


**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL**

The logo of the Universidad del Bío-Bío is a shield-shaped emblem. At the top, it features an open book with the Greek letters Alpha (Α) and Omega (Ω) on its pages. Below the book, there are four lit torches. In the center of the shield is a sun with rays. At the bottom, there are two yellow stars. The entire logo is rendered in a light blue, semi-transparent style.

**“Estudio de la Contaminación de CO<sub>2</sub> de la  
Termoeléctrica Bocamina y su Captura  
Mediante Plantaciones Forestales”**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el  
Título de Ingeniero Civil

**LUIS ERIC BUSTOS FIGUEROA**

**Prof. Guía: Pedro Cisterna Osorio**

**Concepción, Diciembre de 2017**

## **AGRADECIMIENTOS:**

Gracias a mis padres por darme la vida.

Gracias a la vida por darme la oportunidad de aprender día a día cosas nuevas y tenerme en el lugar que hoy me encuentro.

Gracias a la vida por poder cumplir las metas que me he propuesto.

Gracias a la vida por darme conocimiento y sabiduría en cada día de vida.

Gracias a la vida por estos años de vida que son nada en comparación a los años de vida del planeta.

Gracias a la vida por darme la oportunidad de vivir.

Gracias a la vida por hacerme Ingeniero Civil.

## RESUMEN

Hoy en día una de las mayores preocupaciones que debe tener el ser humano es el sustentabilidad ambiental, por ende la contaminación atmosférica es uno de los temas más relevantes a considerar, debido a efluentes gaseosos con alto contenido de CO<sub>2</sub> emitidos por distintos tipos de industrias, los cuales generan calentamiento global.

En el presente Proyecto de Título, se trabajó con datos obtenidos de ENEL (referencia, Termoeléctrica Bocamina). Para obtener las emisiones de CO<sub>2</sub> fue necesario saber cuánto combustible (carbón) se ocupa diariamente en la termoeléctrica, el tipo de combustible y sus porcentajes de carbono quemados diariamente.

Con las emisiones de CO<sub>2</sub> se llevó a cabo el análisis de la dispersión de los gases emitidos por la chimenea de la industria contaminante, mediante el Modelo de Dispersión Gaussiano, con el fin de obtener la concentración con la que estos llegan a una determinada distancia. Una vez obtenida la concentración se procedió a analizar cuanta área del bosque se impactó con los gases que portan partículas de CO<sub>2</sub>, para así evaluar el efecto de estos, considerando la tasa de captura de la zona boscosa, se trabajó con los datos de captura anual de CO<sub>2</sub> de bosques de Eucalipto y Pino Radiata obtenidos de investigaciones realizadas por la Corporación Nacional Forestal (CONAF).

Con el fin de mejorar la calidad del aire, tanto para las personas como para el planeta en general, se realizara un estudio consistente en los niveles de captura de emisión de CO<sub>2</sub>, por poblaciones arbóreas que utilizan el CO<sub>2</sub> en el proceso de fotosíntesis.

## INDICE

<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1: OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
1.1 General.....	2
1.2 Especificos.....	2
<b>CAPITULO 2: CARBON COMO COMBUSTIBLE DE TERMOELECTRICAS EN CHILE Y CO2 .</b>	<b>3</b>
2.1 Generalidades .....	3
2.2 Oportunidades De La Generación Eléctrica A Carbón En Chile .....	7
2.3 Evolución De La Matriz Eléctrica De Chile Desde 1993 .....	8
2.4 Inventario De Emisiones De Co2 Por La Generación Eléctrica A Base De Carbón: 1970-2011 .....	9
2.5 Emisiones De Co2 En Chile (1970-2011) .....	9
2.6 Proyección De Emisiones De Co2 .....	12
<b>CAPITULO 3 CONTAMINACION ATMOSFERICA .....</b>	<b>14</b>
3.1 Aire, Características Y Funciones.....	14
3.2 Capas Atmosféricas .....	16
3.3 Contaminación Atmosférica.....	18
3.4 Origen De La Contaminación.....	18
3.4.1 Fuentes Naturales.....	18
3.4.2 Fuentes Artificiales o Antropogénicas.....	19
3.5 Tipo De Contaminantes.....	19
<b>CAPITULO 4: MARCO TEORICO.....</b>	<b>21</b>
4.1 Carbón .....	21
4.1.1. Tipos de Carbón .....	21
4.2 Categorías De Estabilidad De Pasquill .....	23
4.3 Modelo De Dispersión Gaussiano .....	24
4.3.1 Fórmula Matemática .....	25

<b>4.3.2</b>	<b>Determinación De Los Coeficientes De Dispersión</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Estimación De La Elevación De La Pluma</b> .....	<b>29</b>
<b>4.4</b>	<b>Fotosíntesis</b> .....	<b>30</b>
<b>4.4.1</b>	<b>El CO<sub>2</sub> y La Fotosíntesis</b> .....	<b>31</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Ciclo del Carbono</b> .....	<b>32</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Bosques y Captación de CO<sub>2</sub></b> .....	<b>35</b>
<b>CAPITULO 5: CALCULO DE EMISIONES Y CONCENTRACION DE CO<sub>2</sub></b> .....		<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Emisiones De Co<sub>2</sub></b> .....	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Concentraciones De Co<sub>2</sub> En Función De La Distancia Al Punto De Vertido</b> .....	<b>38</b>
<b>CAPITULO 6: CALCULO DE CAPTACION DE CO<sub>2</sub> POR LOS BOSQUES</b> .....		<b>45</b>
<b>6.1</b>	<b>Características de los Bosques</b> .....	<b>45</b>
<b>6.2</b>	<b>Cálculo del caudal de gas que llega al bosque.</b> .....	<b>45</b>
<b>6.3</b>	<b>Cálculo del flujo CO<sub>2</sub> que llega al bosque</b> .....	<b>46</b>
<b>6.4</b>	<b>Porcentajes de CO<sub>2</sub> captado por el bosque</b> .....	<b>49</b>
<b>6.5</b>	<b>Flujo y Concentración de CO<sub>2</sub> post impacto con el bosque</b> .....	<b>50</b>
<b>6.6</b>	<b>Porcentajes de CO<sub>2</sub> captado por el bosque</b> .....	<b>55</b>
<b>CAPITULO 7:ANALISIS COMPARATIVO</b> .....		<b>57</b>
<b>7.1</b>	<b>Porcentajes de CO<sub>2</sub> captado por el bosque</b> .....	<b>59</b>
<b>7.2</b>	<b>Porcentajes de CO<sub>2</sub> captado por el bosque</b> .....	<b>61</b>
<b>CAPITULO 8: CONCLUSIONES</b> .....		<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		<b>66</b>

## INTRODUCCION

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son causantes del calentamiento global, con emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del orden de las 40 Giga toneladas de carbono al año, lo que acerca la concentración de ese gas en la atmósfera a las 415 ppm, y sigue creciendo a una tasa de 3 ppm por año, descontando la captura natural de la biosfera.

