

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN**



**ESCUELA DE POSGRADO**

**TESIS**

**MODELAMIENTO DEL CAMBIO  
CLIMÁTICO A PARTIR DE LAS  
EMISIONES DE GASES DEL PARQUE  
AUTOMOTOR EN LA REGIÓN LIMA,  
AÑO 2017**

**PRESENTADO POR:**

**PAVEL ALEXANDER ESTUPIÑAN DÍAZ**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN ECOLOGÍA Y  
GESTIÓN AMBIENTAL**

**ASESOR:**

**Dr. FIDEL ALBERTO REYES ULFE**

**HUACHO - 2021**

**MODELAMIENTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO A PARTIR DE LAS  
EMISIONES DE GASES DEL PARQUE AUTOMOTOR EN LA  
REGIÓN LIMA, AÑO 2017**

**PAVEL ALEXANDER ESTUPIÑAN DÍAZ**

**TESIS DE MAESTRÍA**

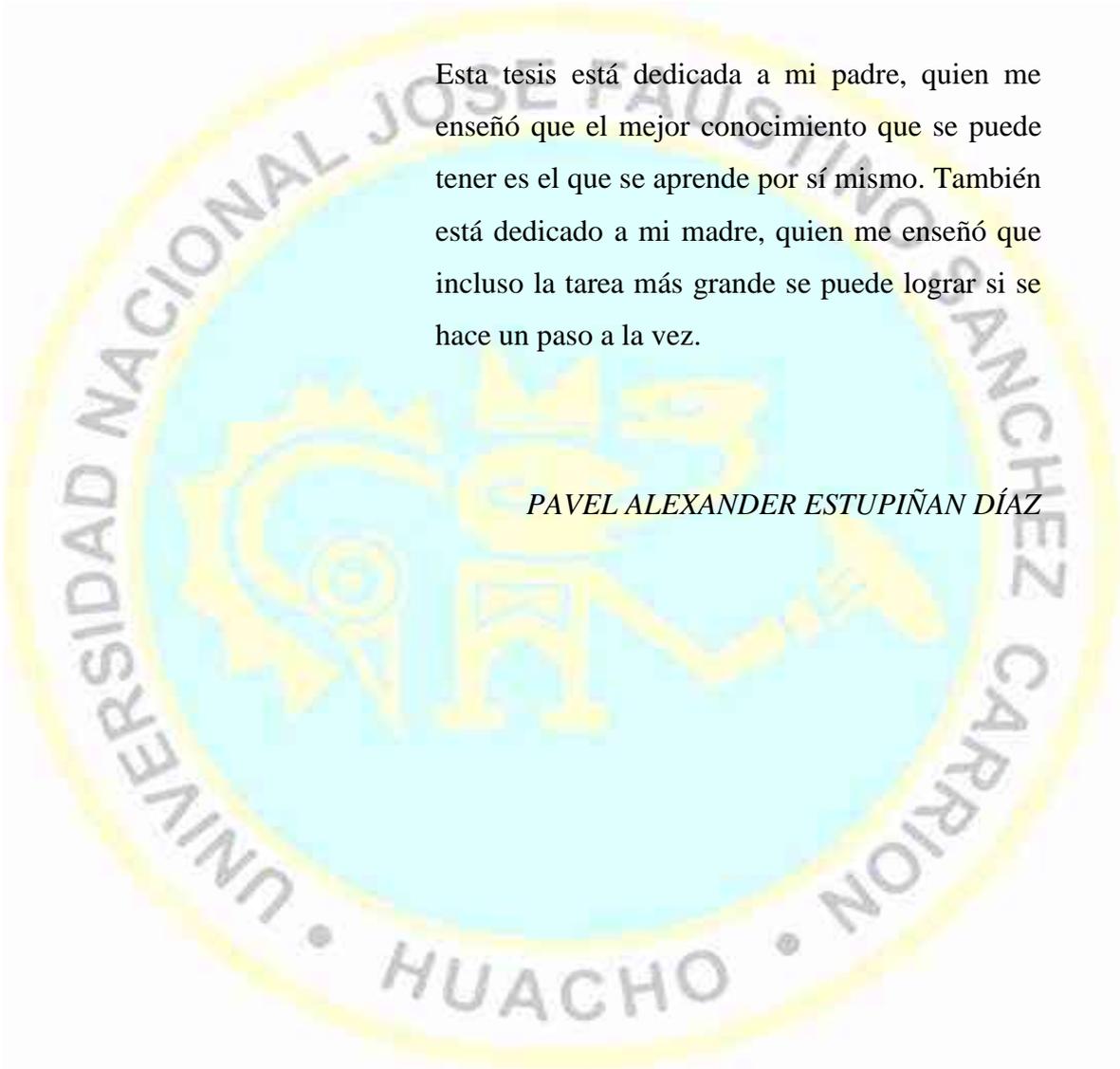
**ASESOR: Dr. FIDEL ALBERTO REYES ULFE**

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRO EN ECOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL  
HUACHO  
2021**

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada a mi padre, quien me enseñó que el mejor conocimiento que se puede tener es el que se aprende por sí mismo. También está dedicado a mi madre, quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez.

*PAVEL ALEXANDER ESTUPIÑAN DÍAZ*



## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, por haberme dado la oportunidad de formarme en esta prestigiosa universidad y haber sido mi apoyo durante todo este tiempo.

De manera especial a mis asesores de tesis, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de investigación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento.

*PAVEL ALEXANDER ESTUPIÑAN DÍAZ*

# ÍNDICE

<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>viii</b>

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

<b>1.1 Descripción de la realidad problemática</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Formulación del problema</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1 Problema general</b>	<b>4</b>
<b>1.2.2 Problemas específicos</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Objetivos de la investigación</b>	<b>4</b>
<b>1.3.1 Objetivo general</b>	<b>4</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Justificación de la investigación</b>	<b>5</b>
<b>1.5 Delimitaciones del estudio</b>	<b>6</b>
<b>1.6 Viabilidad del estudio</b>	<b>6</b>

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

<b>2.1 Antecedentes de la investigación</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1 Investigaciones internacionales</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2 Investigaciones nacionales</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Bases teóricas</b>	<b>18</b>
<b>2.3 Bases filosóficas</b>	<b>38</b>
<b>2.4 Definición de términos básicos</b>	<b>39</b>
<b>2.5 Hipótesis de investigación</b>	<b>39</b>
<b>2.5.1 Hipótesis general</b>	<b>46</b>
<b>2.5.2 Hipótesis específicas</b>	<b>46</b>
<b>2.6 Operacionalización de las variables</b>	<b>47</b>

<b>CAPÍTULO III</b>		
<b>METODOLOGÍA</b>		
<b>3.1</b>	<b>Diseño metodológico</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>Población y muestra</b>	<b>48</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Población</b>	<b>48</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Muestra</b>	<b>48</b>
<b>3.3</b>	<b>Técnicas de recolección de datos</b>	<b>48</b>
<b>3.4</b>	<b>Técnicas para el procesamiento de la información</b>	<b>48</b>
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>RESULTADOS</b>		
<b>4.1</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Contrastación de hipótesis</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO V</b>		
<b>DISCUSIÓN</b>		
<b>5.1</b>	<b>Discusión de resultados</b>	<b>70</b>
<b>CAPÍTULO VI</b>		
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		
<b>6.1</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>75</b>
<b>6.2</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>79</b>
<b>7.1</b>	<b>Fuentes documentales</b>	<b>79</b>
<b>7.2</b>	<b>Fuentes bibliográficas</b>	<b>79</b>
<b>7.3</b>	<b>Fuentes hemerográficas</b>	<b>79</b>
<b>7.4</b>	<b>Fuentes electrónicas</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS</b>		<b>81</b>

## RESUMEN

Las emisiones gaseosas derivadas del parque automotriz en la ciudad de Lima son suficientemente representativas y se constituyen en uno de los factores principales que producen alteraciones climáticas, esto debido a la elevada concentración de gases de efecto invernadero en la tropósfera. Estas emisiones son principalmente conformadas por el  $\text{CO}_2$ , el  $\text{CH}_4$ , y gases nitrogenados,  $\text{NO}_x$ , y algunos óxidos de azufre,  $\text{SO}_x$ , las cuales, debido a la inmensa cantidad de motores de combustión interna, ocupan concentraciones que superan los límites máximos permisibles, determinando consecuentemente impactos en los sistemas ambientales y en consecuencia en todo ente viviente, donde los seres humanos somos parte fundamental de estos sistemas.

El modelamiento del clima constituye la base primordial de la presente investigación, y está sustentado en el análisis de las ecuaciones de Navier & Stokes, fue estudiado en los modelos matemáticos de difusión, que se pueden evaluar analítica o numéricamente, con el propósito de establecer las condiciones de estabilidad numérica, para lo cual se toman en cuenta los parámetros básicos, y luego se pueden establecer intervalos de funcionamiento. La base de cálculo descansa en la Leyes de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, las cuales se refieren a sistemas de coordenadas cartesianas y cilíndricas. Y la ecuación de conservación de momento puede escribirse como una ecuación de la velocidad. Esta ecuación de la velocidad es función de la densidad de la energía acoplada al término de la presión, por lo que se deben resolver las dos ecuaciones simultáneamente. Entonces, los factores que afectan los parámetros y variables de estas ecuaciones son susceptibles de alteraciones con las emisiones gaseosas.

Palabras clave: Emisiones gaseosas, tropósfera, impactos, modelamiento, difusión, evaluación numérica, estabilidad, coordenadas cilíndricas.

## ABSTRACT

The gaseous emissions derived from the automobile fleet in the city of Lima are sufficiently representative that they constitute one of the main factors that produce climatic alterations, due to the high concentration of greenhouse gases in the troposphere. These emissions are mainly conformed by CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and nitrogen gases, NO<sub>x</sub>, and some sulfur oxides, SO<sub>x</sub>, which, due to the immense quantity of internal combustion engines, occupy concentrations that exceed the maximum permissible limits, determining consequently impacts on the systems and on the inhabitants thereof, including human beings.

The modeling of the climate, constitutes the primordial base of the present investigation, and is sustained in the analysis of the equations of Navier & Stokes, was studied in the mathematical models of diffusion, that can be evaluated analytically or numerically, with the purpose of establishing the conditions of numerical stability, for which the basic parameters are taken into account, and then operating intervals can be established. The basis of calculation is based on the laws of conservation of mass, energy and momentum, which refer to cartesian and cylindrical coordinate systems. And the moment conservation equation can be written as an equation of velocity. This equation of velocity is a function of the density of the energy coupled to the pressure term, so the two equations must be solved simultaneously. Then, the factors that affect the parameters and variables of these equations are susceptible to alterations with gaseous emissions.

Keywords: Gaseous emissions, troposphere, impacts, modeling, diffusion, numerical evaluation, stability, cylindrical coordinates.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación está orientado al análisis de la relación y posible incidencia entre las emisiones gaseosas del parque automotor con el cambio climático en la Región Lima, siendo el objetivo primordial el modelamiento de esa relación, con el propósito de verificar el cambio de una de las variables ambientales fundamentales, como es la temperatura.

Para ello se ha utilizado el método descriptivo de la realidad problemática y longitudinal temporal, desde los años 2013 al 2017, y con una base de datos nacionales incorporada desde 1968 a 2019, y una base mundial desde 1958 a la fecha.

Una de las conclusiones más importantes resultado de la investigación es que en los períodos referidos hay un incremento global de 0.68 grados en proyección lineal, y 0.70 en análisis parabólica de la tendencia de cambio en la temperatura.

Las variaciones climáticas afectan globalmente a nuestro planeta y los impactos que verificamos continuamente en diversas latitudes del planeta también se registran en nuestro País, esto constituye una problemática aún no resuelta que determina una realidad compleja en la Región Lima.

Algunas causas de estos fenómenos, se asume, que se deben a emisiones de los gases de efecto invernadero, cuyas fuentes se encuentran en el parque automotor, la ganadería, la industria, y la actividad antrópica de las grandes urbes, entre otras y aunque existen diversos investigadores que han dedicado tiempo - vida intentando plantear soluciones, las alternativas propuestas para mitigarlo aún no se han incluido en los programas de regulación ambiental de los países industrializados con mayores emisiones de éstos gases (USA, China, Rusia, Canadá, etc.), debidas a la actividad industrial y al crecimiento poblacional, tanto como la proliferación de especies cuyas poblaciones suman millares de millones, “caso tipo es el ganado vacuno utilizado en la industria de lácteos, entre otras, las causantes de esta compleja realidad problemática”. (Vargas, P. 2009).

Actualmente, a pesar de que se han formulado varios modelos acerca de las variaciones climáticas, es necesario puntualizar el efecto de las variables temperatura, la densidad y la concentración del CO<sub>2</sub> y otros gases, para poder determinar su influencia en los cambios atmosféricos de la región Lima.



# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática

Las variaciones climáticas afectan globalmente a nuestro planeta y los impactos que verificamos continuamente en diversas latitudes del planeta también se registran en nuestro País, esto constituye una problemática aún no resuelta que determina una realidad compleja en la Región Lima. Se estima que algunas de las principales causas de estos fenómenos son debidas a emisiones de gases de efecto invernadero (cuyas fuentes se encuentran en el parque automotor, la industria y la ganadería, principalmente), y a los desechos propios de la vida en las grandes urbes.

Y aunque existen diversas investigaciones orientadas a proponer y/o plantear soluciones, las alternativas propuestas aún no se han incluido en los programas de regulación ambiental de los países industrializados con mayores emisiones (USA, China, Rusia, Canadá, etc.), debidas la actividad industrial y al crecimiento poblacional, tanto como la crianza de especies cuyas poblaciones suman millares de millones, “caso tipo es el ganado vacuno utilizado en la industria de lácteos, entre otras, las causantes de esta compleja realidad problemática” (Vargas, P. 2009).

Asimismo, se ha verificado que “el clima puede ser afectado por las variaciones estacionales de las recurrentes y aperiódicas corrientes marinas, particularmente en el Océano Pacífico, la Corriente del Niño, que altera la velocidad de evaporación del agua y otros gases como el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>” (Vargas, P. 2009).

Por el momento, a pesar de que se han formulado varios modelos acerca de las variaciones climáticas, es necesario puntualizar el efecto de las variables

temperatura, la densidad y la concentración del CO<sub>2</sub> y otros gases, para poder determinar su influencia en los cambios atmosféricos de la región Lima.

En la actualidad existen numerosos modelos que incluyen simulación climática, oceanográfica, ambiental global y ambiental regional, como Princeton Ocean Model (POM), que es un modelo de circulación general del océano, utilizado para simular y predecir las corrientes oceánicas, la temperatura, la salinidad y otras propiedades del agua; regional Ocean Modeling System (ROMS), utilizado en Colombia, es un modelo regional de superficie libre, hidrostático que utiliza las ecuaciones de conservación, momento y energía; Ocean Parallelise (OPA), es un programa con base en código fortran, utilizado para predicciones oceánicas, en fin, Modelos del Sistema Climático Terrestre (MSCT) y donde se utilizan mecanismos para acoplar diferentes esquemas desde el más simple al más complejo. Por tal motivo, es importante conocer la relación de las variables temperatura y de concentración de los gases producidos por las emisiones de los vehículos en la Región Lima, la ciudad de Lima ocupa el mayor porcentaje de parque automotor, para comprender su comportamiento. Para lo cual se realizará la simulación matemática del sistema utilizando las ecuaciones formuladas por Navier - Stokes.

El Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC), fue establecido en 1988 por la Organización Mundial de Meteorología (WMO) y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP), en particular para asesorar en un comprensivo objetivo y de una transparente manera, todas las relevancias científicas, tecnológicas e información socioeconómica para contribuir en el entendimiento de las bases científicas del riesgo humano inducido al cambio climático, el impacto potencial y las adaptaciones y opciones de mitigación. Empezando en 1990, el IPCC ha producido una serie de Reportes de Asesoramiento, Reportes Especiales, Artículos técnicos, metodologías y otros documentos clave que han traído las referencias estándar para políticos y científicos.

Ha quedado evidenciado que son varios los factores que pueden determinar cambios importantes en las condiciones de vida del Planeta Tierra, que alteran los cambios naturales, y están constituidos por causas antropogénicas, los que van a determinar la vulnerabilidad y la exposición al riesgo de desastres. La implicancia

de todo ello, y ahí radica una de las fortalezas de ésta investigación, es la “posibilidad de adoptar medidas sociales de carácter preventivo, para administrar el riesgo de desastres y la adaptación debidos a los cambios climáticos” (Qin Dahe & Vicente Barros, *Managing the Risks of extreme events and disasters*, IPCC, Cambridge University, 2012).

Por otro lado, se conoce que un factor importante en las modificaciones climáticas está dado por la temperatura del océano pacífico, pues “la termoclina o línea divisoria entre las aguas superficiales cálidas y las aguas profundas frías (Rasmusson y Hall 1983, Wallace y Vogel 1994), varía”. En “el Pacífico Tropical adyacente a las costas suramericanas, la termoclina se encuentra normalmente cerca de la superficie, aproximadamente a 50 m de profundidad” (Zea y Montealegre 1992). Esto se debe a que la fuerza de arrastre de los vientos sobre las aguas superficiales empuja también la termoclina hacia arriba, hacia la superficie. Esta es la razón por la cual en el extremo Este del Pacífico Tropical la termoclina está más cerca de la superficie que en el extremo Oeste del Pacífico, donde el efecto de los vientos del Este junto a la menor densidad del mar, provocan que la distancia entre la termoclina y la superficie sea mayor.

Sin embargo, para nuestra investigación, los factores en consideración tienen relación con las emisiones gaseosas y los cuerpos receptores de las mismas, de modo que el aire o el océano pacífico se tomaron de manera colateral o secundaria, sabiendo que la surgencia o afloramiento nutricional (aguas profundas y nutritivas “surgen” hacia aguas más superficiales) también es un fenómeno importante que ocurre por la inestabilidad vertical del agua en regiones oceánicas donde, las escasas lluvias y la ausencia de caudales de agua dulce, hacen que la evaporación superficial produzca un continuo aumento de la salinidad del mar, y existe una relación directa con los cambios de clima. Por este efecto “las aguas superficiales cálidas y saladas, son sustituidas por aguas profundas, frías y menos saladas” (SNM 1993). Parte de este fenómeno es causado por las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la tropósfera.

## **1.2 Formulación del problema**

### **1.2.1 Problema general**

¿De qué manera las emisiones gaseosas del parque automotor influyen en el cambio climático en la Región Lima, año 2017?

### **1.2.2 Problemas específicos**

¿De qué manera se relacionan las emisiones de CO con el cambio climático en la Región Lima, año 2017?

¿Cuál es la influencia de la emisión de CO<sub>2</sub> en el cambio climático en la Región Lima, año 2017?

¿De qué manera incide la emisión de SO<sub>x</sub> en el cambio climático en la Región Lima, año 2017?

¿Cómo se relaciona la emisión del NO<sub>x</sub> en el cambio climático en la Región Lima, año 2017?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general**

Modelar el sistema climático en la Región Lima debido a las emisiones gaseosas del parque automotor, año 2017.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Determinar la relación de las emisiones de CO con el cambio climático en la Región Lima 2017.

Relacionar la influencia de la emisión de CO<sub>2</sub> con el cambio climático en la Región Lima, 2017.

Evaluar la incidencia de la emisión de SO<sub>x</sub> con el cambio climático en la Región Lima, 2017.

Determinar la relación de la emisión de NO<sub>x</sub> con el cambio climático en la Región Lima, 2017.

#### 1.4 Justificación de la investigación

Uno de los temas de más relevancia en asuntos climáticos, lo constituyen las emisiones gaseosas, y es necesario referirse a los focos de la generación del problema, que este caso está constituido esencialmente por el parque automotor de los núcleos urbanos. Por tal motivo, se eligió como zona de estudio de la presente investigación a la Región Lima, focalizando la atención en la ciudad de Lima debido a la inmensa cantidad de vehículos que, según un estudio publicado en el diario Gestión del 20 de diciembre de 2014, solo de un año (2014) a otro (2015) hubo un incremento estadístico de 63% del parque vehicular, es decir de 1.3 millones de unidades a 2.2 millones de unidades, mientras que para el 2016 se elevó a 2.6 millones de unidades y manteniéndose la tendencia hasta el 2017 se tiene más de 3 millones de unidades.

Según un estudio realizado en 2017 por la Dirección de Calidad Ambiental del Ministerio del Ambiente por parte de Clima de Cambios, una iniciativa de la PUCP, el especialista Eric Concepción, “el principal problema es el parque automotor, no solo por la antigüedad de los vehículos, sino también por la calidad del combustible. La concentración límite de carbono por metro cúbico en el aire es de 50 microgramos, y en ciudades como Arequipa la concentración está entre 150 y 160 microgramos, mientras que, en Lima, éste índice supera los 220 microgramos”(Ambiente, 2018).

El otro factor lo constituyen los gases como el dióxido de azufre, cuyo límite máximo es 350 ppm, y que sumado a los otros gases generan una contaminación de hasta 9700 ppm, cantidad altísima que provoca infinidad de afecciones en la salud poblacional, y los tan mencionados cambios en el clima.

No existiendo un modelo climático regional que permita relacionar las variables climáticas con el cambio climático en la Región Lima, teniendo en cuenta que existen microclimas que requieren ser evaluados en su comportamiento; se identificó y estimó la evolución previsible de variables climáticas a escala regional, tomando en cuenta las emisiones gaseosas del parque automotor y se ha logrado la estimación precisa de los cambios a escala global y a escala regional.

En estudios previos, existe el modelo desarrollado en 2012 por Echevín, para la Costa Norte del Perú, y el estudio desarrollado por Ramos, Lucero en 2014, pero ninguno de ellos aborda el cambio climático en la Región Lima.

Por lo antes dicho, considero que este trabajo se reviste de una singular importancia documental y de referencia para posibles aplicaciones en la búsqueda de soluciones a la problemática ambiental de investigación y modelamiento, y su aporte es orientado al esclarecimiento de las causas del calentamiento del clima, además del fenómeno del Niño o de las ondas Kelvin. Ello justificó plenamente la ejecución de la presente investigación.

### **1.5 Delimitaciones del estudio**

La presente investigación se desarrolló en la Región Lima, tomando como base las emisiones vehiculares medias en la ciudad de Lima, por la existencia de un inmenso parque automotor en esa ciudad.

Se tomó la data existente y disponible en los registros del MINAM, SENAMHI y DININCRI, de los últimos cinco años, para proyectar la tendencia.

Se modeló y simuló el impacto de las emisiones gaseosas del parque automotor con el propósito de contribuir con alternativas técnicamente viables en la solución de la problemática que aqueja a toda la humanidad, y en particular a nuestro país y la Región Lima.

Lo antes señalado permitió considerar que existió el argumento suficiente para considerar justificado el desarrollo del presente trabajo de investigación.

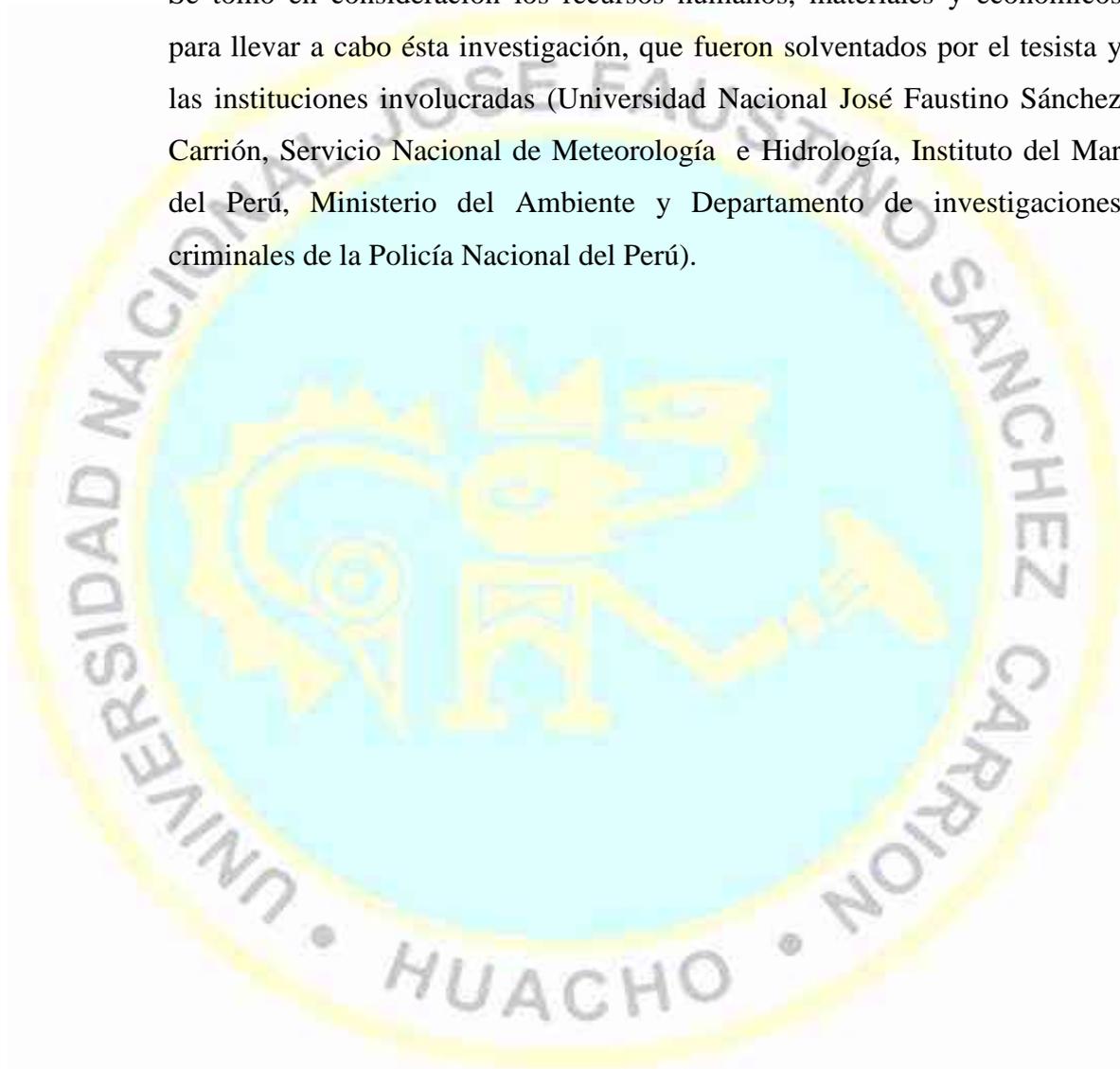
### **1.6 Viabilidad del estudio**

La presente investigación se hizo viable por cuanto se logró el análisis, modelamiento y evaluación de los fenómenos climáticos derivados de la concentración recurrente de las principales emisiones del parque automotriz en la ciudad de Lima, para lo cual se incluyó el uso de:

Herramientas de modelamiento matemático.

Data informativa proveniente de organismos estatales como SENAMHI, MINAM y DININCRI, referido a las concentraciones de los gases de efecto invernadero presentes en las emisiones del parque automotor de la ciudad de Lima, con apoyo de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Software de acceso libre, EXCEL, MatLab 2019a (versión de prueba), y SPSS.

Se tomó en consideración los recursos humanos, materiales y económicos para llevar a cabo ésta investigación, que fueron solventados por el tesista y las instituciones involucradas (Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Instituto del Mar del Perú, Ministerio del Ambiente y Departamento de investigaciones criminales de la Policía Nacional del Perú).



## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación

##### 2.1.1 Investigaciones internacionales

Los climatólogos Syukuro Manabe y James Hansen (1991) crearon, hace 50 años, los primeros modelos para medir el cambio climático por la influencia humana, y ya entonces predijeron que la temperatura subiría dos grados este siglo. Desde el arranque de la Revolución Industrial, en 1780, hasta nuestros días, la temperatura media global ha subido 0,8 grados. Solo en los próximos 40 años, se espera que aumente dos más. Los días de calor se duplicarán en las latitudes elevadas, el nivel del mar subirá casi un metro a finales de este siglo y las consecuencias para la población (diásporas masivas a zonas más altas, desastres naturales) ya se aventuran devastadoras, por más que los objetivos marcados en el seno en la última Cumbre de París vayan enfocados, precisamente, a embridar ese ascenso de la temperatura global.

De acuerdo a lo mencionado por Manabe & Hansen, “Estos datos, hace apenas 10 años desconocidos por la mayoría, son hoy, tristemente, un tema recurrente en tertulias cotidianas de todo el mundo”.

Es indudable la responsabilidad del hombre en el calentamiento global y, como los mencionan éstos autores “...prácticamente todos asumen que detrás está la acción del ser humano”.

Los climatólogos **Syukuro Manabe** y **James Hansen** crearon un modelo computacional “capaz de simular el comportamiento del clima y predecir cuánto subiría la temperatura terrestre por el aumento

del CO<sub>2</sub> en la atmósfera”, advirtiendo acerca del calentamiento global, con una audiencia poco menos que nula. Como bien lo mencionan: “Hemos tenido que esperar al último momento, a un punto de no retorno, para plantear (que no es lo mismo que tomar) medidas. Cosas de la condición humana”.

Se puede apreciar que actualmente los científicos han desarrollado infinidad de modelos climáticos “para predecir la evolución del clima, y todos son herederos de los que los crearon: Manabe y Hansen, y en su propio decir “en la actualidad, las predicciones de los modelos desarrollados siguen vigentes en cuanto a aumento de la temperatura terrestre en función de las futuras variaciones en las concentraciones de dióxido de carbono” (1991).

A pesar de que se llevan años de hablar y discurrir acerca del problema, se puede verificar que las emisiones mundiales siguen superando cada vez los límites anteriores sin un aparente techo.

Según lo afirmado por *sg\_guardian* en *climatechange*, en 2019, se alcanzó la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera más alta en 3 millones de años.

“Los últimos cuatro años fueron los cuatro años más calurosos desde que se llevan registros, y las temperaturas invernales en el Ártico han aumentado en 3°C desde 1990. El nivel del mar está subiendo, los arrecifes de coral mueren y empezamos a ver repercusiones del cambio climático que pueden poner en peligro la salud mediante la contaminación atmosférica, las olas de calor y los riesgos para la seguridad alimentaria. Afortunadamente existe el ‘Acuerdo de París’, un marco normativo visionario y viable en el futuro, donde se plantean las bases de qué hacer exactamente para frenar las perturbaciones del clima e invertir sus efectos. Pero el acuerdo en sí es papel mojado si no va acompañado de medidas ambiciosas”. (<https://www.un.org/es/climatechange/sg-guardian-op-ed.shtml>, 2016).

Hace medio siglo, ni siquiera se sabía de estas concentraciones, y mucho menos que pudieran tener consecuencias en el clima terrestre. Fue

entonces cuando Syukuro Manabe (Japón, 1931) trató de desarrollar un modelo numérico para simular el comportamiento de la atmósfera. En Estados Unidos incorporó a su investigación el uso de computadoras para crear el primer modelo de circulación atmosférica global. El modelo que desarrolló tenía en cuenta elementos como el vapor de agua, los vientos o el transporte del calor en la atmósfera. El punto más resaltante consistió en introducir en el programa los gases de efecto invernadero. A finales de los años sesenta, Manabe, en su puesto como investigador en la agencia estadounidense de la Atmósfera y el Océano (NOAA), desarrolló su modelo y predijo que si la concentración de CO<sub>2</sub> se duplicaba, la temperatura global subiría dos grados. Era una predicción teórica basada en pocos datos, y que no podía ser puesta a prueba debido a la ausencia, por entonces, de un registro fiable de temperaturas a escala planetaria.

A finales de los 60, James Hansen, doctor en Física por la Universidad de Iowa, a partir del programa de ciencia espacial dirigido por James Van Allen, pionero en el estudio del campo magnético terrestre, que dio nacimiento a la teoría de los anillos de Van Allen, y por su formación en física, pudo concretar estancias como becario en la agencia espacial NASA, y viajar al departamento de Astronomía de la Universidad de Tokio donde, según cuenta, “se acercó a varios trabajos de Manabe”. En 1967, entró a trabajar en el Instituto Goddard para Estudios Espaciales, de la NASA, donde investigó atmósferas planetarias y, en particular, la atmósfera de Venus.

“Su trabajo contribuyó a establecer que **las altísimas temperaturas actuales en Venus se deben a un efecto invernadero exacerbado**. Hansen consideró que era mucho más importante estudiar el clima de nuestro propio planeta, que se estaba alterando, y desarrolló un modelo independiente al de Manabe. Su vaticinio fue que la temperatura terrestre aumentaría en cuatro grados centígrados. Por primera vez, incorporó datos globales de temperatura de la Tierra, gracias su nueva metodología para procesar la información de las estaciones meteorológicas disponibles, y

además **predijo los efectos del calentamiento sobre otros procesos**, como la circulación oceánica, la disminución del hielo en el Ártico o las sequías y las inundaciones” ([https://es.wikipedia.org/wiki/James\\_Hansen](https://es.wikipedia.org/wiki/James_Hansen))

Los pronósticos de Hansen “han resistido el paso del tiempo”, señala el acta del jurado, “los dos científicos cuantificaron los factores de los que depende la variación de las temperaturas en la superficie terrestre, y desarrollaron métodos de análisis que se han vuelto esenciales en el estudio de la evolución del clima”(1991). Manabe, que desde 2005 es **meteorólogo senior del Programa de Ciencias Atmosféricas y Oceánicas de la Universidad de Princeton** (Estados Unidos), ha destacado la importancia de la contribución de su colega: “Yo empecé antes a trabajar con modelos, pero Hansen fue el primero en usar estos modelos para hacer predicciones”. Hansen, director del Instituto Goddard para Estudios Espaciales entre 1981 y 2013 y actualmente **profesor adjunto del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia**, ha resaltado que Manabe “es líder mundial en modelos climáticos globales desde que empecé mi carrera”. Y apostilla con un dato que muestra la valía de sus contribuciones: “La primera conclusión importante de nuestro trabajo fue demostrar que el clima global es sensible a la acción humana”. (Ethic, 2011 – vanguardia de la sostenibilidad)

Desde hace algún tiempo se han presentado reportes de temperaturas hemisféricas (Norte y Sur) y “reportes globales de temperatura media del planeta, y el perfil de la tendencia global, es creciente, teniendo como sustento dos factores importantes: el primero, como fuente emisora de los gases de efecto invernadero (principalmente metano y CO<sub>2</sub>), como se observa en la gráfica del anexo 2. La CRUDATA ha desarrollado varias unidades de investigaciones climáticas en la Universidad de East Anglia, juntamente con el Centro Hadley de la oficina de encuentro del Reino Unido, orientadas a la superficie del mar, midiendo durante muchos años las variaciones mensuales y que permiten proyectar un incremento notable, a medida que transcurre el

tiempo. El segundo factor, es la actividad antrópica e industrial, como aportantes con los gases de efecto invernadero” The Climatic Research Unit (CRU).

Por otro lado, “la cantidad de emisiones que produce un vehículo automotor en funcionamiento depende de una serie de factores como por ejemplo el tipo y la calidad de combustible, la antigüedad del vehículo, su tecnología, el recorrido promedio que realiza, entre otros, y esto empeora aún más si se presenta un ambiente de congestión vehicular en donde las velocidades se reducen considerablemente y los vehículos permanecen un mayor tiempo en funcionamiento” (Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Vehiculares, 2007).

En enero del 2014 el Panel Gubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) publicó su último reporte concluyendo que “es evidente la influencia humana en el sistema climático. Esta influencia ha sido a través de la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que ha sido responsable de que en los últimos 30 años exista un calentamiento en la superficie terrestre. Este incremento de temperatura en la atmósfera también ha sido advertido en los océanos y a su vez ha resultado en un incremento del nivel del mar, observado en el siglo XX” (IPCC, 2013).

La herramienta más importante para explorar la posible evolución futura del clima son los Modelos Climáticos Globales, GCMs, (De Castro, 2007). Con ayuda de estos modelos se puede identificar la evolución de variables climáticas como la temperatura, precipitación, vientos y entre otros, a escala global y con escenarios basados en diferentes concentraciones de gases con efecto invernadero (GEI) que pudiera haber en el futuro. En esencia, “los modelos climáticos consisten en integraciones numéricas de ecuaciones que describen la dinámica atmosférica” (Wilks, 2006)

La fundación y progreso de las sociedades humanas, la acción de las fuerzas naturales, pueden cambiar notablemente y en regiones vastas el

estado de la superficie, la distribución del agua y los grandes movimientos del aire. Tales efectos son capaces de hacer variar, en el curso de muchos siglos, el grado promedio del calor; debido a que las expresiones analíticas contienen coeficientes que se relacionan con el estado de la superficie y el cual influye en gran medida a la temperatura. (Joseph Fourier, 1827)

Cuando se asume que el contenido de CO<sub>2</sub> de la atmósfera se duplica y el equilibrio termal estadístico se alcanza, el más realista de los modelos predicen el calentamiento de la superficie global de entre 2°C y 3.5°C, con mayores aumentos en las altas latitudes (IPCC, 1997). Hemos intentado pero no hemos podido encontrar cualquier efecto físico pasado por alto o subestimado que podría reducir los niveles de calentamiento global estimados actuales debido a la duplicación del CO<sub>2</sub> en la atmósfera en proporciones insignificantes o invertirlas en conjunto. (Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos, 1979).

Se sabe que “la continua emisión de GEI causará aún mayor calentamiento de la temperatura del aire lo que incrementará a su vez la TSM” (IPCC, 2014). “A medida que la reducción de las emisiones no sea mitigada, el escenario de debilitamiento de las surgencias costeras y de calentamiento generalizado parece tener más posibilidades de imponerse” (Dimitri, 2011).

### **2.1.2 Investigaciones nacionales**

Perú es uno de los países de la llamada Comunidad Andina, cuyo clima es muy complejo por su diversidad, desde selvas tropicales hasta desiertos, pasando por la cordillera de los Andes. Los Andes han sido objeto de múltiples estudios sobre el tema del cambio climático, los cuales han abundado en sus perspectivas, impactos y consecuencias de diferentes maneras. Así, podemos encontrar en la literatura los trabajos de De Lucía, Buytaert, Caldas, Hezog, entre otros. Para Perú existen varios precedentes relacionados con los escenarios de cambio climático hacia el futuro. Se encuentran entre ellos los trabajos de Marengo y Sanabria et al., las Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático. Igualmente se

encuentran las investigaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), sobre escenarios de Cambio Climático para Perú y para diferentes cuencas. En la literatura internacional se encuentran trabajos que intentan evaluar el funcionamiento de uno o varios modelos sobre una región determinada, lo cual suele hacerse utilizando, indistintamente, modelos globales o modelos regionales. En otras investigaciones se acoplan modelos en forma de “Ensamblés”, con el objetivo de construir escenarios climáticos para un país o una región determinada. Se pueden señalar en este caso los trabajos de Cabazos.

Para Perú a partir del modelo MIROC5, incorporado al proyecto CMIP5, que corresponde a la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos del Programa World Climate Research (WCRPs), el CMIP5 recoge un conjunto amplio de salidas modeladas que está disponible libremente a investigadores a través de un archivo de datos integrados y ha sido parte del quinto informe de evaluación del Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC). El proyecto incluye simulaciones a largo plazo del clima del siglo XX y proyecciones para el siglo XXI y más allá. Recoge además, simulaciones a corto plazo centradas en las últimas décadas y el futuro hasta el año 2035.

En el Perú, se utilizó el Modelo Climático Global MIROC5 para poner en perspectiva la evolución futura de las temperaturas y las precipitaciones para el sur y norte peruanos. Se tomaron datos de salida “histórica” del modelo, empleado por el Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC) en el Proyecto de Inter-comparación de Modelos Acoplados, fase cinco (CMIP5) y “se realizó una verificación para el tiempo presente, a partir de la cual se ajustaron sus proyecciones simuladas y se obtuvieron las tendencias futuras de las precipitaciones y la temperatura hacia 2030, 2070 y 2100” (Journal of climatic, dec. 2010). Como resultado se obtuvo un incremento de las precipitaciones hacia la zona norte del país (27,6 % hacia 2100), que incluye la zona costera y la región de Iquitos, al tiempo que puede esperarse una disminución hacia el sector sur. Para la temperatura se

prevé un incremento en todo el país, pero las tendencias más pronunciadas se esperan en el sector sur del territorio.

“Hacia el 2030 para el escenario de trayectorias representativa de concentración (RCP 8.5) se estiman incrementos de hasta 1,16 °C para Pucallpa y 0,22 °C para Piura. Se concluye que las precipitaciones se incrementarán en el norte y disminuirán en el sur, mientras las temperaturas se incrementarán en todo el país, pero más significativamente en el sector sur” (Journal of climatic, dec. 2010)

“La principal particularidad de la investigación radica en que el modelo MIROC5 pertenece al grupo de modelos incorporados al CMIP5 y en que, el hecho de ajustar las simulaciones del modelo a partir de los resultados de la verificación, lo cual puede calificarse como una especie de reducción de escala estadística, permite obtener resultados más precisos en las perspectivas hacia los años 2030, 2070 y 2100. se puede comprobar que los modelos climáticos globales son capaces de reproducir bastante bien la distribución a gran escala de las principales variables climáticas y simulan de forma muy aceptable, los grandes rasgos del cambio climático observado. Gran parte de ellos coinciden cuantitativamente con muchos aspectos del cambio climático futuro” (Aldo S. Moya Álvarez, 2015 – UNIVERSIDAD CONTINENTAL)

La Costa Norte del Perú, pese a estar ubicada en los trópicos, se caracteriza climáticamente como “desértica y con baja TSM cercana a su costa. Sin embargo, es representada por los GCMs como una zona lluviosa y con alta TSM cercana a la costa. Este problema ha perdurado a lo largo de los últimos veinte años”. (Mechoso et al. 1995, Yu y Mechoso 2000, Meehl et al. 2007, Dai 2006, Lin 2007, Randall et al. 2007).

Se le atribuye al parque automotor “ser responsable del 70 por ciento de la contaminación atmosférica en nuestro país, la cual repercute

directamente en la salud y bienestar de las personas”. (Dirección de Calidad Ambiental del Ministerio del Ambiente, 2013)

La estimación de emisiones para vehículos automotores en circulación que generan una serie de contaminantes (Dawldowsky, 2014) entre los que destacan, compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), material articulado (PTS, PM10 y PM2,5), plomo y especies reductoras de la visibilidad, “tienen impactos negativos sobre la salud pública y, según la Defensoría del Pueblo (2006), son los niños, enfermos, mujeres gestantes y ancianos de los sectores económicos más pobres y excluidos los más perjudicados”. (Inche, 2001)

La generación actual de modelos climáticos proyecta aumento en la lluvia promedio en la costa norte pero estos modelos presentan grandes sesgos positivos de la TSM y precipitaciones en la costa de Sudamérica. Considerando la relación no lineal de la precipitación y temperatura, es probable que estos sesgos sobreestimen la estimación de los cambios futuros de la precipitación en esta región.

Para evitar los errores sistemáticos de los modelos, se propuso un modelo empírico que relaciona la precipitación y la TSM mensual observada en la costa norte del Perú. En este modelo, la precipitación incrementa linealmente con la TSM sobre la Temperatura Crítica ( $T_{crit}$ ) y es cero, bajo esta. “El modelo empírico reproduce bien los resultados de la mayoría de los GCM (Modelos general de circulación) y cuando se evitan los sesgos correspondientes, se encuentra que el cambio de precipitación futuro varía en un rango de entre 0 y 60% en los últimos cincuenta años del siglo XXI. Esto se traduce en un incremento de 22mm en Tumbes y 8mm en Piura”. (Lucero Ramos Jáuregui – Universidad Agraria, 2014)

El Altiplano peruano (Departamento de Puno) es considerado una de las zonas más sensibles y perturbadas por la variabilidad climática con implicancias en las actividades del sector agropecuario, hidroeléctrico,

minero, etc. En el futuro por el posible cambio climático la vulnerabilidad y las condiciones de vida en general serían afectadas, principalmente la actividad agropecuaria que es el principal sustento de la población.

Tomando en cuenta estos aspectos se realizó una investigación que tenía como objetivo evaluar y tener una aproximación de los posibles cambios futuros en la precipitación y temperatura. Para esta evaluación del cambio climático futuro (período 2071 – 2100) en el Altiplano peruano se utilizaron tres modelos climáticos regionales (ETA CCS, HadRM3 y REgCM3) y se analizaron las variables de precipitación y temperatura. Inicialmente, se validó el clima presente (1961-1990) de estos tres modelos, en relación a la climatología observada y posteriormente se analizaron sus proyecciones futuras (2071-2100). Los resultados de la validación mostraron que el modelo HadRM3 fue el que presentó mejor desempeño en la simulación de la precipitación sobre el Altiplano Peruano, representando mejor la estacionalidad y el ciclo anual de la precipitación con menores errores en relación a los otros dos modelos (ETA CSS y REgCM3), y subestimando la media mensual en 2mm/día.

En la temperatura, los modelos ETA CSS y HadRM3, también simularon el ciclo anual y la estacionalidad, el primero relativamente mejor que el segundo, ambos subestimándola con errores de media mensual de 4°C y 5°C, respectivamente. “Los modelos HadRM3 y ETA CSS por ser los que más se aproximaron a lo observado, los posibles cambios climáticos futuros se basaron en los resultados de estos dos modelos. Entonces, en el futuro 2071 – 2100, la precipitación proyectada por el modelo HadRM3 en el escenario A2 (altas concentraciones de CO<sub>2</sub>) mostró incrementos de precipitación de hasta 2 mm/día principalmente en la época lluviosa (SON y DEF), y en el escenario moderado B2 (bajas concentraciones de CO<sub>2</sub>) similares al patrón actual. Por otro lado, la temperatura proyectada, obtenida de la media aritmética de los modelos HadRM3 y el ETA CSS simularon para los escenarios A2 y B2 incrementos entre 2°C a 4°C, más aún al norte de lago con incrementos de hasta 6°C” (Sanabria et al, 2009).

Esta información obtenida es una primera aproximación del cambio climático futuro en el Altiplano Peruano que puede ser utilizada para estudios de impacto de cambio climático en la agricultura, hidrología, etc... También está la perspectiva de entender mejor la variabilidad climática actual del Altiplano y proyectarlo hacia el futuro.

## 2.2 Bases teóricas

Se debe considerar que para la generación de energía mecánica, el motor de combustión interna ha ocupado y sigue ocupando un rol preponderante y éste funciona con reacciones de oxidación del petróleo y combustibles derivados, y como resultado de tales reacciones se identifican las emisiones contaminantes como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarburos no quemados (HC), y compuestos derivados conteniendo los aditivos y antidetonantes del tetraetil plomo, anhídrido sulfuroso y partículas sólidas.

En la unión europea desde hace más de 20 años se han establecido normas legales y regulaciones de modo que han dado varios pasos para controlar las emisiones, donde, en promedio los medios de locomoción son responsables del 25% de las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), así como del 87% del monóxido de carbono (CO) y del 66% de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), y los gases residuales de óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), que son aportantes para el calentamiento global, y además son causantes de problemas respiratorios y alergias entre los habitantes.

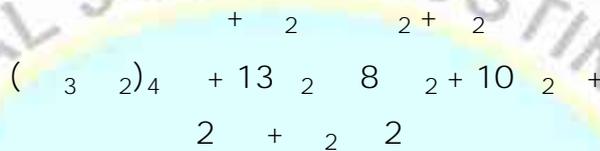
De acuerdo a estudios técnicos en el área de motores de combustión, se puede establecer que en el motor tipo gasolinero, con tipo de combustibles aditivados, serán monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas atomizadas de combustible, y compuestos plúmbicos; mientras que, si los motores utilizan diésel emiten partículas en forma de negro de humo (hollín), residuos de combustible no reaccionado, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso presente en el petróleo.

La reacción típica de los hidrocarburos es:

+

ó

Los componentes de los gases de escape, en combustiones reales, tienen una composición aproximada conformada por compuestos inofensivos (nitrógeno, oxígeno,  $O_2$ , hidrógeno y vapor de agua), y nocivos (monóxido de carbono, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno, plomo y compuestos de plomo, dióxidos de azufre, hollín, etc.).



La reacción del monóxido de carbono (CO) ocurre cuando la combustión es incompleta debido a la falta de oxígeno, quedando los átomos de carbono unidos a un átomo de oxígeno. Es un gas mortal para el ser humano y los seres vivos, porque al ser absorbidos en la respiración, son atrapados en la sangre y se adhieren a la hemoglobina con enlaces covalentes a mayor velocidad cinco veces mayor que el oxígeno, formando la carboxihemoglobina que es incapaz de transportar el oxígeno, generando anoxia. Solo se necesita 0.3 % en volumen para ocasionar la muerte.

Los hidrocarburos no reaccionados con el oxígeno, al ser respirados se tornan en tóxicos, irritantes y cancerígenos. En lo que corresponde a los óxidos de nitrógeno, (NO), éstos se forman en la cámara de combustión de los motores de ignición interna, debido a las altas temperaturas y presiones, luego al salir por el escape, reaccionan con el aire y forman el  $NO_2$ , que al aglutinarse con el NO constituyen el  $NO_x$ . Son gases de efectos irritantes que afectan el sistema respiratorio a nivel alveolar.

Con el óxido de azufre, ocurre una reacción semejante a la del nitrógeno, solo que en menor proporción, pues el azufre se encuentra como impureza en el hidrocarburo, y su emisión propicia las lluvias ácidas.

## **Contaminación por gasolinas:**

Una de las principales causas del aumento de las emisiones, concretamente, de los gases de efecto invernadero, responsables del avance del cambio climático, provienen de los gases que emiten los tubos de escape de los vehículos. El humo que emite un automóvil o bus, independientemente de que el carburante sea un diésel o una gasolina, es provocado por la combustión de la mezcla del aire y el combustible y ambos elementos son los que entran en la cámara de combustión en distintas proporciones que, entre otros factores, dependerán del tipo de motor.

La proporción de aire y combustible tiene influye en la emisión de los gases contaminantes, entre otros hidrocarburos, el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Para poder controlar la mezcla de aire y combustible en los coches mínimamente modernos se introduce un sensor que regule lo que entra en el motor, puesto que resulta imposible controlar debidamente esa proporción, por lo que su función primordial es analizar los gases de escape enviando información de forma constante a la gestión electrónica del motor para conseguir ajustar las proporciones de la mezcla en función de lo que demande el funcionamiento del vehículo.

Todos los vehículos, incluyendo a los coches menos contaminantes que utilizan combustible convencional contienen un alto porcentaje de componentes nocivos, como los mencionados. Actualmente, los fabricantes, como parte de su política ambiental, trabajan para optimizar las emisiones dañinas. Claro que aún no se ha avanzado mucho, pero es necesario insistir para que ese 2 por ciento de los gases perjudiciales, tengan control, y ello es prioritario en políticas ambientales.

Los gases de escape son una serie amenaza para la salud. El ozono troposférico, resultado de la reacción entre la luz solar, el dióxido de nitrógeno y los hidrocarburos emitidos por coches e industrias, resulta muy peligroso para la salud.

El ozono troposférico, a diferencia del que se encuentra en la estratosfera, daña la salud humana, la vegetación y los materiales. El ozono y sus sustancias

químicas precursoras viajan a través de las fronteras, tanto de América del Norte como las continentales.

Los seres humanos contribuyen a la formación de ozono troposférico sobre todo mediante la quema de combustibles fósiles en el transporte, la industria y las centrales eléctricas. La evaporación de combustibles líquidos y solventes se incorpora a la formación de ozono.

En ciertas zonas de América del Norte los niveles de ozono troposférico exceden las normas nacionales de protección de la salud humana. Desde 1990 las emisiones totales de sustancias precursoras del ozono han disminuido en América del Norte, pero la tendencia en la exposición humana en las tres naciones es mixta: refleja las diferencias en las condiciones de cada lugar y los métodos de registro.

Cuando lo aspiramos se reduce nuestra función pulmonar y aumentan los riesgos de padecer enfermedades respiratorias. A su vez, las partículas que entran en nuestro organismo a través de los pulmones pasan al torrente sanguíneo, con lo que ello supone para el agravamiento de enfermedades crónicas y cardiovasculares, entre otras muchas.

Los gases contaminantes que emiten los motores de gasolina son el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y dióxido de carbono o CO<sub>2</sub>, potente gas de efecto invernadero.

Adelantemos que, por lo general, los coches de gasolina contaminan menos que los de diésel, pero obviamente más que un coche híbrido o eléctrico.

Sin embargo, esto no siempre se cumple. Como suele ocurrir en todas partes, las excepciones existen y, como tales, confirman la regla. En este caso, como ejemplo citaremos la curiosa conclusión de un estudio de TÜV Nord, en el que se afirma que los motores gasolina modernos de inyección directa emitían hasta diez veces más partículas contaminantes que los diésel.

## Contaminación por diésel:

De acuerdo a los estudios del Ing. Víctor Mendoza (2016), “los principales contaminantes del motor diésel, los principales contaminantes que emite un motor diésel controlado electrónicamente, utilizando un combustible bajo en Azufre (S), son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el material particulado (PM). Estas emisiones son muy tóxicas y difíciles de disminuir o eliminar. También emite hidrocarburos no quemados (HC) y monóxido de carbono (CO) que se procesan en el catalizador de oxidación diésel (DOC). Las normas de emisiones regulan los máximos niveles admisibles de éstas sustancias tóxicas. (Ver Figura N° 5)

Las emisiones diésel están reguladas y estandarizadas por las normas EURO (en la Unión Europea), por la EPA (en USA), por PROCONVE (en Brasil), entre otros. La mayoría de los países Latinoamericanos han adoptado normativas que se basan en la EURO, por ser la de mayor desarrollo.

Una técnica para reducir los NO<sub>x</sub> es recircular a la admisión una porción de gases de escape por medio del sistema de recirculación parcial de gases de escape (EGR), tal como se estudió en un anterior artículo. El problema es que en un motor con EGR, los NO<sub>x</sub> y el PM tienen “conflictos químicos”. Si disminuyen los NO<sub>x</sub> con la gestión de EGR, es común que aumente el material particulado (PM). Por tal situación es indispensable implementar un sistema de tratamiento químico posterior a la combustión (post-tratamiento), con el objetivo de disminuir los niveles de emisión de los NO<sub>x</sub> sin alterar los niveles de los demás productos de la combustión.

La tecnología desarrollada para tal fin, reducir los NO<sub>x</sub>, es la reducción catalítica selectiva (SCR). Un tratamiento posterior de los gases de escape que utiliza un agente químico llamado fluido de escape diésel (DEF) conocido también como AdBlue, ARLA 32 o AUS 32, que libera amoníaco (NH<sub>3</sub>).

La técnica consiste en inyectar en el ducto de escape (controlado electrónicamente por medio de un módulo dedicado), delante de un catalizador reductor de NO<sub>x</sub>, un agente químico con base en una solución de agua desionizada / desmineralizada (H<sub>2</sub>O) y urea [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>] al 32,5% (en peso), llamada DEF.

El agente activo de la reacción es el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), que se obtiene de la disociación química (un compuesto complejo se separa en moléculas de menor tamaño) de la urea [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ] del DEF. Al inyectarse en la corriente de los gases de escape, el DEF se descompone formando amoníaco ( $\text{NH}_3$ ). Bajo condiciones adecuadas de temperatura, el hidrógeno (H) del amoníaco se recombina con el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) de los  $\text{NO}_x$ , dando por resultado vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ), emisiones inocuas para el medio ambiente y la salud.

