreo continuo de emisiones – CEMS”.
- Resolución Ministerial N° 258 – 2011 MINSAL. “Política nacional de salud ambiental 2011-2020. La estrategia establece la vigilancia de la calidad sanitaria del aire.
- Decreto Supremo N° 009 – 2003 – S.A. Su modificatoria y directiva. “Reglamento de niveles de estados de alerta nacionales de contaminantes de aire”.
- CONAMA-2012 Congreso Nacional del Medio Ambiente – “Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas”.
- CONAMA-2014 Congreso Nacional del Medio Ambiente – “Equipo Multiensayo para la determinación del poder descontaminante de Productos Fotocatalíticos”.
- Artículo de Revisión Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF) – La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento, un complemento perfecto aplicable a las infraestructuras verdes urbanas y periurbanas.
- Revista Ingenierías Universidad de Medellín – Fotocatálisis heterogénea
- Ensayo - Contaminación por Monóxido de carbono: un Problema de Salud Ambiental.

## **2.3 Marco conceptual**

### **2.3.1. Óxido de zinc (ZnO)**

El óxido de zinc es un compuesto inorgánico perteneciente a la función química denominada óxidos, el cual es la suma de un elemento metálico más el oxígeno; en este caso, la unión del elemento zinc con el oxígeno forma el óxido de zinc de fórmula química ZnO, por sus propiedades químicas está considerado como un semiconductor.

Dicho semiconductor, en la naturaleza se puede encontrar como mineral de nombre CINCITA, pero se puede elaborar sintéticamente y es la manera normalmente comercializada. La presentación es un polvo de color blanco y no se disuelve en agua o insoluble a ella, y es empleado como aditivo en la elaboración de diferentes productos

industriales tales como plástico, caucho, cerámica, lubricante, pintura, vidrio, cremas, entre otros.

### **2.3.2. Radiación Ultravioleta (UV)**

Se denomina radiación ultravioleta o radiación UV a la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 400 nm ( $4 \times 10^{-7}$  m) y los 15 nm ( $1,5 \times 10^{-8}$  m). Su nombre proviene de que su rango empieza desde longitudes de onda más cortas de lo que los humanos identificamos como el color violeta; pero dicha luz o longitud de onda es invisible al ojo humano al estar por encima del espectro visible. Esta radiación es parte integrante de los rayos solares y produce varios efectos en la salud al ser una radiación entre no-ionizante e ionizante.

### **2.3.3. Fotocatálisis**

La fotocatálisis es una reacción fotoquímica que convierte la energía solar en energía química en la superficie de un catalizador o sustrato, consistente en un material semiconductor que acelera la velocidad de reacción. Durante el proceso, tienen lugar reacciones tanto de oxidación como de reducción. De esta forma, se promueve la eliminación de la mayor parte de los contaminantes en las ciudades.

Por medio de la fotocatálisis, se puede eliminar la mayor parte de los contaminantes presentes en las zonas urbanas: NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, compuestos orgánicos volátiles (VOCs), CO, metil mercaptano, formaldehído, compuestos orgánicos clorados, compuestos poli aromáticos. Los materiales de construcción tratados con un fotocatalizador eliminan sobre todo las partículas NO<sub>x</sub> que están producidas por los vehículos, la industria y la producción de energía.

### **2.3.4. Reacción Redox**

Nombre simplificado de las reacciones de reducción-oxidación, son aquellas reacciones de tipo químico que llevan a la transferencia de electrones entre reactivos, alterando el estado de oxidación. De este modo, un elemento libera electrones que otro elemento acepta.

Aquel elemento que aporta los electrones recibe la denominación de agente reductor. Se trata del elemento que se oxida en el marco de la reacción redox. El elemento que recibe

los electrones, por su parte, se denomina agente oxidante. Este agente se reduce ya que minimiza su estado de oxidación.

#### **2.3.4.1. Oxidación**

Es el proceso en el cual una especie química pierde electrones y su número de oxidación aumenta.

#### **2.3.4.2. Reducción**

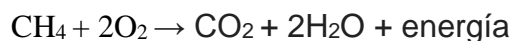
Es el proceso en el cual una especie química gana electrones y su número de oxidación disminuye.

#### **2.3.5. Combustión**

La combustión es un proceso químico que consiste en una reacción de oxidación de materiales llamados combustibles, principalmente formados por carbono, hidrógeno y azufre, en presencia de oxígeno. Son reacciones que se producen de forma muy rápida y con desprendimiento de calor.

##### **2.3.5.1. Tipos de Combustión**

- a) **Combustión completa o perfecta:** Se produce toda la reacción. El oxígeno ha sido al menos el suficiente para completar la reacción. Los componentes se oxidan completamente, formando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua líquida (H<sub>2</sub>O) y en su caso, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).



- b) **Combustión estequiométrica:** se emplea la cantidad de aire exacta. Es una combustión ideal, solo se puede conseguir en laboratorio, ya que la distribución del aire realmente no es homogénea.
- c) **Combustión incompleta:** Es aquella cuyos gases de combustión contienen compuestos que no han sido quemados del todo como, por ejemplo: monóxido de carbono (CO), partículas de carbono, hidrógeno, etc. Estos compuestos pueden ser muy tóxicos (como en el caso del monóxido de carbono).



## 2.4 Marco teórico

### 2.4.1 Procesos de Oxidación Avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA) o también denominadas tecnologías de oxidación avanzada (TOA), son métodos de tratamiento de agentes tóxicos en sus estados físicos de líquido o gas, que pueden ser emitidos normalmente por las industrias u otros focos de contaminación como es el parque automotor. La técnica consiste en la utilización de un compuesto que sea inerte a los elementos contaminantes o en otras palabras que no reacciones con ellos para la formación de nuevos compuestos; sino que debido a su presencia pueda desencadenar reacciones químicas en dichos agentes tóxicos, denominándose así como un CATALIZADOR, pero para que el compuesto pueda trabajar o se active debe recibir luz UV, al recibirla, la denominación de dicho compuesto será de un FOTO-CATALIZADOR, y como lo hemos mencionando todo aquel compuesto que este cerca reaccionara acelerando procesos de oxidación o reducción, que convertirían en compuestos menos tóxicos para el medio ambiente.

Los procesos de oxidación avanzada son considerados como procesos limpios debido a que no generan otros compuestos por el tratamiento de algún agente, debido a que los fotocatalizadores son inertes o no reaccionan directamente con los compuestos a tratar, utilizan la energía solar para su activación, y luego del tratamiento ya del agente contaminante ya sea en la fase líquido o gaseosa, el fotocatalizador puede volverse a reusar. En otras palabras, los procesos de oxidación avanzada se pueden denominar como tecnologías compatibles con el medio ambiente.

Las ventajas de los POA son:

- Posee una elevada capacidad para poder mineralizar los contaminantes orgánicos, y llevar a la oxidación de los compuestos inorgánicos.
- Posee una elevada reactividad con gran parte de los compuestos orgánicos.
- Descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos.



## 2.4.2 La radiación solar y sus aplicaciones en la fotocatalisis

La materia puede interactuar con la luz en un amplio rango de longitudes de onda y con diversos cambios en la estructura de las moléculas. Las radiaciones cerca al espectro visible o ultravioleta (240-700nm) interactúan con los electrones de una molécula y estas reacciones son las más importantes desde el punto de vista ambiental. La luz solar es una energía directa, primaria, abundante y barata que en muchos casos es absorbida por compuestos químicos para producir procesos fotolíticos.

La interacción de la luz con los sistemas moleculares se da a escala molecular donde ésta interactúa con un fotón (reacción 3), en la que A representa el estado fundamental de la molécula,  $h\nu$  es el fotón absorbido y  $A^\circ$  la molécula en estado excitado (Garces Giraldo, Mejia Franco, & Santamaria Arango, 2015).



La aplicación de la energía solar es bastante amplia, desde la utilización básicamente por la concentración de calor, que bien aprovechado para la calefacción de agua, también es posible aprovechar la energía con la que viaja la luz, que se traduce en lo que es la radiación ultravioleta, conformada por el viaje de la luz, en diferentes longitudes de onda, dentro de ellas nosotros solo podemos visualizar desde los 240 a 700nm. La luz que viaja impacta sobre la materia en algunos casos como, la materia presenta comportamiento químico, como es el caso de los semiconductores, que en su superficie al ser impactados por la luz, les sucede saltos de electrones, dicho salto genera energía eléctrica, en algunos casos la aplicación de los semiconductores y para aprovechar la radiación solar son utilizados para generar corriente eléctrica en lo que se conoce como paneles solares, además de ellos otros semiconductores como es el caso de la presente investigación esta actividad presente en la partícula del semiconductor, tiene la capacidad de promover reacciones, tanto de oxidación como de reducción, y su aplicación es utilizada para el tratamiento de efluentes de plantas industriales, o para descontaminar emisiones de gases.

## 2.4.3 La luz solar

A la Tierra le llega energía proveniente del Sol, permitiendo que el planeta entre en equilibrio respecto a la temperatura, pero no toda la energía que llega del Sol es recibida por la tierra, debido a que por la presencia de la capa de ozono una parte rebota y no ingresa a la corteza terrestre, a su vez parte de energía que ingresa también rebota y sale al espacio, esto permite un equilibrio en la Tierra.

El flujo energético que alcanza la atmósfera es de  $1340 \text{ W m}^{-2}$ ; que equivale aproximadamente a la mitad de la radiación que absorbe o refleja al espacio por los gases atmosféricos que llegan a la corteza terrestre, la radiación que llega a la superficie terrestre es absorbida y luego emitida en forma de radiación infrarroja, permitiendo un equilibrio de temperatura del planeta.

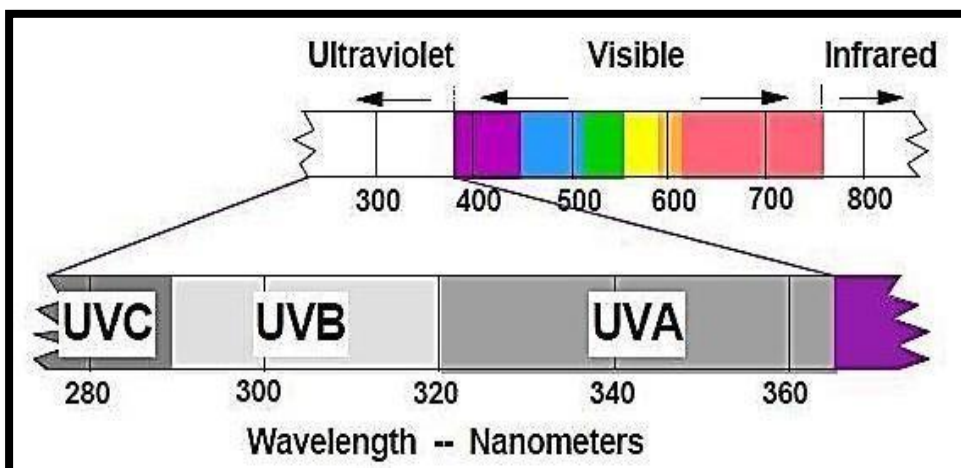
El Sol emite radiación la cual está conformada por fotones que viajan a diferentes niveles de energía, lo que se observa en la longitud de onda ( $\lambda$ ) con la que viajan, esto se denomina como el espectro electromagnético de la luz solar. Entonces como mencionamos la longitud de onda ( $\lambda$ ) y la energía (E) están relacionados.

En la figura 2.1 se puede observar la representación gráfica de la radiación de acuerdo a la longitud de onda con la que se encuentran viajando, como se puede observar el rango visible se encuentra arriba de los 380nm de longitud de onda y poco menos de los 800nm, superior al rango visible se encuentra la radiación infrarroja, e inferior al rango visible se encuentra la radiación ultravioleta la cual llega del Sol, y esta misma se puede subdividir en tres tipos de radiación tales como:

- Radiación Ultravioleta tipo A (UVA)
- Radiación Ultravioleta tipo B (UVB)
- Radiación Ultravioleta tipo C (UVC)

Podemos observar también los rangos para ser denominados UVA, UVB, UVC.

**Figura 2.1.** Espectro electromagnético de la luz solar



**Fuente:** Marisol Faraldos, 2012

La radiación UVC por lo general no llega a la superficie terrestre debido a que la longitud de onda con la que viaja no atraviesa la capa de ozono y rebotan hacia el espacio. La radiación UVA y UVB son las que ingresan a la corteza terrestre, y son las causantes de la activación de los semiconductores.

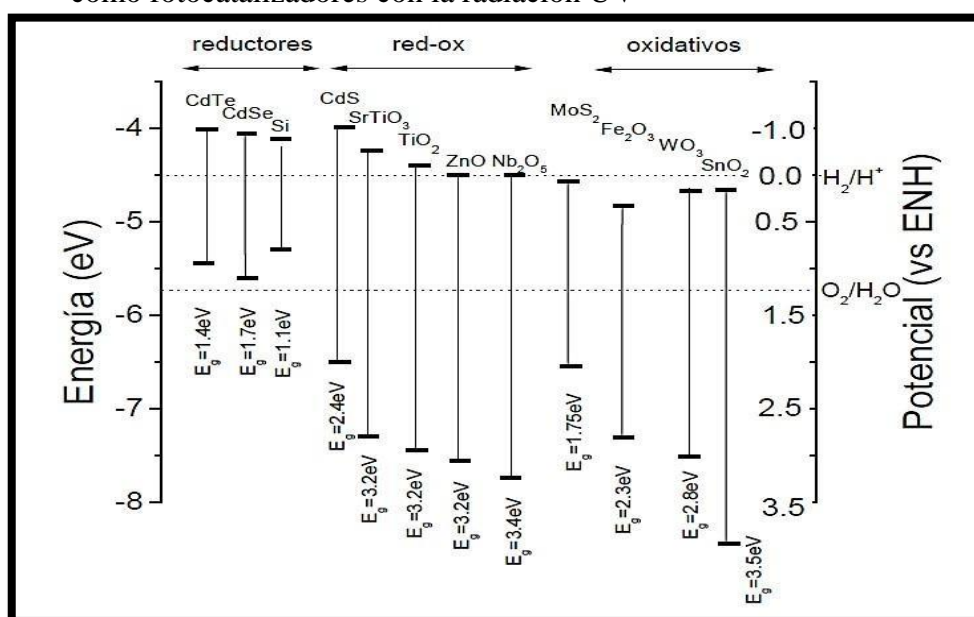
La unidad de medida de la luz son los LUX, que se refiere a la medida de la potencia o flujo luminoso por metro cuadrado.

#### 2.4.4 Semiconductores con actividad fotocatalítica.

La Fig. 2.2 presenta de forma esquemática el potencial redox correspondiente a la banda de valencia y a la banda de conducción para distintos semiconductores (considerando el tipo de dopado cuando corresponde), en contacto con una solución que contiene la cupla (H<sup>+</sup>/½ H<sub>2</sub>) en condiciones normales (ENH); asimismo se muestra los potenciales redox de algunas cuplas.

El potencial de reducción de los (h<sup>+</sup>) generados en la banda de valencia de los semiconductores de banda prohibida ancha (ZnO, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>), es termodinámicamente adecuado para oxidar cualquier molécula orgánica; al mismo tiempo, el potencial redox del electrón promovido a la banda de conducción es también termodinámicamente adecuado para reducir oxígeno u otros oxidantes moderados.

**Figura 2.2.** Posición de los bordes de las bandas de conducción y de valencia (band gap) de algunos compuestos semiconductores que pueden actuar como fotocatalizadores con la radiación UV



Fuente: Marisol Faraldos, 2012

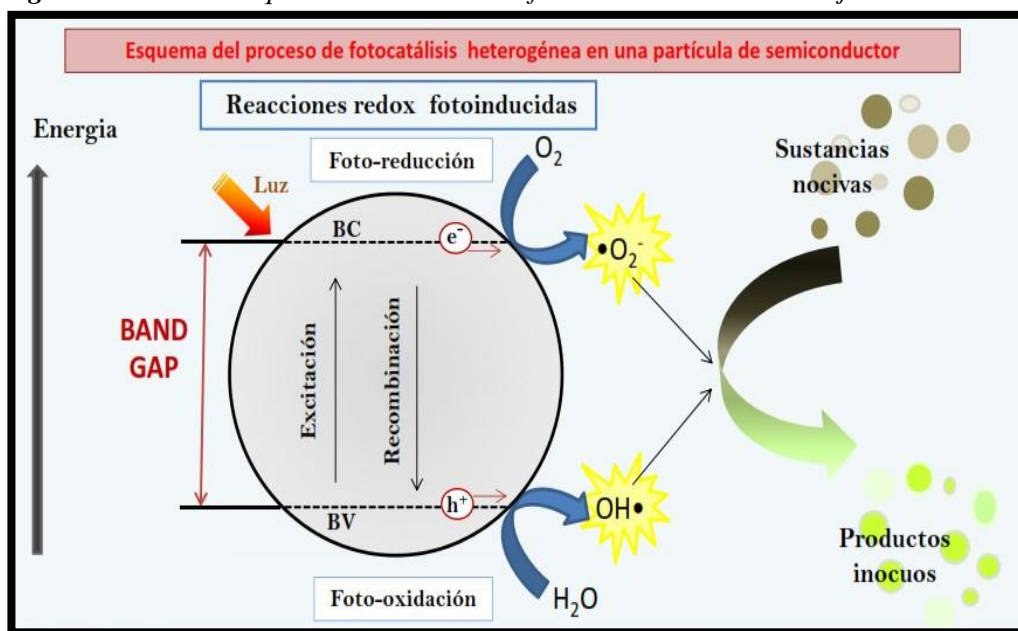


La longitud de onda de la radiación UV, cumple un rol muy importante en la activación de los semiconductores, para los posteriores procesos de oxidación o reducción de contaminantes. Se requiere una radiación ultravioleta UV- A (320-400 nm), para la activación de las partículas de óxido de zinc (ZnO), pero existen otros semiconductores que se activan a otras longitudes de onda.

#### 2.4.5 Fotocatálisis

La fotocatálisis es un fenómeno químico que ocurre alrededor de un semiconductor que presenta comportamiento de catalizador, ya que tiene la capacidad que en su presencia promueve reacciones químicas, con mayor rapidez. A diferencia de un catalizador químico, es que para que entre en actividad debe estar en contacto con la luz UV, para iniciar los procesos de catálisis y pueda promover las reacciones químicas de los compuestos que estén a su alrededor.

**Figura 2.3.** Procesos que ocurren en la interface del semiconductor bajo irradiación



**Fuente:** Iris, 2016

Como se puede observar en la figura 2.3 la esfera representa a la partícula de un semiconductor o fotocatalizador, que al momento de tener contacto con la luz UV, se activa, existe un salto de electrones de la zona expuesta hacia el otro lado de la partícula, dejando un lado con ausencia de electrones, lo que deja cargada a dicha zona positivamente, y a donde se desplaza el electrón cargando dicha zona negativamente, por lo que poseerá propiedades de promover reacciones de oxidación y reducción, para términos fotocatalíticos, la partícula presenta una zona donde ocurre reacciones de foto-reducción y otra zona donde ocurre reacciones de foto-oxidación. Este fenómeno es aplicado para el tratamiento de sustancias

nocivas, para su posterior oxidación u degradación, a convertirlos en compuestos u elementos inocuos o de baja toxicidad al medio ambiente, frente al compuesto inicial antes de la fotocatalisis.