En torno a este problema, se ha generado en el último tiempo una interesante corriente en términos de coordinación de acciones internacionales para disminuir el calentamiento global y así evitar las graves consecuencias que esto traería para vida en la tierra de todas las especies. Uno de los mayores avances lo constituye el Protocolo de Kyoto, en el que la mayoría de países industrializados se comprometen a reducir, cuantificadamente, sus emisiones de GEI. El Protocolo de Kyoto permite además a estos países, emplear diferentes instrumentos de flexibilidad para cumplir con lo acordado. Entre ellos se encuentran los Mecanismos de Desarrollo Limpio, los cuales brindan la posibilidad de invertir en proyectos de reducción de GEI en países en desarrollo, sin compromiso de reducción, promoviendo además en estos un desarrollo sostenible.

Entre los diferentes tipos de proyectos de reducción de CO<sub>2</sub>, las plantaciones forestales constituyen una alternativa, debido a que pueden absorber grandes cantidades de este GEI desde la atmósfera, almacenando el C en forma de biomasa.

## **CAPITULO 1**

### **OBJETIVOS**

#### **1.1 General**

- Estudiar impacto de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la Termoeléctrica Bocamina, sobre un área forestal.

#### **1.2 Específicos**

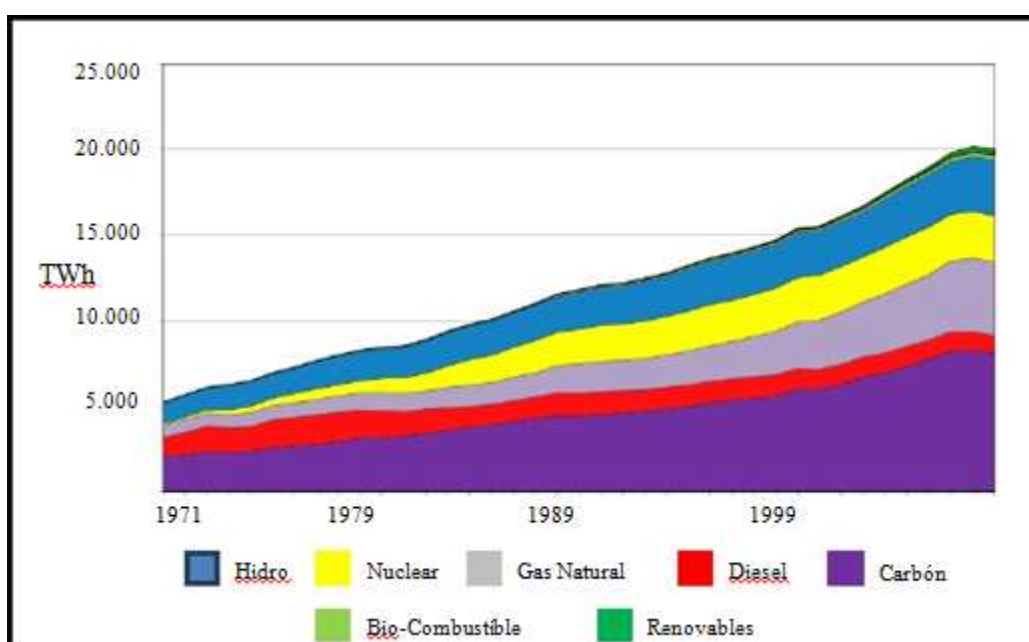
- Obtener la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> producida por la termoeléctrica, mediante balance de masa.
- Evaluar dispersión del flujo contaminante, mediante el Modelo Gaussiano de Dispersión, para determinar la concentración con la que este llega al punto de estudio.
- Estimar tasa de captura para la superficie de la zona boscosa que este en contacto con la masa de gas.
- Realizar análisis de datos, para ver la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado por la población de árboles.

## CAPITULO 2

### CARBON COMO COMBUSTIBLE DE TERMOELECTRICAS EN CHILE Y CO2

#### 2.1 Generalidades

El carbón es un recurso energético ampliamente usado en la actualidad en todo el Mundo, cuyo consumo sigue creciendo en términos absolutos y relativos (ver Figura 1).



**Figura 2.1.1:** Matriz de Generación Eléctrica desde el año 1971 al 2009

**Fuente:** International Energy Agency, 2009.

La combustión de este recurso emite a la atmósfera contaminantes locales como SOX, NOX y material particulado (National Research Council, 2002) productos que pueden ser abatidos con la aplicación de tecnología, con mayores costos de inversión y operación. Sin embargo, el mayor problema es la emisión de CO<sub>2</sub> - principal gas de efecto invernadero (GEI)- por el impacto esperado en el clima global, el cual concita la atención internacional (Miller, 2005) (IPCC, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005) (IEA Coal Industry



Advisory Board, 2008). El carbón es el combustible fósil que emite mayor cantidad de CO<sub>2</sub> por unidad de energía producida (MIT Coal Energy Study Advisory Committee Members, 2007).

En el presente las emisiones de CO<sub>2</sub> se ubican en el orden de las 40 Gt de carbono al año lo que está acercando la concentración de ese gas en la atmósfera a las 415 partes por millón, más de un tercio más de lo que ha sido su estado en el Holoceno, creciendo entre 2 a 3 ppm por año descontando la captura natural que provee la biosfera.

El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ha generado escenarios, llamados SRES (Special Report on Emissions Scenarios), respecto a estimaciones de emisiones de efecto invernadero a largo plazo, tomando en cuenta fuerzas determinantes como los factores demográficos, económicos y tecnológicos (IPCC, IPCC, 2012). Existen 4 familias de escenarios:

A1: Acelerado crecimiento económico, demografía mundial alcanza su máximo hacia mediados del siglo y luego disminuye; aplicación de tecnologías nuevas enfocadas en la eficiencia. Aumento de interrelaciones entre las regiones, homogenizando aspectos culturales, sociales y económicos. La familia A1 se desarrolla bajo 3 opciones dependiendo de la forma de uso de la energía:

- A1FI: Uso intensivo de combustible fósil.
- A1T: Utilización de energía de origen no fósil.
- A1B: Utilización Equilibrada de todo tipo de fuentes de energía.