Es de suma importancia para este proceso químico y sus positivos resultados, la composición del DEF. Este elemento es un líquido compuesto por 32,5% de urea de alta pureza y agua desionizada. El DEF y el proceso del sistema SCR son un desarrollo conjunto de la industria química, la petrolera y la automotriz, especialmente formulada para reducir los niveles de  $\text{NO}_x$  de los gases de escape de motores diésel y cumple con la norma de aseguramiento de la calidad ISO 22241-1.

### **Los Modelos climáticos**

Un modelo describe mediante un conjunto de funciones y relaciones matemáticas, y condiciones propias del sistema, un fenómeno o una realidad, a partir del cual se pueden obtener datos que predicen uno o varios aspectos de la evolución del mismo sistema en un determinado intervalo de acción.

Desde hace algunas décadas, se ha intentado explicar el comportamiento del clima, y en ese afán se crearon los modelos Ur, que estudiaron los fenómenos meteorológicos mediante el dividir a la atmósfera en capas y retículas tridimensionales, dando condiciones térmicas y de presiones simulando el comportamiento del sistema, lo que permite hacer predicciones a corto plazo, como se pudo probar experimentalmente. Las limitaciones de estos modelos han sido fundamentalmente de software y de limitaciones tecnológicas.

Los modelos vienen en diferentes formas, desde los que solo cubren una región particular del mundo o parte del sistema climático, hasta los actuales, que son los Global Circulation Models (GCM), que, adaptados a las posibilidades

computacionales actuales, pueden manejar data de alta complejidad, característica de los modelos ambientales, por cuanto el monitoreo ahora incorpora bases de datos, redes de satélites, redes de estaciones espaciales y de control remoto, de manera que muchos de las aplicaciones se encuentran en google maps, google earth online en tiempo real, y otras aplicaciones como Keyhole's EarthViewer 3D, que permiten el monitoreo y exploración de cualquier parte del mundo.

En cierta medida, el modelado climático es solo una extensión del pronóstico del tiempo, pero se centra en los cambios a lo largo de décadas en lugar de horas. De hecho, el Met Office, Hadley Centre del Reino Unido utiliza el "Modelo Unificado" como base para ambas tareas.

A pesar de todo el desarrollo, las limitaciones persisten para la visualización a mediano y largo plazo de los fenómenos climáticos, por lo que se hace necesario establecer las 'tendencias' en base a la simulación, y acercarla a la realidad actual.

### **El Modelo Climático de Manabe**

Entre 1980 y 1990, en la universidad de Princeton, Nueva Jersey, fue desarrollado el Modelo Climático de Manabe, y sirve de base para muchos modelos actuales, trabajos asociados al estudio del cambio climático, hasta aproximadamente el año 2000 y en las primeras fases del CMIP (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados).

Los climatólogos Syukuro Manabe y James Hansen han sido premiados por la Fundación BBVA por sus aportaciones a los modelos para predecir el calentamiento global debido al incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera y su impacto en la temperatura terrestre. Los modelos actuales se basan en los que Manabe y Hansen desarrollaron hace décadas.

El modelo está basado en documentación recopilada sobre alteraciones atmosféricas debidas a factores diversos, principalmente, a emisiones de CO<sub>2</sub>, proveniente de varias fuentes (océanos, volcanes, emisiones industriales, entre otros, los cuales son compilados, procesados computacionalmente, con códigos de

adaptados para supercomputadoras Cray, y con los datos de entrada se obtienen gráficos y proyecciones del comportamiento atmosférico. La documentación para el océano (MOM1) está disponible en otros lugares.

En la actualidad, el código ha sido adaptado para ejecutarse en máquinas similares a una PC utilizando los compiladores Intel. Algunas pruebas se realizaron con otros compiladores disponibles (por ejemplo, GNU). El modelo provisto es un modelo de atmósfera y océano, y se basa en las corrientes marinas (movimiento de las masas del océano, los cambios de temperatura entre ellas, y los cambios atmosféricos resultantes de las evaporaciones y gases desprendidos tanto por el mar, como por las emisiones antrópicas, y de la naturaleza. La resolución de la atmósfera se describe normalmente como un R30. La red de transformación de la atmósfera es de 96 (este-oeste) por 80 (norte-sur). La cuadrícula oceánica es de 192 por 80 y está dispuesta de modo que 2 cajas de cuadrícula oceánica TS (trazador) se superponen a 1 caja de cuadrícula atmosférica. Las parametrizaciones físicas son muy simples y fueron desarrolladas principalmente por Manabe y sus compañeros de trabajo en la década de 1970 y 1980 para la atmósfera y por Bryan y sus compañeros de trabajo para el océano. No hay variación diurna de la radiación.

A partir del modelo de Manabe, han surgido cientos de investigaciones, como es Manabe et al. 1991 – Manabe, Syukuro, Ronald J Stouffer, Michael J Spelman y Kirk Bryan, 1991; y en modelos de atmósfera oceánica acoplada a cambios graduales de CO<sub>2</sub> atmosférico, sobre todo, aquellos relacionados con el estado transiente debido a diferencial de temperatura, que genera diferentes concentraciones del gas, como se ve a continuación:

Este estudio investiga la respuesta de un modelo climático a un aumento o disminución gradual del dióxido de carbono atmosférico. El modelo es un modelo de circulación general del sistema de superficie acoplada atmósfera-océano-tierra con geografía global y variación estacional del aislamiento. Para compensar el sesgo del modelo acoplado hacia la instalación en un estado poco realista, los flujos de calor y agua en la interfaz océano-atmósfera se ajustan por cantidades que varían según la estación y la geografía, pero que no cambian de un año a otro.

Partiendo de un clima cuasi-equilibrio, se realizan tres integraciones numéricas de tiempo del modelo acoplado con una concentración de dióxido de carbono atmosférico que aumenta gradualmente, es constante y disminuye gradualmente. Se observa que la respuesta simulada de la temperatura de la superficie del mar es muy lenta en el norte Atlántico Norte y Océano Circumpolar del Hemisferio Sur, donde la mezcla vertical de agua penetra muy profundamente. Sin embargo, en la mayor parte del hemisferio norte y las latitudes bajas del hemisferio sur, la distribución del cambio en la temperatura del aire superficial del modelo al momento de duplicar (o reducir a la mitad) el dióxido de carbono atmosférico se asemeja a la respuesta de equilibrio de una mezcla atmosférica duplicación del modelo oceánico a CO<sub>2</sub> (o reducción a la mitad). Por ejemplo, el aumento de la temperatura media anual del aire en la superficie en respuesta al aumento gradual del dióxido de carbono atmosférico aumenta con las latitudes en el hemisferio norte y es mayor en los continentes que en los océanos. Cuando la respuesta dependiente del tiempo de los océanos modelo al aumento de El dióxido de carbono atmosférico se compara con la respuesta correspondiente al CO<sub>2</sub>, la reducción a una velocidad idéntica, la penetración de la anomalía del frío en el último caso es significativamente más profunda que la de la anomalía cálida en el primer caso. La falta de simetría en la profundidad de penetración de una anomalía térmica entre los dos casos está asociada con la diferencia en la estabilidad estática, que se debe principalmente al cambio en la distribución vertical de la salinidad en latitudes altas y cambios de temperatura en las latitudes medias y bajas. A pesar de la diferencia en la profundidad de penetración y, en consecuencia, la inercia térmica efectiva de los océanos entre los dos experimentos, la respuesta dependiente del tiempo de la temperatura media global de la superficie del aire en el experimento de reducción de CO<sub>2</sub> es similar en magnitud a la respuesta correspondiente en el crecimiento de CO<sub>2</sub> experimental. En el primer experimento con un clima más frío, la nieve y el hielo marino con albedo de alta superficie cubren un área mucho más grande, lo que mejora su efecto de retroalimentación positiva sobre la temperatura del aire superficial. Por otro lado, el enfriamiento de la superficie se reduce debido a la mayor inercia térmica efectiva de los océanos. Debido a la compensación entre estos dos efectos, la magnitud de la respuesta de la temperatura del aire en la superficie resultó ser similar entre los dos experimentos. (Manabe et al, 1991).

**El modelo climático de Lorenz:**

Existe una dependencia de estas variaciones con las alteraciones de las temperaturas oceánicas por efectos de las corrientes marinas y las emisiones de CO<sub>2</sub>, que permiten utilizar las ecuaciones del modelo de Lorenz para vincularlas en las mediciones realizadas por IMARPE.

A partir de los años 60, debido a las alteraciones climáticas y el incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, muchos científicos se abocaron al modelamiento del clima.

El modelo de Lorenz, corresponde a un sistema caótico de convección atmosférica, constituyendo un típico problema de valor inicial. El sistema ecuacional es el siguiente:

$$\dot{x} = \sigma(y - x) \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{y} = rx - y - yz \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{z} = xy - bz \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

x = razón de rotación del sistema

y = gradiente de temperatura

z = desviación de la temperatura

$\sigma$  = N° de Prandtl ([viscosidad cinemática]/ [conductividad térmica])

r = diferencia de temperatura entre la base y el tope del sistema

b = razón entre la longitud y altura del sistema

Los parámetros utilizados por Lorenz fueron:  $\sigma = 10$ ,  $r = 28$  y  $b = 8/3$ , que tomó en cuenta el lugar de experimentación. Y, las condiciones iniciales fueron:  $x(0) = 3$ ;  $y(0) = 3$ ;  $z(0) = 20$ .

Lorenz pudo demostrar que ínfimas variaciones en las condiciones de entrada, comparadas a una pequeña borrasca local, se convertían, en breve tiempo, en enormes salidas de su ordenador. Este fenómeno es conocido como “efecto

mariposa” (según el cual, si hoy agita sus alas una pequeña mariposa en Pekín, puede modificar el clima de Nueva York el mes que viene).

**Concepto termodinámico:**

Por principio, es un deseo de los científicos, que los modelos cumplan con los principios físicos fundamentales, como la primera ley de la termodinámica (ley de conservación de la energía), que establece que “en un sistema cerrado, la energía no se puede perder o crear, solo cambiar de una forma a otra”.

Otra es la Ley de Stefan – Boltzmann, a partir de la cual se ha demostrado que efecto invernadero natural mantiene la superficie de la Tierra alrededor de 33°C. La ley de Stefan-Boltzmann establece que “toda materia que no se encuentra a una temperatura infinita emite dos radiaciones térmicas. Estas radiaciones se originan a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie más baja por la que fluyen, la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m<sup>2</sup>) se denomina la potencia emisiva superficial *E*. Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por esta ley:

$$E = \sigma \cdot T_e^4 \dots\dots\dots (4)$$

Donde *T<sub>e</sub>* es la temperatura efectiva, es decir la temperatura absoluta de la superficie y sigma es la constante de Stefan – Boltzmann, dada por:

$\sigma = \frac{15}{4} \cdot \frac{10^{-16}}{3} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^{-4}$ , dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro. ( [https://astronomia.fandom.com/wiki/Ley\\_de\\_Stefan-Boltzmann](https://astronomia.fandom.com/wiki/Ley_de_Stefan-Boltzmann))

Luego, tenemos la ecuación de Claussius – Clapeiron, que caracteriza la relación entre la temperatura del aire y su presión máxima de vapor de agua.

$$\ln \left( \frac{e_s}{e_{s0}} \right) = \frac{L_v}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \dots\dots\dots (5)$$

Donde:

- , es la pendiente de la curva
- , es el calor latente o entalpía del cambio de fase
- , es el volumen

Uno de los problemas derivados del cambio climático es la conservación de la energía dentro de la tropósfera. Se entiende, para la explicación que se necesita en esta investigación, que la forma de energía es como energía calórica, que está en la misma categoría que otras formas de energía, sin embargo, la energía calorífica es única y fija restricciones a los procesos ambientales, lo que constituye la base para la segunda ley de la termodinámica.

Se puede considerar que, por ejemplo, la energía cósmica que llega a la superficie de la Tierra, va a impactar y libera calor, y por la concentración de gases como el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, entre otros, en la tropósfera, determinan una barrera infranqueable para los rayos que refractan, produciendo un aumento de la actividad energética en las capas inferiores de la atmósfera, es decir, aumento de la entropía. Y el proceso de degradación debería ocurrir, en parte, con los fenómenos meteorológicos y precipitaciones pluviales, pero la velocidad de interacción no es suficientemente acelerada, por lo que la relación entre gases emitidos y entropía, están ligados directamente.

Las ecuaciones más importantes son las de movimiento de fluidos de Navier – Stokes, que capturan la velocidad, la presión, la temperatura y la densidad de los gases en la atmósfera y el agua en el océano.

#### **Modelo de Navier & Stokes:**

El sistema climático de la región costera de la Región Lima, tiene un desarrollo turbulento de difusión, y la ecuación de Navier & Stokes, se puede escribir a continuación:

- a. Ecuación de continuidad (ley de conservación):

En los fluidos se cumple el principio de conservación (la materia no se crea ni se destruye, y solo es posible la interconversión de materia – energía), con independencia del fluido o la naturaleza que actúen sobre el mismo. Se puede expresar en su forma diferencial como:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \dots\dots\dots(6)$$

La ecuación el primer término de la ecuación (1) expresa la variación de la masa por unidad de volumen, el segundo término expresa la variación de la velocidad del flujo de materia a la entrada y salida del sistema.

$\rho$  es la densidad del fluido,  $\mathbf{v}$  es la velocidad de flujo en un punto del espacio  $(x, y, z)$ , a un instante

b. Cantidad de movimiento:

La cantidad de movimiento o momento, se expresa vectorialmente, de acuerdo a la segunda Ley de Newton, ( $F=m*a$ , que significa que “la masa multiplicada por la aceleración de las partículas del fluido es proporcional a las fuerzas que actúan sobre ella”), que señala que la variación de la cantidad de movimiento por unidad de tiempo de una masa de fluido, es la resultante de todas las fuerzas que actúen sobre ella.

Tomando una unidad diferencial de volumen  $dV$  dentro de una superficie cerrada  $S$ , las interacciones entre el fluido y la unidad de volumen afectan a todo el sistema por igual. Las fuerzas de volumen actuantes pueden ser gravitatorias, eléctricas y magnéticas. Las fuerzas de superficie (presión, viscosidad o fricción), dependen de la interacción del fluido en  $S$  con el fluido de todo el sistema, por lo que la ecuación es:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \rho \mathbf{v} \dots\dots\dots(7)$$

Corresponde a las fuerzas de volumen y  $\tau$  es el tensor de las tensiones respecto a las fuerzas de superficie;  $\frac{d\mathbf{v}}{dt}$  es la variación de la velocidad de una partícula en el espacio. Esta forma de describir los fluidos macroscópicamente se conoce como la *descripción lagrangiana*. Además, otra forma de describir el comportamiento de los fluidos es la *descripción euleriana*, que corresponde a un tratamiento discreto, mediante el concepto de derivada sustancial, y que expresa los cambios de la partícula a lo largo del campo fluido:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \dots\dots\dots(8)$$

Reemplazando (3) en (2) se tendrá la ecuación que permite calcular el tensor que representa los esfuerzos normales producidos por las fuerzas externas sobre la superficie del sistema:

$$[\mathbf{T} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{T}] = \mathbf{T} \times \dots\dots\dots(9)$$

y el otro tensor que corresponde a los esfuerzos viscosos:

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} \dots\dots\dots(10)$$

Dónde:  $p$  es la presión del fluido,  $\mathbf{I}$  es el tensor unitario, y  $\boldsymbol{\tau}$  es el tensor de tensiones de esfuerzos viscosos, en relación con la cantidad de movimiento

c. La difusión:

La ecuación de la segunda ley de Fick, permite predecir la forma en que la difusión es causante de que la concentración cambie con el tiempo:

$$\frac{dc}{dt} = D \nabla^2 c \dots\dots\dots(11)$$

Donde:

es el coeficiente de difusión en dimensiones de  $L^2 t^{-1}$ , por ejemplo (—)

$\rho = \rho(x, t)$  Es una función que depende de la localización  $x$  y el tiempo  $t$ , es una variable de estado (temperatura, concentración de gases, etc.). Se expresa en unidades de concentración (—)

$t$ : es el tiempo (S)

En su forma unidimensional:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\rho) = 0 \quad (12)$$

$\mathbf{F}$ : Es el vector de las cantidades que se conservan, por ejemplo:

$$\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$$

$\mathbf{F}$  es la función vectorial de los flujos.

$$\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$$

El fluido atmósfera y sus diferentes componentes (partículas, sustancias y moléculas de diversas propiedades), tienen un comportamiento reológico que puede ser abordado con las ecuaciones de Navier & Stokes, y para efectos de simplificación, se va a considerar el aire atmosférico como un fluido newtoniano, que para graficar la relación entre la fuerza ejercida en un eje de coordenadas y la velocidad de deformación del fluido en el otro eje daría una recta. Pero, para efectos de simulación, el comportamiento se considera turbulento, lo que nos permite una aproximación al comportamiento real, resultando las gráficas no lineales, mayormente de segundo orden

Desde el punto de vista de la turbulencia, existen muchos avances en la resolución del sistema de ecuaciones de Navier & Stokes, entre ellos el rotacional. Las variables a tomar en cuenta son:

1. Valores constantes: la densidad, la viscosidad.
2. Las velocidades de desplazamiento en cada dirección ( $v_x, v_y, v_z$ )
3. Las derivadas parciales de estas velocidades respecto a cada dirección y respecto al tiempo.
4. Sus derivadas de segundo orden

El sistema en consideración tiene un comportamiento de régimen turbulento a diferentes escalas espaciales, y la aparición de estructuras giratorias en el seno del campo vectorial demanda el uso de operadores vectoriales (el operador rotacional), y en el contexto de la mecánica de los fluidos, éste operador desarrolla un campo de velocidades conocido como vorticidad, y corresponde a un vector bidimensional:

$$\left( \begin{matrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{matrix} \right) = \nabla \times \left( \begin{matrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{matrix} \right) = \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}, \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}, \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \dots\dots\dots (13)$$

Se considera que el aire es técnicamente compresible, es de movimiento lento, y por lo tanto se lo trata como incompresible para simplificar las ecuaciones:

$$\left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \dots (14)$$

$$\left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \left[ \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \dots (15)$$

$$\left[ \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] = - \frac{\partial \omega_z}{\partial z} + \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \dots (16)$$

Las ecuaciones de Navier – Stokes para fluido “incompresible” en tres dimensiones (x, y, z). No obstante, este set de ecuaciones diferenciales parciales es

tan complejo que no existe una solución exacta conocida para ellas (salvo casos simplificados), por lo que se abordan numéricamente, para obtener soluciones aproximadas.

Con las asunciones siguientes:

Propiedades físicas del fluido constantes (asumiendo densidad constante, viscosidad del fluido constante), donde las temperaturas estarán en un rango en que las propiedades físicas del aire no varíen notablemente.

Comportamiento laminar del aire, es decir con un número de Reynolds menor a 2100.

Considerar que el fluido es newtoniano, en el cual la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación no sea constante.

Para efectos de simulación, limitando notablemente sistema se adimensionaliza para obtener el modelo simplificado bidimensional que es más asequible.

Por lo tanto, las ecuaciones usadas para simulaciones son:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

Es con esta asunción, que se considera que el vector velocidad tiene solamente dos dimensiones:  $\mathbf{u} = (u, v)$ , y que la variable presión ( $p$ ) es desechada, al considerarse el sistema incompresible. Por lo que las dos ecuaciones, de “momento” y de “continuidad” o “de balance de masa”, respectivamente, en el límite de “flujo reptante” o “flujo de Stokes” (despreciando el término convectivo), las ecuaciones resultantes son exactamente iguales a las de elasticidad lineal incompresible isotrópica (reemplazando el vector velocidad por el de desplazamiento y la viscosidad por el módulo de elasticidad). En consecuencia, con esta restricción, sin efecto alguno de la presión, el estado del fluido (atmósfera) solo

estará condicionado por la velocidad la presión, que pasa a ser el multiplicador de Lagrange asociado. Y, en el estado estacionario, las ecuaciones dejan de ser elípticas al convertirse el sistema en incompresible. Esto se debe a que la ecuación de continuidad no tiene derivadas segundas.

En cuanto a las condiciones de contorno, considerando las asumidas por Cavada y García (2015), para el movimiento del fluido viscoso (laminar), se asumirá la condición de *no-deslizamiento* (no slip), aplicable a superficies de sólidos y asumiendo que la velocidad relativa entre la superficie del sólido y el fluido es infinitamente pequeña ( $\approx 0$ ); además, las condiciones de contorno tipo *Dirichlet* permiten asumir que el valor de frontera  $= f$  aplicable al flujo entrante, y por lo tanto las condiciones de velocidad de entrada, conocidas.; y, finalmente, las condiciones de contorno *Newman* aportarán información indirecta, por lo que no habrán cambios en la componente de velocidad a lo largo del desplazamiento.

Como se trata de un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, lo que se debe hacer primeramente es desacoplarlas, luego discretizarlas y resolverlas.

Para lo primero, se separa la presión de la velocidad, para obtener ecuaciones equivalentes a las de Navier – Stokes y continuidad, donde las incógnitas ( $u, v, w, p$ ) se pueden resolver por separado.

Para lo segundo, se transformas las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (en el tiempo y en el espacio)

Para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas ya discretizadas y desacopladas, se aplican los métodos numéricos.

Se utiliza el esquema de diferencias centrales, temporal:

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^{n-1}}{2\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (18)$$

Agrupando términos en ( ):

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} = -\left(\frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x}\right) - \left(\frac{v_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta y}\right) \dots (19)$$

Finalmente, utilizando el método de Euler backward para el gradiente de presión:

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} = -\left(\frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x}\right) - \left(\frac{v_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta y}\right) - \left(\frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{i,j}^n}{\Delta x}\right) \dots (20)$$

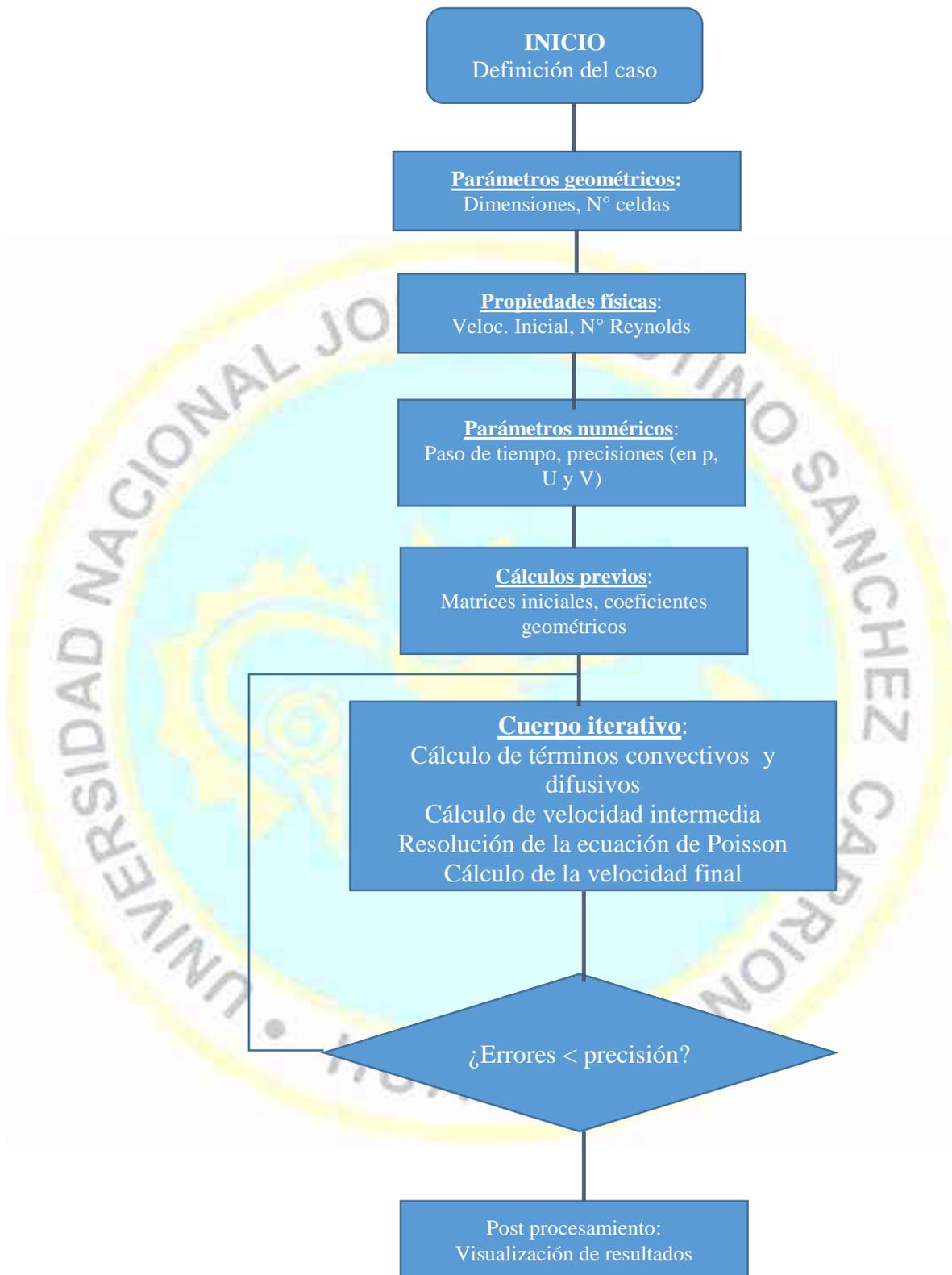
Manipulando adecuadamente, se llega a la expresión para determinar la velocidad real (  $u_{i,j}^{n+1}$  ):

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n - \Delta t \left[ \left(\frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x}\right) + \left(\frac{v_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta y}\right) + \left(\frac{p_{i,j}^{n+1} - p_{i,j}^n}{\Delta x}\right) \right] \dots (21)$$

Aplicando el operador divergencia y el criterio de incompresibilidad, se obtiene la ecuación de Poisson discretizada, concluyendo en:

$$\nabla^2 p_{i,j}^{n+1} = -\left(\frac{u_{i+1,j}^{n+1} - u_{i-1,j}^{n+1}}{2\Delta x}\right) - \left(\frac{v_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta y}\right) \dots (22)$$

Diagrama de velocidad del fluido:



Fuente: Elaboración propia.

Límites máximos permisibles y estándares de calidad ambiental para vehículos motorizados

De acuerdo a la normatividad vigente, Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM, quedaron establecidos los Límites Máximos Permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores, (Ver en Anexos – Tabla 15).

Este referente técnico es muy importante, desde el punto de vista de la necesidad de controlar la contaminación, sin embargo, es evidente que, aun cuando se cumplieren todos los requisitos de la norma, se van a tener siempre emisiones contaminantes originados por los motores de combustión interna.

Los volúmenes apreciados en la norma, permiten, asimismo, cuantificar las emisiones gaseosas, y ello es un indicador esencial para el calentamiento global del planeta.

### **2.3 Bases filosóficas**

Con algunas consideraciones epistemológicas de la presente investigación se intenta responder algún aspecto, tratando de fundamentar el ¿por qué?, y ¿para qué? Principalmente, en su importancia transcendental para la salud del planeta, contribuyendo con algunos argumentos que van a dar elementos que explican la importancia de aplicar los modelos matemáticos, para el control de las emisiones.

En primer término, se define el ámbito de desarrollo de la investigación, en una región geográfica que continuamente sufre el impacto de las emisiones gaseosas desprendidas por los vehículos, y de ello se desprende la importancia conceptual de abordar para contribuir con una propuesta de integración entre un desplazamiento vehicular amigable, tomando cuenta de las recomendaciones que del presente trabajo de investigación se desprenden.