#### **2.4.6 Foto-catalizadores**

En lo que respecta a las características del semiconductor, existen diversos materiales con propiedades idóneas para procesos fotocatalíticos como por ejemplo  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$ , Oxidos de hierro,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnS}$ , etc. La mayoría de estos pueden excitarse con luz de no muy alta energía, absorbiendo parte de la radiación del espectro solar que incide sobre la superficie terrestre, sin embargo, algunos de estos semiconductores son tóxicos. De los fotocatalizadores más usados tenemos el  $\text{TiO}_2$ , el cual presenta una elevada estabilidad química que lo hace apto para trabajar en un amplio intervalo de valores de pH, es capaz de producir transiciones electrónicas por absorción de luz en el ultravioleta cercano (UV-A), además es completamente inocuo (Rodríguez, Candal, Solis, Estrada, & Blesa, 2011).

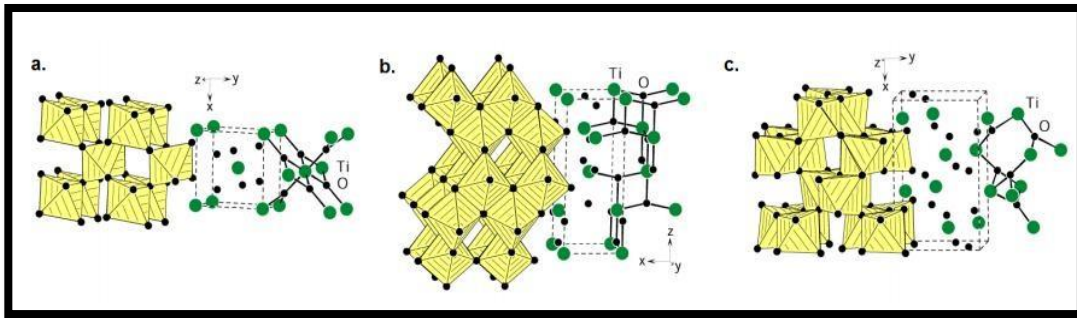
#### **2.4.7 $\text{TiO}_2$ como fotocatalizador**

El dióxido de titanio es uno de los mejores semiconductores, promueve eficientemente las reacciones químicas, el estado cristalino del dióxido de titanio utilizado es la Anastasa, presenta elevada actividad, fotoestabilidad y un grado muy bajo de toxicidad.

Es un sólido de marcado carácter iónico que consiste en iones  $\text{Ti}^{4+}$  y  $\text{O}^{2-}$ . El  $\text{TiO}_2$  tiene cuatro polimorfos: anatasa (tetragonal), rutilo (tetragonal), brookita (ortorrómbica) y  $\text{TiO}_2$  (B) (monoclínico). Además de estos polimorfos, se han obtenido a altas presiones dos polimorfos adicionales derivados de la estructura rutilo;  $\text{TiO}_2$  (II) (estructura tipo  $\text{PbO}_2$ ) y  $\text{TiO}_2$  (H) (estructura tipo holandita).

El dióxido de titanio también se presenta en otras formas cristalinas tales como el Rutilo, y la Brookita, que se muestran en la figura 2.4.

Figura 2.4. Estructura cristalina de los polímeros de TiO<sub>2</sub>. A. Rutilo, B. anatasa y C. brookita

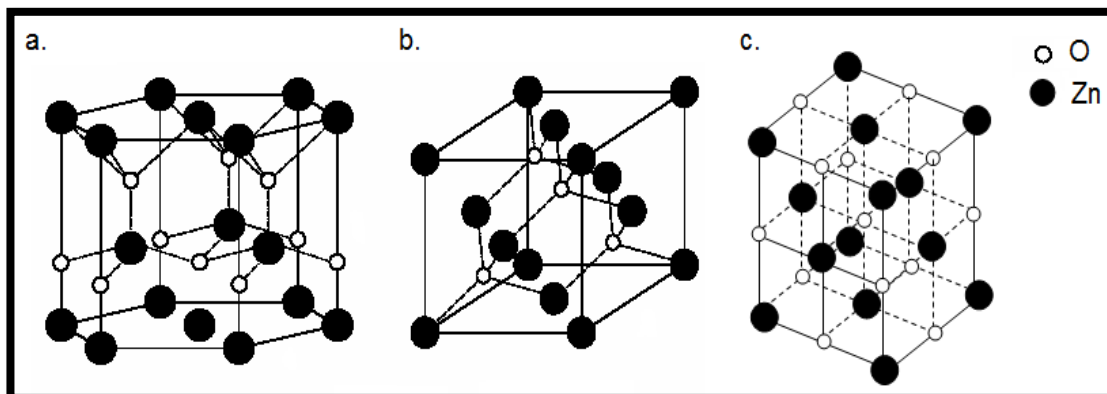


Fuente: Rodríguez, Candal, Solis, Estrada, & Blesa, 2011.

### 2.4.8 ZnO como fotocatalizador

El óxido de zinc (ZnO) es un material semiconductor de transición directa con una banda de energía prohibida amplia ( $E_g > 3$  eV) que ha sido utilizado en la fabricación de dispositivos electrónicos, catalíticos, sensores químicos, así como en celdas solares. Las estructuras cristalinas que presenta el ZnO son la wurtzita (hexagonal), blenda de zinc (cúbica) y de sal de roca (NaCl, cúbica centrada en caras), aunque esta última estructura es obtenida únicamente a altas presiones (10 GPa). Asimismo, el ZnO con estructura de blenda de zinc se ha obtenido mediante el uso de cristales cúbicos durante el crecimiento epitaxial del óxido, siendo la wurtzita, la estructura cristalográfica estable en condiciones ambientales (Figura 2.3).

Figura 2.5. Estructura cristalina de los polimorfos de ZbO. A. wurtzita, B. Blenda de zinc y C. NaCl



Fuente: Refugio Villafuerte, 2013

En la estructura NaCl, el oxígeno ocupa los vértices de un octaedro regular ( $NC = 6$ ) mientras que en la blenda de zinc y wurtzita, los vértices de un tetraedro regular ( $NC = 4$ ). Las estructuras de blenda de zinc y wurtzita pueden describirse mediante un

empaquetamiento de aniones con cationes de igual carga, los cuales ocupan la mitad de los sitios tetraédricos. La diferencia entre ambas estructuras es que en la blenda de zinc el empaquetamiento compacto de aniones es cúbico, mientras que en la wurtzita es hexagonal. La Tabla 1.7 resume diferentes propiedades de los polimorfos de ZnO (Jurado, Vargas Hernandez, & Londoño Calderon, 2012).

*Tabla 2.1. Datos cristalográficos de ZnO*

Propiedad	Wurtzita	Blenda de zinc	NaCl
<b>Estructura cristalina</b>	Hexagonal	Cúbica	Cúbica centra en caras
<b>Parámetro de red (A)</b>	a=3.251 c=5.207	a=5.406	a=4.271
<b>Grupo espacial</b>	P6 <sub>3</sub> mc	F43m	Fm3m
<b>Unidades formula (Z)</b>	2	4	4
<b>Volumen (A)<sup>3</sup></b>	47.665	157.990	19.600
<b>Densidad (g.cm<sup>3</sup>)</b>	4.050	4.087	3.580

Fuente: Jurado, Vargas Hernández & Londoño Calderón, 2012

- **Síntesis de Óxido de Zinc (ZnO)**

Los métodos de producción de Óxido de Zinc van desde:

**a) Procesos indirectos**

Consiste en la fundición del zinc, y posteriormente vaporizado para luego dicho vapor reaccione con el oxígeno del aire, formándose así el óxido de zinc.

**b) Procesos directos**

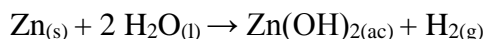
Proceso que ocurre en fase acuosa de sales de carbonato de zinc (ZnCO<sub>3</sub>) o hidróxido de zinc (Zn(OH)<sub>2</sub>), de las cuales el zinc es precipitado; posteriormente, es filtrado, secado y llevado a hornos para ser calcinado y formar el óxido de zinc (ZnO).

**c) Síntesis en laboratorio**

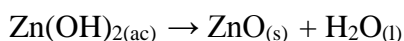
El óxido de zinc (ZnO) es producido a partir de la electrolisis de una solución acuosa de bicarbonato de sodio (NaHCO<sub>3</sub>) con un ánodo de zinc. Posteriormente, se forma

el hidróxido de zinc ( $\text{Zn(OH)}_2$ ) y al calentarse se pasa a generarse el óxido de zinc. Las ecuaciones químicas a continuación demuestran el proceso de formación:

1. El zinc del ánodo por la electrolisis reacciona con el agua, formando directamente el hidróxido de zinc y la generación del gas de hidrógeno.



2. Posterior al filtrado, el hidróxido de zinc es calentado y se descompone en agua y óxido de zinc.



Luevano Hipolito, 2015

#### 2.4.9 El aire

El aire es un gas incoloro que se encuentra sobre la corteza terrestre. El aire posee una composición de nitrógeno, oxígeno y otros gases tal cual se observa en la siguiente tabla:

*Tabla 2.2. Composición del aire*

Elementos	Composición porcentual
	(%)
Nitrógeno	78
Oxígeno	21
Otros gases	1

**Fuente:** MINAM, Aire limpio para todos, 2014

Entre otros gases que componen el aire se pueden considerar al Argón, Neón, Helio, Criptón, Xenón, Hidrógeno, Metano, Óxido nitroso y vapor de agua (cuya composición varía entre 0.5 y 4 %) además hay presencia de ozono troposférico y partículas suspendidas. Las partículas que se encuentran en el aire, se denominan aerosoles y están compuestos esencialmente por polvo arrastrado de la superficie de la tierra y cenizas (producto de la combustión o actividades volcánicas). Son por lo general menores a 10 micrómetros de diámetro (MINAM, Aire limpio para todos, 2014).

#### **2.4.10 Calidad de aire**

La calidad de aire se refiere específicamente a los niveles de elementos que están viajando en el aire que no influyan en el normal desarrollo de los organismos vivientes, entre menos alteraciones les ocurra, la calidad de aire es mejor, caso contrario, la calidad disminuye y altera los procesos metabólicos y se supervivencia de los organismos ya sea plantas, animales, entre otros.

Se puede entender por contaminación atmosférica “el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire”, entendiéndose que los contaminantes “son fenómenos físicos o sustancias, elementos en estados sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medioambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas”.

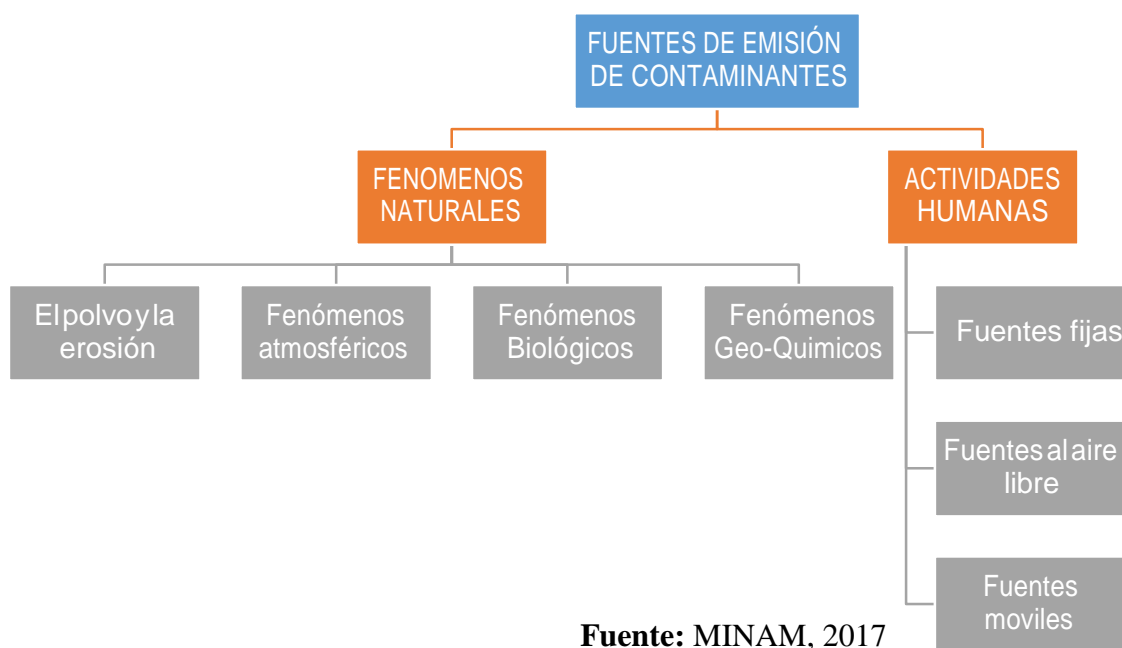
La contaminación atmosférica cobra relevancia especialmente en los centros urbanos, en los que se presenta debido a la manera como se venían desarrollando los sectores industriales y de transporte, así como a la falta de planificación en su crecimiento. Esta contaminación disminuye notablemente la calidad de vida de la población, lo cual se ve reflejado en un aumento en la frecuencia y la gravedad de las enfermedades respiratorias, en la mortalidad temprana, en las consultas hospitalarias y en la ausencia laboral (IDEAM, 2007).

#### **2.4.11 Principales contaminantes del aire**

Los contaminantes del aire son todos aquellos que en composición le resta porcentaje al global del contenido de Oxígeno y Nitrógeno, con otros gases que como se menciona anteriormente son perjudiciales para el normal desarrollo de organismos vivientes. Tal es así que los contaminantes del aire pueden ser tanto partículas en suspensión en el aire, tales como polvo entre otros, y también emisiones de gases químicos como el monóxido de carbono, dióxido de carbono, gases de azufre tales como anhídrido hiposulfuroso, anhídrido hiposulfuroso y anhídrido sulfúrico, o gases formados por nitrógeno. Todos los gases que resten porcentaje a la composición del aire respecto al nitrógeno y oxígeno son considerados contaminantes, y pero aun si estos mismos perjudican el desarrollo de la vida.

El Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, aprobó el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, estableciendo niveles de concentración máxima para el SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Pb y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). El valor anual para el Pb fue fijado con el Decreto Supremo n.° 069-2003-PCM. El 2008 mediante el Decreto Supremo n.° 003-2008-MINAM se actualiza el valor de 24 horas para el SO<sub>2</sub> y se incluyen nuevos valores de los ECA para los contaminantes benceno, hidrocarburos totales (HT), material particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM<sub>2,5</sub>) e hidrógeno sulfurado (H<sub>2</sub>S) (que era referencial). Los valores de los ECA establecidos por las precitadas normas se aprecian en el Anexo 4. A continuación se presenta una breve descripción de los parámetros que serán sujetos de evaluación y análisis (MINAM), aprobó Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire con DECRETO SUPREMO N° 003-2017-MINAM, 2017).

*Figura 2.6. Fuentes de emisión de contaminantes*



**a) Monóxido de Carbono (CO)**

Es un gas inodoro e incoloro. Cuando se lo inhala, sus moléculas ingresan al torrente sanguíneo, donde inhiben la distribución del oxígeno. En bajas concentraciones produce mareos, jaqueca y fatiga, mientras que en concentraciones mayores puede ser fatal (MINAM, Aire limpio para todos, 2014).

**b) Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)**

Gas causante del efecto invernadero, el cual se genera por la combustión de material tales como el petróleo, carbón, gas natural, madera, entre otros. Un gran foco emisor de dicho gas son los medios de transporte que funcionan por la combustión del diésel, gasolina o gas, para desarrollar movimiento.

**c) Clorofluorcarbonos (CFC)**

Son sustancias químicas que se utilizan en gran cantidad en la industria, en sistemas de refrigeración y aire acondicionado y en la elaboración de bienes de consumo. Cuando son liberados a la atmósfera, ascienden hasta la estratosfera. Una vez allí, los CFC producen reacciones químicas que dan lugar a la reducción de la capa de ozono que protege la superficie de la Tierra de los rayos solares. La reducción de las emisiones de CFC y la suspensión de la producción de productos químicos que destruyen la capa de ozono constituyen pasos fundamentales para la preservación de la estratosfera (MINAM, Aire limpio para todos, 2014).

**d) Contaminantes atmosféricos peligrosos (HAP)**

Son compuestos químicos que afectan la salud y el medio ambiente. Las emanaciones masivas –como el desastre que tuvo lugar en una fábrica de agroquímicos en Bhopal, India– pueden causar cáncer, y daños severos a la salud de los organismos que se encuentre en su contacto.

Las emisiones de HAP son generadas en fábricas de productos químicos, productos para limpieza en seco, imprentas y vehículos (automóviles, camiones, autobuses y aviones) (MINAM, 2014).

**e) Plomo**

Metal pesado muy tóxico que ocasiona daños a la salud humana. Afectando al sistema nervioso y causar daño al sistema digestivo, hasta conducir al cáncer. El plomo también ocasiona impacto ambiental al influir en el normal desarrollo de la flora y fauna silvestre.



#### **f) Ozono (O<sub>3</sub>)**

Existe dos tipos de ozono el troposférico y el que se genera a nivel de la corteza terrestre, el cual este último es nocivo para el medio ambiente y para la salud humana, generando problemas severos en sistema respiratorio. El ozono terrestre se forma por la descomposición y oxidación de compuestos orgánicos volátiles como los disolventes, también se forma por la combustión de compuestos orgánicos, como es el carbón, o la combustión de gasolina, pinturas entre otros. El ozono también se genera en las industrias y del parque automotor (MINAM, 2014).