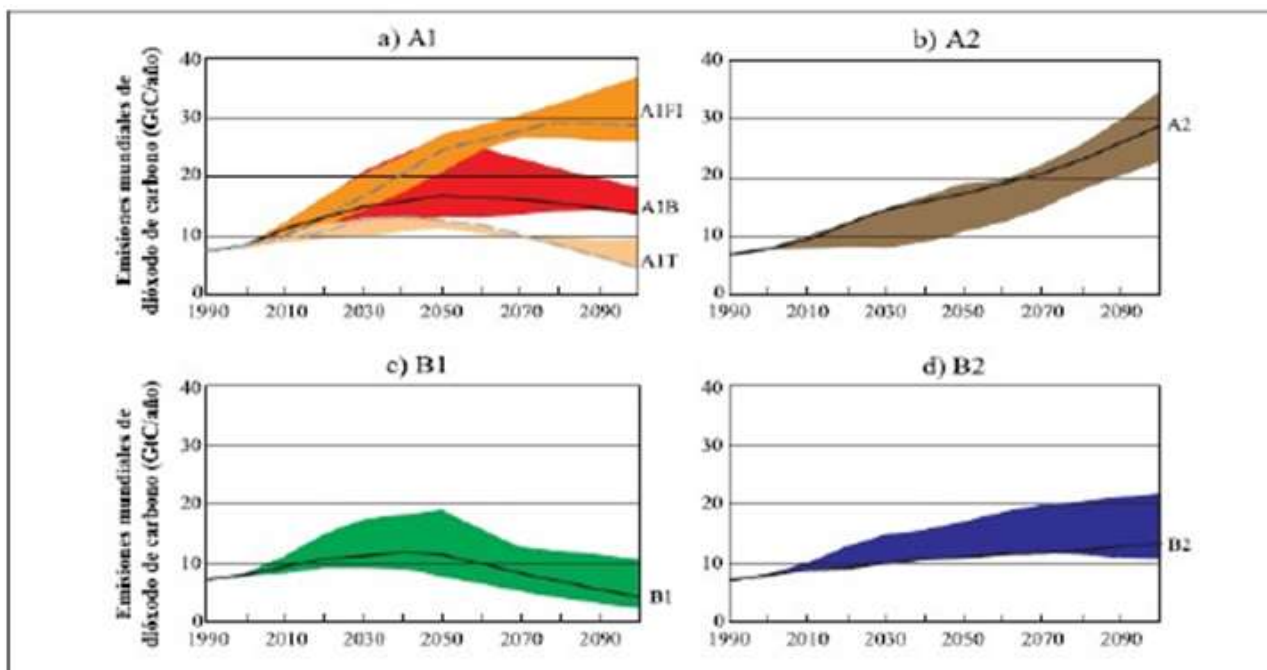
A2: Describe un mundo heterogéneo, dado que no existe las facilidades de interrelación entre las regiones, las cuales son autosuficientes y mantienen sus

culturas propias. El crecimiento económico y tecnológico crece lentamente, en comparación a otras líneas evolutivas.

B1: Mundo convergente, donde la población mundial alcanza su máximo a mitad del siglo. Similar al A1, con la diferencia que este escenario se oriente a economía de servicios y de información. Introducción acelerada de las tecnologías limpias con enfoque a la eficiencia, con bajo uso de materiales. Se busca la sustentabilidad económica, social y medioambiental.

B2: Al igual que el escenario B1, se busca la sustentabilidad pero de forma regional, con soluciones locales. Desarrollo económico intermedio y aplicación de tecnologías nuevas a menos rapidez pero más diverso que la línea evolutiva B1 y A1. Crecimiento de la población progresivo pero menor al escenario A2.

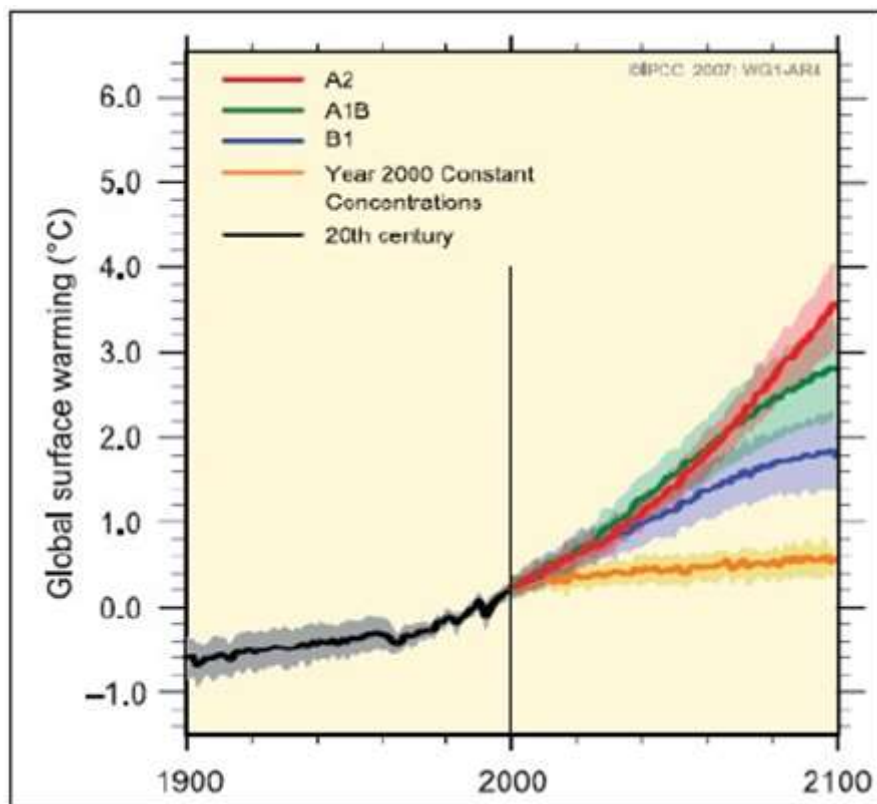
Los resultados de estimación de gases efecto invernadero obtenidos por el IPCC para los escenarios SRES, se muestran en la Figura 2:



**Figura 2.1.2:** Resultados de Emisiones a largo plazo según escenarios SRES (IPCC)

**Fuente:** IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005.

Las proyecciones de emisiones entregadas por cada escenario SRES, tiene una estimación de la consecuencia climática global, midiéndolo respecto al aumento de temperatura, como se observa en la Figura 2.1.3.