Siempre existirá una relación entre la actividad antrópica y la naturaleza, solo que es necesario tener visión holística, y el manejo responsable de todo tipo de actividades industriales, caso contrario, la especie humana corre un inminente peligro.

Otro aspecto epistemológicamente radica en la necesidad de adoptar algunos aspectos (los llamados TIPS), que complementan la necesidad de cambiar algunos patrones culturales para impulsar y dar paso a nuevos estilos de vida.

## 2.4 Definición de términos básicos

### a) CAMBIO CLIMÁTICO

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se define como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.

### b) IPCC

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1988 para que facilitara evaluaciones integrales del estado de los conocimientos científicos, técnicos y socioeconómicos sobre el cambio climático, sus causas, posibles repercusiones y estrategias de respuesta.

### c) ECUACIONES NAVIER – STOKES

Las ecuaciones de Navier-Stokes reciben su nombre de Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.

### d) EFECTO INVERNADERO

El efecto invernadero es un proceso en el que la radiación térmica emitida por la superficie planetaria es absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI) atmosféricos y es re irradiada en todas las direcciones. Como parte de esta radiación es devuelta hacia la superficie y la atmósfera inferior, ello resulta en un

incremento de la temperatura superficial media respecto a lo que habría en ausencia de los GEI.

e) GEI

Los gases de efecto invernadero, conocidos como GEI, son aquellos gases que se acumulan en la atmósfera terrestre y que son capaces de absorber la radiación infrarroja del Sol, aumentando y reteniendo el calor en la atmósfera. Es decir, son aquellos gases presentes en la atmósfera que dan lugar al efecto invernadero. Los gases de invernadero más importantes son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) clorofluorocarbonos (CFC) y ozono (O<sub>3</sub>), y el Hexafloruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Éste es el GEI con mayor potencial de calentamiento: 22 frente al CO<sub>2</sub> que es 1. Pero el más conocido es el CO<sub>2</sub>, porque su contribución en el efecto invernadero es mayor que la del resto cuando nos ceñimos a gases emitidos directamente por la actividad humana.

f) VAPOR DE AGUA

Es un gas que se obtiene por evaporación o ebullición del agua líquida o por sublimación del hielo. Es inodoro e incoloro. El vapor de agua es responsable de la humedad ambiental. En ciertas condiciones, a alta concentración, parte del agua que está en forma de vapor se condensa constituyendo gotas de agua líquida en suspensión, y así se forma la niebla o, a alturas mayores sobre el suelo, nubes.

g) DIÓXIDO DE CARBONO (CO<sub>2</sub>)

Es un gas incoloro y vital para la vida en la Tierra. Este compuesto químico se encuentra en la naturaleza y está compuesto de un átomo de carbono unido con enlaces covalentes dobles a dos átomos de oxígeno.

El dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero, que absorbe y emite radiación infrarroja en sus dos frecuencias de vibración activas en infrarrojos. Este proceso hace que el dióxido de carbono caliente la superficie y la atmósfera inferior y enfríe la atmósfera superior. Una gran mayoría de climatólogos coinciden en que el aumento en la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, y por lo tanto en el efecto invernadero inducido por CO<sub>2</sub>, es la principal razón del aumento de la temperatura media global desde mediados del siglo XX.

#### h) METANO (CH<sub>4</sub>)

El metano no es tóxico. Su principal peligro para la salud son las quemaduras que puede provocar si entra en ignición. Es altamente inflamable y puede formar mezclas explosivas con el aire. El metano reacciona violentamente con agentes oxidantes, halógenos y algunos compuestos halogenados. El metano también es asfixiante y puede desplazar al oxígeno en un espacio cerrado.

El metano es un gas de efecto invernadero relativamente potente que contribuye al calentamiento global del planeta Tierra ya que tiene un potencial de calentamiento global de 23. Esto significa que en una medida de tiempo de 100 años cada kg de CH<sub>4</sub> calienta la Tierra 23 veces más que la misma masa de CO<sub>2</sub>, sin embargo hay aproximadamente 220 veces más dióxido de carbono en la atmósfera de la Tierra que metano por lo que el metano contribuye de manera menos importante al efecto invernadero.

#### i) ÓXIDO DE NITRÓGENO (NO<sub>x</sub>)

El término óxidos de nitrógeno se aplica a varios compuestos químicos binarios gaseosos formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno. El proceso de formación más habitual de estos compuestos inorgánicos es la combustión a altas temperaturas, proceso en el cual habitualmente el aire es el comburente. Los óxidos también indican varios compuestos cuya combinación viene del oxígeno mezclado con el nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno son usados en la producción de ácido nítrico, lacas, tinturas y otros productos químicos, como combustibles para cohetes, en la nitrificación de compuestos químicos orgánicos y en la manufactura de explosivos. Los motores que más los producen son los diésel y los motores de mezcla pobre.

#### j) CLOROFLUOROCARBONOS

Los clorofluorocarbonos (CFC) son derivados de los hidrocarburos saturados obtenidos mediante la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de flúor y/o cloro principalmente.

Debido a su alta estabilidad fisicoquímica y su nula toxicidad, han sido muy usados como gases refrigerantes, agentes extintores y propelentes para aerosoles. Fueron introducidos a principios de la década de los años 1930 por ingenieros de General Motors, para sustituir materiales peligrosos como el dióxido de azufre y el amoníaco.

#### k) OZONO

El ozono (O<sub>3</sub>) es una sustancia cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno, formada al disociarse los dos átomos que componen el gas de oxígeno. Cada átomo de oxígeno liberado se une a otra molécula de oxígeno gaseoso (O<sub>2</sub>), formando moléculas de ozono (O<sub>3</sub>). Actúa en la atmósfera como depurador del aire y sobre todo como filtro de los rayos ultravioletas procedentes del Sol. Sin ese filtro la existencia de vida en la Tierra sería completamente imposible; de ahí la gran importancia de la llamada “capa de ozono”. El ozono en su forma natural es un gas de color azul y de un olor picante muy característico. Se licúa a  $-111,9^{\circ}\text{C}$  y se solidifica a  $-193^{\circ}\text{C}$ . El ozono en altas concentraciones y por períodos prolongados tiene efectos perjudiciales para la salud. Más allá de especulaciones (muchas de ellas de carácter publicitario) acerca de efectos beneficiosos a bajas concentraciones, la Organización Mundial de la Salud plantea que no hay ninguna evidencia de un umbral por debajo del cual no exista perjuicio.

#### l) GASES DE COMBUSTIÓN

Muy a menudo el gas de combustión se refiere al gas de escape de la combustión producida en las plantas de energía. Su composición depende de lo que se está quemado, pero generalmente consistirá en su mayoría de nitrógeno (normalmente más de dos tercios) derivado del aire de combustión, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y vapor de agua, así como exceso de oxígeno (también derivado del aire de combustión). Contiene, además, un pequeño porcentaje de un número de contaminantes como partículas de hollín, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre.

m) PARQUE AUTOMOTOR

El parque automotor está constituido por todos los vehículos que circulan por las vías de la ciudad, entre los que encontramos automóviles particulares, vehículos de transporte público y vehículos de transporte de carga. Su incidencia ambiental está representada en la contribución de contaminantes por tipo de combustible y la circularidad vehicular.

Actualmente estas emisiones se han convertido en un problema ha alcanzado grandes dimensiones, en parte debido al incremento descontrolado de la motorización y las escasos mecanismos de control.

n) REGIÓN LIMA

La región de Lima representa cerca del 3% del territorio peruano por su territorio de 35.892,49 km<sup>2</sup>. Tiene una población de 944 mil habitantes. Está ubicada en la costa central del país.

Limita con el Departamento de Áncash por el norte, con el Departamento de Huánuco por el noreste, con el Departamento de Ica por el sur, con los de Junín y Pasco por el este, con el Departamento de Huancavelica por el sureste y con la Provincia Constitucional del Callao por el oeste. Sus coordenadas son 10° 16' 18" de latitud sur y se extiende entre los meridianos 76° 54' 16" y 77° 53' 2" de longitud oeste. Alberga 10 provincias y 171 distritos.

En la Región Lima hay 47 mil 650 empresas inscritas en la administración tributaria.

De cada mil, 969 son micro empresas, la mayoría de ellas se dedica al Comercio y reparación de vehículos automotores y motocicletas, seguida de actividades de Alojamiento y de Servicio de comidas.

o) TSM

Temperatura superficial del mar.

p) SENAMHI

Actualmente el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI, es un organismo público ejecutor adscrito al Ministerio del Ambiente. Se inició como un Organismo Público Descentralizado del Sector Defensa creado por D.L.N° 17532 del 25 de Marzo de 1969, regulada por la Ley N° 24031 del 14 de Diciembre de 1984, su modificatoria aprobada por Ley N° 27188 del 25 de Octubre de 1999, el Reglamento de su Ley establecida con D.S.N° 005-85-AE del 26 de Julio de 1985.

El SENAMHI tiene como propósito generar y proveer información y conocimiento meteorológico, hidrológico y climático de manera confiable, oportuna y accesible en beneficio de la sociedad peruana.

Con el ánimo de difundir información confiable y de calidad, el SENAMHI opera, controla, organiza y mantiene la Red Nacional de más de 900 Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas de conformidad con las normas técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Los meteorólogos y climatólogos trabajan en el estudio y pronóstico de eventos extremos de corto plazo como lluvias y vientos intensos, bajas temperaturas vinculadas a heladas y friajes; así como estudiar y prever el clima, en particular los eventos asociados a la variabilidad climática como el Fenómeno El Niño; así como brindar información para la toma de decisiones respecto de los escenarios vinculados al cambio climático.

Otro rubro importante en esta especialidad es el estudio del potencial país para el desarrollo de energías renovables; el monitoreo de la contaminación de fondo a efectos de evaluar el cambio de la composición de la atmósfera y su relación con los gases de efecto invernadero, la radiación ultravioleta y su relación con la capa de ozono, como la vigilancia y monitoreo de los efectos de las condiciones atmosféricas sobre la calidad del aire.

q) IMARPE

El Instituto del Mar del Perú – IMARPE es un Organismo Técnico Especializado del Ministerio de la Producción, orientado a la investigación científica, así como al estudio y conocimiento del mar peruano y sus recursos, para asesorar al Estado en la toma de decisiones respecto al uso racional de los recursos pesqueros y la conservación del ambiente marino, contribuyendo activamente con el desarrollo del país. Debido a la gran riqueza de nuestro mar peruano y su ecosistema, el IMARPE cuenta con cinco Direcciones Generales que contemplan diferentes líneas de investigación:

Dirección General de Investigaciones de Recursos Pelágicos

Dirección General de Investigaciones de Recursos Demersales y Litorales

Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático

Dirección General de Investigaciones en Acuicultura

Dirección General de Investigaciones en Hidroacústicos, Sensoramiento Remoto y Artes de Pesca.

La Dirección de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático (DGIOCC): Es el órgano responsable del IMARPE de desarrollar las investigaciones científicas de los procesos y condiciones oceanográficas, físicas, químicas, biológicas y geológicas del mar peruano en el marco de la variabilidad climática, así como estudios del impacto del cambio climático de los ecosistemas marinos y marino-costeros. Los investigadores de la DGIOCC aplican herramientas observacionales, experimentales, de modelado y de predicción. Así, la DGIOCC contribuye con brindar asesoría técnica veraz y oportuna para coadyuvar a la sostenibilidad de los recursos pesqueros y a la de los ecosistemas. La DGIOCC se compone de tres áreas funcionales de investigación.

## 2.5 Hipótesis de investigación

### 2.5.1 Hipótesis general

El modelamiento permite establecer la relación de las emisiones gaseosas del parque automotor con el cambio climático en la Región Lima, año 2017.

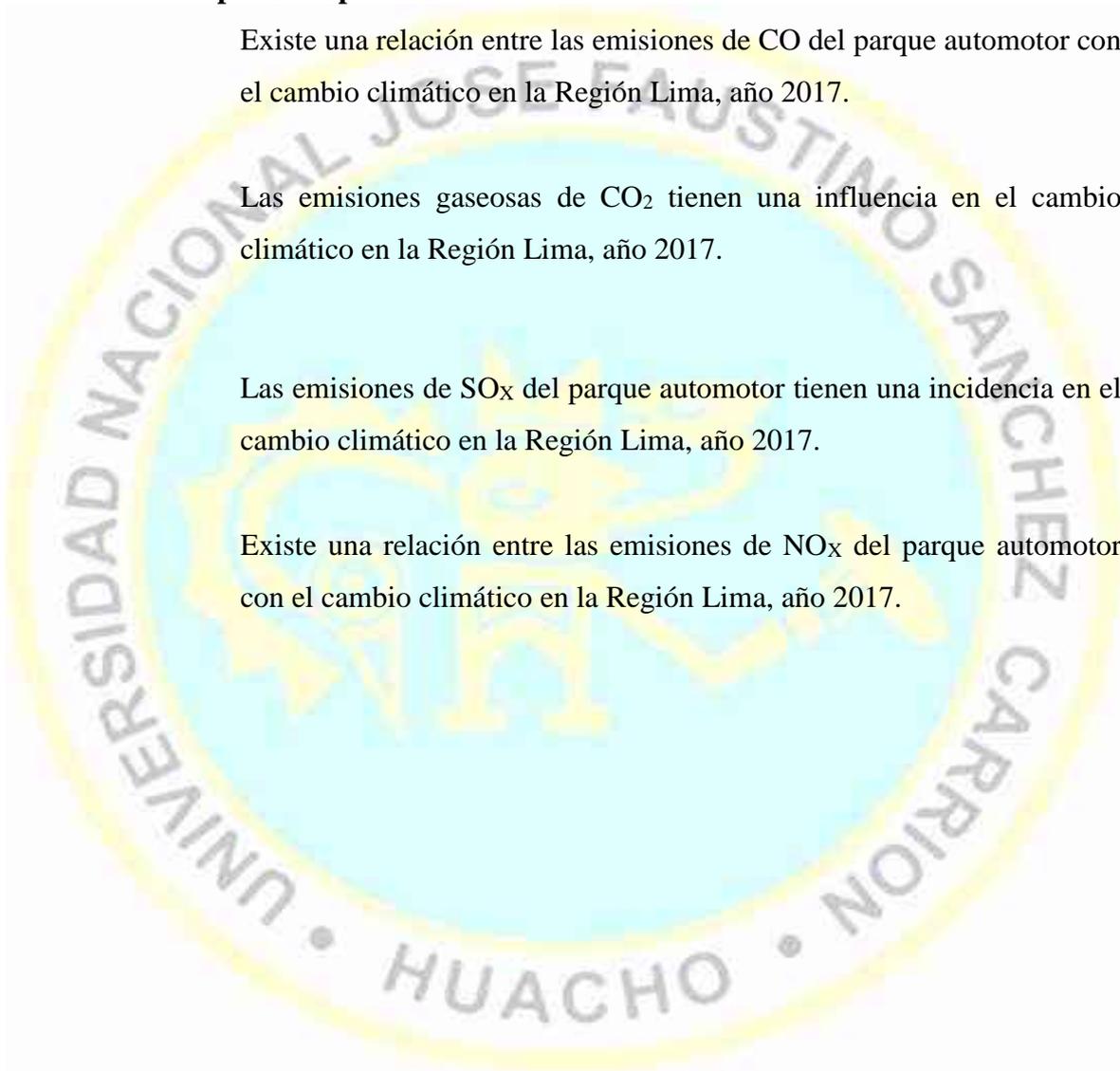
### 2.5.2 Hipótesis específicas

Existe una relación entre las emisiones de CO del parque automotor con el cambio climático en la Región Lima, año 2017.

Las emisiones gaseosas de CO<sub>2</sub> tienen una influencia en el cambio climático en la Región Lima, año 2017.

Las emisiones de SO<sub>x</sub> del parque automotor tienen una incidencia en el cambio climático en la Región Lima, año 2017.

Existe una relación entre las emisiones de NO<sub>x</sub> del parque automotor con el cambio climático en la Región Lima, año 2017.



## 2.6 Operacionalización de las variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Técnicas e instrumentos
<b>V. Independiente (X)</b> Modelamiento del cambio climático	Es el efecto de las variables climáticas, CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> , en el clima en la Región Lima, 2017	Son las actividades orientadas a determinar los impactos ambientales de las emisiones de CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> , en la Región Lima, 2017.	Centro de Lima. San Isidro La Victoria	°C	<b>Técnicas:</b> Modelamiento. <b>Instrumentos:</b> Programación computarizada.
<b>V. Dependiente (Y)</b> Emisiones de gases del parque automotor en la Región Lima	Proceso que consiste en obtener información de las concentraciones de CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> , en la Región Lima, 2017.	Conjunto de actividades orientadas a determinar las concentraciones de las emisiones de CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> , en la región Lima, 2017	Concentración de CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> , en ppm	Ppm mg/100 ml	<b>Técnicas:</b> Análisis documental <b>Instrumentos:</b> Termómetro Aerómetro Sensores de CO, CO <sub>2</sub> , SO <sub>x</sub> y NO <sub>x</sub> ,

**FUENTE:** Elaboración propia.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Diseño metodológico**

El tipo de investigación utilizado fue:

- Descriptivo (realidad problemática)
- Longitudinal (se analizan cambios en el tiempo, abarcando un período de 5 años, de 2013 a 2017, en las variables CO, CO<sub>2</sub>, SOX y NOX, lo que permitió determinar las relaciones entre estas y el cambio climático).

#### **3.2 Población y muestra**

##### **3.2.1 Población**

Las poblaciones constituyeron todos los datos obtenidos por el MINAM y diferentes instituciones que están vinculadas con las mediciones y regulaciones ambientales durante los años 2013 a 2017.

##### **3.2.2 Muestra**

Los datos para la Región Lima, donde se incorporaron los datos obtenidos por IMARPE y DININCRI, durante el año 2017.

#### **3.3 Técnicas de recolección de datos**

Fueron los análisis documentales de los datos estadísticos de IMARPE, MINAM y DININCRI, durante los años 2013 a 2017.

#### **3.4 Técnicas para el procesamiento de la información.**

Se utilizó el método estadístico de regresión lineal mediante el método de mínimos cuadrados. El software utilizado para el manejo de datos es SPSS y el MatLab (versión prueba) para simulación del modelo climático.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

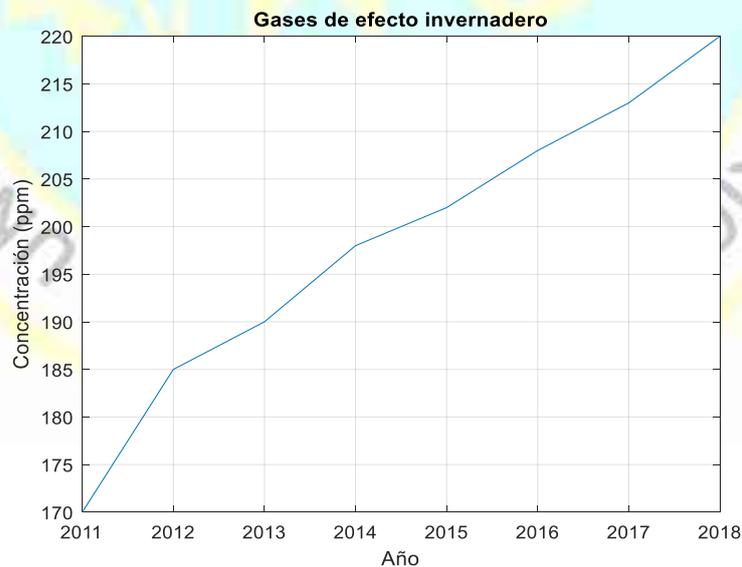
La cantidad de gases de efecto invernadero producidos en Lima y la Región Lima, se muestran a continuación, y posteriormente se les dio el tratamiento estadístico, mediante regresión lineal, usando mínimos cuadrados, para determinar la tendencia. La importancia de la secuencia posterior a los datos conocidos, permitió efectuar las proyecciones, utilizando el modelo climático basado en las ecuaciones de Navier – Stokes.

#### 4.1 Análisis de resultados

**Tabla 1: Gases de efecto invernadero**

Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Concentración (ppm)	170	185	190	198	202	208	213	220

**Fuente:** Ministerio del Ambiente, DGSA



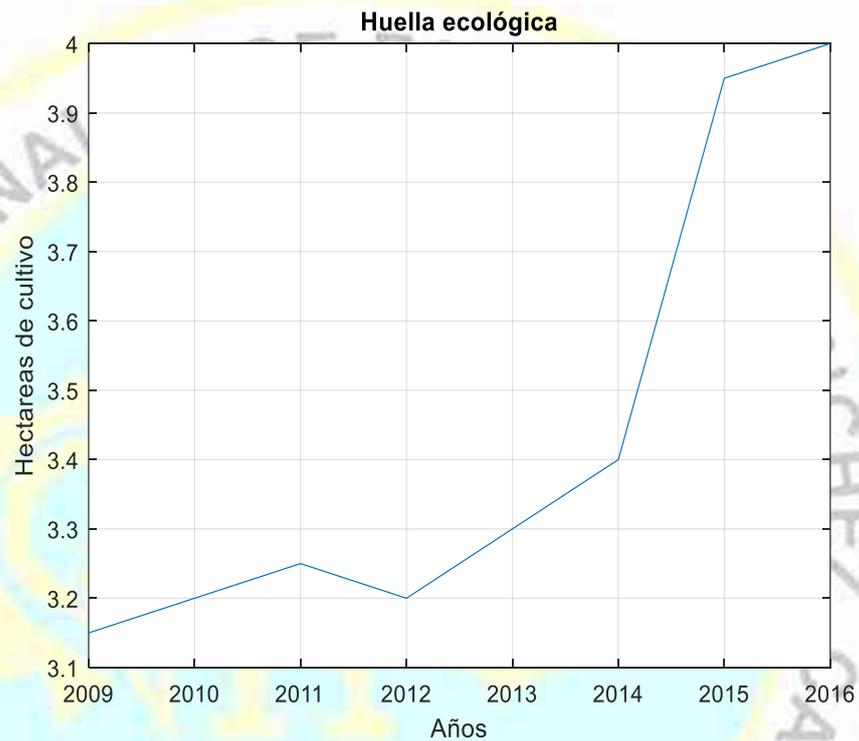
**Fuente:** Elaboración propia del autor

Se puede apreciar que la tendencia es hacia el incremento de la concentración de los GEI, tendencia que se ha mantenido durante todo el intervalo de tiempo.

**Tabla 2: Huella ecológica (Lima)**

Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Hectáreas	3.15	3.20	3.25	3.20	3.30	3.40	3.95	4.00

**Fuente:** Ministerio del Ambiente, DGSA



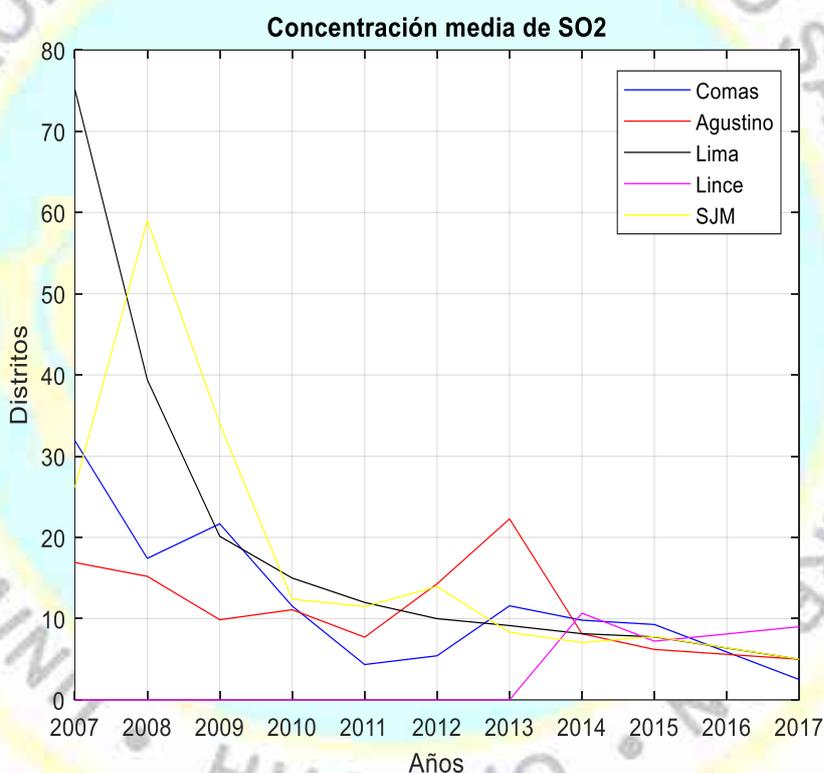
**Fuente:** Elaboración propia del autor

En el caso de la demanda de área de cultivo, es notoria la tendencia al incremento acelerado, lo cual es un indicador de un mayor incremento de las concentraciones de los contaminantes que obligan a exigir mayor área de cultivo.

**Tabla 3: Concentración media de SO<sub>2</sub> (microgramos por metro cúbico)**

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2017
Comas	31.92	17.42	21.68	11.55	4.35	5.43	11.58	9.81	9.28	2.5
El Agustino	16.91	15.21	9.87	11.1	7.72	14.29	22.28	8.14	6.21	5
Lima	75.18	39.41	20.14	15	12	10	9.15	8.15	7.76	5
Lince	00	00	00	00	00	00	00	10.68	7.23	9.01
San Juan de Miraflores	26.17	59.00	34.01	12.4	11.49	13.95	8.32	7.06	7.8	5

Fuente: Ministerio del Ambiente, DGSA.



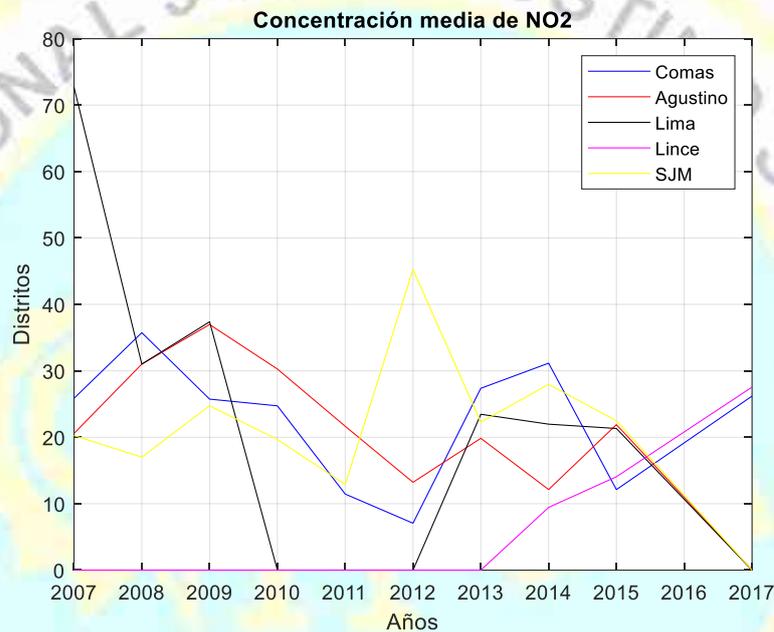
Fuente: Elaboración propia del autor

Es posible apreciar una tendencia general a disminuir en las concentraciones de SO<sub>2</sub>, lo cual es debida a los cambios en las formulaciones de los antidetonantes de las gasolinas y combustibles, y ello constituye un avance en el uso de combustibles, en cuanto a ése factor. Por otro lado, se explican los cambios debido a que la norma legal así lo exige.