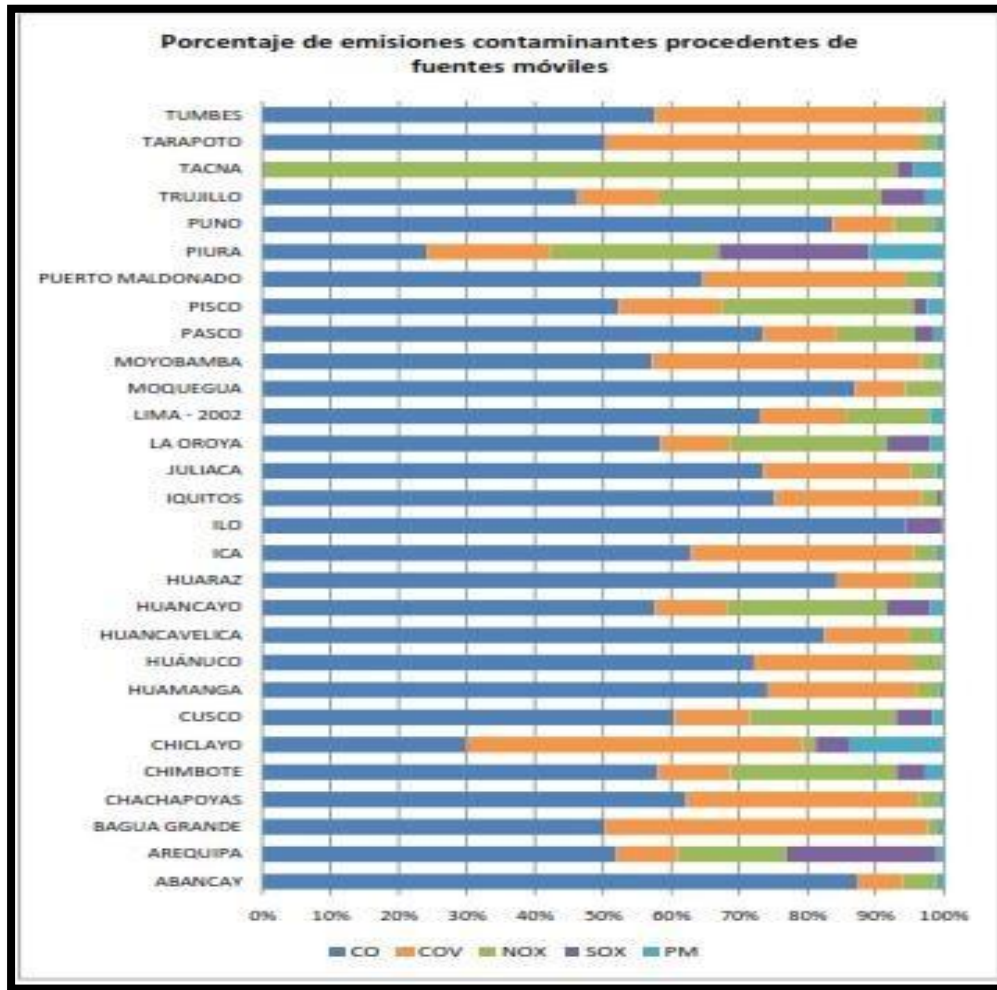
#### **2.4.12 Fuentes de contaminación de aire**

##### **a) Fuentes móviles**

El parque automotor, es como fuente de contaminación del aire una de las más grandes en el Perú. Ya que los vehículos casi en su totalidad funcionan por la combustión interna en el motor de la gasolina, diésel o gas licuado de petróleo (GLP) produciéndose gases como: Anhídrido de carbonoso (CO), Anhídrido nitroso (NO<sub>2</sub>), Anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>), además de la liberación de plomo (este último dependerá del tipo de gasolina a usar), todos estos gases son liberados al medio ambiente, causando problemas respiratorios y también en el normal desarrollo de los organismos vivientes (MINAM, Aire limpio para todos, 2015).

A continuación, se muestra una gráfica de las ciudades mayormente afectadas por su propia generación de gases contaminantes de su parque automotor:

Figura 2.7. Porcentajes de emisiones contaminantes procedentes de fuentes móviles en ciudades



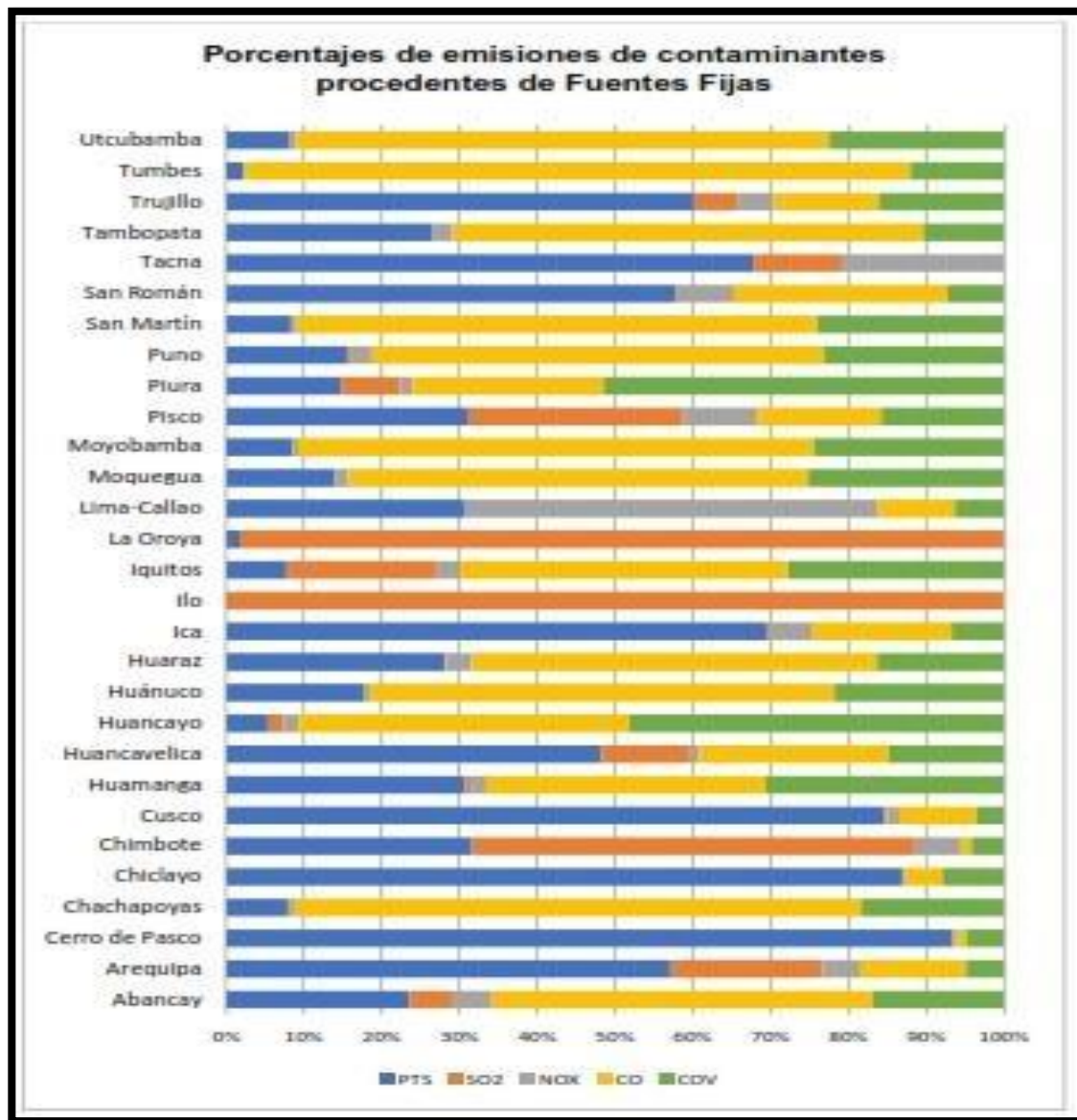
Fuente: MINAM, 2015

**b) Fuentes fijas**

- Fábricas, fundiciones, siderúrgicas, minas, ladrilleras que generan gases, polvos, cenizas y otros productos de sus procesos de combustión o transformación de materias primas con tecnologías obsoletas o sucias. En algunos lugares, como en Chimbote, Pisco, Ilo o La Oroya, sus volúmenes o concentraciones, generan riesgo para la salud de la población.
- Comercios y servicios, como restaurantes, pollerías industrias en la preparación de alimentos y otros, que tienen procesos de combustión o transformación, generando gases y polvos en pequeñas cantidades, pero de modo continuo y disperso y que todavía no tienen normas o mecanismos de control en el país.

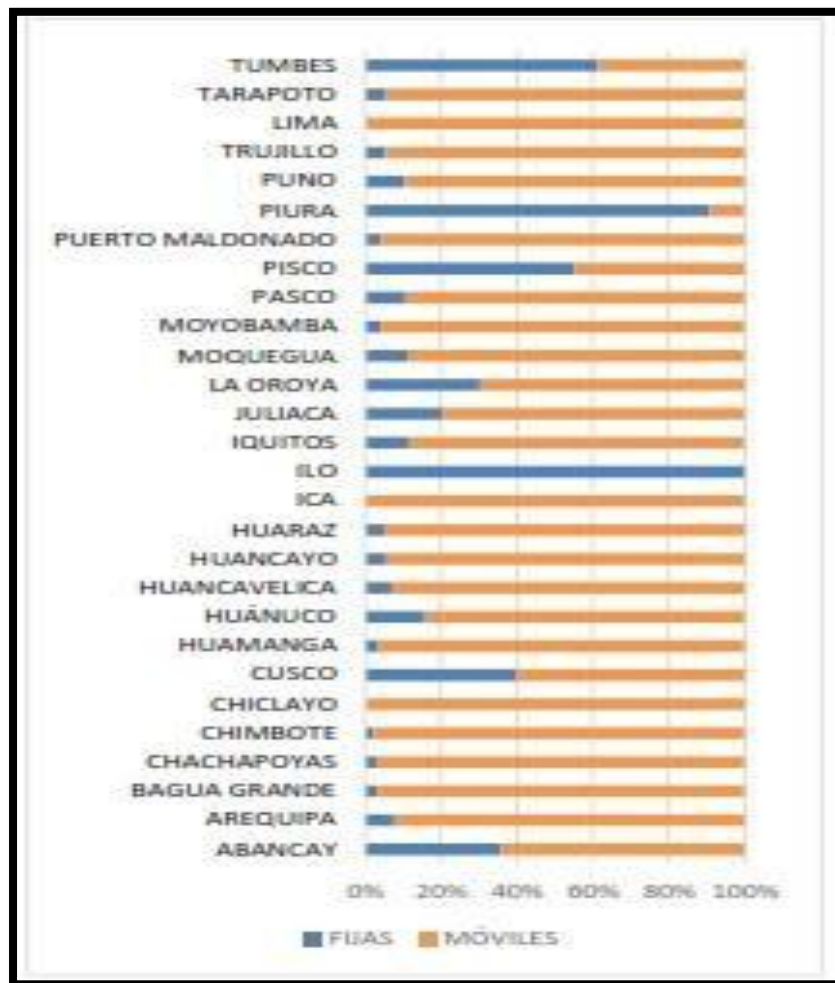
- Quema de basura, práctica inadecuada de su eliminación de parte de la población, sea por malos hábitos, o la carencia o deficiencia del servicio de limpieza municipal; dentro de los residuos se encuentran plásticos, llantas y otros materiales sintéticos que al ser quemados pueden generar gases sumamente tóxicos.
- Quema de bosques, práctica realizada por la población rural para la preparación de terreno para la agricultura, pero el efecto en el ambiente es altamente perjudicial ya que se emiten grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y partículas.
- Causas naturales, como el polvo generado por la erosión de los suelos, microorganismos y elementos biológicos (esporas, polen, bacterias, hongos, etc.); en otros países están también las erupciones volcánicas, incendios forestales, brisa marina y otros (MINAM, 2015).

Figura 2.8. Porcentajes de emisiones contaminantes procedentes de fuentes fijas en ciudades



Fuente: MINAM, 2015

Figura 2.9. Porcentajes de emisiones de monóxido de carbono (CO) de fuentes fijas y fuentes móviles.



Fuente: MINAM, 2015

#### 2.4.13 Principales fuentes de contaminación en las ciudades de Perú

Como parte de los procesos de elaboración de los diagnósticos de línea base en las treinta y un (31) zonas de atención prioritaria, dispuesto en el Reglamento de Estándares de Calidad Ambiental del Aire 17, se elaboraron los inventarios de emisiones en dichas zonas; a partir de los cuales se han identificados las principales fuentes de contaminación del aire, según se observa a continuación: En muchas de las zonas de atención prioritaria la principal fuente de contaminación lo constituye el parque automotor, seguido de las fuentes puntuales, fuentes de área y fuente natural; todas las emisiones generadas por las diversas fuentes contribuyen al deterioro de la calidad del aire en las ciudades (MINAM, 2017).

**Tabla 2.3. Principales fuentes de contaminación en las ciudades**

<b>N°</b>	<b>Zona de atención prioritaria</b>	<b>Principales fuentes de contaminación</b>
1	Arequipa	Ladrilleras ,cementeras, parque automotor (vehículos)
2	Cerros de Pasco	Extracción de minerales
3	Chiclayo	Parque automotor (vehículos),industrias (ladrilleras, azucarera, fundiciones) y fuente de área (panaderías , imprenta y carpinterías
4	Chimbote	Industria pesquera
5	Cusco	Parque automotor (vehículos) , ladrillera
6	Huancayo	Parque automotor (vehículos)
7	Ilo	Fundición de cobre
8	Iquitos	Generación eléctrica ,refinación de petróleo, parque automotor (motocicletas)
9	La Oroya	Fundición de concentrados de minerales (plomo,cobre.zinc), fuente natural y fuente de área (comercios y servicios)
10	Lima- Callao	Parque automotor (vehículos), industrias
11	Pisco	Industria pesquera
12	Piura	Parque automotor (vehículos)
13	Trujillo	Parque automotor (vehículos), industrias, briquetas de carbón ,quema de caña de azúcar ,ladrillera
14	Cajamarca	Parque automotor (vehículos),fuente de área, fuente natural
15	Pucallpa	Aserraderos ,carboneras
16	Tacna	Parque automotor (vehículos) ,ladrilleras
17	Abancay	Fuente natural, fuentes móviles ,fuentes de área (servicios y comercio)
18	Ayacucho	Fuente natural, fuentes móviles ,fuentes de área (servicios y comercio)
19	Bagua Grande	Aserradoras y cepilladoras ,fuente de área (pollerías , panaderías)
20	Chachapoyas	Aserradoras y cepilladoras ,fuente de área (pollerías , panaderías)
21	Huancavelica	Fuente natural, fuentes móviles ,fuentes de área (servicios y comercio)
22	Huánuco	Parque automotor (vehículos), canteras.
23	Huaraz	Parque automotor (vehículos) ,ladrilleras
24	Ica	Parque automotor ,fuente natural )
25	Juliaca	Fuentes naturales , fuentes móviles ,fuentes de área
26	Moyobamba	Fuente natural, fuentes móviles, fuentes de área (servicio y comercio)
27	Moquegua	Parque automotor ,fuente natural, fuente de área (panaderías , pollerías)
28	Puerto Maldonado	Fuentes naturales, fuentes móviles, aserraderos y fuente de área
29	Puno	Fuentes naturales, fuentes móviles y fuentes de área
30	Tarapoto	Fuente natural, fuentes móviles, fuentes de área (servicio y comercio)
31	Tumbes	Cultivo de arroz, fuentes de área (panaderías ,pollerías)

**Fuente:** MINAM, 2017

#### 2.4.14 Impactos de la contaminación del aire

La contaminación del aire en el cuerpo ocasiona varios problemas en la salud, es así que se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 2.4. Efectos de aire contaminado en la salud.*

<b>SISTEMA AFECTADO</b>	<b>EFEECTO</b>
<b>Sistema nervioso central</b>	Hiperreflexia
<b>Sistema nervioso autónomo</b>	Dilatación pupilar
<b>Aparato cardiovascular</b>	Alteraciones de la frecuencia cardiaca e hipertensión arterial (aguda)
<b>Aparato digestivo</b>	Alteraciones de la secreción gastrointestinal
<b>Sistema endocrino</b>	Aumentos de cortisol y efectos hormonales
<b>Aparato respiratorio</b>	Alteraciones del ritmo
<b>Aparato reproductor –gestación</b>	Alteraciones, menstruales, bajo peso al nacer, prematuridad, riesgos auditivos en el feto
<b>Órgano de la visión</b>	Estrabismo del campo visual y problemas de acomodación
<b>Aparato vestibular</b>	Vértigo y nistagmus
<b>Aparato auditivo</b>	Disfonías disfuncionales

**Fuente:** MINAM, 2014

#### 2.4.15 Sustancia contaminante y su efecto en la salud

Son varias las fuentes de emisión de contaminantes ya sea por el parque automotor, industrias, restaurantes; así también son emitidos domésticamente al encender una cocina de combustión o al quemar basura, es aquí donde se emiten diferentes tipos de gases todos tóxicos para la salud. A continuación, se muestra los diferentes gases contaminantes, dónde se originan y sus efectos en la salud.

*Tabla 2.5. Gases contaminantes: origen y efectos en la salud.*

<b>CONTAMINANTE</b>	<b>SE PRODUCE POR:</b>	<b>EFFECTOS EN LA SALUD:</b>
<b>Monóxido de carbono(CO)</b>	Quema incompleta de combustibles fósiles	Afecta el transporte de oxígeno en la sangre
<b>Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	Quema de combustible con azufre y fundición de minerales	Irritación de mucosas del aparato respiratorio y reducción de la función pulmonar
<b>Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)</b>	Quema de combustibles fósiles a altas temperaturas	Irritación de mucosas del aparato respiratorio, reducción de la función pulmonar y facilita infecciones respiratorias
<b>Ozono (O<sub>3</sub>)</b>	Reacción del NO <sub>2</sub> con contaminantes orgánicos volátiles (COV) en presencia de luz solar	Irritación de las mucosas del aparato respiratorio y reducción de la función pulmonar
<b>Partículas (PM): TSP , PM10, PM 2.5</b>	Polvos, cenizas, humo de tabaco en el ambiente ,condensación de vapores y derivados de las emisiones de hidrocarburos ,SO <sub>2</sub> y NO <sub>2</sub>	Agravamiento de enfermedades a los pulmones y cardiacas crónicas graves
<b>Plomo (Pb)</b>	Combustibles con plomo, fundición de minerales y reciclaje de baterías	Daño del sistema nervioso central, disminución de coeficiente intelectual.
<b>Sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S)</b>	Procesos anaeróbicos ,materia orgánica muerta ,procesamiento de pescado para harina	Irritación de las mucosas del aparato respiratorio y reducción de la función pulmonar
<b>Compuestos orgánicos volátiles (COV)</b>	Quema incompleta y evaporación de combustibles fósiles, solventes, humo de tabaco en el ambiente.	Depende del compuesto, siendo algunos cancerígenos

**Fuente:** MINAM, 2014



#### 2.4.16 Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono, fórmula CO, es gas incoloro, inodoro y muy tóxico, se genera por la combustión incompleta de los combustibles como el diésel, petróleo, gasolina, madera, etc. muy perjudicial para el desarrollo de la vida.

Se muestra en la tabla el efecto que ocurre en la salud dependiendo del grado de concentración del monóxido de carbono en el ambiente.