**Figura 2.1.3:** Variación de temperatura dependiendo de la evolución de cada escenario SRES (IPCC)

**Fuente:** IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005.

Los diferentes escenarios, en menor o mayor medida, darán probablemente las siguientes consecuencias:

- Alta probabilidad que los recursos hídricos disminuyan entre el 10% y 30%, en regiones de latitudes medias y trópicos húmedos. Además de la reducción de reservas de agua dulce por descongelamiento de glaciares y nieve.

- Respecto a los ecosistemas, se observará que habrá pérdidas de especies, y específicamente entre el 20% y 30% para especies en peligro de extinción.
- Con un aumento global en la temperatura de menos de 3°C, puede que la productividad agrícola aumente en latitudes altas., en cambio para latitudes bajas, incluso con menos de 3°C, esta actividad podría reducirse. Por otro lado, si la temperatura esta sobre los 3°C, es probable que la actividad agrícola disminuya en la mayoría de las regiones del planeta.
- Debido al descongelamiento de los glaciares, el nivel del mar aumentará, con alto riesgos de pérdida de suelo costero e incremento de inundaciones hacia fin de siglo.

## **2.2 Oportunidades De La Generación Eléctrica A Carbón En Chile**

La matriz eléctrica de Chile ha evolucionado desde un predominio hidroeléctrico hacia un dominio fósil. En el periodo 1970 a 1985 el aporte hidroeléctrico promedio fue de 67% de la generación eléctrica durante esos años. Contrariamente, en los últimos años eso se ha revertido, debido a la crisis del gas argentino a principios de la década. El periodo 2011 y 2012, se generaba electricidad con un predominio de carbón y gas natural, con 34,7% y 22,9%, respectivamente, mientras la fuente de generación hidráulica entregaba un 33,2% (Comisión Nacional de Energía, 2012). El carbón se ha mantenido durante los últimos años como la opción de generación dominante del país, y según los estudios vigentes (Servicio de Evaluación Ambiental, 2014), esta alternativa continuará desarrollándose.

Se estima que la generación fósil disminuirá, pero lentamente, mientras la sustitución por otras fuentes menos contaminantes se espera costosa e insuficiente. Por ende, para mantener los niveles de producción y desarrollo económico, junto con elevados niveles de recursos carboníferos, se prevé que el carbón seguirá siendo un actor dominante por mucho tiempo. Una forma de reducir el impacto es aumentando la temperatura de operación de las centrales,

mejorando por ende su eficiencia, sin embargo los efectos son limitados. Debido a lo anterior, una de las formas de poder seguir utilizando masivamente el carbón como combustible para la generación eléctrica reduciendo su actual impacto ambiental a nivel global, es mediante el posible uso de bosques para captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> o por medio de la tecnología de CAC.

### **2.3 Evolución De La Matriz Eléctrica De Chile Desde 1993**

La generación eléctrica en Chile se ha basado en dos tipos de energía: hidroeléctrica y termoeléctrica con distribuciones anuales que dependen del régimen hidrológico. En el año 2011, la primera aportó 33,2% del total, y 64,7% lo produjo la opción térmica, además de un aporte mínimo de biomasa de 1,5%, mientras 0,5% fue generado por fuente eólica (Comisión de Energía, 2012).

El año 2011, la generación térmica ocupó como combustible principal el carbón con un 34,7% del total de la generación eléctrica del país, luego el gas natural con 22,9%, seguido por el diésel con 6,6%. Salvo cambios importantes en los sistemas de extracción de gas natural y la posible masificación de gas de esquisto en ciertos países, se puede inferir que el carbón seguirá siendo una alternativa energética importante que utilizará Chile para suplir la creciente demanda energética debido principalmente a su bajo costo y confiabilidad (a pesar de la concreción de los grandes proyectos hidroeléctricos en planes). No obstante, el carbón es el combustible fósil que produce la mayor contaminación local y también es el mayor generador de gases de efecto invernadero por unidad de energía producida.

La matriz eléctrica de Chile, se ha compuesto básicamente por fuentes a base hídrica y térmica, donde en esta última tiene, en forma general, tres tipos de combustibles; carbón, diésel y gas natural, los cuales se han turnado la preponderancia a lo largo del periodo (1970-2016) acorde a coyunturas climáticas y contractuales.

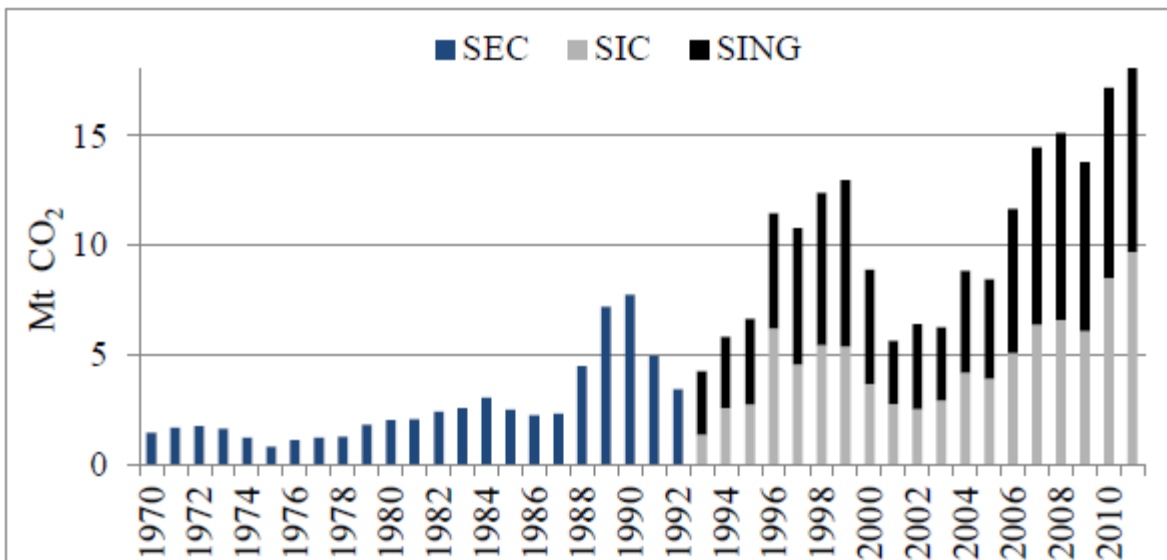
La organización geográfica-económica del sistema eléctrico chileno es particular. Comienza con un proceso de interconexión de unidades en diferentes zonas del centro del país, configurando el Sistema Interconectado Central (SIC) el cual se consolida con la instauración del Centro de Despacho Económico de Carga del SIC (CDEC-SIC) en 1985. Similarmente, las unidades del Norte del País, destinadas principalmente a abastecer al sector minero, interconectan centrales y usuarios, con solidando en 1987 el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), cuya constitución formal se estableció en 1993, con la creación de Centro de Despacho Económico de Carga del SING (CDEC- SING).