**Tabla 4: Concentración media de NO<sub>2</sub> (microgramos por metro cúbico)**

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2017
Comas	25.86	35.74	25.74	24.73	11.45	7.06	27.37	31.15	12.12	26.2
El Agustino	20.57	31.01	36.97	30.27	21.66	13.22	19.84	12.13	21.90	
Lima	72.7	73.01	37.38				23.46	21.97	21.32	
Lince								9.44	14.06	27.55
San Juan de Miraflores	20.26	17	24.75	19.67	12.9	45.26	22.27	27.96	22.47	

**Fuente:** Ministerio del Ambiente, DGSA



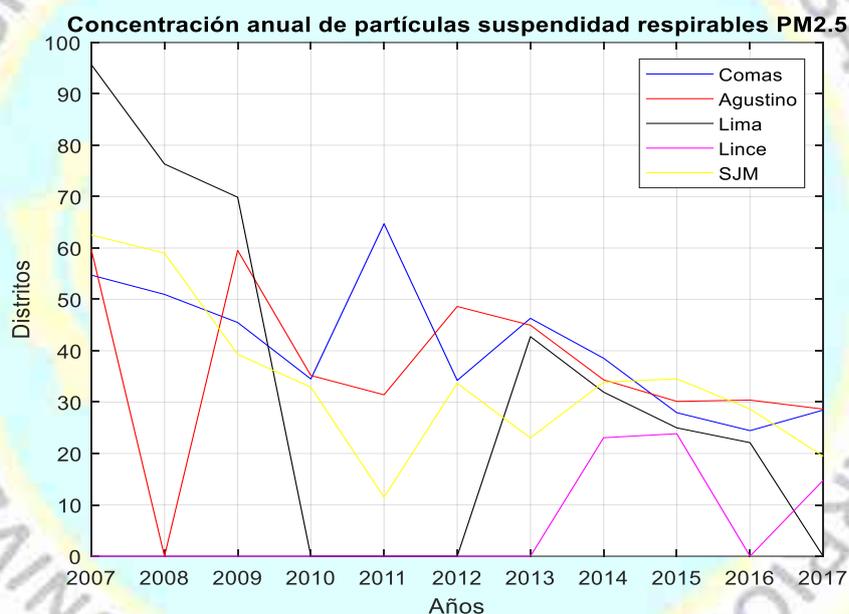
**Fuente:** Elaboración propia del autor

Los NO<sub>x</sub> en el tiempo muestran una tendencia oscilante, excepto en el centro de Lima, lo cual se explica, principalmente, por las regulaciones municipales para la circulación de cierto tipo de vehículos, lo cual en ese caso particular va hacia la depresión de los gases derivados de la combustión.

**Tabla 5: Concentración anual de partículas suspendidas respirables PM2, 5 (microgramos por metro cúbico).**

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Comas	54.72	50.97	45.5	34.55	64.72	34.23	46.31	38.54	27.94	24.45	28.45
El Agustino	59.72		59.54	35.18	31.43	48.62	44.97	34.34	30.14	30.4	28.64
Lima	95.71	76.35	69.88				42.74	31.94	24.99	22.11	
Lince								23.07	23.85		14.78
San Juan de Miraflores	62.54	59	39.3	32.91	11.49	33.66	23.03	33.89	34.54	28.67	19.46

**Fuente:** Ministerio del Ambiente, DGSA



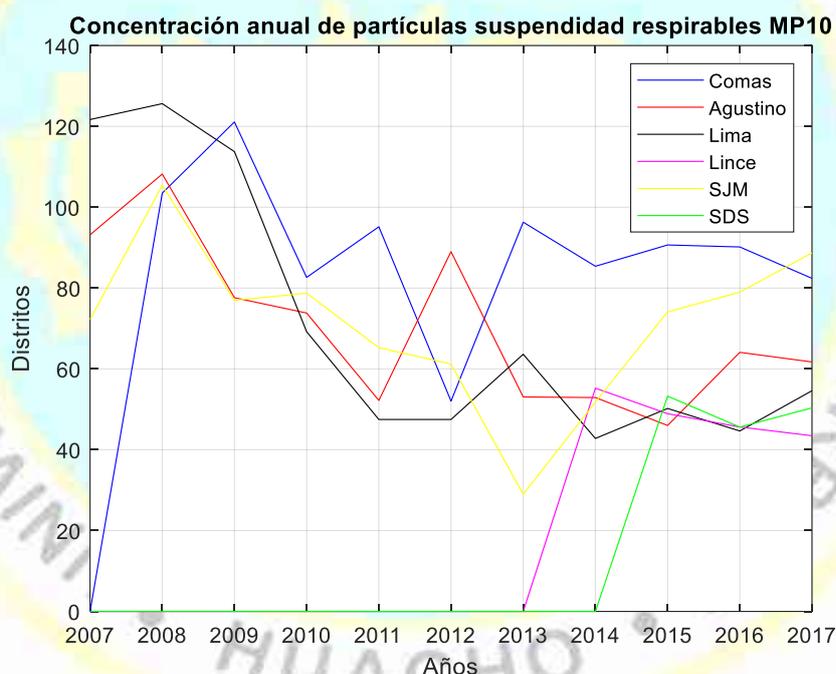
**Fuente:** Elaboración propia del autor

Las PM2.5 muestran una tendencia al decaimiento, y los puntos de inflexión (caso de centro de Lima, El Agustino y Lince), es por la ausencia de información disponible (una limitación de la data).

**Tabla 6: Concentración media anual de partículas suspendidas respirables MP10 (microgramos por metro cúbico)**

Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Comas		103.49	121.1	82.64	95.16	52.04	96.3	85.39	90.66	90.17	82.4
El Agustino	93.18	108.2	77.62	73.82	52.2	89.01	53.06	52.91	46.01	64.1	61.72
Lima	127.69	125.62	113.75	69.2	47.49	47.49	63.62	42.79	50.21	44.64	54.6
Lince								55.23	48.91	45.63	43.46
San Juan de Miraflores	72.25	105.42	76.98	78.73	65.25	61.2	28.98	51.8	74.1	78.98	88.7
Santiago de Surco									53.26	45.6	50.36

Fuente: Ministerio del Ambiente, DGSA



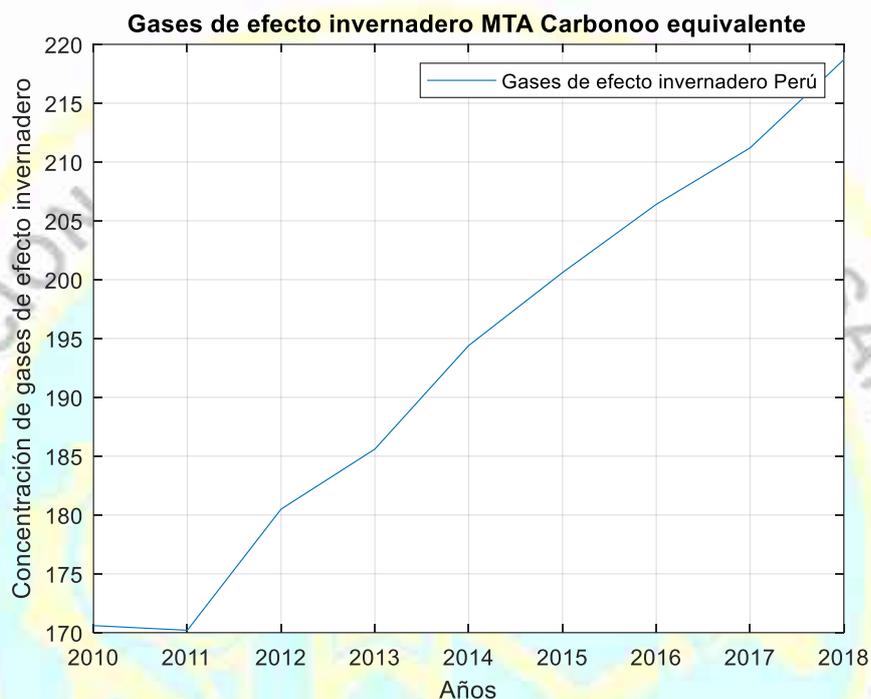
Fuente: Elaboración propia del autor

Las partículas MP10 se conservan relativamente en concentraciones elevadas, debido al incremento de las unidades de motores a diésel, constituyendo una de las principales fuentes emisoras de tales partículas

**Tabla 7: Gases de efecto invernadero (millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente)**

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Perú	170.6	170.2	180.5	185.6	194.4	200.6	206.4	211.2	218.7

**Fuente:** Ministerio del Ambiente, DGSA



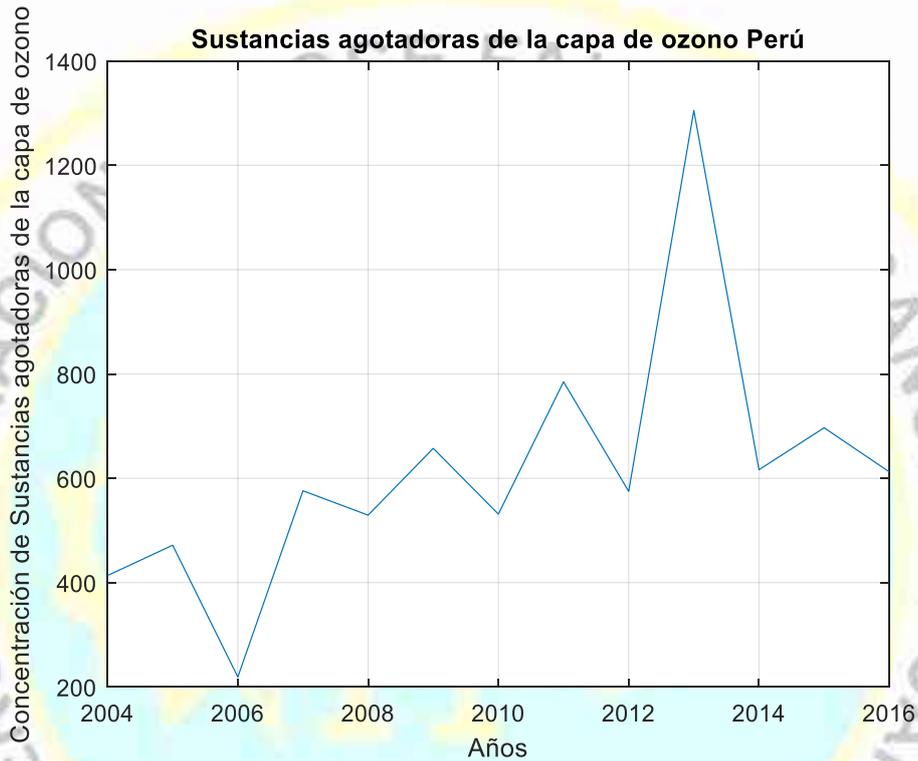
**Fuente:** Propia del autor

De acuerdo a la información, reflejada en esta gráfica, la tendencia es hacia el incremento de los gases de efecto invernadero, donde es evidente que la producción ha ido de 170 millones de toneladas de dióxido de carbono en el año 2011, hasta casi 220 millones de toneladas de la misma sustancia en el año 2018, o sea una diferencia de 50 millones de toneladas más, con una tasa de crecimiento de aproximadamente 6000 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por año.

**Tabla 8: Sustancias agotadoras de la capa de ozono**

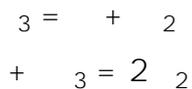
Año	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Perú	413.43	471.67	218.98	576	529.3	657.36	531.13	784.92	574.82	1305.27	616.38	696.85	612.3

**Fuente:** Ministerio del Ambiente, DGSA



**Fuente:** Propia del autor

Los derivados de los CFC (cloro fluoro carbonados), los OCF (órgano cloro fluorados) y los aerosoles, principalmente, componentes de los solventes orgánicos, gasolinas, y otros derivados, van a producir reacciones con el O<sub>3</sub> ubicado en la capa exterior a la ionósfera, degradándolo a oxígeno, por una reacción en cadena al liberarse un átomo de oxígeno:



Los CFC y derivados, actúan como catalizadores negativos producen destrucción de los radicales para la propagación de las cadenas de O<sub>3</sub>

Entonces, se observa una tendencia creciente de estos gases, componentes de los gases de combustión.

**Tabla 9: Vehículos por cada mil habitantes (unidades por mil habitantes)**

Año	Lima
2000	100
2001	101.44
2002	102.91
2003	103.83
2004	103.96
2005	104.51
2006	106.07
2007	109.65
2008	117.09
2009	123.19
2010	131.16
2011	139.15
2012	184.54
2013	157.01
2014	164.18
2015	170.23
2016	175.48

**Fuente:** Ministerio del Ambiente – MINAM



**Fuente:** Propia del autor

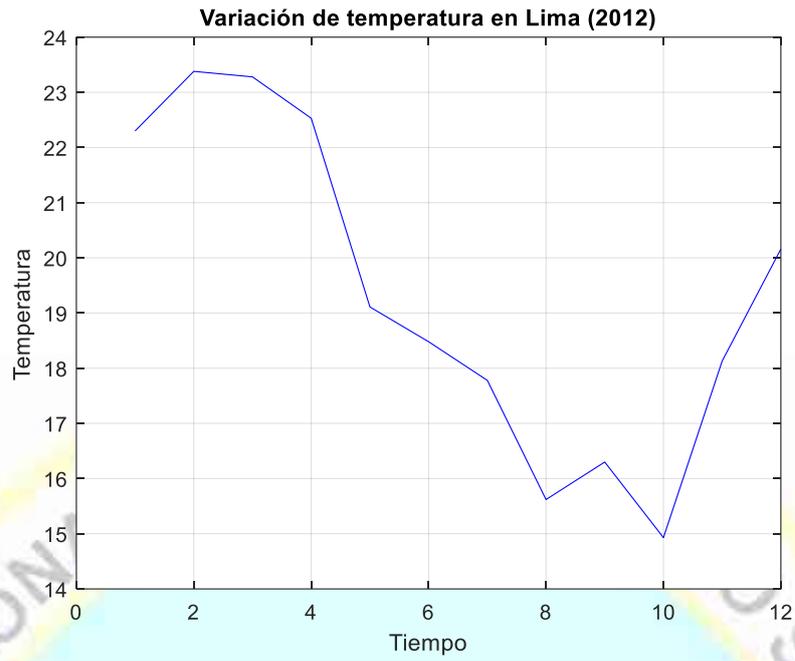
El incremento del parque automotor garantiza el aumento de las emisiones propias de la combustión de los vehículos, lo cual constituye parte del problema.

**Tabla 10: Temperaturas en el tiempo (años 2012 – 2019):**

Datos hidrometeorológicos Lima (Estación de Jesús María, Estación Hipólito Unanue - PUCP y Estación Villa María del Triunfo)

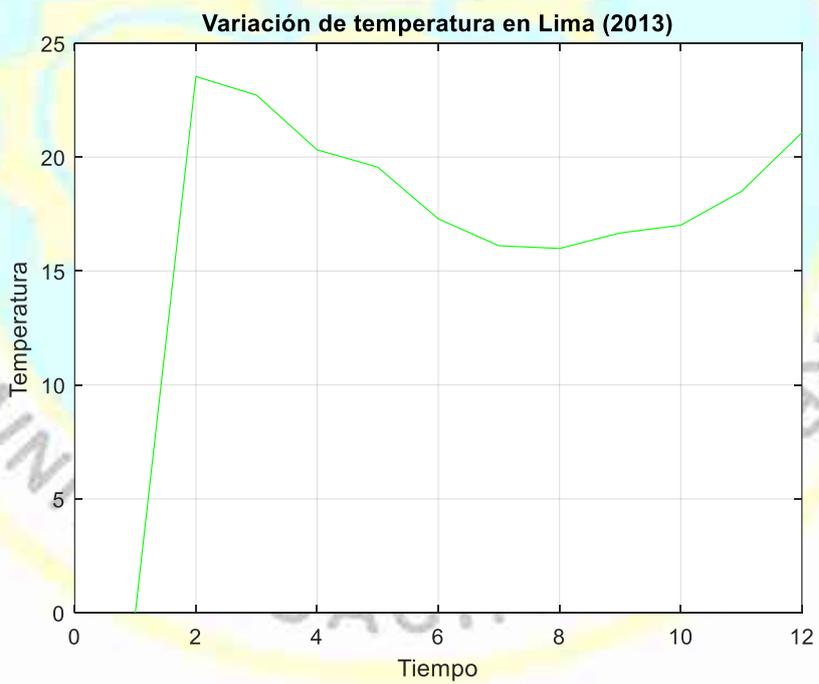
Mes	Temperatura (°C)							
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	22.30	0	21.73	23.28	0	0	21.4171	0
Febrero	23.38	23.54	23.82	22.22	0	25.1597	23.5600	22.5415
Marzo	23.28	22.72	20.77	22.89	0	24.9680	22.3343	20.2718
Abril	22.53	20.32	21.37	20.60	0	22.2515	21.6101	15.6103
Mayo	19.11	19.56	20.83	20.21	0	19.6253	19.3474	15.12.90
Junio	18.48	17.29	19.88	19.11	0	16.5086	18.6500	14.6478
Julio	17.78	16.11	16.88	15.86	0	15.8397	18.1282	14.1665
Agosto	15.62	15.99	17.21	15.65	0	14.7089	17.6106	14.0326
Septiembre	16.30	16.67	17.78	15.82	0	14.6962	18.4904	
Octubre	14.93	17.01	17.96	18.54	16.4817	16.1639	19.8427	
Noviembre	18.13	18.49	18.93	18.74	18.3454	16.7883	21.4927	
Diciembre	20.16	21.07	20.79	19.96	20.1929	19.3928	23.1910	

**Fuente:** SENAMHI / DRD - Ref: <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>  
Los resultados por año del cambio de la temperatura son los siguientes:



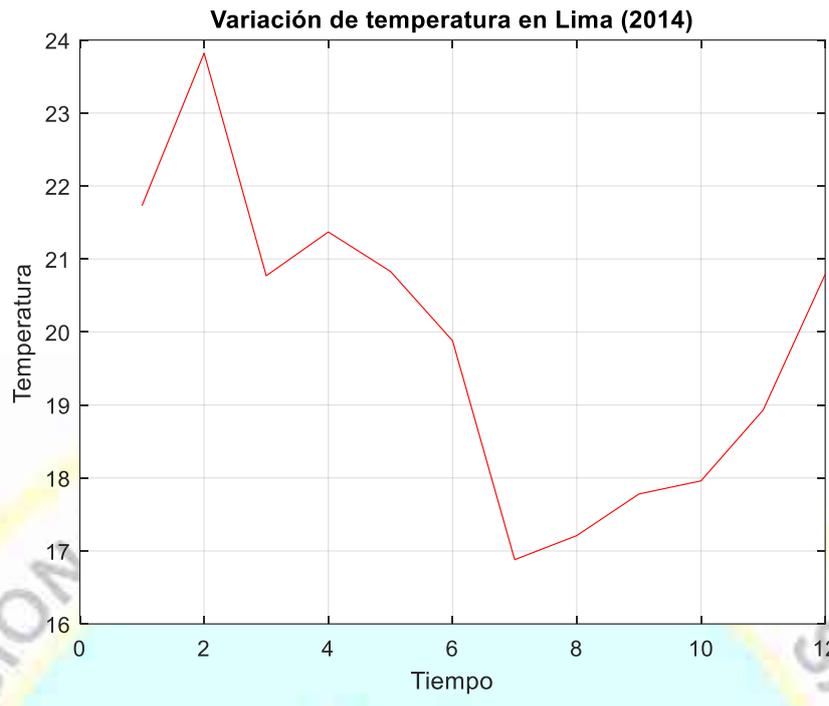
**Fuente:** Elaboración propia del autor

La variación de la temperatura en el año 2012



**Fuente:** Elaboración propia del autor

Variación de la temperatura en el año 2013



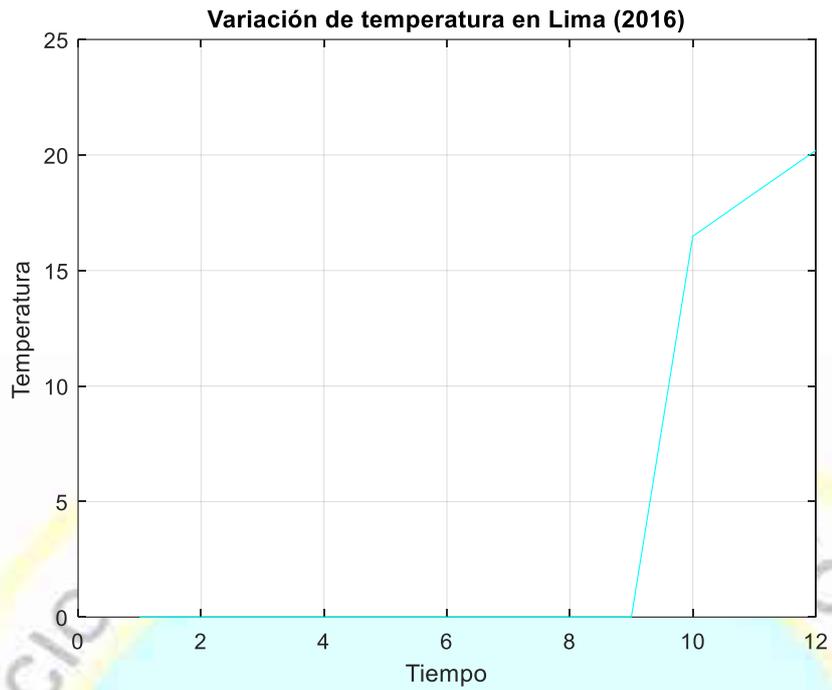
**Fuente:** Elaboración propia del autor

Se observa lo propio para el 2014.



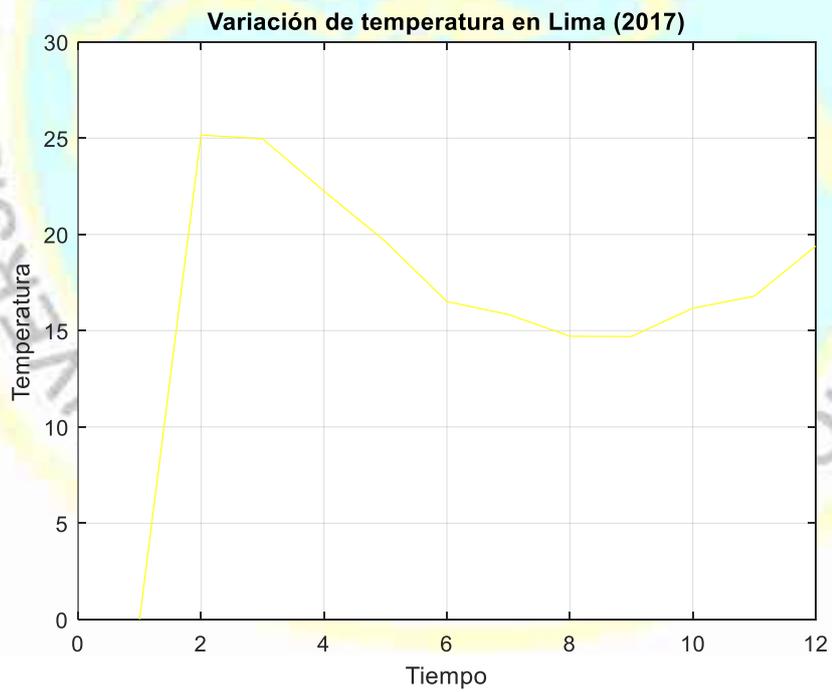
**Fuente:** Elaboración propia del autor

Igualmente, para el 2015.



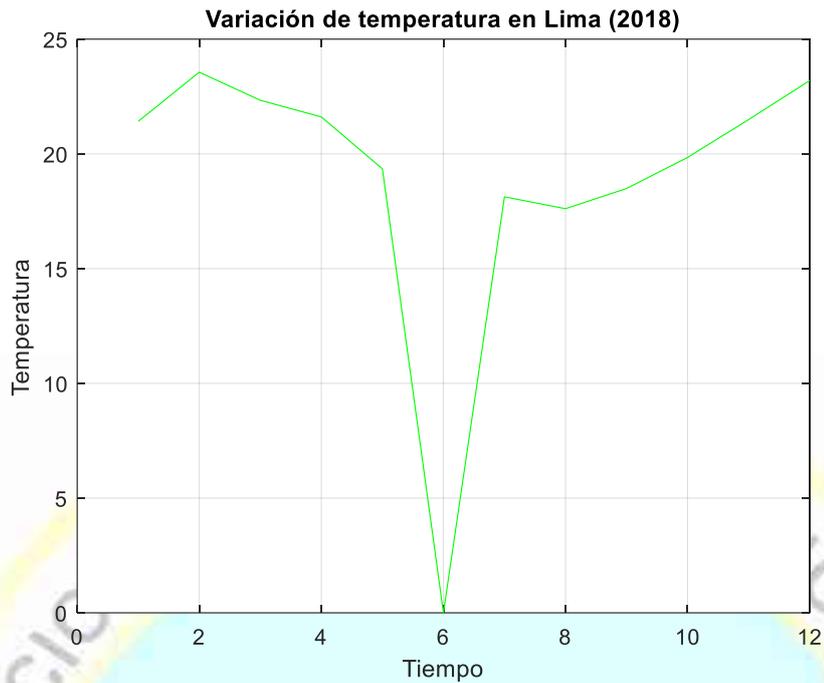
**Fuente:** Elaboración propia del autor

Temperatura en el 2016.



**Fuente:** Elaboración propia del autor

La temperatura el 2017.



**Fuente:** Elaboración propia del autor

La caída brusca no es real, pero indica la ausencia de datos. Año 2018.

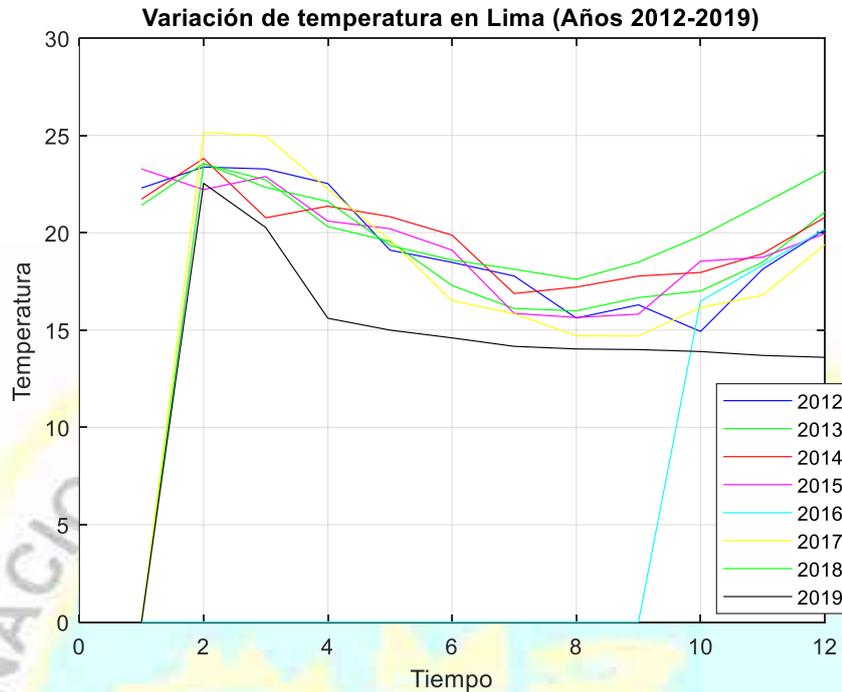


**Fuente:** Elaboración propia del autor

De manera semejante en 2019.

La ausencia de datos corresponde a los reportes publicados. Sin embargo, la tendencia siempre va en incremento.

Sumarizando, se pueden observar todas las tendencias, como se aprecia en la siguiente gráfica:



Fuente: Elaboración propia del autor

**De acuerdo a los datos obtenidos, se puede observar lo siguiente:**

- Que en la Tabla 1. se aprecia que los gases de efecto invernadero, en el período entre 2011 al 2018, existe una concentración creciente en partes por millón, y de acuerdo a la proyección por mínimos cuadrados, en el año 2028, la concentración de gases de efecto invernadero se incrementará hasta 292.8451 (los parámetros de regresión para esta tabla de datos son:  $A=175.4167$  y  $B=-6.5238$ ).
- En la Tabla 2, se puede observar que el requerimiento de hectáreas necesarias por habitante será de 5.02 para el año 2028. Los parámetros obtenidos por mínimos cuadrados son:  $A=3.0042$  y  $B=0.1220$ .
- En la Tabla 3 referida a la concentración de  $SO_2$ , la tendencia es decreciente, por las regulaciones ambientales, en la especificación de los combustibles, pero existe una concentración latente, y presente siempre.