*Tabla 2.6. Concentración de monóxido de carbono y su efecto en la salud*

<b>CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO</b>	<b>EFECTO</b>
<b>0-229 mg/m<sup>3</sup> (0-200 ppm)</b>	Ligero dolor de cabeza de algunos casos
<b>229-458 mg/m<sup>3</sup> (200-400 ppm)</b>	Después de 5 – 6 horas se puede observar un leve dolor de cabeza, incoordinación muscular, debilidad, vómitos y colapso.
<b>458-802 mg/m<sup>3</sup> (400-700 ppm)</b>	Des de 4 - 5 horas se puede observar un fuerte dolor de cabeza, incoordinación muscular, debilidad, vómitos y colapso.
<b>802-1260 mg /m<sup>3</sup> (700-1100 ppm)</b>	Después de 3-5 horas se puede observar un fuerte dolor de cabeza ,debilidad, vómitos y colapso
<b>1260-1832 mg/m<sup>3</sup> (1100-1600 ppm)</b>	Después de 1.5-3 horas se puede observar coma (la respiración es aún bastante buena a no ser que el envenenamiento se haya prolongado)
<b>1832-2290 mg/m<sup>3</sup> (1600-2000 ppm)</b>	Después de 1 -1.5 horas hay probabilidades de muerte
<b>5726-11452 mg/m<sup>3</sup> (5000-1000 ppm)</b>	Después de 2 – 15 minutos se puede producir la muerte

**Fuente:** ATSDR, 2012

#### **2.4.17 Calidad de aire en Arequipa**

La contaminación del aire en la ciudad de Arequipa supera hasta el 50% los valores máximos permitidos de monóxido de carbono.

Sucede que de los 150 microgramos por metro cúbico de monóxido de carbono permitido, se registran 175 en el centro de la ciudad, indicó el Director General de Salud Ambiental, Percy Madariaga.

Explicó que la contaminación ocurre por la gran cantidad de vehículos que existen en la ciudad sureña, sobre todo en el Centro Histórico, en donde diariamente se observa gran congestión (Con información de RPP Noticias).

#### **2.4.18 Gestión de calidad de aire**

El Ministerio de Medio Ambiente (MINAM), autoridad ambiental nacional, encargada de promover la calidad ambiental y la prevención de la contaminación ambiental en el país estableció, luego de un trabajo concertado, aprobar en junio 2017 el “Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad del Aire” (Decreto Supremo 003-2017-MINAM), definiendo los contaminantes criterio, la meta a lograr en cada contaminante con el fin de cuidar la salud, un plan de trabajo nacional y las 13 zonas de atención prioritarias del país: Arequipa, Chiclayo, Chimbote, Cusco, Huancayo, Ilo, Iquitos, La Oroya, Lima-Callao, Pisco, Piura, Trujillo y Cerro de Pasco. Estas ciudades fueron elegidas por su gran cantidad de población y/o por sus actividades socioeconómicas e industriales contaminantes; en cada una ellas se han instalado grupos de trabajo denominados Gestas Zonales del Aire.

**Tabla 2.7. Estándares de Calidad de aire en Perú**

Parámetros	Período	Valor [µg/m <sup>3</sup> ]	Criterios de evaluación	Método de análisis <sup>[1]</sup>
Benceno (C6 H6)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO2)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO2)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM 2.5)	Anual	100	Media aritmética anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	
Material Particulado con diámetro menor a 10 micras (PM10)	Anual	25	Media aritmética anual	Separación inercial/filtración (Gravimetría)
	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	
Mercurio Gaseoso Total (Hg) <sup>[2]</sup>	Anual	50	Media aritmética anual	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)
	24 horas	2	No exceder	
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O3)	8 horas	100	Máxima media diaria	Fotometría de absorción ultravioleta (Método automático)
			NE más de 24 veces al año	
Plomo (Pb) en PM10	Mensual	1,5	NE más de 4 veces al año	Método para PM <sub>10</sub> (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0,5	Media aritmética de los valores mensuales	
Sulfuro de Hidrógeno (H2S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

**Fuente:** MINAM, 2017

## **CAPÍTULO III**

### **PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Metodología**

##### **3.1.1 Método**

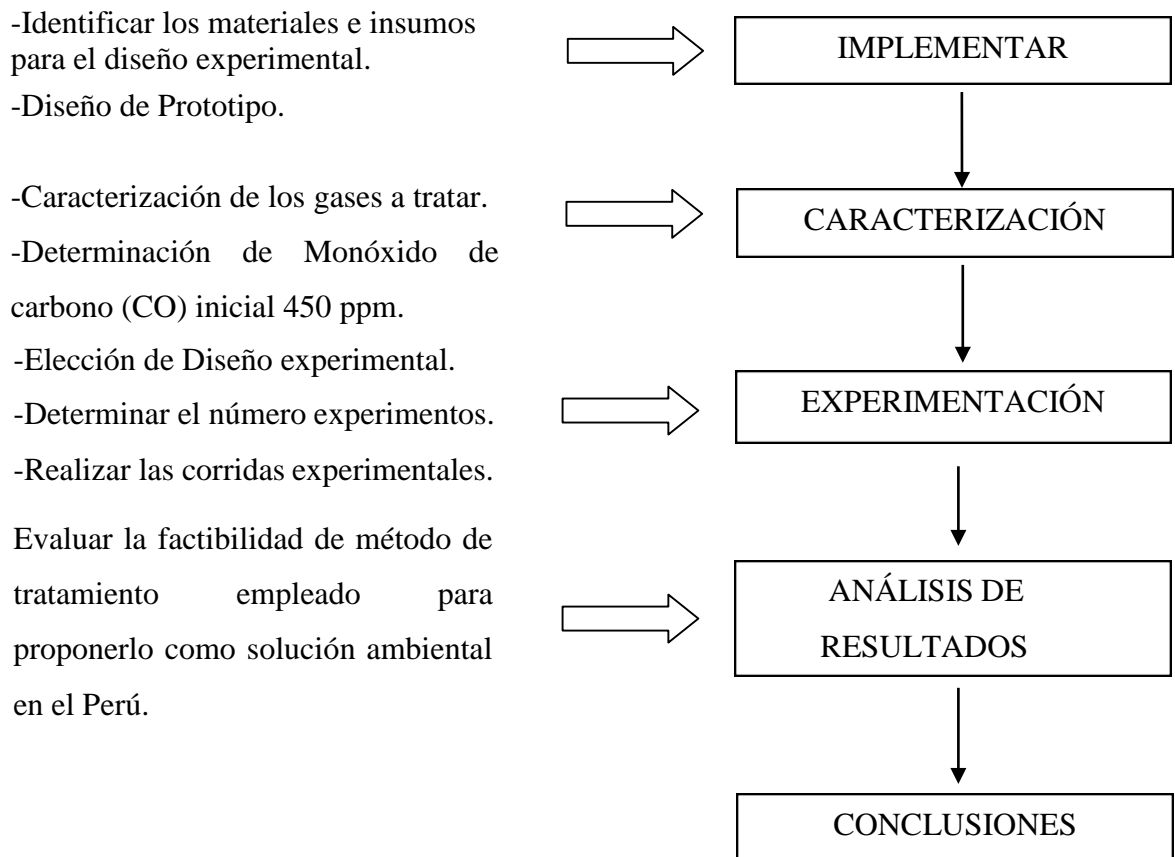
Es una investigación cuantitativa en la cual se analizaron los datos obtenidos, los cuales fueron usados como base de datos primarios para el desarrollo de la investigación

##### **3.1.1.1 Ubicación geográfica**

Las pruebas para el proyecto de tratamiento de gases por fotocatalisis se desarrollarán en un equipo en la ciudad de Arequipa.

### 3.1.1.2 Procedimiento para la toma de muestras

Figura 3.1. Diagrama de Bloques de la estrategia operacional de la Investigación



Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.2 Materiales utilizados

- Espátula
- Bandeja de PVC
- Vasos de precipitado de 50, 100, 250 ml, 500ml

### 3.1.3 Reactivos utilizados

- Óxido de zinc en polvo
- Agua
- Papel filtro
- Cemento
- Arena

### **3.1.4 Equipos utilizados**

- Cabina hermética de vidrio
- Balanza analítica.
- Sensor de UV
- Sensor de monóxido de carbono
- Ahumador.

### **3.1.5 Preparación**

#### **3.1.5.1 Tipo de investigación**

Por su finalidad, se trata de una investigación aplicada.

Por la fuente de datos, es una investigación documental y de campo.

### **3.1.6 Nivel de investigación**

El nivel del estudio es descriptivo, explicativo y predictivo a través de diversos datos obtenidos y su sustentación

## **3.2 Diseño de la investigación**

La investigación es analítico - experimental, asociando las variables de estudio mediante la revisión documentaria, para lograr la oxidación del monóxido de carbono.

## **3.3 Hipótesis de la investigación**

### **3.3.1 Hipótesis de la investigación**

El proceso de oxidación avanzada mediante la radiación UV y utilizando el óxido de zinc como fotocatalizador tendrá efecto en la conversión de monóxido de carbono a dióxido de carbono

### **3.3.2 Hipótesis específicas**

- a) Determinando los parámetros, podremos probar la efectividad de la oxidación de monóxido de carbono a dióxido de carbono por el método de oxidación avanzada.
- b) Mediante un diseño experimental, lograremos encontrar la influencia de las variables masa de óxido de zinc y tiempo de exposición a la radiación UV para la oxidación del monóxido de carbono.
- c) La oxidación de monóxido de carbono se puede expresar matemáticamente considerando las variables masa de óxido de zinc y tiempo a la radiación UV.
- d) Al establecer una mezcla adecuada incluyendo el óxido de zinc y al disponerlos en una superficie lograremos que tenga contacto con los gases de monóxido de carbono para su posterior oxidación.

- e) La cantidad de óxido de zinc dispuesta sobre la superficie y el tiempo de exposición a la radiación UV influyen en la oxidación del monóxido de carbono.

### 3.4 Variables

#### 3.4.1. Variable independiente

- Proceso de fotocatalisis por el uso de óxido de zinc y RUV.

#### 3.4.2. Variable dependiente

Oxidación del monóxido de carbono

#### 3.4.3. Operacionalizacion de variables

*Tabla 3.1. Operacionalización de variables*

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA
INDEPENDIENTE	Oxidación del monóxido de carbono	Reacción de oxidación	- Concentración del monóxido de carbono antes del tratamiento.	- Ppm de CO.
		VARIABLES DE ESTADO	- Temperatura ambiental. - Presión atmosférica - Radiación UV solar	- Grados Centígrados (°C) - Atmosferas (atm) - longitud de onda ( $\lambda$ )
DEPENDIENTE	Proceso de fotocatalisis por el uso de óxido de zinc y RUV	VARIABLES DE MANIPULACIÓN	- Mezcla de tarrajeo - Tiempo de exposición. - Masa de ZnO utilizado	- Ppm de CO. - Porcentaje de proporciones de materiales. (%) - Horas (h) - Gramos (g)
		VARIABLES DE RESULTADO	- costos de equipamiento - concentración de gas monóxido en la cámara.	- Soles - Ppm de CO.

### 3.5. Cobertura del Estudio

#### 3.5.1. Universo

Volumen de gases de combustión incompleta que existen en el ahumador.

#### 3.5.2. Población

Los gases de combustión incompleta que se encuentran dentro del ambiente hermético (Prototipo).

#### 3.5.3. Muestra

Se encuentra encapsulada en un ambiente hermético, automáticamente con los sensores de CO se registrarán los datos

#### 3.5.4. Muestreo

##### 3.5.4.1. Muestreo probabilístico

Se encapsula los gases de combustión dentro de la cabina tal como se muestra en el punto 3.9.4. Se desarrolla la experiencia para comprobar el ambiente hermético, sin exposición solar a la cabina y para comprobar que no exista fugas de la cámara. El gas a detectar permanece en las mismas concentraciones iniciales; se usa el detector de gas de monóxido de carbono (CO), luego se compara de un lapso de tiempo (8 horas), y se verificar que aún permanece la concentración de CO.

Se elabora la siguiente tabla de muestreo de gases:

Tabla 3.2. Muestreo de Gases

Muestra	Tiempo	Prueba 1 Concentración de monóxido de carbono ppm	Prueba 1 Concentración de monóxido de carbono (ug/m <sup>3</sup> )	Prueba 2 Concentración de monóxido de carbono ppm	Prueba 2 Concentración de monóxido de carbono (ug/m <sup>3</sup> )	Prueba 3 Concentración de monóxido de carbono ppm	Prueba 3 Concentración de monóxido de carbono (ug/m <sup>3</sup> )
1	0	525	600000	480	548571.4286	420	480000
2	1	525	600000	480	548571.4286	421	481142.8571
3	2	524	598857.1429	480	548571.4286	421	481142.8571
4	3	525	600000	480	548571.4286	421	481142.8571
5	4	526	601142.8571	481	549714.2857	422	482285.7143
6	5	524	598857.1429	481	549714.2857	421	481142.8571
7	6	530	605714.2857	481	549714.2857	421	481142.8571
8	7	525	600000	480	548571.4286	421	481142.8571
9	8	525	600000	481	549714.2857	422	482285.7143

**Fuente:** Elaboración propia



### **3.6. Técnicas e instrumentos**

#### **3.6.1. Técnicas de la investigación**

Dentro de la técnica se encuentra la experimentación y se desarrolla aplicando el diseño de experimentos.

#### **3.6.2. Instrumentos de la investigación**

Bernardo y Calderero (2000) consideran que los instrumentos son recursos del que puede valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información.

Los instrumentos utilizados:

- Material experimental (Consta de los equipos requeridos para desarrollar la experimentación)
- Tablas para la recolección de datos experimentales (Tablas que se utilizan para anotar los valores que se vayan recogiendo de la experimentación desarrollada).
- Fotografía, grabaciones de audio y video (Material que se utiliza para poder evidenciar los procedimientos utilizados y analizarlos con respecto a los resultados).
- Software estadístico (Excel, Statgraphit). Instrumentos que nos permitirán almacenar y procesar los datos de acuerdo a la técnica de procesamiento estadístico necesaria.

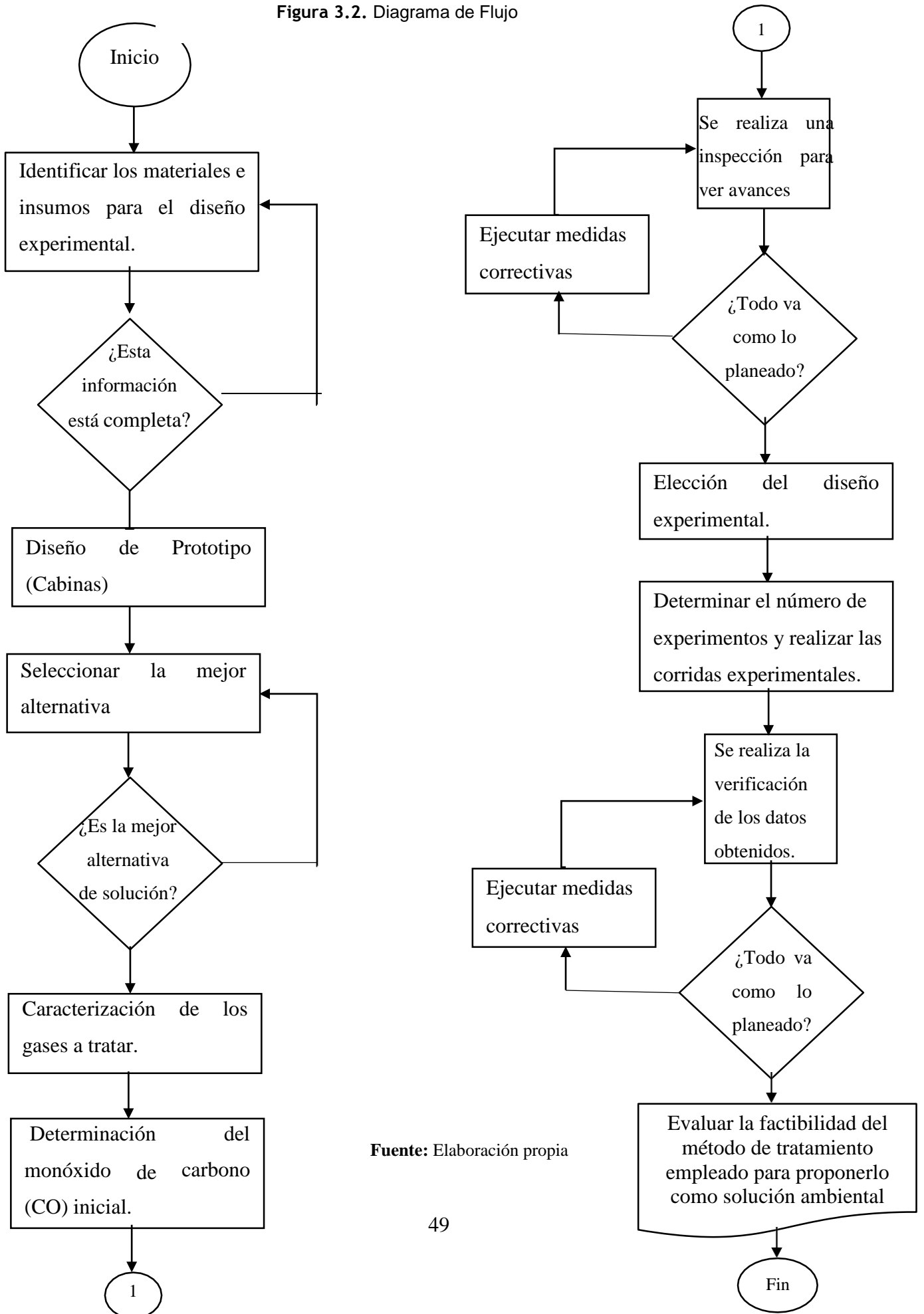
#### **3.6.3. Fuentes**

La fuente de colecta de datos es primaria, datos que son descargados o facilitados por las páginas institucionales del Minam, Digesa, Minsa, Senamhi, OMS, etc.

Las fuentes secundarias utilizadas fueron la “Guía Práctica de la Fotocatálisis Aplicada a Infraestructuras Urbanas” de la Asociación Ibérica de la Fotocatálisis (AIF), artículos, revistas y ensayos.

### 3.7. Diagrama de Flujo del Proceso

Figura 3.2. Diagrama de Flujo



Fuente: Elaboración propia

### 3.8 Desarrollo de la experiencia

Se establece todos los puntos que comprende el desarrollo de la investigación, los cuales se observan en la tabla 3.2.

#### 3.8.1 Actividades

Se detallan las actividades para el desarrollo de la investigación.

**Tabla 3.3.** Actividades para el desarrollo de la experiencia

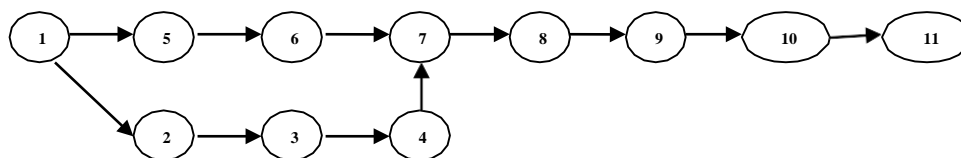
<b>CÓDIGO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>DURACIÓN Semanas</b>
1	Revisión bibliográfica	02
2	Revisión de la instalación	01
3	Implementación de materiales, reactivos y equipos a utilizar.	01
4	Estudio del gas a tratar	01
5	Diseño y cálculos de ingeniería de tratamiento.	02
6	Revisión de la estrategia experimental	01
7	Ejecución de la Experimentación	04
8	Observaciones	01
9	Análisis de resultados	02
10	Cálculos de comparación en costos económicos	01
11	Redacción de tesis	02

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.2 Desarrollo de la experiencia

A continuación, se desarrolla la interconexión de las actividades y el camino para lograr la conformación del presente proyecto de investigación.