#### **2.4 Inventario De Emisiones De Co2 Por La Generación Eléctrica A Base De Carbón: 1970-2011**

Los gases de efecto invernadero (GEI) se han generado naturalmente a lo largo de la historia de la Tierra. En el Holoceno, la concentración del GEI dominante – CO<sub>2</sub>- se mantuvo relativamente constante bajo las 300 ppm no obstante su concentración comenzó a aumentar con la llegada de la industrialización y el explosivo crecimiento de la población, aumentando a más de 400 ppm, motivo que lleva a la comunidad científica a señalar este efecto como uno de los causantes del calentamiento global del planeta. Los GEI se derivan en parte de la generación termoeléctrica y térmica en especial del uso del carbón, del transporte en el cual domina el uso del petróleo, así de otras actividades industriales (i.e. producción de cemento y acero) y también de actividades industriales no energéticas (i.e. agricultura, deforestación, producción de desechos) y procesos naturales.

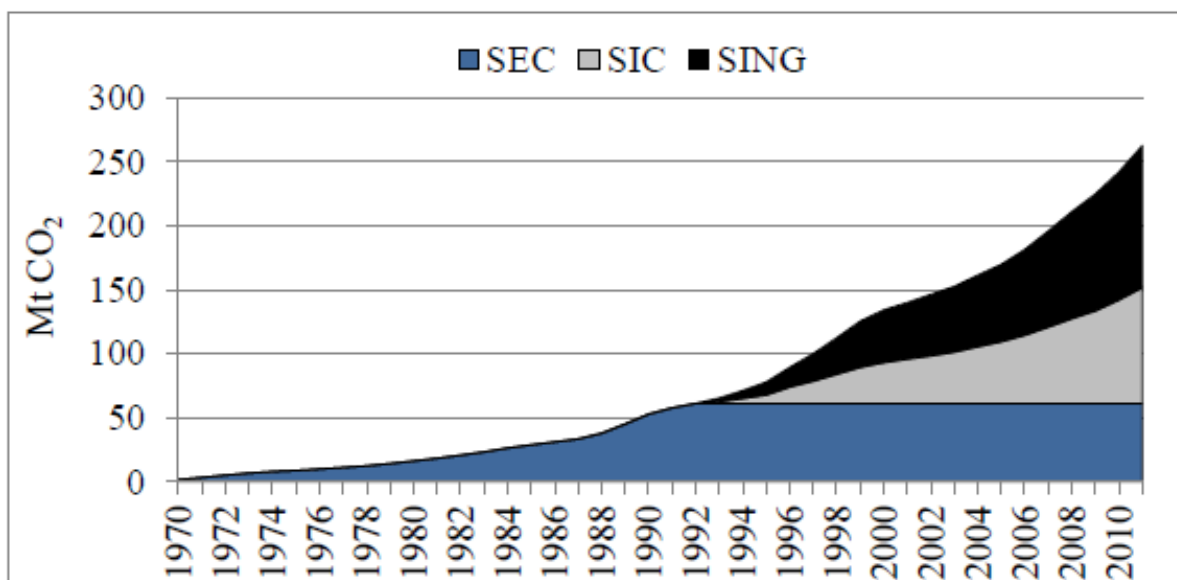
#### **2.5 Emisiones De Co2 En Chile (1970-2011)**

Para tener una visión amplia de los resultados, en la Figura 2.5.1 se muestran las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> y en la Figura 2.5.2, las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> de todo el periodo respecto a cada sistema interconectado.



**Figura 2.5.1:** Emisiones anuales de CO<sub>2</sub> (Mt) en periodo 1970-2011 según cada sistema eléctrico, debido a la generación eléctrica a base de carbón.

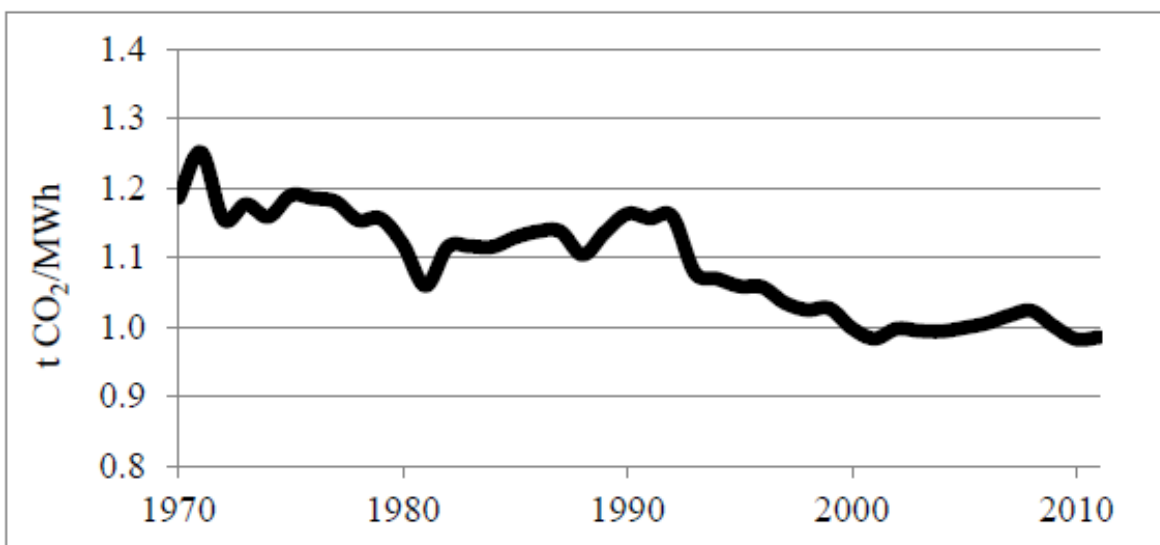
**Fuente:** Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)



**Figura 2.5.2:** Emisiones acumuladas anuales de CO<sub>2</sub> (Mt) en periodo 1970-2011 según cada sistema interconectado, debido a la generación eléctrica a base de carbón.