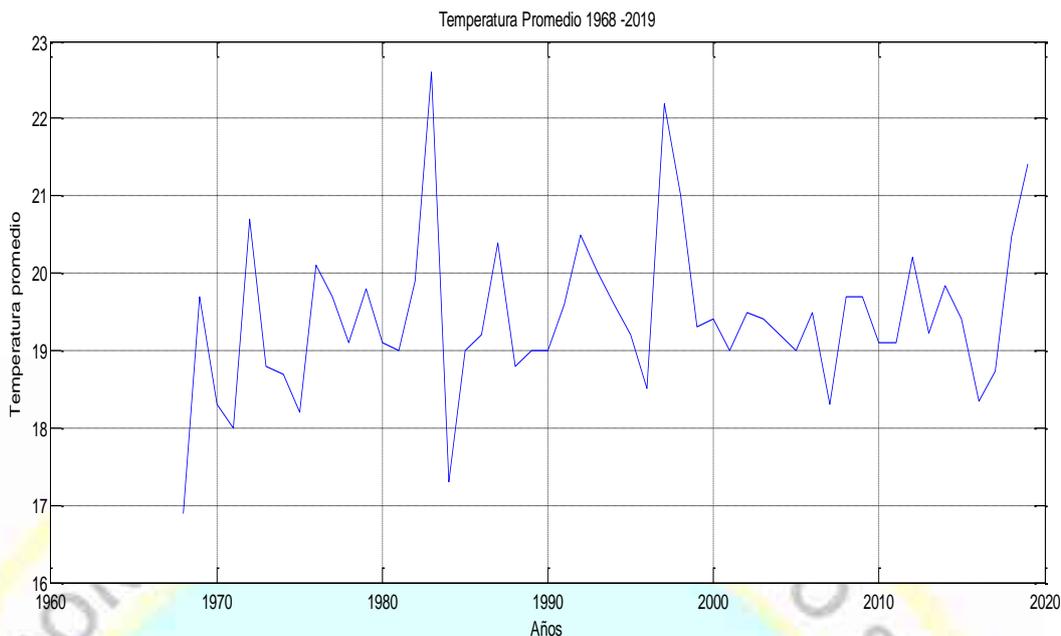
- d. La Tabla 4, para el NO<sub>2</sub>, se puede observar que de acuerdo a los distritos de Lima, hay incidencia diferente, siendo Comas el distrito donde se aprecia mayor concentración de este gas producto de la combustión.
- e. En la Tabla 5, referente a partículas de MP2.5, se observa, igualmente, una concentración variable por distrito.
- f. Lo mostrado en la Tabla 6 de MP10, la mayor incidencia está en los distritos de Comas y San Juan de Miraflores.
- g. En el cuadro correspondiente a la Tabla 7, el gas de efecto invernadero más importante, se observa un creciente aumento, y por lo tanto, de acuerdo a la regresión lineal utilizada, para el año 2028, se obtiene una proyección de 1853.1 en toneladas de carbono equivalente que se producen en el Perú, concentrándose en Lima el 80% del parque automotor. Los parámetros obtenidos son: A=-249.5147 y B=110.6620.

**Tabla 11: Temperaturas en el tiempo (años 1968 – 2012):**

Temperatura Promedio 1968 - 2019 (°C)									
Año	Temperatura media	Año	Temperatura media	Año	Temperatura media	Año	Temperatura media	Año	Temperatura media
1968	16.9	1980	19.1	1992	20.5	2004	19.2	2016	18.34
1969	19.7	1981	19	1993	20	2005	19	2017	18.74
1970	18.3	1982	19.9	1994	19.6	2006	19.5	2018	20.47
1971	18	1983	22.6	1995	19.2	2007	18.3	2019	21.41
1972	20.7	1984	17.3	1996	18.5	2008	19.7		
1973	18.8	1985	19	1997	22.2	2009	19.7		
1974	18.7	1986	19.2	1998	21	2010	19.1		
1975	18.2	1987	20.4	1999	19.3	2011	19.1		
1976	20.1	1988	18.8	2000	19.4	2012	20.2		
1977	19.7	1989	19	2001	19	2013	19.23		
1978	19.1	1990	19	2002	19.5	2014	19.83		
1979	19.8	1991	19.6	2003	19.4	2015	19.41		

**Fuente:** SENAMHI / DRD

Y Se observa el detalle del comportamiento de la temperatura:



**Fuente:** Elaboración propia del autor

Considerando los datos de la tabla, y discretizados en la tabla anterior, se procedió a determinar la tendencia de la variable temperatura en el tiempo, y para ello, se hace el cálculo de la tendencia global lineal y parabólica, según los comandos polyfit y polyval para los vectores que representan el tiempo y la temperatura promedio anual:

### Vectorización de los datos para los cálculos (como ejemplo, un caso)

An=[1968:2019]; % 52 datos de lectura del tiempo (en años)

```
TempMedia=[16.9 19.7 18.3 18 20.7 18.8 18.7 18.2 20.1 19.7 19.1 19.8...
19.1 19 19.9 22.6 17.3 19 19.2 20.4 18.8 19 19 19.6...
20.5 20 19.6 19.2 18.5 22.2 21 19.3 19.4 19 19.5 19.4...
19.2 19 19.5 18.3 19.7 19.7 19.1 19.1 20.2 19.23 19.83 19.41...
18.34 18.74 20.47 21.41]; % 52 datos de temperaturas anuales (°C).
```

### Tendencia Lineal:

**Comandos:** (en MatLab 2019a, versión de prueba):

```
>> C=polyfit (An, TempMedia, 1)
```

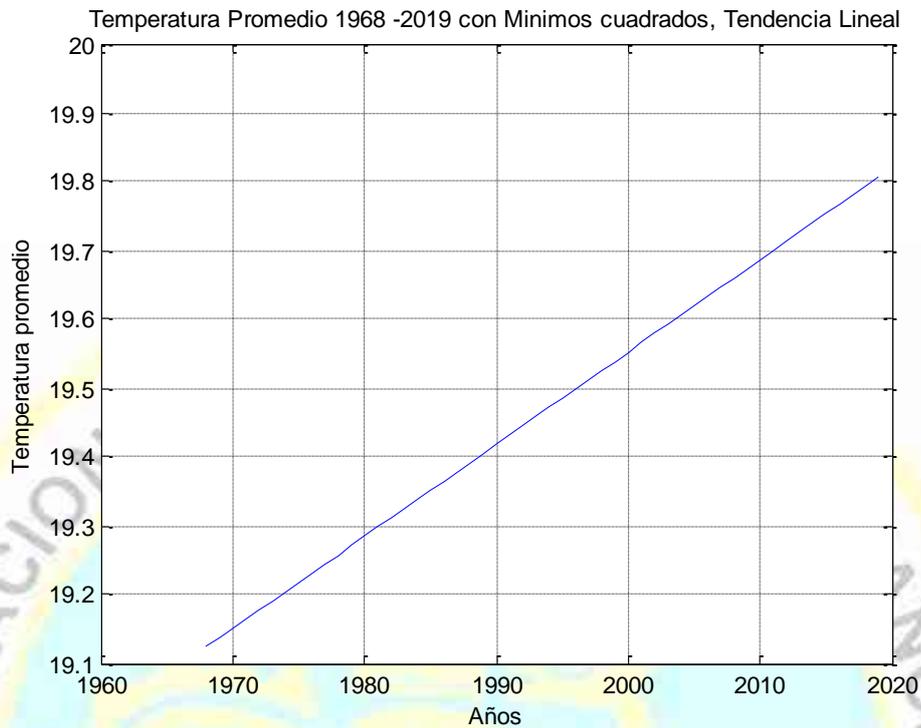
C =

```
0.0134 -7.2475
```

Que permite formular la ecuación representativa de la recta para regresión lineal por mínimos cuadrados:

$$= 0.0134 - 7.2475 \dots \dots \dots (23)$$

Obteniéndose la curva:



**Fuente:** Elaboración propia del autor

Que permite saber que la pendiente es positiva en 0.0134, un valor que es relativamente pequeño, y se puede apreciar que de 1968 a 2019, (trunco), hay una tendencia creciente del aumento de la temperatura (para 52 años, la temperatura ha tenido un delta de incremento cercano a 0.69), y ello ha significado, que el Lima se ha producido un incremento de temperatura global de esa magnitud.

En el concepto de los sistemas caóticos de Lorenz, basados en las ecuaciones de Navier – Stokes, ése incremento es significativo, y la tendencia es a incrementar la temperatura de la atmósfera de la tierra.

**Tendencia Parabólica:**

Comando polyval:

$$= ( , )$$

Asigna a Y\* el valor de polinomio obtenido previamente con

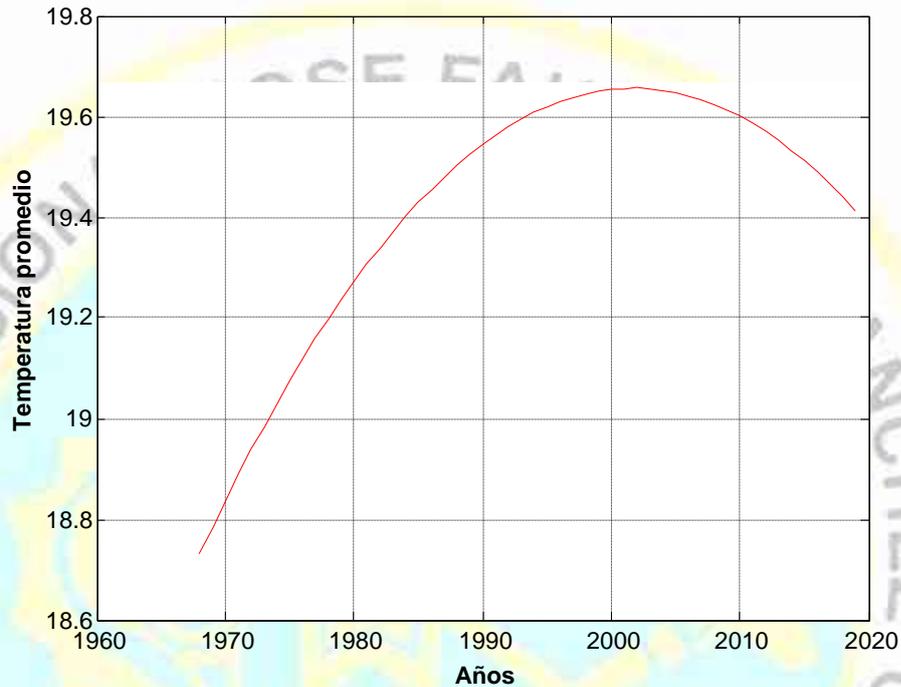
```
>> C=polyfit(An,TempMedia,2)
```

```
C =
```

```
1.0e+03 *  
-0.0000  0.0033 -3.2442
```

Da como resultado

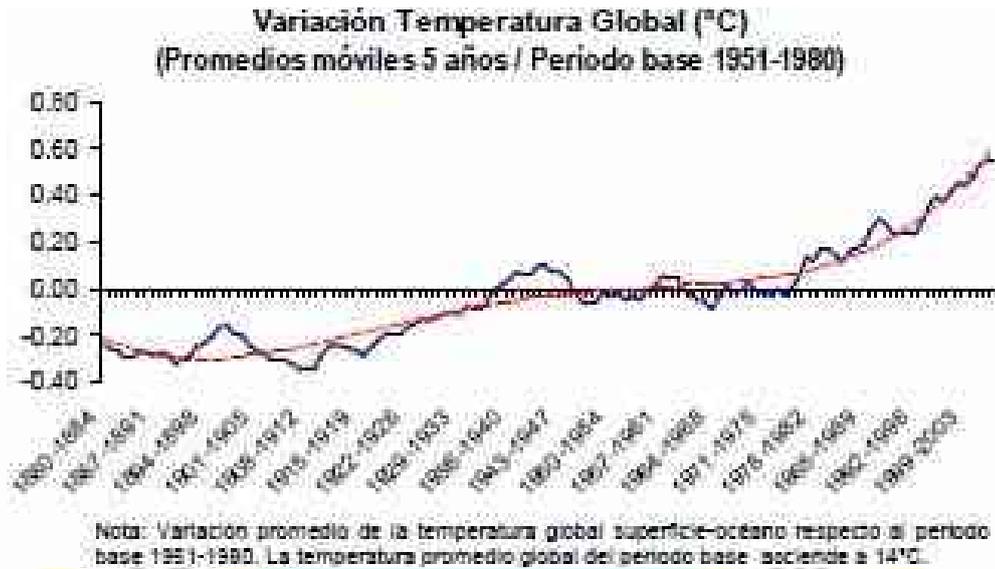
**Temperatura Promedio 1968 -2019  
Con Mínimos cuadrados, Tendencia Parabólica**



**Fuente:** Elaboración propia del autor

Se puede apreciar que este caso la tendencia global es al aumento de la temperatura, y el incremento es casi de 0.7. La última parte de la curva no se debe considerar debido a que presenta data incompleta, sin embargo, la tendencia se mantiene.

Y comparativamente con los perfiles obtenidos por Paola Vargas, en su gráfica se aprecia un delta de variación de la Temperatura global de 0.72, y con ello se puede corroborar los datos obtenidos en esta investigación.



**Fuente:** Vargas, P., BCR, Junio, 2009

Esta gráfica confirma los resultados que se obtuvieron en el presente trabajo de investigación.

#### 4.2 Contrastación de hipótesis

De acuerdo a la información empleada en el desarrollo de esta investigación, tomada de fuentes oficiales, reportes publicados por el SENAMHI, se puede establecer las siguientes relaciones:

Las emisiones gaseosas (CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, principalmente), del parque automotor de Lima, para 20 kilómetros de recorrido son:

Automóvil: 2.6 kilos de CO<sub>2</sub> – Combustible: gasoil (o gasohol)

Station wagon:

**Tabla 12: Parque automotor nacional estimado por clase de vehículo, según departamento (parcial)**

Departamento	TOTAL	Automóvil	Sation wagon	Camionetas			Ómnibus	Camión	Remolcador	Remolque semirem.
				Pick up	Rural	Panel				
Lima/Callao	1752919	807529	284251	163793	236502	31006	50441	116601	29520	33276
La Libertad	190073	77440	21459	25037	18382	1372	7105	21208	4548	13522
Arequipa	187929	89335	14236	21353	27142	1989	5099	16853	4804	7118

**Fuente:** Ministerio de Transportes y Comunicaciones.



**Fuente:** Elaboración propia del autor

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos al efectuar el análisis del comportamiento de las variables climáticas (referidas a las concentraciones de los gases en la atmósfera, y a la temperatura) han permitido considerar lo siguiente:

A partir del primer modelo matemático formulado por Manabe y Hansen en la década de los 60's , se intentó establecer la relación entre la actividad antrópica y el cambio climático, y en su investigación predijeron que la temperatura aumentaría 2° C hacia finales del siglo XXI, por lo que, comparando a lo propuesto en la hipótesis general de éste trabajo de investigación, se puede concordar en que si existe una verificación en lo referente a que las emisiones gaseosas del parque automotor (parte de la actividad antrópica) con el incremento de la temperatura, en un porcentaje de 0.68 y 0.70 °C, de la atmósfera de la Tierra, en correlación lineal y parabólica, respectivamente. En la hipótesis de Manabe y Hansen están las bases del cambio climático, y los impactos del efecto invernadero

El panel intergubernamental para el cambio climático (IPCC), publicó en 2014 el reporte que concluye que era evidente la influencia humana en el sistema climático, lo cual fue calculado utilizando Modelos Climáticos Globales (simulaciones), tomando como base de los cálculos las evaporaciones del océano, que generan grandes movimientos de aire, siendo los principales gases el CO, CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub>, y ello tiene concordancia, de con la primera hipótesis específica, que propuso la existencia de una relación entre las emisiones de CO.

Los modelos climáticos, según Wilks, en esencia son integraciones numéricas de las ecuaciones analíticas de Fourier, y al evaluados los cambios producidos por la evaporación del agua y CO<sub>2</sub>, por efecto del calor, producen el mismo

efecto que el parque automotor, que por efecto de la combustión interna de sus máquinas, lo cual concuerda con la segunda hipótesis específica que afirmó que las emisiones de CO<sub>2</sub>, tienen una influencia en el cambio climático. Ello, sin cuantificar, corrobora la hipótesis propuesta.

A nivel nacional, el modelo MIROC5, basado en el modelo CMIP5, de la Universidad de Princeton, USA, abordó el tema de las lluvias, como factor de cambio climático, y estableció que el modelo local (regional) es parte del modelo global (mundial), y que de las variables climáticas son parte de una influencia global. Por nuestra parte, se hizo e estudio del modelo climático, y se determinó una relación entre la cantidad de CO<sub>2</sub> desprendido del parque automotor y el incremento de la temperatura (conforme a los reportes del SENAHMI).

Los gases compuestos por COV, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y material particulado (PTS , PM10 y PM2.5) tienen una incidencia en la salud pública y en el ambiente, según Inche refiere, y tiene una relación indirecta con la tercera y cuarta hipótesis específica, que contribuye a fortalecer los criterios de la dependencia entre las emisiones y el cambio de las variables climáticas.

El modelo de Navier & Stokes, se basa en los fenómenos de difusión y en la ley de conservación materia – energía, y en segunda Ley de Newton que expresa el comportamiento vectorial de los fluidos, lo cual llega a constituir una matriz sumamente compleja , pero que para efectos de modelamiento, se simplifica a un modelo bidimensional, que permite considerar que el sistema se mantiene a condiciones estacionarias durante todo su desarrollo, y que el comportamiento reológico es básicamente laminar.

Algunas características del parque automotor y de los gases de combustión:

#### **5.1.1. Caracterización del parque automotor de Lima**

De acuerdo con la data vehicular disponible, la tendencia al incremento de vehículos en Lima, y en el Perú, es creciente, por lo que es posible cuantificar las emisiones gaseosas contaminantes.

**Tabla 13: Emisiones gaseosas de acuerdo al tipo de vehículo (en gramos/kilómetro de recorrido)**

Tipo Vehículo	Cantidad de CO[g/km]	Cantidad de HC[g/km]	Cantidad de NOx[g/km]
Automóviles	1615058	807529	524893.85
Station Wagon	568502	284251	184763.15
Pick up	327586	163793	106465.45
Rural	473004	236502	153726.3
Panel	62012	31006	20153.9
Ómnibus	100882	40352.8	7566.15
Camión	233202	93280.8	17490.15
Remolcador	59040	23616	4428
Remolque sem	66552	26620.8	4991.4
	<b>3505838</b>	<b>1706951.4</b>	<b>1024478.35</b>

**Fuente:** Elaboración propia del autor

**Tabla 14: Emisiones gaseosas en cantidades globales (en kilogramos/kilómetro de recorrido)**

Km	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CO[kg/km]	3506	7012	10518	14023	17529	21035	24541	28047	31553	35058	38564	42070	45576	49082	52588	56093	59599	63105	66611	70117
HCl[kg/km]	1707	3414	5121	6828	8535	10242	11949	13656	15363	17070	18776	20483	22190	23897	25604	27311	29018	30725	32432	34139
CO[kg/km]	1024	2049	3073	4098	5122	6147	7171	8196	9220	10245	11269	12294	13318	14343	15367	16392	17416	18441	19465	20490

**Fuente:** Elaboración propia del autor

### 5.1.2. Otros gases de combustión:

Los otros gases, digamos,  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_x$ , constituyen elementos de composición de las emisiones gaseosas de los motores de combustión interna, tanto a gasolina, GNV, GNL, diésel y las 19 variedades de gasolinas y combustibles que existen en el mercado interno de Perú, que dan como resultado partículas  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , además de los gases propiamente dichos. Este tipo de gases, y las partículas tienen dos efectos fundamentales:

- a. Incrementan la temperatura del ambiente.
- b. Incrementan los problemas respiratorios de la población.

Se ha observado que el incremento de estos componentes, mantiene un nivel alto en los distritos de Comas, y Lince, principalmente, pero que su efecto es extendido a toda la ciudad.

La sumatoria de todos los gases, determina un incremento global de la temperatura en  $0.68\text{ }^\circ\text{C}$  durante los últimos 52 años, cifra que concuerda con los cálculos procesados en modelos como el de Manabe y del IPCC.

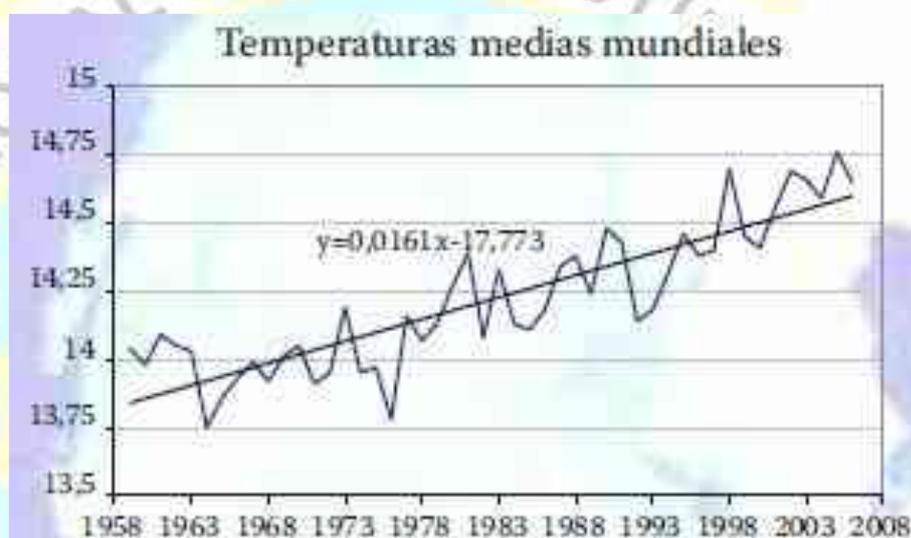
La tecnología de fabricación y diseño de motores, aún no encuentra la máquina ideal que no contamine, por lo que con lo que existe en el mercado, se intenta reducir los  $\text{NO}_x$ , mediante reducción catalítica selectiva (SCR). Un tratamiento posterior de los gases de escape que utiliza un agente químico llamado fluido de escape diésel (DEF) conocido también como AdBlue, ARLA 32 o AUS 32, que libera amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

En fin, hay que considerar también, las regulaciones ambientales, las mismas que están sujetas a la tecnología de mercado, y lo más que se ha logrado hacer es aplicar los estándares de calidad ambiental y los límites

máximos permisibles, aun cuando se sabe que son regulaciones que deben aplicarse para mejorar la calidad de vida del planeta

### 5.1.3. Tendencia global:

De acuerdo a los pronósticos del futuro, la tendencia global al calentamiento, por emisiones globales, incluyendo las industriales, las volcánicas, y las motorizadas, lanzadas a la atmósfera está aumentando, debido a las ingentes cantidades emitidas por las actividades humanas:



**Comentario:** Se ve una concordancia en la tendencia de nuestra región Lima, con la tendencia mundial.

**Fuente:** Sumia, Nov., 2007, pp 63-71

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

Se concluye en lo siguiente:

Se verifica un incremento paulatino de la temperatura ambiental en la región Lima, debido a las también crecientes emisiones gaseosas del parque automotor en la ciudad capital y ciudades de la Región, con un valor de aumento global equivalente a  $0.68^{\circ}\text{C}$ , en tendencia lineal y  $0.70^{\circ}\text{C}$  en la tendencia parabólica a partir de los datos existentes. Ello ha permitido corroborar la relación entre emisiones gaseosas del parque automotor con el cambio climático de la hipótesis general.

Se observó que las cantidades de CO contenidas en los gases de combustión del parque automotor, es proporcional al kilometraje, por lo que haciendo un cálculo estimativo de 20 kilómetros, mínimo, de recorrido diario de los vehículos, puede llegar a un estimado de 3505.8 kg de CO, lo cual concuerda con lo planteado en la primera hipótesis específica, por cuanto el CO es uno de los gases de efecto invernadero, el mismo que, de acuerdo a la tabla 12, tiene un incremento continuo.

De acuerdo a la segunda hipótesis específica que se propuso, se observó que la concentración de los gases desprendidos de los motores de combustión interna a gasolinas, gas natural y diésel, en sus diferentes formas comerciales, incrementaron la concentración de los G.E.I. ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ), y la tendencia se mantiene en un ascenso. Aquí es necesario precisar que a partir de 1992 se hicieron cambios en las fórmulas de elaboración de gasolinas, reduciendo hasta eliminar completamente el uso de tetraetilplomo y otros aditivos con metales

pesados, sin embargo, la cantidad de gases desprendidos del parque automotor ha seguido en aumento, proporcionalmente al incremento de la cantidad de vehículos circulantes. Con ello, se consideró que si existe una influencia, la cual es medible y real.

Los gases de combustión conteniendo  $SO_x$  son principalmente debidos a la combustión incompleta de los combustibles diésel, y entre los gases desprendidos, acompañados por partículas o material particulado, con lo que se puede corroborar que si existe una incidencia de las emisiones,  $SO_x$ , lo que viene a confirmar la tercera sub hipótesis.

Complementariamente, se llegó a las siguientes conclusiones:

Se ha determinado que las cantidades de CO,  $NO_x$  y HCl en la atmósfera es proporcional al kilometraje, por lo que haciendo un cálculo estimativo de 20 kilómetros, mínimo, de recorrido diario de los vehículos, puede llegar de: 3505.8 kg de CO, 1024.5 kg de  $NO_x$  y 1707 kg. de HCl desprendidos en un kilómetro por todo el parque automotor de Lima, hasta 70117 kg de CO, 20490 kg de  $NO_x$  y 34139 kg de HCl, desprendidos en 20 kilómetros por todo el parque automotor de Lima.

Los modelos utilizados corresponden al de Navier\_Stokes y al de Lorenz, para determinar la tendencia global al cambio de las condiciones de temperatura. El modelo es complejo, por lo que es necesario visualizar las condiciones iniciales y proyectar el comportamiento futuro.

En el Modelo de Navier\_Stokes, se han asumido condiciones newtonianas al aire, de modo que la variable presión no entra a tallar en el cálculo, lo cual permite obtener la tendencia a la linealidad o a comportamiento parabólico del sistema, como se observa en las gráficas correspondientes. El sistema se ha considerado por tal razón como bidimensional.

Se puede concluir en que si existe una variación global en la temperatura, por efecto de la contaminación por emisiones (no se descarta que existan otros factores dentro de ello, como por ejemplo, los factores industriales, la contaminación por evaporación marina, y la actividad volcánica).

La data existente ha sido reportada por el SENAMHI y el IMARPE, principalmente, y al consultar sobre su uso, se confirmó que era de libre disponibilidad.

Se ha utilizado la programación en Excel y MatLab (versión de prueba), para las simulaciones correspondientes.

## **6.2 Recomendaciones**

Es pertinente recomendar el mejor control de las emisiones de los gases de efecto invernadero, producidos por el parque automotor, para lo cual es ideal pero viable técnicamente el uso de filtros y tratamiento de los combustibles para que las reacciones de combustión desprendan menor cantidad de gases.

Es importante tener en consideración que esta actividad de emisiones gaseosas por parte del parque automotor, se suma a todas las máquinas de combustión interna, constituyen un problema global que solo será posible si hay una reacción global para evitar la continuidad de las emisiones en atoo grado, que hoy por hoy constituyen insolubles.

Es conveniente que se siga investigando el tema climático, y los factores que llevan a la alteración de los parámetros temperatura, y concentración de CO<sub>2</sub>, principalmente.