**Figura 3.3.** Flujograma de actividades



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.8.3 Cronograma de actividades

El desarrollo de la investigación tardó un total de 18 semanas tal como se muestra en la tabla 3.3.

**Tabla 3.4.** Cronograma de actividades para el desarrollo de la investigación

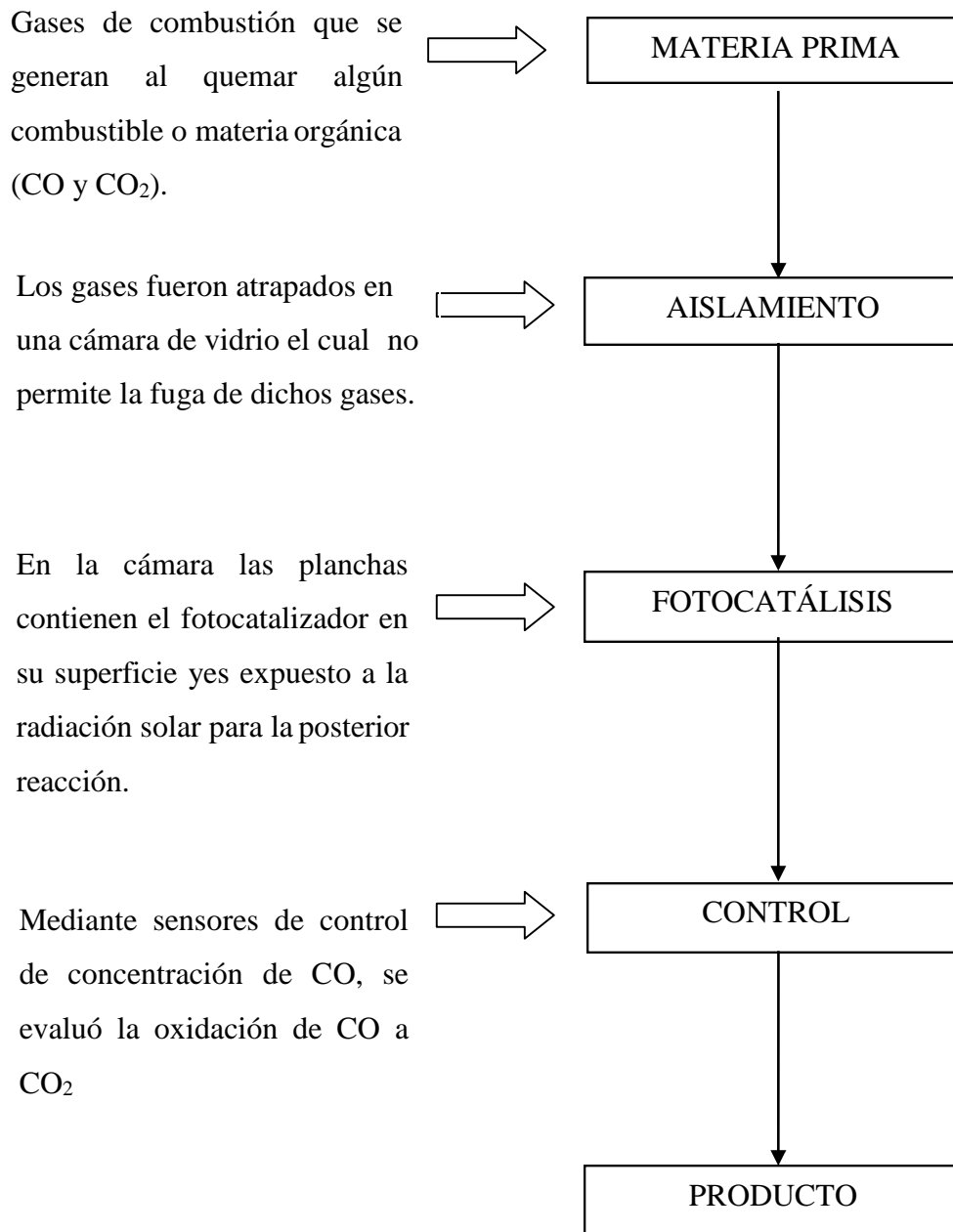
Código	Mayo				Junio				Julio				Agosto				Setiembre	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	■	■																
2	■																	
3		■	■															
4				■														
5				■	■													
6					■													
7						■	■	■	■	■	■	■	■					
8														■				
9														■	■			
10															■	■		
11																■	■	■

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.9 Método del proceso fotocatalítico

Para lograr desarrollar la experiencia, se establece el proceso para el tratamiento experimental el cual se muestra en la figura 3.4, que menciona el diagrama de bloques para el proceso de fotocatalisis.

Figura 3.4. Diagrama del proceso de fotocatalisis de monóxido de carbono



Fuente: Elaboración propia

### 3.9.1 Preparación de las superficies de óxido de zinc

Tomando de referencia el manual de construcción para maestros de obra de la empresa “Aceros Arequipa” indica que la proporción adecuada para una mezcla de tarrajeo es de 1 parte de cemento por 5 partes de arena fina, y verteremos agua hasta alcanzar una pasta (AcerosArequipa, 2016).

Para nuestra mezcla con el fotocatalizador (Óxido de zinc), reemplazaremos una porción de arena fina con este, y lo haremos en diferentes proporciones para evaluar la cantidad efectiva del fotocatalizador para el tratamiento de gases.

Con respecto a la superficie se considera una base fija con las dimensiones de 50 cm de largo por 20 cm de ancho, haciendo un total de  $1000 \text{ cm}^2$  o  $0.1 \text{ m}^2$ , que es la décima parte de un metro cuadrado; se aplicó una fina capa de la mezcla de aproximadamente 3mm de espesor. A continuación, se muestra la tabla que corresponde a la mezcla para la aplicación del fotocatalizador.

*Tabla 3.5. Proporción de materiales para la experimentación.*

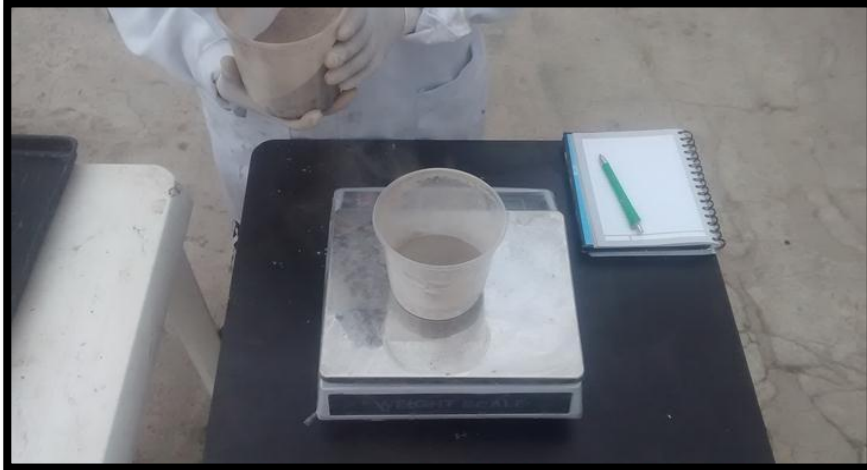
<b>Mezcla</b>	<b>Cemento (gr)</b>	<b>Arena (gr)</b>	<b>Óxido de zinc (gr)</b>	<b>Total de porción (gr)</b>
1	200	800	200	1200
2	200	856.6	143.4	1200
3	200	840	160	1200
4	200	760	240	1200
5	200	743.5	256.5	1200

**Fuente:** Elaboración propia

La cantidad de Óxido de zinc utilizado partió del cambio de color que le brindaba a la mezcla final, por lo que se usó un total de 200g lo que corresponde a una parte y esta es complementada por 4 partes de arena más una parte de cemento y que le daba un color blanco resultante a la mezcla, y según el diseño de experimentos mencionado en el Punto 3.9 estudiamos la influencia del fotocatalizador en diferentes proporciones.

**Actividad 01:** Se utilizó la balanza analítica para el pesado de los materiales (cemento, arena y óxido de zinc) para las diferentes mezclas de proporciones de la experimentación.

**Figura 3.5.** Pesado de materiales



**Fuente:** Elaboración propia

**Actividad 02:** Dentro de la bandeja de PVC, se preparó los materiales (cemento, arena y óxido de zinc) en diferentes proporciones para la experimentación.

**Figura 3.6.** Preparación de mezcla de materiales



**Fuente:** Elaboración propia

**Actividad 03:** Se procedió a mezclar los materiales (cemento, arena y óxido de zinc) en diferentes proporciones para la experimentación.

**Figura 3.7.** Mezcla de los materiales

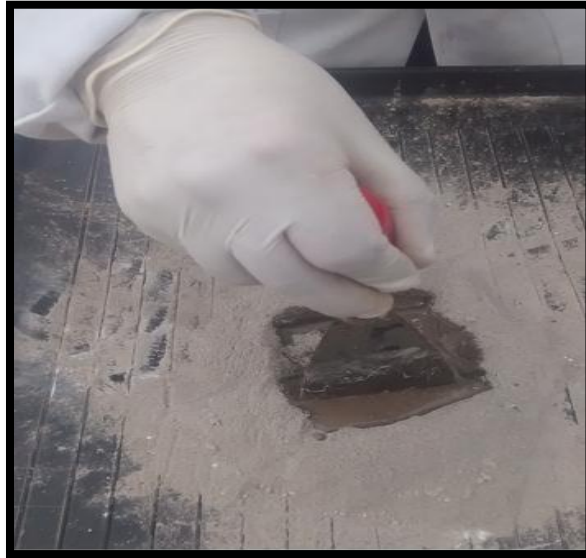


**Fuente:** Elaboración propia



**Actividad 04:** Con el apoyo de una espátula y 500 ml de agua, se mezcló los materiales (cemento, arena y óxido de zinc) para las diferentes proporciones de la experimentación.

**Figura 3.8.** Mezclando con agua



**Fuente:** Elaboración propia

**Actividad 05:** Posteriormente, con el apoyo de la espátula, se empastó las baldosas con las diferentes proporciones para la experimentación.

**Figura 3.9.** Recubriendo con la mezcla las superficies para la experimentación



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.9.2 Acondicionamiento de la cabina

Se preparó el ambiente adecuado para que se pueda experimentar, para lo cual se diseñaron cabinas de vidrio herméticas las cuales serán cargadas de gases producto de combustión de material orgánico.

Dichas cabinas tienen las siguientes dimensiones:

- Largo: 50 cm
- Alto: 50cm
- Ancho: 51cm

### 3.9.3 Preparación de superficie fotocatalítica

Según el diseño de experimentos que se propone en el punto 3.10 para la cantidad de óxido de zinc (foto-catalizador), se preparó conjuntamente con cemento (como conglomerante) y arena (evitar que se raje la superficie) superficies que son la mitad en área de la cabina hermética.

Figura 3.10. Superficie foto-catalítica de ZnO



**Fuente:** Elaboración propia

**Actividad 07:** Posteriormente se ingresaron las baldosas preparadas dentro de las cabinas de oxidación para su tratamiento y medición.

**Figura 3.11.** Armado de cabinas para la experimentación



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.12.** Cabinas listas para tratamiento de gases



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.9.4 Aislamiento de gases

Construidas las cabinas, se empieza la experimentación aislando gases de combustión, para lo que se introduce gracias a un ahumador a las cabinas; de esta manera, encerramos los gases que serán cuantificados por los sensores de monóxido de carbono.

**Figura 3.13.** Preparando el ahumador



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.14.** Introduciendo gases de combustión a las cabinas



**Fuente:** Elaboración propia

Figura 3.15. Cabina llenándose de gas de combustión



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16. Cabina llena de gas de combustión



Fuente: Elaboración propia

### 3.9.5 Fotocatálisis

Atrapados los gases, inicia la acción del fotocatalizador exponiéndolo a la radiación solar; el lapso de exposición se considera desde las 9:00 de la mañana hasta las 4:00 de la tarde que es el horario de mayor incidencia solar.

Las cabinas son expuestas en un área donde no podrá caerles sombra durante las horas mencionadas.

### 3.9.6 Control en la cabina

Durante el lapso de tiempo del diseño experimental, se fije midiendo la cantidad de monóxido de carbono.

**Figura 3.17.** Control de gases al inicio-durante-fin de la experimentación



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.9.7 Control mediante software

Los resultados fueron estudiados y analizados. Para el diseño experimental, se utilizó el software STATGRAPHICS.

### 3.10 Diseño experimental

Un experimento es la preparación y ejecución de conjuntos de prueba, que se hacen con el objetivo de verificar la validez de una hipótesis sobre las causas o factores de un fenómeno que se estudia. La experimentación juega un papel fundamental en casi todos los campos de la investigación y el desarrollo, su objetivo es obtener información de calidad que permita desarrollar nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema (como un proceso industrial) y tomar decisiones sobre cómo optimizarlo, etc. Por lo que, en esta investigación, se hace uso de un diseño factorial para evaluar estadísticamente cómo afectan los factores y los niveles escogidos para la investigación. El diseño aplicable para la experiencia será “DISEÑO COMPUESTO CENTRAL” de  $2^k$  experimentos + estrellas, donde  $k$  = factores (masa de óxido de Zinc y tiempo de exposición a la luz), cada uno con dos niveles, por lo que la matriz del experimento sería:

*Tabla 3.6. Combinaciones para un diseño  $2^2$*

		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1		-	-
2		+	-
3		-	+
4		+	+

**Fuente:** Elaboración propia

Resumiendo, en la tabla anterior se muestra los factores y niveles a experimentar, considerando un margen de 20% hacia arriba y hacia abajo para fijar los niveles máximos y mínimos para encontrar la mejor combinación y la influencia de las variables.

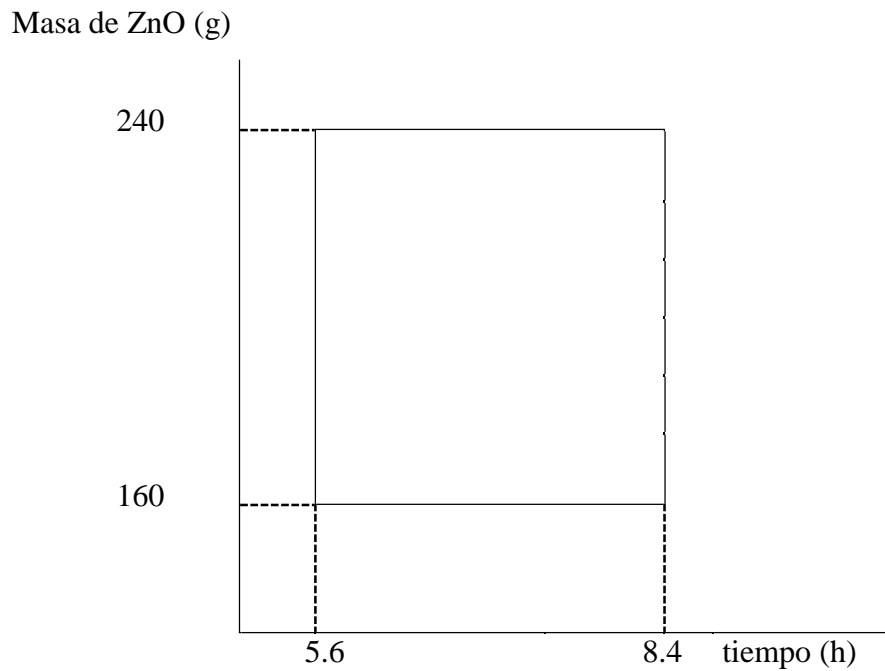
**Tabla 3.7.** Factores y niveles del diseño experimental

Factor	Nivel(-)	Valores centrales referenciales	Nivel(+)
Masa de ZnO (g)	160	200	240
Tiempo de exposición	5.6	7	8.4

**Fuente:** Elaboración propia

✓ **Graficando estos niveles se tienen:**

**Figura 3.18.** Representación gráfica de los niveles para la experimentación sin considerar puntos centrales ni puntos estrella

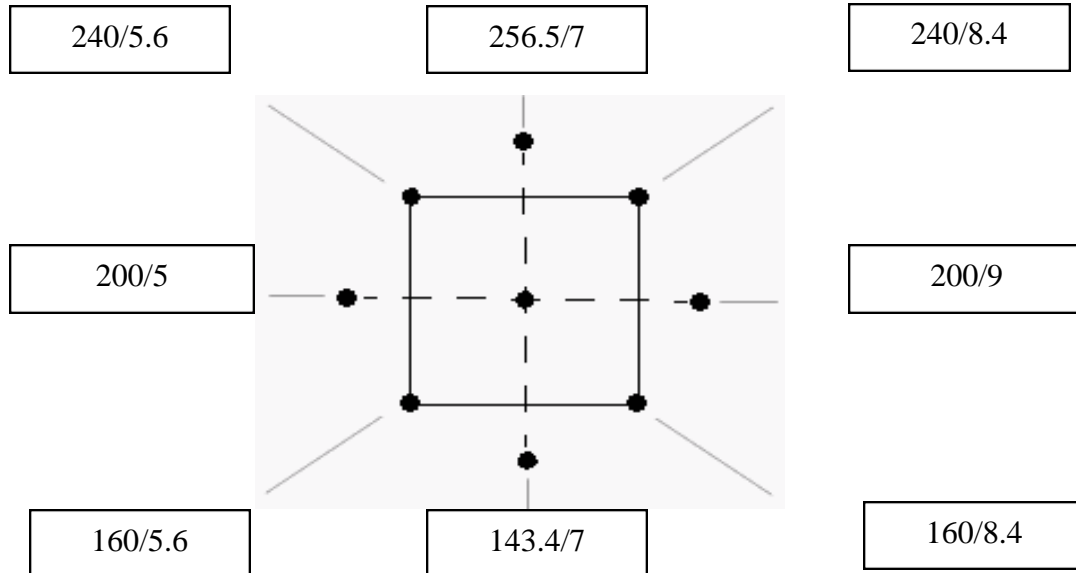


**Fuente:** Elaboración propia



A continuación, se muestra el diseño experimental completo con puntos estrella.