**Fuente:** Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)

Además, se estimó la eficiencia del sistema respecto a las emisiones con el factor de emisiones, el cual es el parámetro que mide cuanto CO<sub>2</sub> son emitidas al ambiente por unidad de energía eléctrica generada. En la Figura 2.5.3, se observa la evolución de este factor para todo el sistema sobre el periodo en evaluación, que tiene un patrón descendente a pesar del aumento de centrales termoeléctricas debido a que las centrales nuevas son más eficientes que las antiguas.



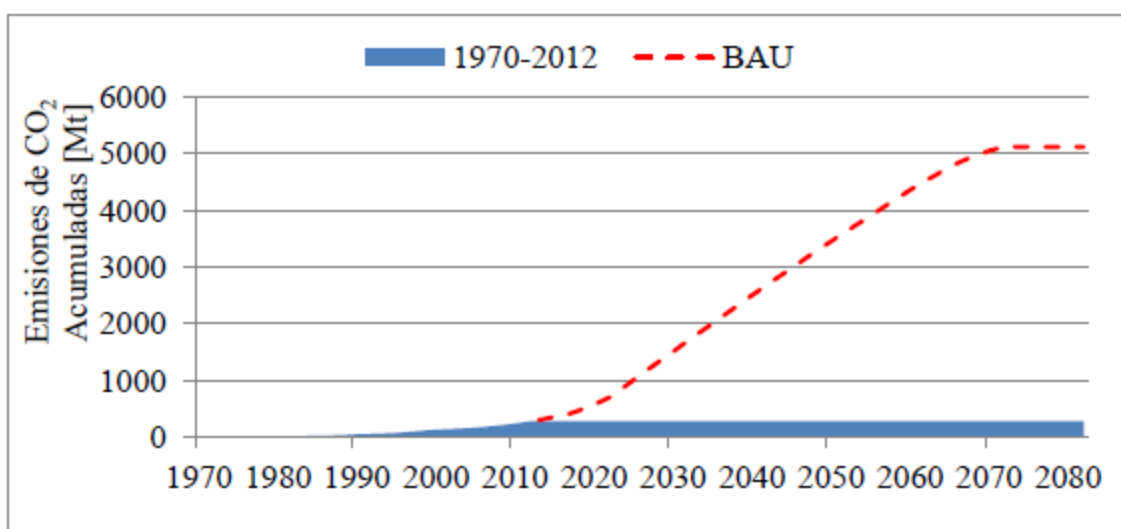
**Figura 2.5.3:** Factor de emisiones (tCO<sub>2</sub>/MWh) para el periodo 1970 – 2011, de todo el sistema por la generación eléctrica a carbón.

**Fuente:** Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)



## 2.6 Proyección De Emisiones De Co2

Como la matriz eléctrica chilena tiende a aumentar de forma considerable en el uso del carbón, esto implicará que las emisiones de GEI aumentarán de la misma forma. En la Figura 2.6, se estiman las emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a la proyección en la generación eléctrica de las termoeléctricas a carbón, desde el año 2013 hasta el 2082 (Registro de emisiones y transferencia de contaminantes, RETC)



**Figura 2.6:** Estimación de emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> desde año 1970 al 2012; y la proyección de generación eléctrica a Carbón, entre el año 2013 y 2082.

**Fuente:** Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)

Se observa en la Figura 2.6, la estimación de emisiones acumuladas actuales producto de la generación eléctrica a carbón desde 1970 al 2012, la cual es 283 MtCO<sub>2</sub>.

El escenario BAU (Business As Usual), proyecta las emisiones de CO<sub>2</sub> como si las centrales proyectadas a futuro estén operarán en el año propuesto como puesta en marcha.

Es importante mencionar que la tendencia definitiva depende de factores políticos, económicos, regulatorios y ambientales donde la proyección escapa del alcance

del presente documento. La suma entre las emisiones acumuladas actuales y las proyectadas es de 5120 MtCO<sub>2</sub>. Este valor es 17 veces las emisiones acumuladas actuales, lo que indica que la generación eléctrica basada en la combustión a carbón crecerá aceleradamente, y así también, las emisiones de CO<sub>2</sub>, provocando un escenario insostenible si se proyecta que existe posibilidad de aplicación de políticas de reducción de emisiones a nivel país.

## CAPITULO 3

### CONTAMINACION ATMOSFERICA

#### 3.1 Aire, Características Y Funciones

El aire es la mezcla de gases invisibles que rodea la tierra y que está dividida en capas que en su conjunto constituyen la Atmósfera. Ésta se encuentra sujeta a la tierra por la fuerza de gravedad y en condiciones libres de contaminantes posee la siguiente composición volumétrica aproximada:

**Tabla. 3.1:** Composición del aire atmosférico (limpio y seco).-

**Fuente:** “Fundamentals of Stack Gas Dispersion” - Mylton R. Baychock

<b>Componente</b>	<b>Concentración (ppm) *</b>	<b>Tiempo de residencia estimado</b>
Nitrógeno	$78.09 \times 10^4$	Continuo
Oxigeno	$20.94 \times 10^4$	Continuo
Argón	$93 \times 10^2$	Continuo
Dióxido de Carbono	$3.2 \times 10^2$	2 – 4 años
Neón	18	Continuo
Helio	5.2	Aprox. 2 millones años
Criptón	1.0	Continuo
Xenón	$8 \times 10^{-2}$	Continuo
Monóxido de Carbono	$1 \times 10^{-1}$	0.5 años
Metano	1.2	4 – 7 años
Óxido Nitroso	$25 \times 10^{-2}$	4 años
Óxido Nítrico	$6 \times 10^{-4}$	5 días
Amoníaco	$6 \times 10^{-3}$	7 días
Sulfuro de Hidrógeno	$2 \times 10^{-4}$	2 días
Dióxido de Azufre	$2 \times 10^{-4}$	4 días
Hidrogeno	$5 \times 10^{-1}$	?
Ozono	$2 \times 10^{-2}$	Apróx. 60 días

La proporción entre los gases se mantiene gracias a su regeneración mediante procesos cíclicos. El nitrógeno, que es el componente principal de las proteínas presentes en todos los seres vivos, se recicla a través de su incorporación a las cadenas alimenticias y su posterior devolución a la Atmósfera por los excrementos. El oxígeno, indispensable para la respiración de seres humanos, animales y plantas, es regenerado por la acción de los vegetales a través de la fotosíntesis, que se realiza especialmente en bosques y en el fitoplancton marino. El dióxido de carbono se regenera por la respiración de los seres vivos - que retorna este gas al ambiente -, por volcanismo o por la combustión de sustancias como la madera.