La tendencia actual resulta determinante en el cambio de condiciones de vida del planeta, comenzando con nuestra región.

Es importante que el MINAM y todos los órganos reguladores, de control y de monitoreo ambiental, se mantengan incólumes ante tanta debacle y

descalabro en el manejo de los ecosistemas, partiendo por la actividad antrópica.

Es necesario controlar el uso de vehículos, para disminuir la carga gaseosa que desprenden los motores de combustión.



## REFERENCIAS

### 7.1 Fuentes documentales

Mendoza, Victor, (2016), “Principales contaminantes del motor diésel”, Blog Automotriz, Colombia.

Manabe S.; Stouffer, R. J.; Spelman, M. J.; Bryan, K., Journal of climate, vol. 4, Issue 8, pp.785-818, 08/1991).

Sanabria y col., (2009), Escenarios de Cambio Climático con modelos regionales sobre el Altiplano Peruano (Departamento de Puno).

De Castro, Manuel (2007), “Los modelos climáticos globales”, ICAM-UCLM, Toledo, España.

Dawldowsky et al (2014), “Estimación de emisiones vehiculares en Lima metropolitana, SEHNAMI/SAEMC.

### 7.2 Fuentes bibliográficas

Nigro & Storti, (2005), Métodos Numéricos en fenómenos de Transporte, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.

Montes & Rios, (2013), Promedios mensuales y normales mensuales de las variables meteorológicas sinópticas registradas por la Estación Meteorológica Hipólito Unanue de la Pontificia Universidad Católica del Perú durante el período junio 1968 – enero 2013, Reporte de Investigación, PUCP, Lima.

Gil y Col., (2017), Modelado y simulación de sistemas naturales, editado por Universidad de Bogot

### 7.3 Fuentes hemerográficas

Watanabe et al, (2010), Improved climatic simulation by MIROC5: Mean States, Variability and Climatic Sensitivity, Journal of Climate, American Meteorological Society, USA.

### 7.4 Fuentes electrónicas

Ambiente, M. d. (Abril de 2018). Obtenido de <https://www.ssecoconsulting.com/calidad-del-dieacutesel-y-gasolina-en-peruacute-abril-2018.html>

America, M. d. (2016). Obtenido de <http://www3.cec.org/islandora/es/item/986-north-american-mosaic-overview-key-environmental-issues-es.pdf>

Autosoporte. (10 de Junio de 2016). *Blog Automotriz*. Obtenido de <https://www.autosoporte.com/blog-automotriz/item/421-principales-contaminantes-del-motor-diesel>

EUR-LEX. (2014). Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?qid=1544934982141%20&uri=CELEX:32014L0045>

FANDOM. (Abril de 2018). *FANDOM*. Obtenido de [https://astronomia.fandom.com/wiki/Ley\\_de\\_Stefan-Boltzmann](https://astronomia.fandom.com/wiki/Ley_de_Stefan-Boltzmann)

Houghton, J. et al (1997), Modelos climáticos generales IPCC, PNUM, UNEP, OMM, WMO.

Isan, A. (23 de Noviembre de 2017). *Ecologia Verde*. Obtenido de <https://www.ecologiaverde.com/que-tipo-de-polucion-emite-el-tubo-de-escape-de-un-coche-441.html>

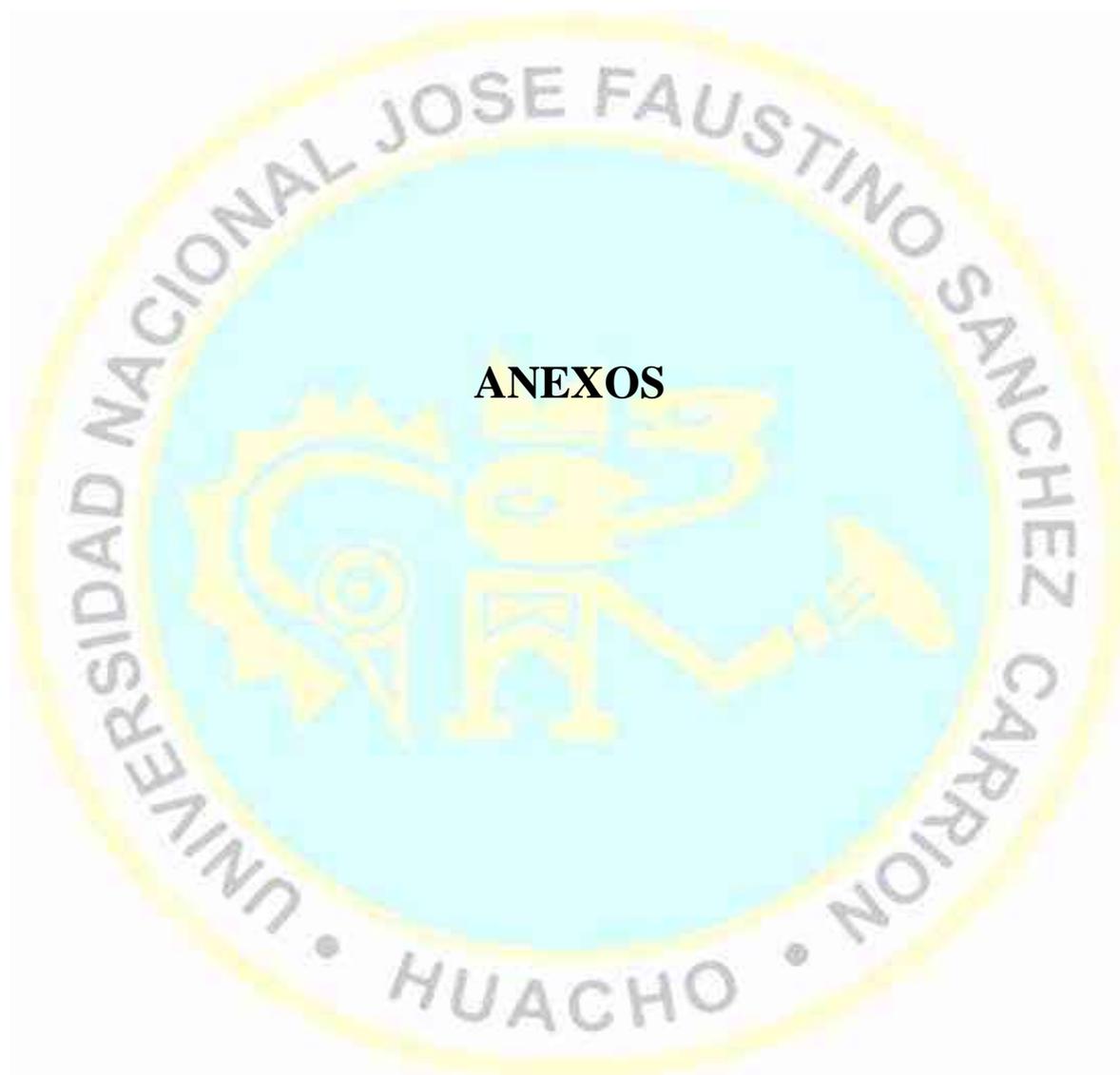
Jones, P. (Enero de 2016). *Cruedata*. Obtenido de <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>

MatLab. (2019). Obtenido de Andrea La Spina (2019). 2D Steady Navier-Stokes (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60868-2d-steady-navier-stokes>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 27, 2019.

ResearchGate. (2019). Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/51994787>

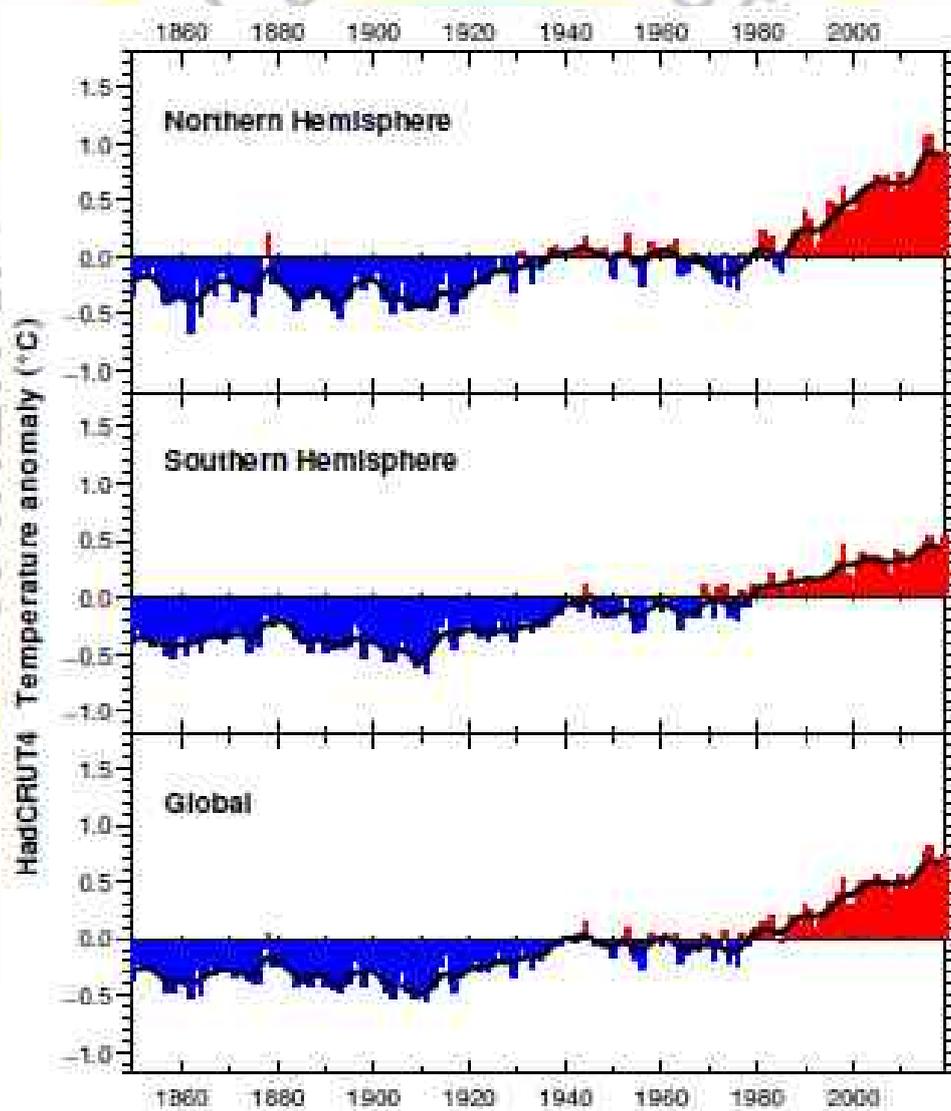
TWENERGY. (31 de Julio de 2019). Obtenido de <https://twenergy.com/a/las-emisiones-contaminantes-de-los-coches-605>

Unidas, N. (diciembre de 2016). *cambio climatico*. Obtenido de naciones unidas: <https://www.un.org/es/climatechange/sg-guardian-op-ed.shtml> .  
<https://www.un.org/es/climatechange/sg-guardian-op-ed.shtml> (2016)



## ANEXO 1

**Figura 1:** HadCRUT4\_Hemispheric and global mean annual temperature

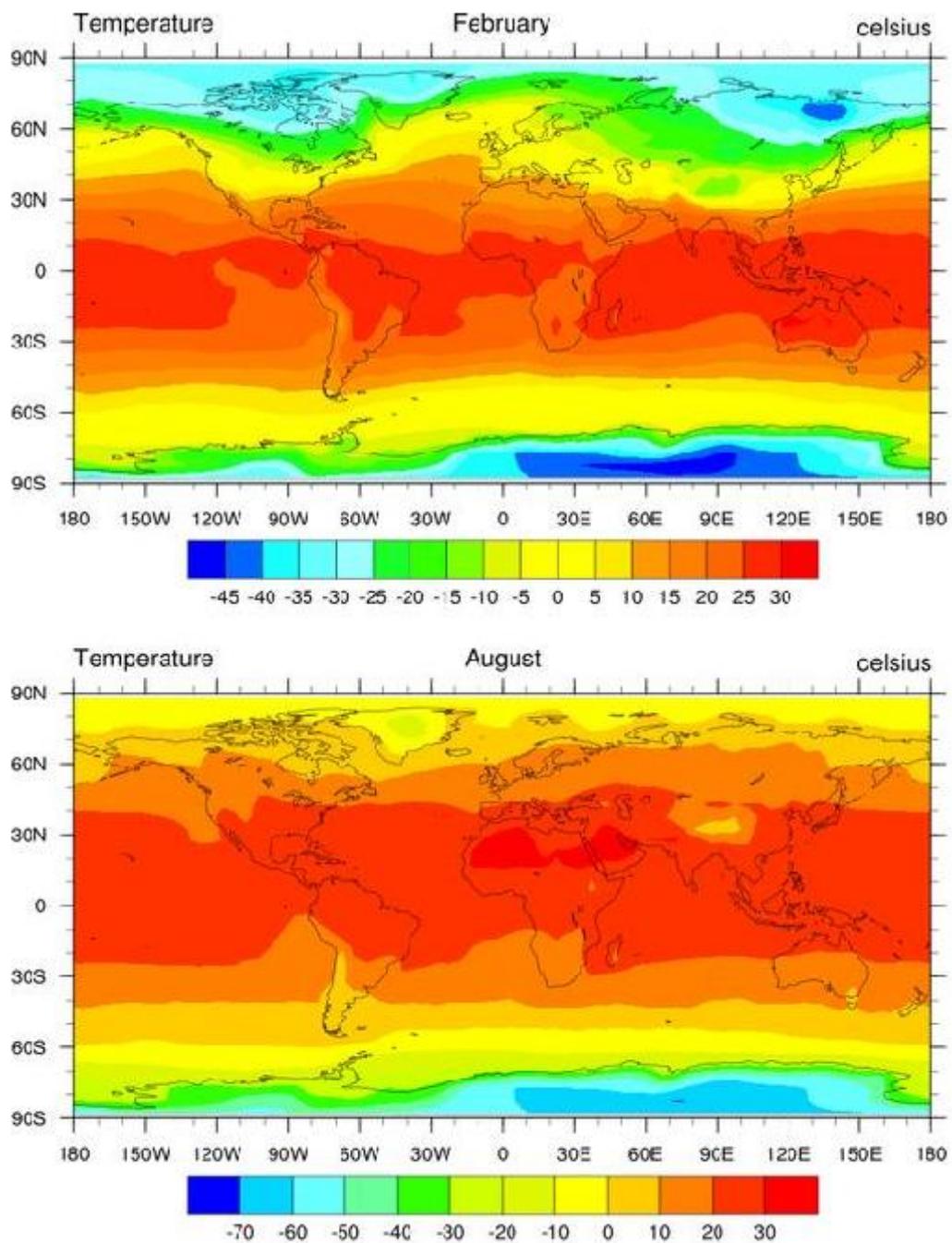


Esta gráfica, constituye una referencia publicada por la CRU ( climatic Research Unit), que corrobora en gran medida la data que se manejó.

**Fuente:** Climatic Research Unit: DATA

## ANEXO 2

Figura 2: Bandas hemisféricas



De manera semejante, los mapas climáticos globales, muestran la incidencia del incremento de las condiciones más influidas por el incremento de la temperatura, que ocurre por las nuevas condiciones.

**Fuente:** Climatic Research Unit: DATA



### ANEXO 3

#### VALORES DE LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA VEHÍCULOS AUTOMOTORES

#### I. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA VEHÍCULOS NUEVOS QUE SE INCORPOREN AL PARQUE AUTOMOTOR

**Tabla 15:** Vehículos de categorías L3 a L5 con motores de encendido por chispa de dos tiempos, que usan mezclas de gasolina - aceite como combustible y de cuatro tiempos que usan gasolina, GLP o GNV como combustibles

Año aplicación(*)	Categoría	Norma	Directiva	Ciclo	N° de Ruedas	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]
2017 en adelante	< 150 cc	EURO III o de mayor exigencia	2002/51/EC(B)(1)	ECE R40(2)	2	2,0	0.8	0.15
2017 en adelante	150 cc	EURO III o de mayor exigencia	2002/51/EC(B)(1)	ECE R40(3)	2	2,0	0.3	0.15
2017 en adelante	Todos	EURO II o de mayor exigencia	2002/51/EC(A)(1)	ECE R40	3 (4)	7,0	1.5	0.4
2017 en adelante	v <sub>máx</sub> < 130 km/h	EURO III o de mayor exigencia	2006/72/EC(C)(1)	WMTC	2	2,62	0.75	0.17
2017 en adelante	v <sub>máx</sub> 130 km/h	EURO III o de mayor exigencia	2006/72/EC(C)(1)	WMTC	2	2,62	0.33	0.22

[1] Se adecuara a la mayor exigencia

[2] Ciclo extraurbano en frío

[3] Ciclo urbano + extraurbano en frío

[4] Vehículos de 3 ruedas de fabricación nacional

[\*] Se refiere a la fecha de embarque y no a la de incorporación al país

**Tabla 16:** Vehículos de categorías L3 a L5 con motores de encendido por compresión que usan Diésel como combustibles

Año aplicación(*)	Categoría	Norma	Directiva	Ciclo	N° de Ruedas	CO [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]
2017 en adelante	Todos	EURO III o de mayor exigencia	2002/51/EC(A)(1)	ECE R40	3 (2)	2,0	1	0.65

[\*] Se refiere a la fecha de embarque y no a la de incorporación al país

[1] Se aplicará la norma de mayor exigencia

[2] Vehículos de 3 ruedas de fabricación nacional

**Fuente:** El Peruano (30/11/2017)

## ANEXO 4

Figura 3: Principales contaminantes del motor diésel



### Emisiones de un Motor Diesel Moderno

#### Emisiones no Reguladas

Nitrógeno (N<sub>2</sub>): 73,8%  
 Oxígeno (O<sub>2</sub>): 9%  
 Agua (H<sub>2</sub>O): 9%  
 Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>): 8%

#### Emisiones Reguladas

	Fecha implantación	CO g/kWh	HC g/kWh	NO <sub>x</sub> g/kWh	HC+NO <sub>x</sub> g/kWh	PM	
DIESEL	Euro I	01/02	3,16	-	1,13	0,14	
	Euro II	01/06	1,00	0,15	0,55	0,08	
	Euro III	01/00	0,64	0,06	0,50	0,05	
	Euro IV	01/05	0,50	0,05	0,25	0,005	
	Euro V	09/09	0,50	0,05	0,18	0,23	0,005
	Euro VI	08/14	0,50	0,02	0,08	0,17	0,003

Fuente: Víctor Mendoza

## ANEXO 5

Figura 4: Material particulado y NOx

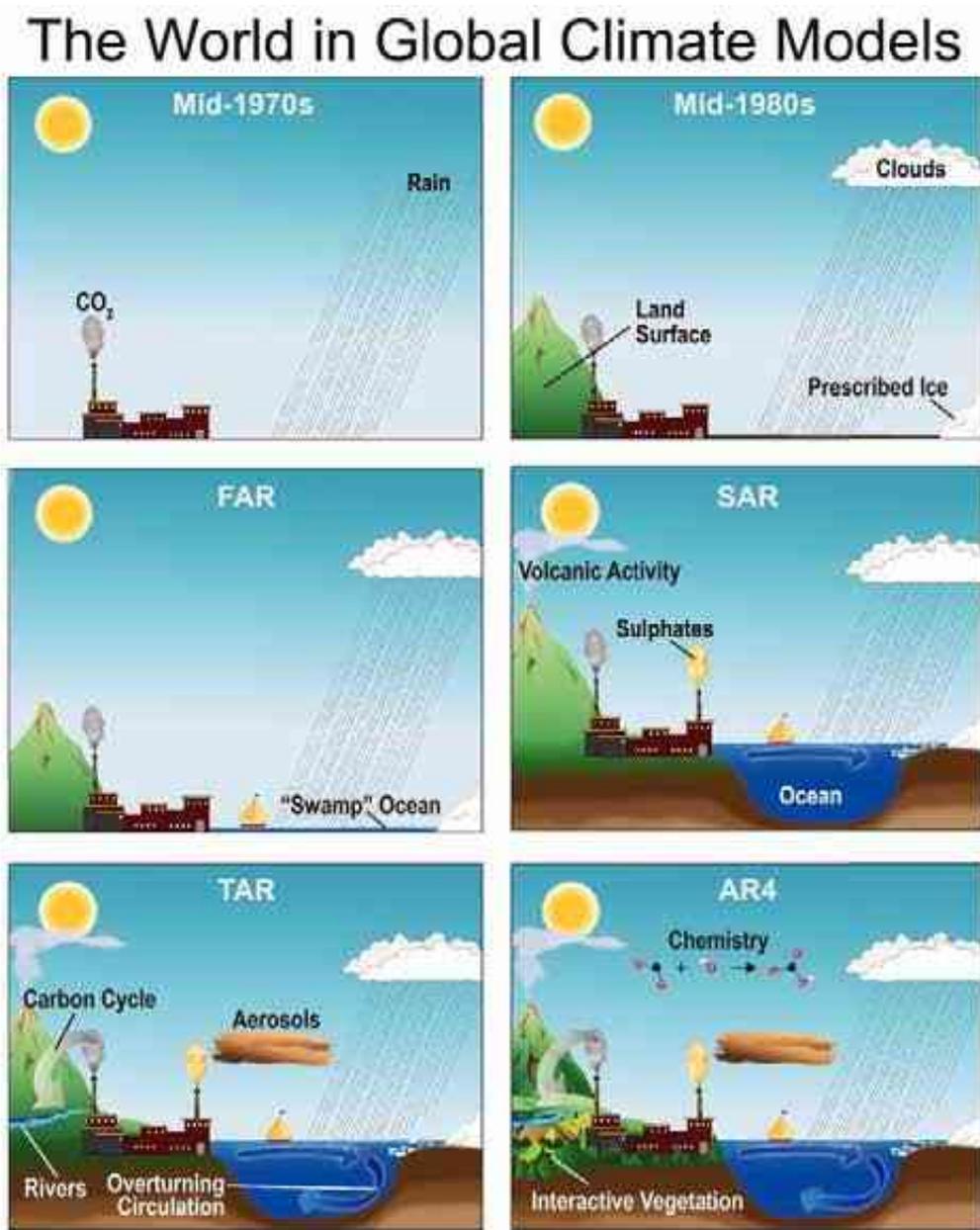


Fuente: Víctor Mendoza

**Nota:** La tecnología desarrollada para tal fin, reducir los NO<sub>x</sub>, es la reducción catalítica selectiva (SCR). Un tratamiento posterior de los gases de escape que utiliza un agente químico llamado fluido de escape diésel (DEF) conocido también como AdBlue, ARLA 32 o AUS 32, que libera amoníaco (NH<sub>3</sub>).

## ANEXO 6

Figura 5: Los modelos climáticos globales



Los ciclos que se generan debido a las emisiones gaseosas, a partir de diferentes fuentes

Fuente: IPCC AR4

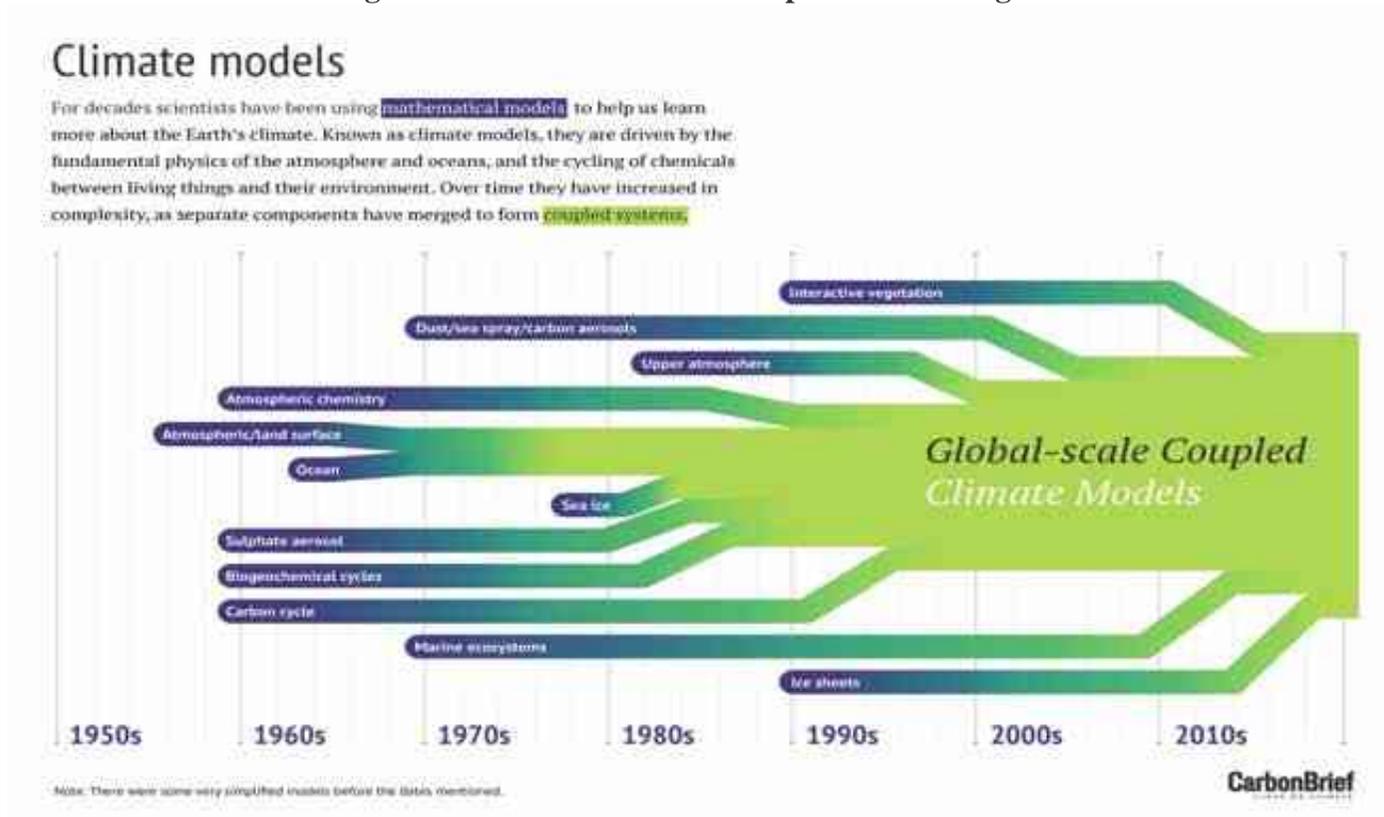
**Nota:** Ilustración de los procesos añadidos a los modelos climáticos mundiales a lo largo de las décadas, desde mediados de la década de 1970, hasta los primeros cuatro informes de evaluación del IPCC: primero ("FAR") publicado en 1990, segundo

("SAR") en 1995, tercero ("TAR ") En 2001 y cuarto (" AR4 ") en 2007. (Nota, también hay un quinto informe, que se completó en 2014).