**Figura 3.19.** Representación gráfica del diseño de experimentos considerando puntos centrales y puntos estrella



**Fuente:** Elaboración propia

El diseño factorial tuvo  $N=2^2 + 6 = 10$  experimentos y se consideró una repetición adicional para corroborar los resultados, por lo que el número de experiencias fueron 20; luego la matriz de diseño es:

**Tabla 3.8. Matriz de valores codificados y reales de variables**

Prueba a N°	Valores codificados		Valores reales		Resultados
	(X1)	(X2)	Z1 M(Masa)	Z2(tiempo)	
1	-1	-1	160	5.6	
2	+1	-1	240	5.6	
3	-1	+1	160	8.4	
4	+1	+1	240	8.4	
5	-α	0	143.4	7	
6	+α	0	256.5	7	
7	0	-α	200	5	
8	0	+α	200	9	
9	0	0	200	7	
10	0	0	200	7	
11	-1	-1	160	5.6	
12	+1	-1	160	5.6	
13	-1	+1	240	8.4	
14	+1	+1	240	8.4	
15	-α	0	143.4	7	
16	+α	0	256.5	7	
17	0	-α	200	5	
18	0	+α	200	9	
19	0	0	200	7	
20	0	0	200	7	

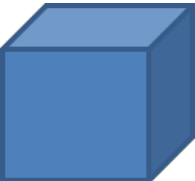
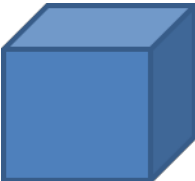
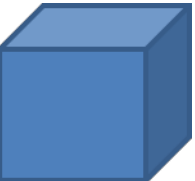
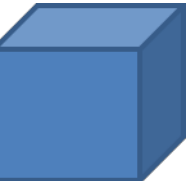
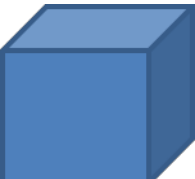
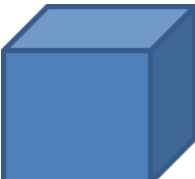
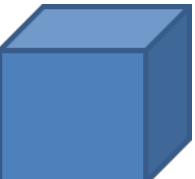
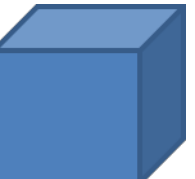
**Fuente:** Elaboración propia

### 3.11 Planeamiento de las pruebas

Para evaluar la capacidad de oxidación del fotocatalizador por el método de oxidación avanzada, se usó ZnO (óxido de zinc) como fotocatalizador. Se realizaron 10 combinaciones con los valores de masa de óxido de zinc y tiempo de fotocatalisis. Se utilizó para cada una de las pruebas gases de producto de la combustión de materia orgánica. Las variables en estudio fueron masa de óxido de zinc en gramos y el tiempo de fotocatalisis en horas. Para la masa óxido de zinc, se eligieron 2 niveles con punto central de 200g, nivel inferior 160g y nivel superior 240; además, dos estrellas: estrella menor de 143,4g y estrella mayor de 256.5g. Para el tiempo de fotocatalisis, se optó 2 niveles 5.6h y 8.4h con punto central 7h y también dos estrellas: estrella menor 5h y estrella mayor 9h. Como variable de

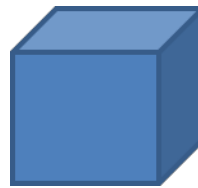
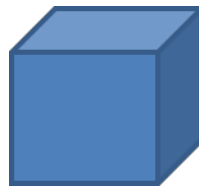
respuesta, se consideró ppm de CO (monóxido de carbono) en la cabina luego de la fotocatalísis.

**Figura 3.20.** Pruebas a realizar en las cabinas

<b>PRUEBA 1</b>	<b>PRUEBA 2</b>	<b>PRUEBA 3</b>	<b>PRUEBA 4</b>
$M_{ZnO} = 160g$ $t = 5.6$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 240g$ $t = 5.6$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 160g$ $t = 8.4$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 240g$ $t = 8.4$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98
			
<b>PRUEBA 5</b>	<b>PRUEBA 6</b>	<b>PRUEBA 7</b>	<b>PRUEBA 8</b>
$M_{ZnO} = 143.4g = 7$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 256.5g$ $t = 7$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 200g$ $t = 5$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 200g$ $t = 9$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98
			

**PRUEBA 9****PRUEBA 10**

$M_{ZnO} = 200g$ $t = 7$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98	$M_{ZnO} = 200g$ $t = 7$ horas $T =$ ambiente Presión = atmosférica 0.98
--	--



**Fuente:** Elaboración propia

El modelo estadístico aplicado corresponde a un Análisis de Varianza 2 variables y 2 niveles, con el cual se probaron los efectos y las interacciones entre los factores evaluados (Masa de ZnO y tiempo de fotocatalisis) con relación a la variable respuesta (ppm de CO totales en Prototipo).

*Tabla 3.9. Control de CO totales*

Valores reales		Resultados (ppm de CO)	
Masa ZnO gr	Tiempo(h)	Ensayo 1	Ensayo 2
160	5.6		
240	5.6		
160	8.4		
240	8.4		
143.4	7		
256.5	7		
200	5		
200	9		
200	7		
200	7		

**Fuente:** Elaboración propia

Se realizó el muestreo correspondiente para empezar a medir con el detector de monóxido de carbono

**Figura 3.31.** Control de monóxido de carbono



**Fuente:** Elaboración propia

## **CAPÍTULO IV**

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

#### **4.1 Generalidades**

En este capítulo, mencionaremos los resultados obtenidos y su correspondiente análisis para la comprobación de la hipótesis además de la realización de los objetivos planteados para el tratamiento del monóxido de carbono por el método de fotocatalisis.

#### **4.2 Materia prima**

La materia prima constituye el gas generado por la combustión de materia orgánica (madera) que fué colectado en las cabinas herméticas.

#### **4.3 Diseño de experimentos**

Los resultados obtenidos del experimento, se presentan a continuación. En estas, se evidencia la conversión del monóxido de carbono a dióxido de carbono; además, aplicamos el Análisis de Varianza ANOVA donde se muestran los efectos de cada factor de manera independiente y las interacciones entre ellos sobre la variable independiente (ppm de monóxido de carbóno). Finalmente, se incluyó la tabla correspondiente al diseño experimental donde se muestran los ppm de monóxido de carbono en cada condición establecida para el diseño.

### 4.3.1 Contenido de monóxido de carbono luego de la experiencia.

En la siguiente tabla, se expresa los resultados obtenidos aplicando el diseño del experimento.

**Tabla 4.1. Resultado de control de CO totales**

Valores reales		Resultados (ppm de CO)	Concentración del CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Resultados (ppm de CO)	Concentración del CO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Masa ZnO gr	Tiempo(h)	Ensayo 1	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 2
160	5.6	60	68,595.92	65	74,312.24
240	5.6	20	22,865.31	23	26,295.110
160	8.4	45	51,446.64	47	53,733.47
240	8.4	14	16,005.71	16	18,292.24
143.4	7	65	74,312.24	68	77,742.04
256.5	7	21	24,008.57	19	21,722.04
200	5	51	58,306.53	49	56,020.00
200	9	41	46,873.88	45	51,446.94
200	7	40	45,730.61	38	43,444.08
200	7	39	44,587.35	41	46,873.88

**Fuente:** Elaboración propia

Podemos observar que la interacción que tiene mejor resultado con respecto a la oxidación del monóxido de carbono es en el caso de mayor masa de óxido de zinc con un tiempo más prolongado, llevando la concentración de monóxido de carbono.

### 4.3.2 Análisis de varianza

A continuación, calcularemos la efectividad del análisis de Varianza ANOVA, de un diseño de experimentos, en este caso para nuestra matriz  $2^2 +$  estrella.

Se crea la tabla de interacciones según el diseño de experimentos y colocamos los resultados obtenidos de la cantidad de monóxido de carbono convertido por fotocatalisis.

El procedimiento desarrollado para la introducción de los datos en el Statgraphics se observa en el ANEXO 1.

### 4.3.3 Analizar experimento: monóxido de carbono

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de monóxido de carbono en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces, prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 2 efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 92.86% de la variabilidad en Monóxido de Carbono. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 89.5647%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5.48741. El error medio absoluto (MAE) de 3.7355 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Debido que el valor-P es menor que 5.0%, hay una indicación de posible correlación serial al nivel de significancia del 5.0%. Grafiqué los residuos versus el orden de fila para ver si hay algún patrón que pueda detectarse.

Esta tabla muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.225. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Para graficar los estimados en orden decreciente de importancia, seleccioné el Diagrama de Pareto de la lista de Opciones Gráficas. Para probar la significancia estadística de los efectos, seleccioné la Tabla ANOVA de la lista de Opciones Tabulares. Puede retirar efectos significativos pulsando el botón secundario del ratón, seleccionando Opciones de Análisis, y pulsando el botón de Excluir.



**Tabla 4.2. Análisis de Varianza para Monóxido de Carbono**

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>A:Masa ZnO</b>	4744.52	1	4744.52	157.56	0.0000
<b>B:tiempo</b>	270.594	1	270.594	8.99	0.0103
<b>AA</b>	0.72289	1	0.72289	0.02	0.8792
<b>AB</b>	50.0	1	50.0	1.66	0.2200
<b>BB</b>	16.5096	1	16.5096	0.55	0.4722
<b>Error total</b>	392.702	13	28.0501		
<b>Total (corr.)</b>	5482.55	19			

**Fuente:** Elaboración propia

R-cuadrada = 92.86 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89.5647 porciento

Error estándar del est. = 5.48741

Error absoluto medio = 3.7355

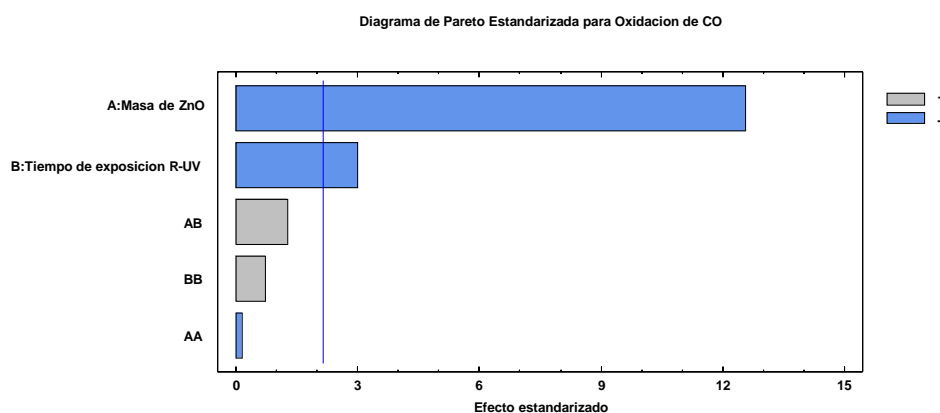
Estadístico Durbin-Watson = 2.49343 (P=0.7879)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.349843

Factor de inflación de varianza = 1.225.

En donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. La expresión de las variables en el diagrama de Pareto donde podemos observar que la masa de ZnO es una variable influyente en la degradación del monóxido de carbono, el tiempo también es influyente no a la misma capacidad que el ZnO pero si influye el transcurso del tiempo para la conversión del monóxido de carbono, y las interacciones de las variables no se consideran influyentes en la oxidación del monóxido de carbono. Ver figura 4.1.

**Figura 4.1. Diagrama de Pareto estandarizada para Monóxido de carbono**



**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.3.4 Coeficiente de regresión para monóxido de carbono

*Tabla 4.3. Tabla resumen de los coeficientes para el modelo matemático*

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
<b>constante</b>	235.227
<b>A:Masa ZnO</b>	-0.672705
<b>B:tiempo</b>	-21.4644
<b>AA</b>	-0.00017574
<b>AB</b>	0.0446429
<b>BB</b>	0.685601

**Fuente:** Elaboración propia

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Monóxido de Carbono} = 235.227 - 0.672705 * \text{Masa ZnO} - 21.4644 * \text{tiempo de exposición R-UV} - 0.00017574 * (\text{Masa ZnO})^2 + 0.0446429 * \text{Masa ZnO} * \text{tiempo de exposición R-UV} + 0.685601 * (\text{tiempo de exposición R-UV})^2$$

#### 4.3.5 Optimización de resultados

El objetivo es lograr oxidar el monóxido de carbono por lo que se determinó por la experimentación y por los datos proporcionados pueda optimizar un mejor resultado, con un tiempo y masa de óxido de zinc utilizado, tal como se muestra en la siguiente tabla:

*Tabla 4.4. Optimización de variables para alcanzar mejores resultados*

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
<b>Masa ZnO</b>	143.431	256.569	256.569
<b>tiempo</b>	5.0201	8.9799	7.30043

**Fuente:** Elaboración propia

Esta tabla muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza la Oxidación de Monóxido de Carbono sobre la región indicada. La resultante con las variables optimas, en tal sentido se estima que el valor en concentración de Monóxido de Carbono llegaría hasta un 14.5226 ppm.

#### 4.3.6 Predicción para la oxidación del monóxido de carbono

En la tabla 4.5, se puede observar el trayecto de máximo ascenso (o descenso). Este es el trayecto, desde el centro de la región experimental actual, a través del cual la respuesta estimada cambia más rápidamente con un cambio menor en los factores experimentales. Indica buenas características para ejecutar experimentos adicionales si el objetivo es incrementar o de incrementar Oxidación de CO. Actualmente, 12 puntos se han generado cambiando Masa de ZnO en incrementos de 5.5 gramos. Puede especificarse la cantidad de cambio en cualquiera de los factores, asimismo se determinará entonces cuanto tendrán que cambiar los otros factores para mantenerse en el trayecto del máximo ascenso. En tal sentido también se podrá calcular la Oxidación de CO estimada en cada uno de los puntos del trayecto, con los cuales pueden compararse los resultados si es que se corren esos ensayos.

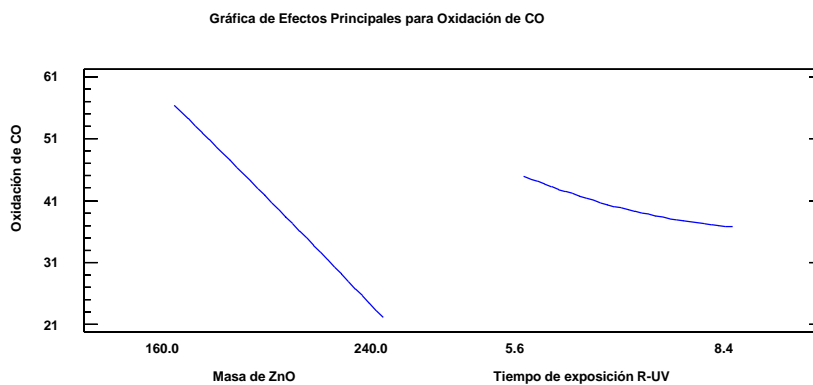
**Tabla 4.5.** Camino de Máximo Ascenso para Oxidación de CO

<i>Masa de ZnO</i> (gramos)	<i>Tiempo de exposición R-UV</i> (horas)	<i>Predicción para Oxidación de CO</i> (ppm)
200.0	7.0	39.4999
205.5	7.04358	37.0108
211.0	7.08242	34.5462
216.5	7.11662	32.1015
222.0	7.14625	29.6725
227.5	7.17142	27.2553
233.0	7.19223	24.8459
238.5	7.20878	22.4406
244.0	7.22117	20.0359
249.5	7.22951	17.6286
255.0	7.23392	15.2155
260.5	7.2345	12.7936

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 4.2, podemos observar la tendencia de los efectos de cada factor sobre la oxidación del monóxido de carbono.

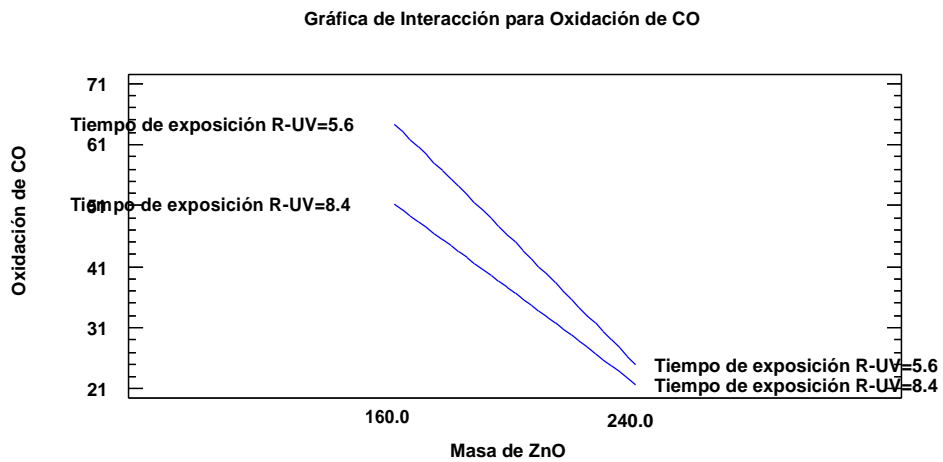
Figura 4.2. Gráfica de efectos principales para monóxido de carbono.



**Fuente:** Elaboración propia

**Interpretación:** Podemos que la tendencia de oxidación o la reducción del contenido del gas de monóxido de carbono, en cuanto a la cantidad de óxido de zinc que se emplee, esta descende con una pendiente negativa; mientras que en cuanto al tiempo de exposición a la radiación UV, este también presenta un descenso, pero la pendiente de la curva tiene el aspecto que ir creciendo, lo cual significa que llegara un punto en que si se expone por mayor tiempo los gases con la superficie foto catalítica, este no seguiría oxidando al CO.

Figura 4.3. Gráfica de efectos principales para monóxido de carbono



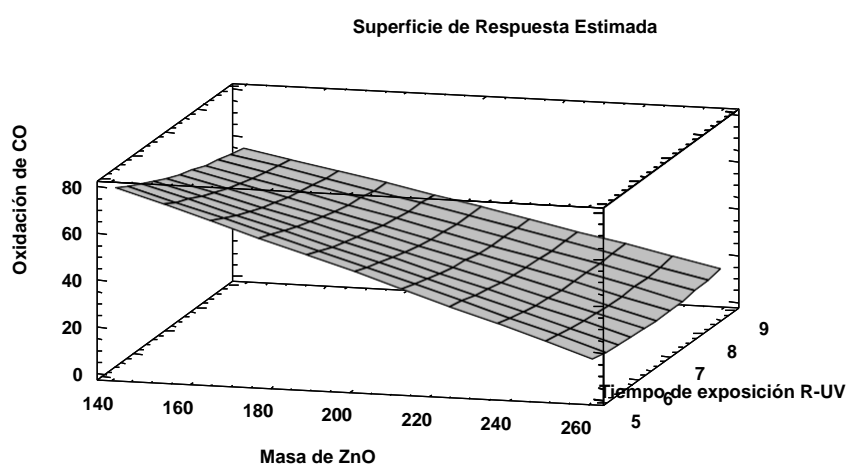
**Fuente:** Elaboración propia

**Interpretación:** En la figura 4.3, podemos observar si existe una interacción entre ambas variables de estudio, y el resultado anuncia que no existe una interpretación directa; aunque si se pudiese extender a gráfica, en algún punto tanto como la variable cantidad de óxido de zinc y el tiempo de exposición a la R-UV, ambas juntas serian influyentes en el proceso de reducción de la concentración de monóxido de carbono. La figura 4.3 corrobora lo encontrado en la figura 4.1, donde expresa en un diagrama de barras a las variables influyentes para el proceso de oxidación del CO.