Si bien hay una regeneración constante de estos gases en la Atmósfera, lo cual hace pensar que el aire es un recurso inagotable, algunas actividades humanas pueden alterar su composición y afectar su calidad. Por ejemplo, la tala indiscriminada de árboles y la contaminación de los mares, que destruye el plancton, causa una disminución del oxígeno atmosférico. La actividad industrial, por su parte, produce un aumento de dióxido de carbono, alterando el ciclo del carbono - nitrógeno.

Además de contener el oxígeno necesario para la respiración y para la purificación del aire y el agua, la Atmósfera retiene el calor y actúa como regulador térmico. Sin ella la temperatura terrestre alcanzaría más de 75°C durante el día y más de 130°C bajo cero en la noche (Fuente: "Fundamentals of Stack Gas Dispersion" - Mylton R. Baychock) . En la Atmósfera se origina el clima, específicamente en la Tropósfera, que es la capa más cercana a la tierra y la que contiene casi todo el vapor de agua y las nubes. Aquí se producen los fenómenos que determinan el clima global, regional y local y se encuentran la mayoría de los contaminantes generados en el planeta. Más arriba, en la Estratósfera, la Atmósfera contiene ozono (O<sub>3</sub>), que es el encargado de absorber la radiación ultravioleta emitida por el sol, que es altamente dañina para los seres vivos.

Además de estas importantes funciones, el aire puede ser una fuente de energía si se utilizan tecnologías renovables como las turbinas de viento, que permiten generar en ciertos lugares con las condiciones adecuadas, energía al mismo o menor costo que la producida por plantas nucleares o que las alimentadas por combustibles fósiles como el carbón.

### 3.2 Capas Atmosféricas

La atmósfera está formada por 5 capas principales en función de su temperatura, composición química, densidad y movimiento, pero también posee otras regiones de características especiales. Esto indica que la atmósfera no es solamente una mezcla de gases suspendidos en lo alto del planeta, sino que se trata de una estructura compleja cuya constitución varía según la capa.

- **Troposfera:** Es la capa más cercana a la corteza terrestre. Se extiende hasta una altura de 8 kilómetros sobre los polos y de unos 18 kilómetros sobre el ecuador.

Tienen lugar la mayor parte de los fenómenos relacionados con el tiempo atmosférico (vientos, nubes y lluvias) y en ella las temperaturas descienden a razón de 6°C por kilómetro de altitud. En su nivel superior se forman las nubes más altas, que son los cirros.

Hay una gran movilidad de gases. La troposfera contiene el 80% de toda la masa de gases de la atmósfera y el 99% de todo el vapor de agua. Con la altura disminuye la densidad del aire, la temperatura y la presión.

- **Estratosfera:** Se llama así porque los gases se disponen por su densidad en capas o estratos horizontales a causa de no haber corrientes verticales.

Es zona de equilibrio dinámico por no tener corrientes, y térmico porque la temperatura es baja pero constante, aproximadamente -70°C. A medida que asciende la altitud, la temperatura aumenta debido a que el ozono absorbe la luz solar.

Carece de vapor de agua, de dióxido de carbono y el oxígeno está muy enrarecido, pero en cambio hay hidrógeno y helio.

- **Mesosfera:** Se sitúa entre los 50 y 80 km de altitud.

La temperatura sufre un fuerte descenso térmico y alcanza temperaturas de  $-90^{\circ}\text{C}$ , la más baja de la atmósfera. Hay fuertes movimientos turbulentos sobre una capa de aire caliente. Es una capa importante por la ionización y las reacciones químicas que ocurren en ella. Los gases apenas se mueven.

- **Termosfera:** Se sitúa a partir de los 80 km. Es la última capa térmica, donde la temperatura aumenta de forma progresiva.

A estas alturas, el aire está enrarecido extremadamente. Las partículas experimentan una ionización por radiación ultravioleta y tienden a permanecer ionizadas debido a las mínimas colisiones que se producen entre los iones.

La termosfera ejerce una gran importancia en la refracción de las ondas, como por ejemplo las de radio.

Además de experimentar variaciones térmicas importantes, la atmósfera cambia también su composición química a medida que se aleja de la superficie terrestre.

-**Exosfera.** Es la última capa, la más externa hasta conectarse con el viento solar. Comprende el área desde la parte superior de la termosfera hasta unos 10,000 kilómetros de altura hasta perderse en el vacío del espacio interplanetario.

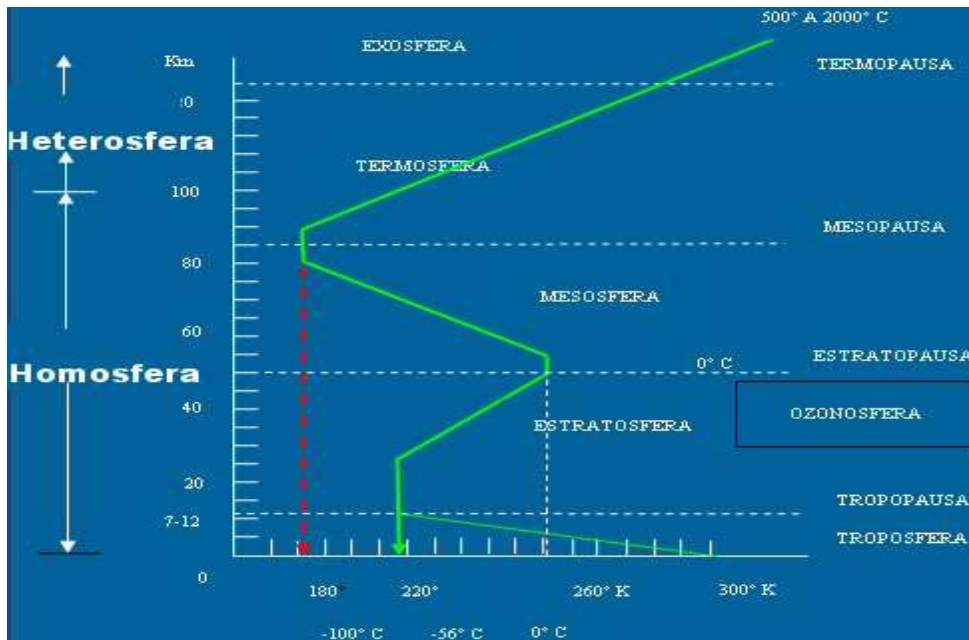


Figura 3.2: Estructura de la atmósfera.