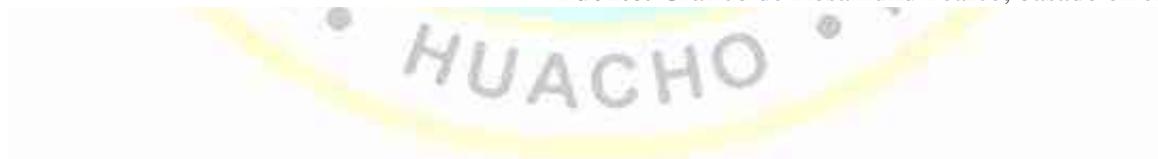


## ANEXO 7

Figura 6: Modelos climáticos acoplados a escala global

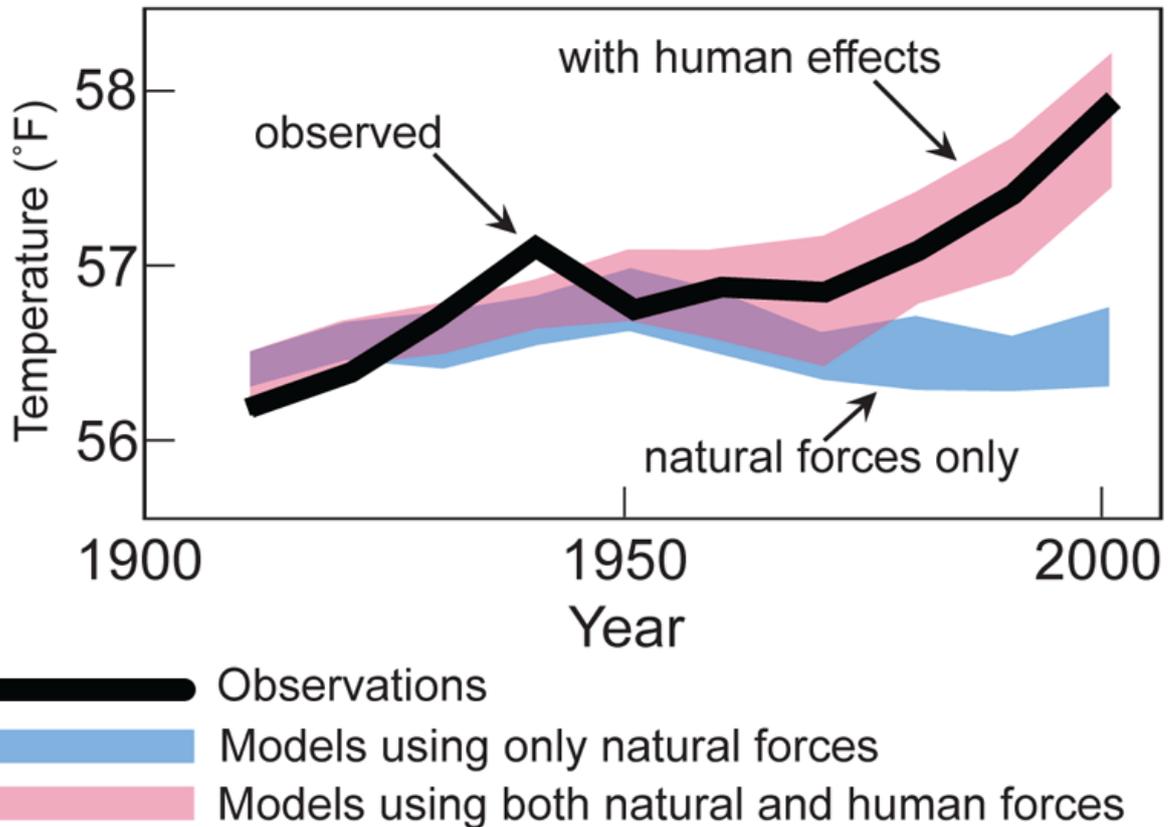


Fuente: Gráfico de Rosamund Pearce; basado en el trabajo del Dr. Gavin Schmidt



## ANEXO 8

Figura 7: Aumento de la temperatura durante el siglo XX a nivel global



En la gráfica se aprecia el aumento de la temperatura durante el siglo XX, según el IPCC, que lleva implícita una tendencia al incremento de la temperatura global del Planeta Tierra.

**Fuente:** Cuarto Informe de Evaluación del IPCC ( [Hegerl et al 2007](#) ).

## ANEXO 9

### Escenarios de calentamiento futuro

El quinto informe de evaluación del IPCC se centró en cuatro escenarios de calentamiento futuro, conocidos como escenarios de la Vía de concentración representativa (RCP). Estos miran cómo el clima podría cambiar desde el presente hasta 2100 y más allá.

Muchas cosas que impulsan las emisiones futuras, como la población y el crecimiento económico, son difíciles de predecir. Por lo tanto, estos escenarios abarcan una amplia gama de futuros, desde un mundo de negocios como de costumbre donde se toman pocas o ninguna acción de mitigación ( RCP6.0 y RCP8.5 ) a un mundo en el que la mitigación agresiva generalmente limita el calentamiento a no más de 2C ( RCP2.6 ). Puede leer más sobre los diferentes RCP aquí .

Estos escenarios RCP especifican diferentes cantidades de forzamientos radiativos . Los modelos usan esos forzamientos para examinar cómo cambiará el sistema de la Tierra bajo cada una de las diferentes vías. El próximo ejercicio CMIP6 , asociado con el sexto informe de evaluación del IPCC, agregará cuatro nuevos escenarios RCP para llenar los vacíos en torno a los cuatro que ya están en uso, incluido un escenario que cumple con el límite de temperatura de 1.5C .

Las ejecuciones de control son útiles para examinar cómo se expresa la variabilidad natural en los modelos, en ausencia de otros cambios. También se utilizan para diagnosticar la " deriva del modelo ", donde se producen cambios espurios a largo plazo en el modelo que no están relacionados con la variabilidad natural o los cambios en el forzamiento externo.

Si un modelo está "a la deriva", experimentará cambios más allá de la variabilidad natural habitual de año a año y de década a década, a pesar de que los factores que afectan el clima, como las concentraciones de gases de efecto invernadero, no cambian.

Las ejecuciones de control del modelo inician el modelo durante un período antes de que la actividad industrial moderna aumentara drásticamente los gases de efecto invernadero. Luego dejan que el modelo funcione durante cientos o miles de años sin cambiar los gases de efecto invernadero, la actividad solar o cualquier otro factor externo que afecte el clima. Esto difiere de una carrera natural, ya que los factores humanos y naturales no se modifican.

Se ejecuta el proyecto de Intercomparación de modelos atmosféricos (AMIP)

Los modelos climáticos incluyen la atmósfera, la tierra y el océano. Normalmente, los modelos climáticos tendrán su propia variabilidad interna: ciclos climáticos a corto plazo en los océanos, como los eventos de El Niño y La Niña, que ocurren en momentos diferentes de lo que sucede en el mundo real. Las ejecuciones de AMIP permiten a los modeladores hacer coincidir las temperaturas del océano con las observaciones, de modo que la variabilidad interna en los modelos ocurre al mismo tiempo que en las observaciones y los cambios en el tiempo en ambos son más fáciles de comparar.



## **ANEXO 10**

### **El modelo climático**

“Las tendencias medias globales se controlan por cordura,  
pero no (generalmente) se ajustan con precisión.  
Hay mucha discusión sobre este punto en la comunidad,  
pero todos tienen claro que esto debe hacerse más transparente ”  
Dr. Gavin Schmidt, Director del Instituto Goddard de Estudios Espaciales  
De la NASA

La única forma de validar un modelo climático es por observación del mundo real. Esto podría incluir, por ejemplo, comparar las proyecciones del modelo con las temperaturas reales de la superficie global durante el siglo pasado.

Los modelos climáticos pueden ser probados contra los cambios pasados en el clima de la Tierra. Se analiza información sobre forzamientos climáticos pasados y los modelos generan un "pronóstico posterior" de las condiciones históricas. Esta puede ser una forma útil de validar modelos.

Se han utilizado modelos climáticos de diferentes factores climáticos, como la temperatura (en la superficie, los océanos y la atmósfera), la lluvia y la nieve, la formación de huracanes, la extensión del hielo marino y muchas otras variables climáticas para mostrar que los modelos pueden simular con precisión el clima de la Tierra. En el presente trabajo, se han tomado dos fuentes de información importantes: la temperatura registrada a lo largo de los últimos 50 años, y las concentraciones de los gases de combustión de los diversos tipos de vehículos motorizados.

Hay predicciones posteriores para el registro histórico de temperatura (1850-presente), en los últimos 2,000 años utilizando varios indicadores climáticos, e incluso en los últimos 20,000 años.

Los eventos específicos que tienen un gran impacto en el clima, como las erupciones volcánicas, también se pueden usar para probar el rendimiento del modelo. El clima responde relativamente rápido a las erupciones volcánicas, por lo que los modeladores pueden ver si los modelos capturan con precisión lo que sucede después de grandes erupciones, después de esperar solo unos pocos años. Los estudios muestran que los modelos proyectan con precisión los cambios en la temperatura y en el vapor de agua atmosférico después de grandes erupciones volcánicas.

Los modelos climáticos también se comparan con el estado promedio del clima, conocido como "climatología". Por ejemplo, los investigadores verifican si la temperatura promedio de la Tierra en invierno y verano es similar en los modelos y la realidad. También comparan la extensión del hielo marino entre modelos y observaciones, y pueden optar por usar modelos que representen mejor la cantidad actual de hielo marino al intentar proyectar cambios futuros.

Los experimentos en los que se ejecutan muchos modelos diferentes con las mismas concentraciones de gases de efecto invernadero y otros "forzamientos", como en los proyectos de intercomparación de modelos, proporcionan una forma de ver las similitudes y diferencias entre los modelos.

Esencialmente, los científicos comparan las estadísticas a largo plazo en la salida del modelo con los datos climáticos observados. Utilizando técnicas estadísticas, corrigen cualquier sesgo en el resultado del modelo para asegurarse de que sea coherente con el conocimiento actual del sistema climático.

### **Proyecciones de la temperatura del modelo climático**



Una de las salidas más importantes de los modelos climáticos es la proyección de las temperaturas, que van a aportar a las temperaturas globales de la superficie. Sobre la base de las temperaturas históricas, se pueden realizar las proyecciones a 10, 20, 50 o más años, utilizando para ello regresión lineal simple o múltiple. En el presente trabajo de investigación, se ha utilizado proyección por mínimos cuadrados, lineal y proyección parabólica.

Para evaluar qué tan bien funciona el modelo, se ha comparado con otros modelos que han abordado la proyección en Perú, y a nivel global. Se han obtenido valores cercanos, lo que significa que el resultado se encuentra muy cercano, con una desviación de 0.02, equivalente a un 2.86%.

Los cambios históricos de temperatura desde finales de 1800 están impulsados por una serie de factores, que incluyen el aumento de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, aerosoles, cambios en la actividad solar, erupciones

volcánicas y cambios en el uso de la tierra. La variabilidad natural también juega un papel en escalas de tiempo más cortas.

Si los modelos hacen un buen trabajo al capturar la respuesta climática en el pasado, los investigadores pueden estar más seguros de que responderán con precisión a los cambios en los mismos factores en el futuro.

Las estimaciones del modelo de temperaturas atmosféricas son un poco más cálidas que las observaciones, mientras que para los modelos de contenido de calor del océano coinciden bastante bien con nuestra mejor estimación de los cambios observados.

Comparar modelos y observaciones puede ser un ejercicio algo complicado. Los valores más utilizados de los modelos climáticos son la temperatura del aire justo por encima de la superficie. Sin embargo, los registros de temperatura observados son una combinación de la temperatura del aire justo por encima de la superficie, sobre la tierra, y la temperatura de las aguas superficiales del océano.

Comparar las temperaturas globales del aire de los modelos con una combinación de temperaturas del aire y temperaturas de la superficie del mar en las observaciones puede crear problemas. Para dar cuenta de esto, los investigadores han creado lo que ellos llaman "campos mezclados" a partir de modelos climáticos, que incluyen las temperaturas de la superficie del mar de los océanos y la temperatura del aire de la superficie sobre la tierra, para que coincida con lo que realmente se mide en las observaciones.

Los campos mezclados de los modelos generalmente coinciden bastante bien con el calentamiento visto en las observaciones, mientras que las temperaturas del aire de los modelos muestran un poco más de calentamiento ya que incluyen la temperatura del aire sobre el océano en lugar de la superficie del mar. Todas las observaciones están dentro del intervalo de confianza del 95% de las ejecuciones del modelo, lo que sugiere que los modelos hacen un buen trabajo al reflejar la variabilidad natural a corto plazo impulsada por El Niño y otros factores.

Las proyecciones del clima desde mediados de 1800 en adelante concuerdan bastante bien con las observaciones. Hay algunos períodos, como principios de 1900, donde la

Tierra era un poco más fría que los modelos proyectados, o la década de 1940, donde las observaciones eran un poco más cálidas

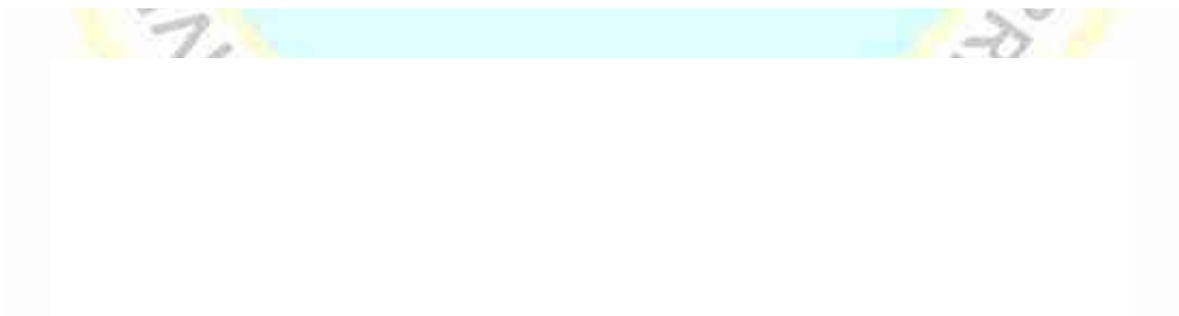
### **Limitaciones del modelo climático**

El modelo climático permite representar aproximadamente el comportamiento del clima de la región Lima, y sin embargo, existen muchos factores que pueden contribuir para representar con más precisión la tendencia, pero no son una representación perfecta de la región, ni menos del clima de la Tierra, y tampoco pueden serlo. Como el clima es inherentemente caótico, es imposible simular con una precisión del 100%, sin embargo, los modelos hacen un buen trabajo para lograr el clima correcto.

La precisión de las proyecciones realizadas por los modelos también depende de la calidad de los pronósticos que se incluyen en ellos. Esto agrega otra capa de incertidumbre a las proyecciones climáticas.

Del mismo modo, hay aspectos del futuro que serían tan raros en la historia de la Tierra que es extremadamente difícil hacer proyecciones. Por lo que los modelos se vuelven cada vez más complejos y sofisticados, todavía hay aspectos del sistema climático que hay que incorporar.

No obstante ello, la proyección es válida.



## ANEXO 11

Figura 8: Modelador climático en el trabajo en la Met Office, Exeter, Reino Unido



**Fuente:** Crédito: Met Office.

La investigación de los modelos climáticos constituye una tarea de los científicos e ingenieros, hacia la búsqueda de soluciones globales.



## ANEXO 12

**Figura 9: Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero tienen origen en el motor de combustión**



**Fuente:** IPCC 2015.

Como es bien sabido, los gases que emiten los tubos de escape de los vehículos son una de las principales causas del aumento de las emisiones, concretamente, de los gases de efecto invernadero, responsables del avance del cambio climático. Independientemente de que sea un coche de diésel o gasolina, el humo del tubo de escape es provocado por la combustión de la mezcla del aire y el combustible y ambos elementos son los que entran en la cámara de combustión en distintas proporciones que, entre otros factores, dependerán del tipo de motor.

La proporción de aire y combustible tiene influye en la emisión de los gases contaminantes, entre otros hidrocarburos, el anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el monóxido de carbono (CO). Anteriormente, también se incluía el nefasto el plomo.

## ANEXO 13

### La simulación climática – Aplicando Programa MATLAB

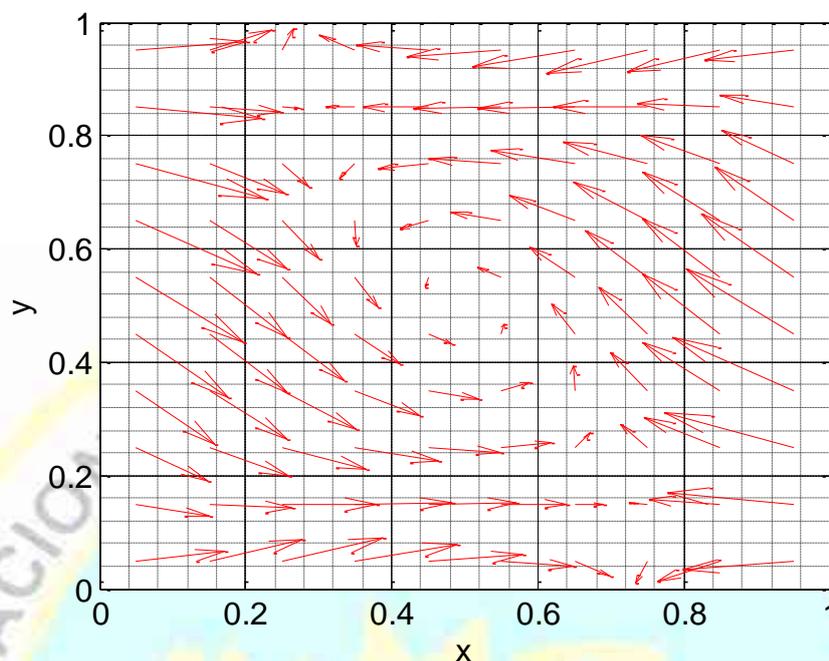
Se ha utilizado el programa de `Steady_Navier_Stokes.m`, desarrollado por Jean Donea y Antonio Huerta, disponible en <https://mathworks.com>, que resuelve las ecuaciones estables en 2D de Navier-Stokes, para lo cual, se ha realizado la discretización del espacio (utilizado el enfoque de Galerkin). Y para el perfil de presiones, se ha utilizado elementos cuadrangulares bilineales, mientras que para la velocidad se han utilizado los elementos cuadrangulares bicuadráticos. De acuerdo a esos criterios, al hacer la interpolación de presión y velocidad, se puede satisfacer la condición LBB que garantiza la resolución del sistema algebraico.

Los parámetros para la matriz de elementos finitos (FEM), tanto como la cantidad de elementos finitos y la cantidad de puntos de integración de Gauss, se pueden elegir fácilmente.

Las funciones y los ejemplos se desarrollan de acuerdo con el Capítulo 6 "Flujos viscosos incompresibles" del libro "Métodos de elementos finitos para problemas de flujo" de Jean Donea y Antonio Huerta.

A continuación, se muestran algunas gráficas que representan las interacciones del cuerpo de gases en la atmósfera

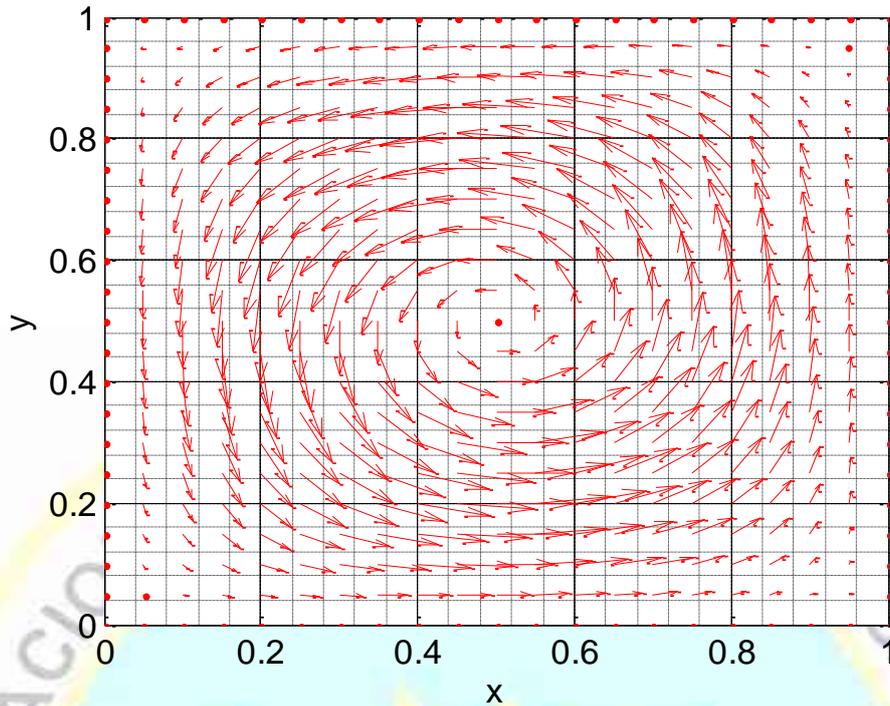
### Campo de fuerza vectorial del cuerpo de gases:



**Fuente:** Steady\_Navier\_Stokes.m, Jean Donea y Antonio Huerta

Campo de fuerza vectorial del cuerpo de gases en la atmósfera, que tienen un comportamiento caótico, de acuerdo al concepto de Lorenz (ecuaciones de Navier & Stokes). Dentro de ese comportamiento, existe siempre la tendencia central, que permite observar que la suma de las fuerzas vectoriales es armónica. Se puede considerar desde el punto de vista molecular, se van a verificar interacciones que varían de acuerdo a la naturaleza y concentración de los gases, siendo la atmósfera un gigantesco reactor, y sus resultados se miden como impactos ambientales, y cambios de temperatura.

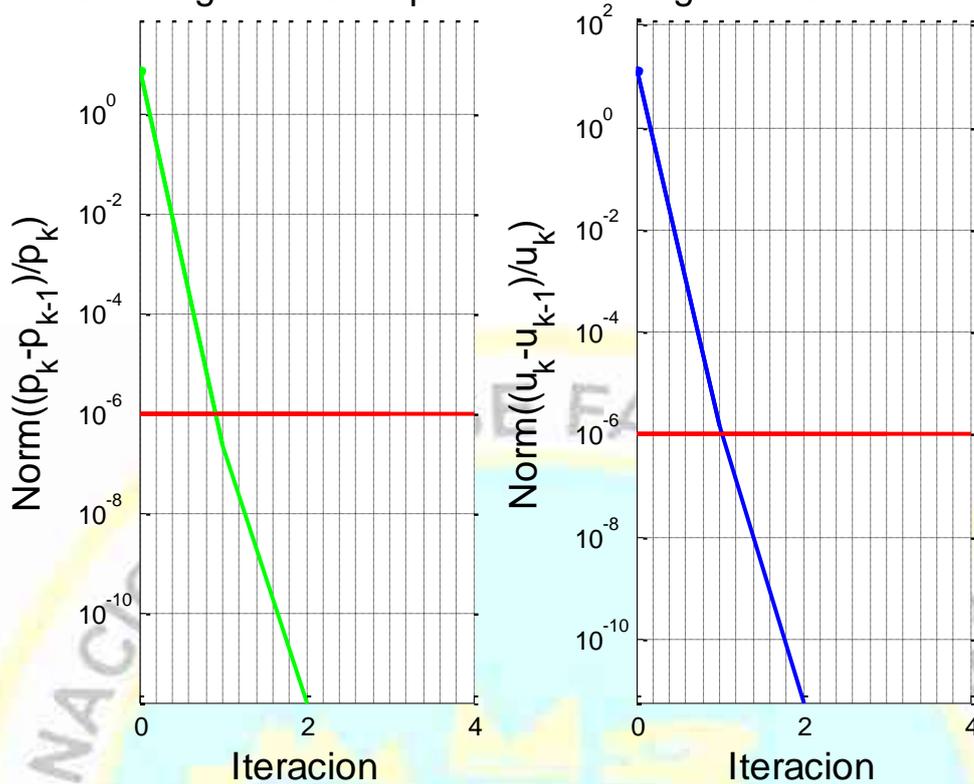
### Solución del campo vectorial de la velocidad



**Fuente:** `Steady_Navier_Stokes.m`, Jean Donea y Antonio Huerta

Las fuerzas vectoriales de la velocidad de movimiento de la masa de gases, pueden predecirse hacia un comportamiento lineal, asumidos para este trabajo, y facilitar la asimilación del modelo bidimensional. Se puede observar un alto grado de distribución espacial, lo cual es indicador de alteración o movimiento, al menos, de todo el sistema.

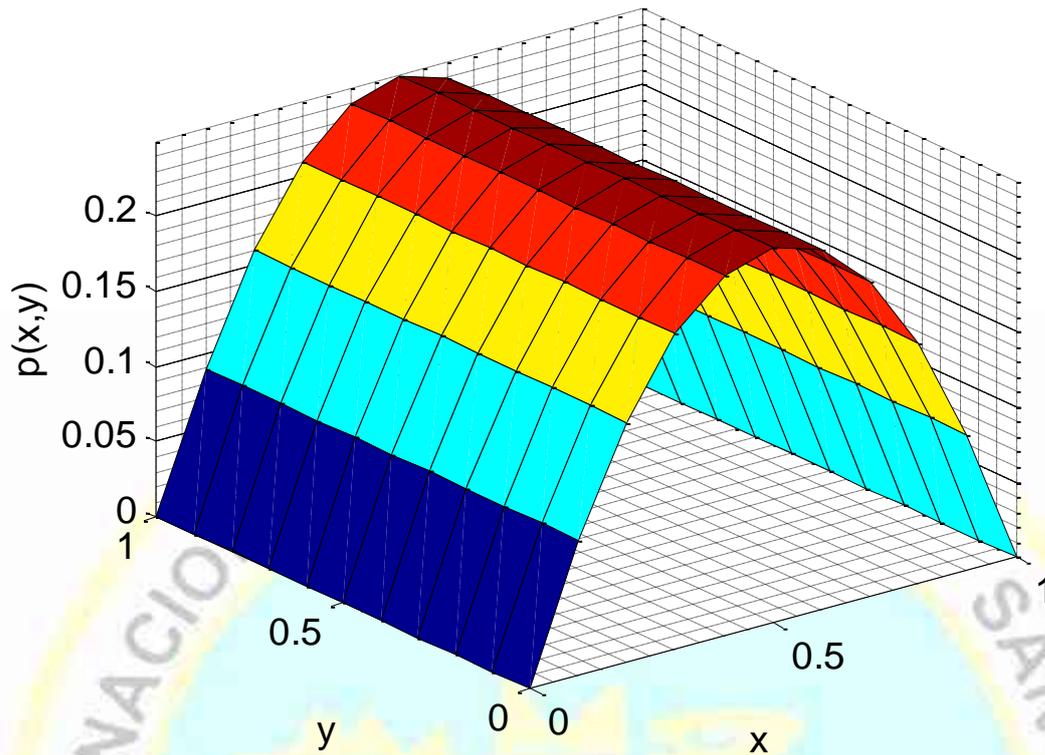
## Convergencia de la presión Convergencia de la velocidad



**Fuente:** Steady\_Navier\_Stokes.m, Jean Donea y Antonio Huerta

En esta imagen, se puede visualizar el comportamiento de las variables presión y velocidad, donde, por un lado, se debe considerar el cálculo hacia la convergencia (comportamiento real) de la presión y velocidad, frente a la magnitud de la diferencia vectorial de las presiones y de las velocidades (longitud euclidiana), que permitió calcular las pendientes decrecientes en ambos casos, y lo cual se interpretó como la variación en decaimiento tanto de la presión como de la velocidad, es decir, que si disminuye la presión y la velocidad en el comportamiento de los cuerpos de gas, se puede considerar que la tendencia es hacia el estancamiento dinámico, característico de los gases de efecto invernadero.

### Solución de p



**Fuente:** Steady\_Navier\_Stokes.m, Jean Donea y Antonio Huerta

Se observa en ésta figura espacial para la presión, sobre una base bidimensional,  $(x, y)$ , que el comportamiento del cuerpo de gases de efecto invernadero, es hacia alcanzar presiones globales de equilibrio, las mismas que estarán sujetas a factores de concentración.

---

**Dr. FIDEL ALBERTO REYES ULFE**  
**ASESOR**

---

**M(o) RONALD FERNANDO RODRÍGUEZ ESPINOZA**  
**PRESIDENTE**

---

**M(o) JUAN MANUEL IPANAQUE ROÑA**  
**SECRETARIO**

---

**M(o) FREDESVINDO FERNÁNDEZ HERRERA**  
**VOCAL**