### 4.3.7 Superficie – Respuesta

Se observa en la figura 4.4 los rangos de masa de ZnO y tiempo de exposición a la Radiación UV adecuada para obtener una determinada oxidación de monóxido de carbono.

Figura 4.3. Gráfica de Superficie: Respuesta para la oxidación de CO

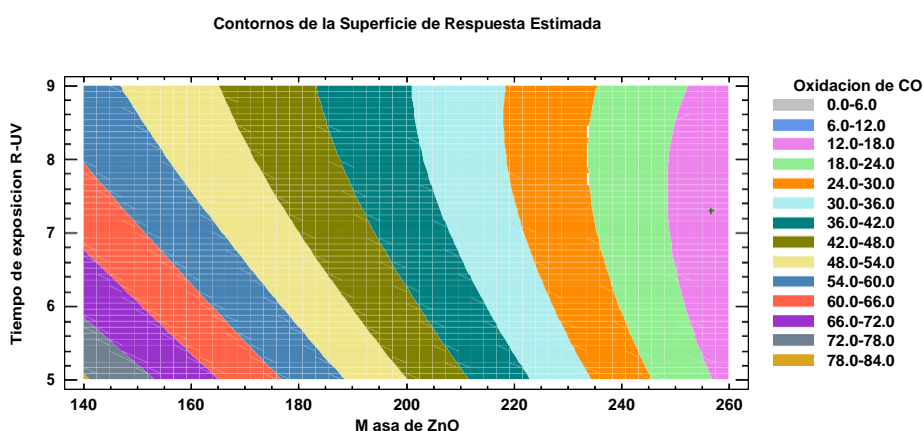


**Fuente:** Elaboración propia

**Interpretación:** La figura 4.4 muestra el diagrama de superficie, que es solo una proyección y predicción de puntos a partir de los introducidos con sus respectivas respuestas en cuanto a la cantidad de monóxido de carbono presente en la cabina. Se observa que, a mayor cantidad de óxido de zinc, mayor es la disminución de la cantidad de monóxido de carbono, lo que en cuanto al tiempo de exposición es ligero.

En la figura 4.5, se observa que a medida que se incrementa la masa de ZnO; aumenta la Oxidación de CO. De forma similar al incrementar el tiempo de exposición de radiación UV; la oxidación de CO también incrementa. Para una mejor observación, se proyecta el sólido sobre el plano inferior obteniendo las siguientes curvas de isovalores. Se puede apreciar claramente que para obtener una Oxidación de CO óptima entre 12 – 18 ppm debemos experimentar con una masa de ZnO de 256.5 gramos y un tiempo de exposición de radiación UV de 7.3 horas para una concentración de 450 ppm de CO inicial.

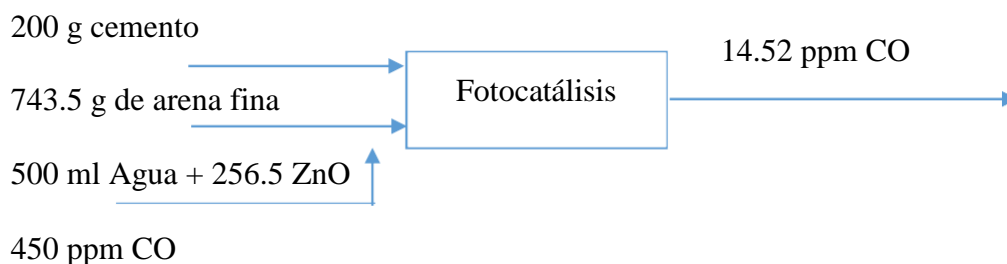
Figura 4.5. Curva de isovalores para la Oxidación de CO



**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.4 Balance de materia de la experiencia

Figura 4.6. Balance de materia de acuerdo a la experimentación



**Fuente:** Elaboración propia

En el balance de masa, se puede observar las cantidades de material que se requiere para preparar la superficie fotocatalizadora, la cual permanecerá y seguirá tratando demás gases que estén en contacto con su superficie.

Por otro lado, la energía que se usa es energía renovable por lo que no representa costo alguno, pero si se toma en cuenta.

#### 4.5 Análisis económico para la experiencia

Para el desarrollo de la investigación, se considera una inversión económica la cual consta desde la elaboración del equipo, alquiler de sensores, entre otros. A continuación, se detalla el monto de inversión para el desarrollo de la presente investigación:

**Tabla 4.5.** Costo por desarrollo de la investigación

<b>N°</b>	<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario (S/)</b>	<b>Costo Total (S/)</b>
1	Cámara de vidrio hermética cubica de 50cm de lado	2	500	1000
2	Ahumador para abejas	1	35	35
3	Cemento	1 bolsa	20	20
4	Arena fina	2 tarros	10	20
5	Óxido de zinc	10 kg	2	20
6	Balanza analítica	1	50	50
7	Alquiler de sensor de CO por mes	2 meses	400	800
8	Alquiler de instrumentos de vidrio (vaso de precipitados 50, 100, 250, 500ml, espátula , bandeja de PVC, entre otros) por mes	2 meses	100	200
9	Pasajes por día hacia el lugar de la experiencia.	25 días	10	250
10	EPPs (guantes de cuero, guates de látex, barbijo, lentes, etc.	1	200	200
<b>TOTAL</b>				<b>S/2595</b>



#### 4.6 Análisis económico escalado

Por ser un proyecto de investigación por el cual encontramos el grado de conversión de los gases de monóxido de carbono a dióxido de carbono, por el método de inclusión de óxido de zinc en una mezcla de tarrajeo, podemos realizar con lo encontrado un análisis para determinar el aumento en costo sobre la mezcla que usarían para los techos o paredes de casas.

Considerando que en promedio a recubrir de casa externamente sería de 50 m<sup>2</sup>, y según la experiencia la mezcla ideal sería:

**Tabla 4.6. Mezcla ideal**

<b>Mezcla</b>	<b>Cemento (gr)</b>	<b>Arena (gr)</b>	<b>Óxido de zinc (gr)</b>	<b>Total de porción (gr)</b>
5	200	743.5	256.5	1200

**Fuente:** Elaboración propia

Y esta proporción cubrió aproximadamente 0.2 m<sup>2</sup>. Al sacar proporciones en costos de los materiales, tendremos:

**Tabla 4.7. Costos por la experiencia**

<b>Numero</b>	<b>Material</b>	<b>Cantidad (g)</b>	<b>Costo (S/.)</b>
1	Cemento	200	0.20
2	Arena	743.5	0.10
3	Óxido de Zinc	256.5	0.2
4	Agua	500	0.05
<b>TOTAL (S/.)</b>			<b>0.55</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Luego, en costos reales para un total de 50m<sup>2</sup>, aplicamos una regla de tres para obtener el costo por el aumento del óxido de zinc.

**Tabla 4.8. Costos para la mezcla**

<b>Área</b>	<b>Costo (S/)</b>
0.2 m <sup>2</sup>	0.55
50 m <sup>2</sup>	137.5

**Fuente:** Elaboración propia

Considerando la mano de obra del personal y otros, se expresa en la siguiente tabla:

**Tabla 4.9. Costos totales incluidos mano de obra**

<b>Área</b>	<b>Costo (S/)</b>
<b>Costo tarrajeo</b>	137.5
<b>Mano de obra</b>	400
<b>TOTAL (S/.)</b>	537.5

**Fuente:** Elaboración propia

El costo por estucar 50 m<sup>2</sup>, aproximadamente, sería 537.5 soles. Si lo comparamos con la mezcla normal de tarrajeo, obtenemos un precio de 485 soles, se observa que existe una diferencia de 52.5 soles.

Es posible por la diferencia de 52.5 que se pueda empezar a tarrajar, pues la ventaja en esta mezcla es que se puede tener contacto con los gases contaminantes y los convierta en gases menos tóxicos al ambiente.

#### **4.7 Costo Efectividad**

Mediante una Matriz de decisión se procedió a comparar costos monetarios (económicos) y efectos no monetarios.

<b>COSTO</b>	<b>EFFECTIVIDAD</b>
Para realizar la oxidación de monóxido de carbono de un área de 0.2 m <sup>2</sup> , se invirtió la cantidad de S/ 2 595.00.	De un valor inicial de 450 ppm de CO, se redujo un 96.77% equivalente a 435.48 ppm de CO, obteniendo un valor final de 14.52 ppm de oxidación de CO.

## CONCLUSIONES

**PRIMERA:** Se logró oxidar el monóxido de carbono a dióxido de carbono utilizando el óxido de zinc como fotocatalizador en cual fue activado por la radiación UV.

**SEGUNDA:** Se identificó que los parámetros ideales para la oxidación del monóxido de carbono son óxido de zinc = 256.5 gr, tiempo de exposición = 7.3 h, Longitud de Onda ( $\lambda$ ) correspondiente a Radiación UV-A (320-400 nm).

**TERCERA:** Se determinó que en el “DISEÑO COMPUESTO CENTRAL” de  $2^k$  experimentos + estrellas = 10 experimentos, en el cual se tomó el diseño rotatable debido que en este se puede ampliar la magnitud de muestreo; es útil porque no se pueden modificar fácilmente los niveles de los factores.

**CUARTA:** Se determinó que el modelo matemático es  $\text{Monóxido de Carbono} = 235.227 - 0.672705 * \text{Masa ZnO} - 21.4644 * \text{tiempo de exposición R-UV} - 0.00017574 * (\text{Masa ZnO})^2 + 0.0446429 * \text{Masa ZnO} * \text{tiempo de exposición R-UV} + 0.685601 * (\text{tiempo de exposición R-UV})^2$ . El modelo planteado obedece a las condiciones establecidas para esta misma investigación por lo que solo es aplicable para una investigación que trabaje las mismas condiciones, y de tal modo podremos predecir resultados.

**QUINTA:** Se estableció la cantidad óptimas de arena, cemento, y óxido de zinc para la experiencia las cuales son cemento = 200gr, arena = 743.5 gr, óxido de zinc = 256.5 gr.

**SEXTA:** La influencia de la variable masa de óxido de zinc es predeterminante, tiene un alto valor de significancia, lo que quiere decir que entre más cantidad de óxido de zinc podemos lograr una mayor oxidación de monóxido de carbono. Asimismo, la influencia de la variable tiempo de exposición a la radiación UV es significativa; pero no tiene tanta importancia como la cantidad de masa que se usa de óxido de zinc.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERA:** Además del óxido de zinc existen otros fotocatalizadores como el dióxido de titanio, dióxido de estaño, y otros que pueden emplearse en una investigación similar para poder desarrollar una comparación de efectividad en la conversión de gases contaminantes.

**SEGUNDA:** Además de las mezclas de tarrajeo, se puede utilizar en superficies de fijación como pinturas fotocatalíticas, pavimentos butiminosos drenantes percolados con lechada fotocatalítica, losas fotocatalíticas y adoquines.

**TERCERA:** Se recomendaría usar un equipo que constantemente determine la composición total de los gases dentro de la cámara mientras tiene contacto con la superficie fotocatalítica, para así realizar los ensayos in situ. Y evaluar el grado real de contaminación del parque automotor en Arequipa.

**CUARTA:** Se recomendaría probar directamente con los gases generados de los motores de combustión interna, para evaluar no solo el monóxido de carbono; sino los demás gases producidos en la combustión incompleta de los combustibles y así desarrollar un estudio integral su grado de tratamiento de los mismos.

## BIBLIOGRAFÍA

- AcerosArequipa. (2016). *Manual de la construcción para maestros de obra*. Arequipa.
- Athalía Rodríguez Santiago (2011).- *Regeneración de  $\text{TiO}_2$  (de gussa p25) proveniente del proceso de degradación fotocatalítica de colorantes comerciales en medio acuoso*.
- ATSDR. (2012). *Resumen de salud pública. Monóxido de Carbono*. Agencia para sustancias tóxicas y el registro de enfermedades.
- Benigno Sánchez, Ana Isabel Cardona, José Peral y Marta I. Litter. (2012)-*Purificación de gases por fotocatalisis heterogénea: estado del arte*.
- Chin. Sci. Bull. Guo, S., Wu, Z., Zhao, W.(2009) - *TiO<sub>2</sub>-based building materials: above and beyond traditional applications*.
- Comité científico de seguridad de los consumidores, Comisión europea (2012).- *El óxido de zinc (en nano formas)*.
- Corzo Lucioni, A., & Vega Baudrit, J. (2012). Estudio Cinético de la degradación fotocatalítica oxidativa de colorantes empleados en la industria textilera. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 1.
- David Adrián Ochoa Fajardo(2005) - *Desarrollo de un material compuesto de óxido de zinc impregnado en un soporte granular que presente actividad fotocatalítica*.
- Garces Giraldo, L. F., Mejía Franco, E. A., & Santamaría Arango, J. J. (2015). La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Sistema de información científica Redalyc*.
- Guillaume Sauthier (2012).- *Preparación y caracterización de capas delgadas y estructuras de óxido de titanio para aplicaciones fotocatalíticas activadas mediante radiación uv*.
- IDEAM. (2007). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia*. Bogotá.
- Iris. (2016). *FMG Fabrica Marmi R Graniti*. Obtenido de <http://versitalia.it/wp-content/uploads/versitalia/fotocatalisis.pdf>
- Jaime A. Pérez Taborda, Jorge L. Gallego, Wilson S. Roman, Henry R. Landazuri (2008).- *Películas nano estructuradas de óxido de zinc (ZnO)*.

- Jurado, J., Vargas Hernandez, C., & Londoño Calderon, A. (2012). Estudio vibracional de nanoestructuras de ZnO sinterizadas por reaccion en estado solido. *Revista Colombiana de Fisica RCF*.
- Luevano Hipolito, M. (2015). *Purificacion de aire mediante oxidacion fotocatalitica de gases contaminantes NOx. Estudio de los fotocatalizadores TiO2 y ZnO*. Universidad Autonoma de Nueva Leon
- Marisol Faraldos, (-C. (2012). *Guia practica de la fotocatalisis aplicada a infraestructuras urbanas*. Madrid: Asociacion Iberica de Fotocatalisis (AIF).
- MINAM. (2014). Aire limpio para todos. *Educca (direccion general de educacion, cultura y ciudadania ambiental*.
- MINAM. (2015). *Aire limpio para todos*. Lima: Educca - Direccion Central de educacion cultura y ciudadania ambiental.
- MINAM. (2015). *Informe Nacional de calidad de Aire*. Lima.
- MINAM. (2015). *Informe Nacional de calidad de Aire*. Lima.
- MINAM. (2017). *(MINAM), aprobó Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire con DECRETO SUPREMO N° 003-2017-MINAM*. Lima.
- Mohammed Ouzzine (2014)-Materiales basados en nano partículas de tio2 para la oxidación fotocatalitica de propeno en fase gas a baja concentración”*
- Refugio Villafuerte, M. (2013). Estructura cristalina. *Facultad de quimica - UNAM*.
- Ricardo García San José (2001)- Combustión y combustibles*.
- Rodriguez, J., Candal, R., Solis, J., Estrada, W., & Blesa, M. (2011). El fotocatalizador: sintesis, propiedades y limitaciones.
- Sandra A. Mayen Hernández, José Santos Cruz, Francisco J. De Moure. (2013) - Películas delgadas de óxidos semiconductores obtenidas por la técnica sol-gel*.
- Sanidad, C. d. (2014). *Riesgo Químico - Accidentes graves - Monóxido de Carbono*. Murcia.
- Verdeja González, García Coque, Huerta Nosti -Variación de las propiedades físicas del óxido de cinc con la temperatura*.

## ANEXOS

### ANEXO 1. MANUAL DEL MAESTRO CONSTRUCTOR

La proporción recomendada para una casa de dos pisos es la “P2”, es decir, un volumen de cemento por 4 ó 5 volúmenes de arena gruesa. Esta proporción se logra usando una bolsa de cemento con 1 1/2 buggies de arena gruesa y la cantidad de agua necesaria para lograr una mezcla pastosa que permita un buen trabajo.



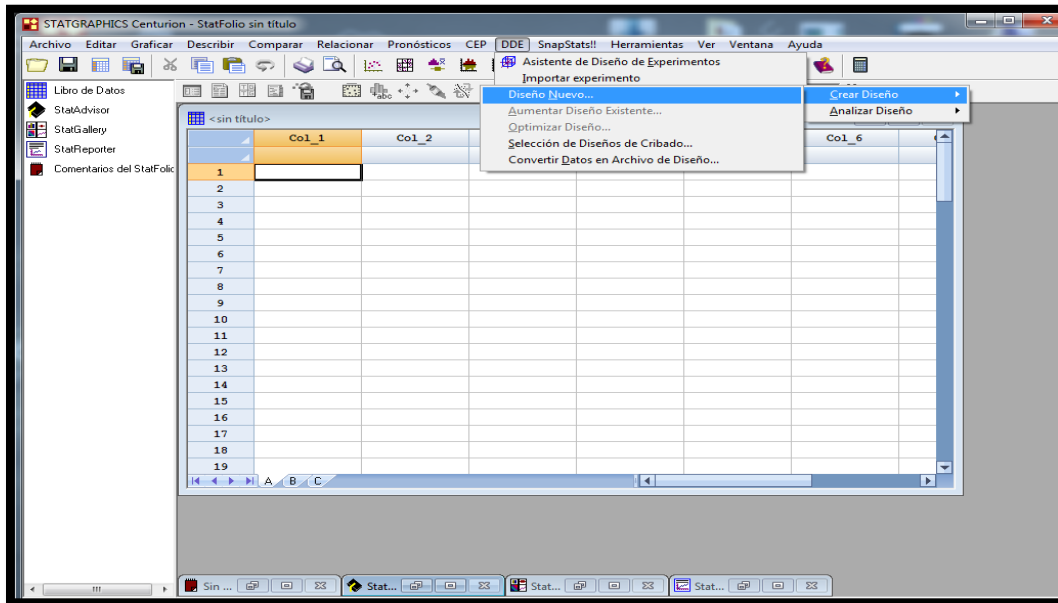
**b. Mortero para los Tarrajeos:** Se usa para tarrajar los muros y los cielos rasos. La mezcla se hace con arena fina, la proporción recomendada es de un volumen de cemento por 5 volúmenes de arena fina. Esta proporción se logra usando 1 bolsa de cemento con 1 1/2 buggies de arena fina y la cantidad de agua necesaria para lograr una mezcla pastosa que permita un buen trabajo.



**1.12 EL CONCRETO** Se denomina concreto a la mezcla de cemento, arena gruesa, piedra y agua, que se endurece conforme avanza la reacción química del agua con el cemento. La cantidad de cada material en la mezcla depende de la resistencia que se indique en los planos de estructuras. Siempre la resistencia de las columnas y de los techos debe ser superior a la resistencia de cimientos y falsos pisos. Después del vaciado, es necesario garantizar que el cemento reaccione químicamente y desarrolle su resistencia. Esto sucede principalmente durante los 7 primeros días, por lo cual es muy importante mantenerlo húmedo en ese tiempo. A este proceso se le conoce como curado del concreto.

## ANEXO 2. PROCEDIMIENTO PARA LOS RESULTADOS ESTADÍSTICOS EN STATGRAPHICS

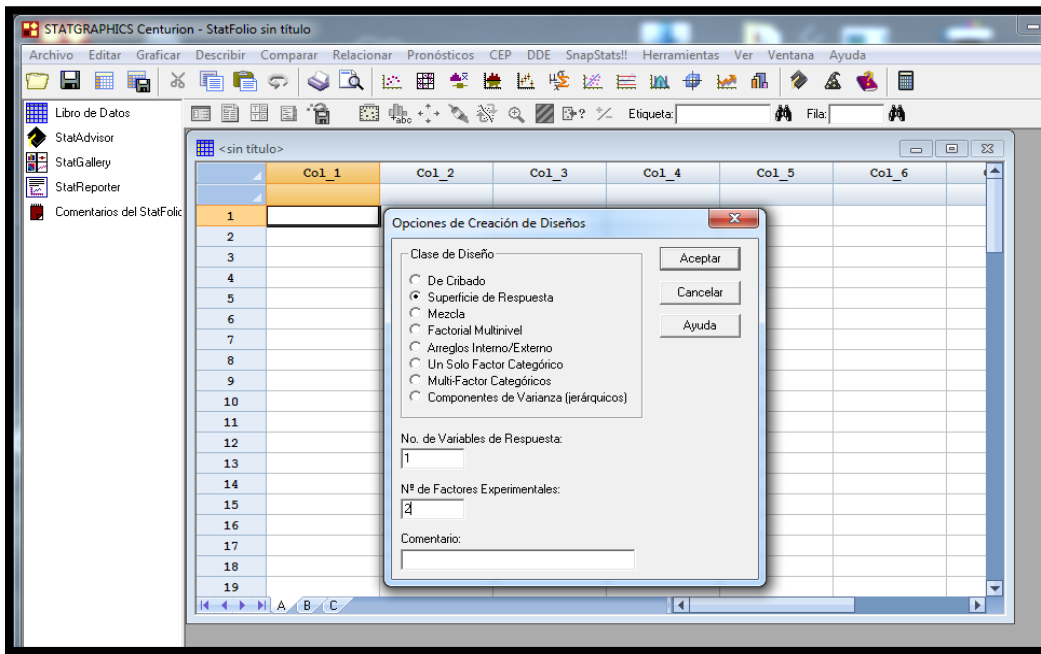
Figura 1. Crear diseño en la hoja Statgraphic.



Fuente: Statgraphics

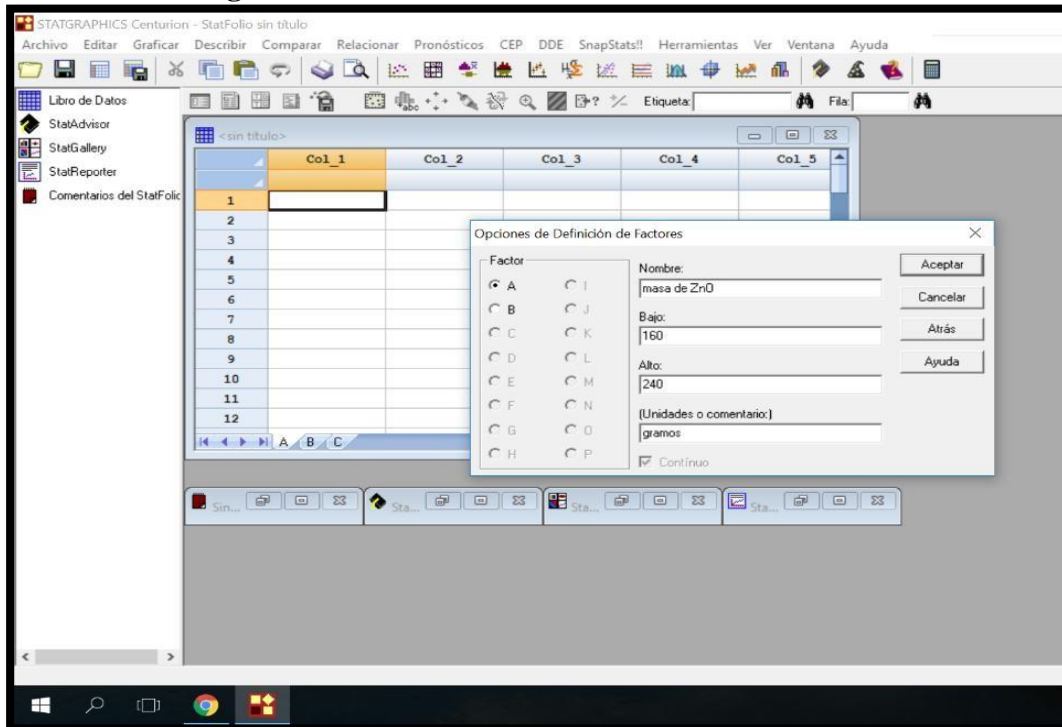


Figura 2. Se Crea el diseño en superficie de respuesta



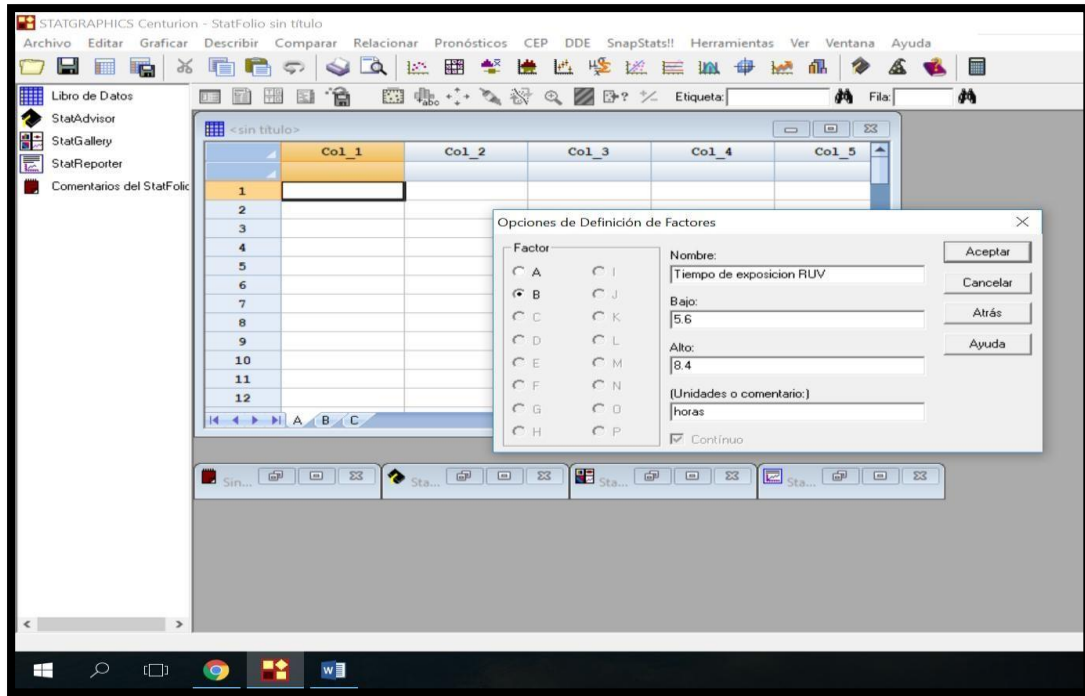
Fuente: Statgraphics

Figura 3. Se introducen las variables de óxido de zinc



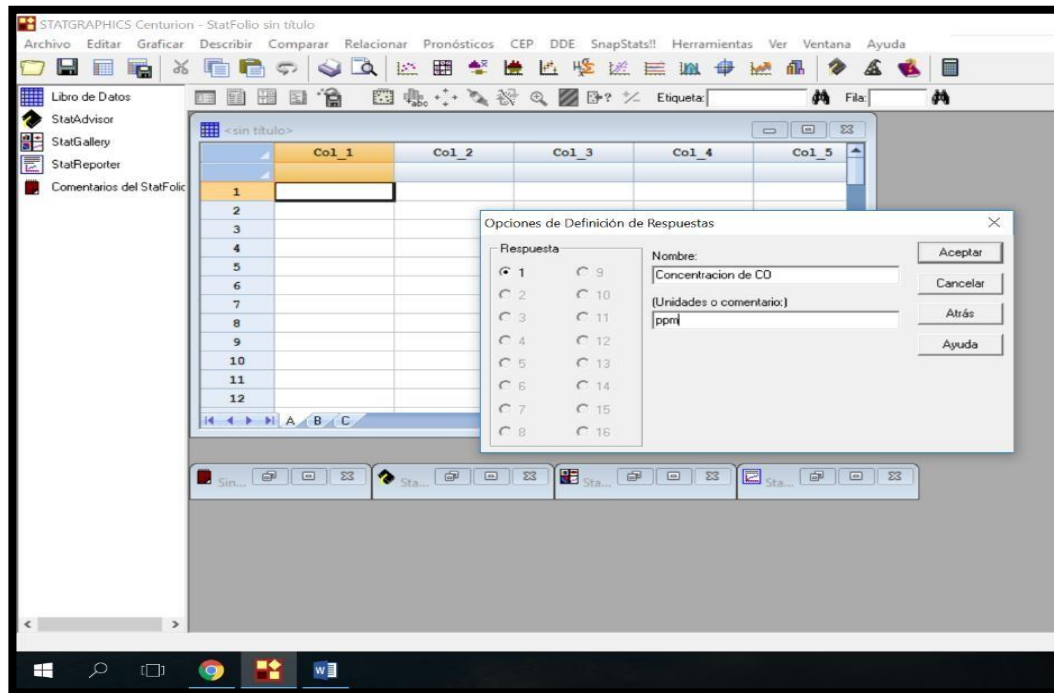
Fuente: Statgraphics

**Figura 4.** Se introducen las variables a manejar



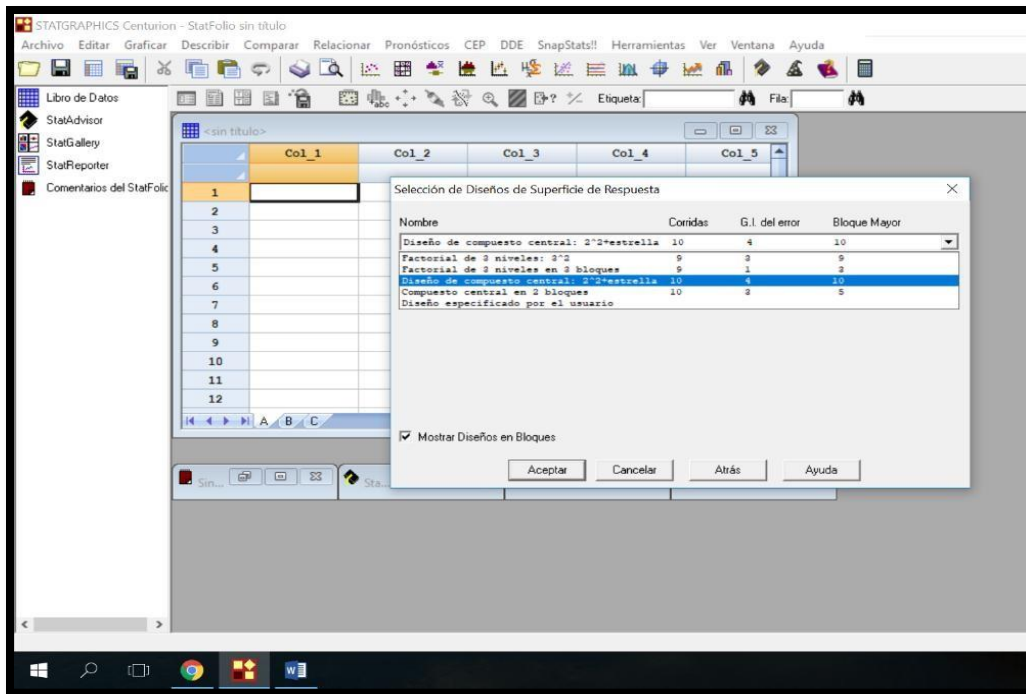
**Fuente:** Statgraphics

**Figura 5.** Se introduce la variable respuesta



**Fuente:** Statgraphics

**Figura 6.** Se define el tipo de diseño experimental, el cual es de diseño de compuesto centrales  $2^2 +$  estrellas



Fuente: Statgraphics

**Figura 7.** Statgraphics entrega el diseño experimental a seguir

	BLOQUE	masa de ZnO gramos	Tiempo de exposicion RUV horas	Concentracion de CO ppm	Col_5
1	1	240.0	8.4		
2	1	160.0	8.4		
3	1	200.0	7.0		
4	1	160.0	5.6		
5	1	200.0	7.0		
6	1	240.0	5.6		
7	1	143.431	7.0		
8	1	200.0	8.9799		
9	1	256.569	7.0		
10	1	200.0	5.0201		
11	2	240.0	8.4		
12	2	160.0	8.4		
13	2	200.0	7.0		
14	2	160.0	5.6		
15	2	200.0	7.0		
16	2	240.0	5.6		
17	2	143.431	7.0		
18	2	200.0	8.9799		
19	2	256.569	7.0		
20	2	200.0	5.0201		
21					
22					
23					
24					

Fuente: Statgraphics

**Figura 8.** Introducimos los resultados obtenidos de acuerdo a la experimentación

The screenshot shows the STATGRAPHICS Centurion software interface. The main window displays a data table with the following columns: BLOQUE, masa de ZnO (gramos), Tiempo de exposicion RDV (horas), and Concentracion de CO (ppm). The data is organized into 24 rows, with rows 1-20 containing numerical data and rows 21-24 being empty. The interface includes a menu bar at the top with options like Archivo, Editar, Graficar, and a sidebar on the left with options like Libro de Datos, StatAdvisor, and StatReporter.

	BLOQUE	masa de ZnO gramos	Tiempo de exposicion RDV horas	Concentracion de CO ppm	Col_5	Col_6
1	1	240.0	8.4	14		
2	1	160.0	8.4	45		
3	1	200.0	7.0	40		
4	1	160.0	5.6	60		
5	1	200.0	7.0	39		
6	1	240.0	5.6	20		
7	1	143.431	7.0	65		
8	1	200.0	8.9799	41		
9	1	256.569	7.0	21		
10	1	200.0	5.0201	51		
11	2	240.0	8.4	16		
12	2	160.0	8.4	47		
13	2	200.0	7.0	38		
14	2	160.0	5.6	65		
15	2	200.0	7.0	41		
16	2	240.0	5.6	23		
17	2	143.431	7.0	68		
18	2	200.0	8.9799	45		
19	2	256.569	7.0	19		
20	2	200.0	5.0201	49		
21						
22						
23						
24						

Fuente: Statgraphics

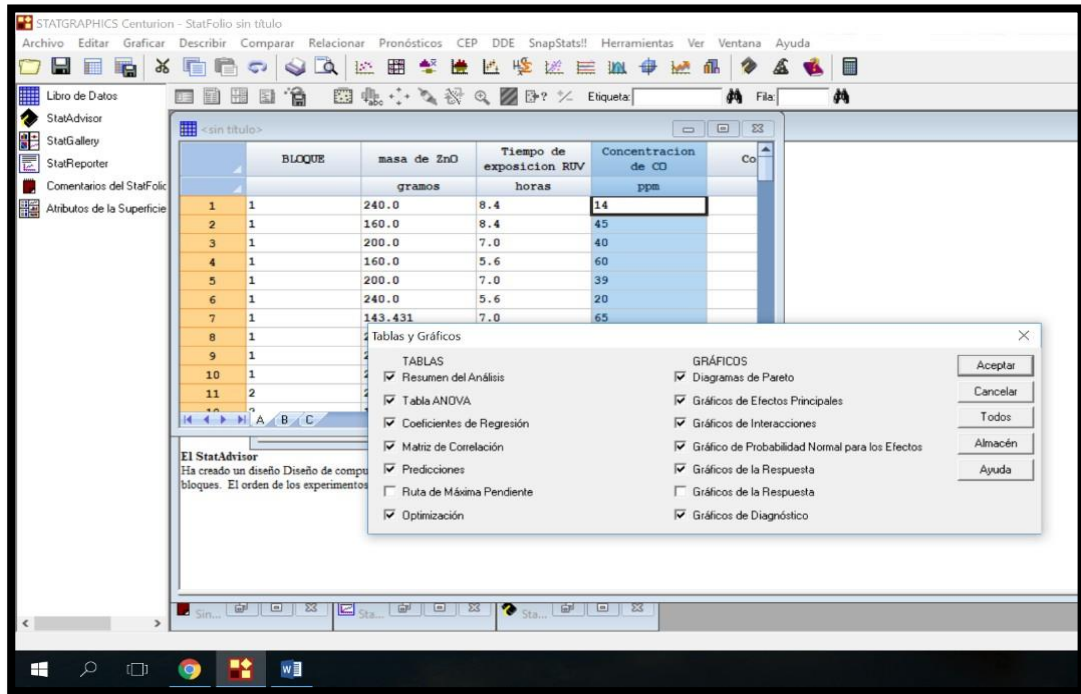
**Figura 9.** Definimos nuevamente las variables respuesta a STATGRAPHICS

The screenshot shows the same data table as in Figure 8, but with a dialog box titled 'Analizar Diseño' open. The dialog box has a 'Datos:' field containing 'Concentracion de CO' and a '(Selección:)' field which is empty. There are buttons for 'Aceptar', 'Cancelar', 'Borrar', 'Transformar...', and 'Ayuda' at the bottom of the dialog. The background data table is partially visible, showing rows 1 through 20.

	BLOQUE	masa de ZnO gramos	Tiempo de exposicion RDV horas	Concentracion de CO ppm	Col_5	Col_6	Col_7
1	1	240.0	8.4	14			
2	1	160.0	8.4	45			
3	1	200.0	7.0	40			
4	1	160.0	5.6	60			
5	1	200.0	7.0	39			
6	1	240.0	5.6	20			
7	1	143.431	7.0	65			
8	1	200.0	8.9799	41			
9	1	256.569	7.0	21			
10	1	200.0	5.0201	51			
11	2	240.0	8.4	16			
12	2	160.0	8.4	47			
13	2	200.0	7.0	38			
14	2	160.0	5.6	65			
15	2	200.0	7.0	41			
16	2	240.0	5.6	23			
17	2	143.431	7.0	68			
18	2	200.0	8.9799	45			
19	2	256.569	7.0	19			
20	2	200.0	5.0201	49			
21							
22							
23							
24							

Fuente: Statgraphics

**Figura 10.** Seleccionamos las gráficas y la interpretación al diseño de experimentos propuesto



**Fuente:** Statgraphics