Fuente: CIEMAT: Centro de investigaciones energéticas y medioambientales, 2014.

### 3.3 Contaminación Atmosférica

"Contaminación atmosférica puede definirse como cualquier condición en que ciertas sustancias alcanzan concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal, lo que puede producir un efecto negativo en las personas, en los animales y en la vegetación." (ref: Definición de contaminación Atmosférica de la Seremi de Salud)

### 3.4 Origen De La Contaminación

La contaminación Atmosférica se puede clasificar de acuerdo a su procedencia en dos grandes grupos:

**3.4.1 Fuentes Naturales:** Proceden de procesos dados por la naturaleza, como por ejemplo la erupción Volcánica y los incendios forestales.

**3.4.2. Fuentes Artificiales o Antropogénicas:** Que son consecuencias de las actividades humanas, como por ejemplo Calefacción doméstica, Actividad Industrial, Transporte.



**Figura 3.4:** Ejemplos de contaminación, Fuente Artificial (derecha); Fuente Natural (izquierda)

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 3.5 Tipo De Contaminantes

**Contaminantes Primarios:** Aquellos procedentes directamente de la fuente de emisión, como el NO.

**Contaminante Secundario:** Aquellos generados en la atmosfera por reacción de dos o más contaminantes primarios o por sus reacciones con los constituyentes normales de la Atmósfera, como por ejemplo el CO<sub>2</sub>.



## Contaminación primaria y secundaria



Figura 3.5: Clasificación de Contaminantes

Fuente: Educar Chile.

## CAPITULO 4

### MARCO TEORICO

En el presente Marco Teórico se describe el fenómeno que se estudiara consistente en las emisiones, dispersión de CO<sub>2</sub> y su captura por árboles para llevar a cabo su proceso de fotosíntesis.



**Figura 4.1:** Imagen izquierda Termoeléctrica Bocamina, Imagen derecha Bosque de Pino Radiata

**Fuente:** Google.

#### 4.1 Carbón

El carbón o carbón mineral es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos, principalmente hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno, utilizada como combustible fósil. La mayor parte del carbón se formó durante el período Carbonífero (hace 359 a 299 millones de años). Es un recurso no renovable.

##### 4.1.1 Tipos de Carbón

Las principales categorías de carbón se basan en el porcentaje de carbono que contienen, el cual a su vez depende de la evolución geológica y biológica que ha experimentado el carbón (Clasificación Europea):

- Turba (50 a 55 %): producto de la fosilización de desechos vegetales por los micro organismos en zonas húmedas y pobres en oxígeno.
- Lignito (55 a 75 %): Carbón mineral que se forma por compresión de la turba, convirtiéndose en una sustancia desmenuzable en la que aún se pueden reconocer algunas estructuras vegetales. Es de color negro o pardo y frecuentemente presenta una textura similar a la de la madera de la que procede.
- Hulla (75 a 90 %): - Hulla grasa o Carbón bituminoso bajo en volátiles es una roca sedimentaria orgánica. Es dura y quebradiza, estratificada, de color negro y brillo mate o graso. Se formó mediante la compresión del lignito, principalmente en la Era Paleozoica, durante los períodos Carbonífero y Pérmico. Surge como resultado de la descomposición de la materia vegetal de los bosques primitivos, proceso que ha requerido millones de años. Es el tipo de carbón más abundante.
- Antracita (90 a 95 %): Este mineral se extrae directamente de las minas y contiene una elevada proporción de carbono, un bajo contenido en volátiles, y reducido contenido de azufre, que le confieren unas excelentes propiedades para ser utilizado en procesos de reducción, y también como fuente de energía.
- Grafito: Carbono puro, no utilizado como combustible.



**Figura 4.1.1:** Porcentaje de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O presentes en los distintos tipos de Carbón.

**Fuente:** Revista EI.

La Hulla Grasa o Carbón Bituminoso es la más abundante y se utiliza principalmente en las centrales termoeléctricas para producir electricidad.

#### **4.2 Categorías De Estabilidad De Pasquill**

La cantidad o tipo de turbulencia en el aire ambiente tiene un efecto importante en el aumento de los penachos de gas de la chimenea y en la posterior dispersión de las plumas. Se puede categorizar en incrementos definidos como "Categorías de estabilidad". Las categorías más utilizadas son las Categorías de Estabilidad de Pasquill, que pueden ser: A, B, C, D, E y F; donde A denota la más inestable o turbulenta y la Categoría F denota la más estable o menos turbulenta. Estas categorías de Pasquill son las más utilizadas por la exactitud de su aproximación y son las utilizadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA. (USA Environmental Protection Agency).-

La turbulencia atmosférica se genera por muchos factores como: el flujo del viento en un terreno rugoso, árboles o edificios, la migración de masas de alta y baja presión de aire y "frentes" que causan los vientos, las turbulencias térmicas de aire caliente que sube, entre otros.

Cualquier factor que aumenta el movimiento vertical del aire (ya sea ascendente o descendente) aumentará el grado de turbulencia. La diferencia entre este gradiente vertical adiabático seco y una temperatura dada del aire ambiente proporciona una indicación directa de si el movimiento vertical del aire se verá reforzado o atenuado.

Velocidad superficial del viento en (m/s)	Día			Noche	
	Radiación Solar Incidente			Nuboso	Claro
	Fuerte (> 50 cal/cm2h)	Moderada (entre 25 y 50 cal/cm2h)	Débil (< 25 cal/cm2h)		
<2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
>6	D	D	D	D	D

**Tabla 4.2:** Categorías de Estabilidad (Pasquill).

**Fuente:** “Fundamentals of Stack gas dispersion” 2005

### 4.3 Modelo De Dispersión Gaussiano

Los modelos de dispersión gaussiano son de uso común en problemas de dispersión contaminantes no reactivos de fuentes puntuales tales como chimeneas industriales. Básicamente suponen que el penacho de un efluente presenta una distribución normal o de Gauss (Gaussiana) de las concentraciones, en torno al eje de simetría definido por la dirección del viento.

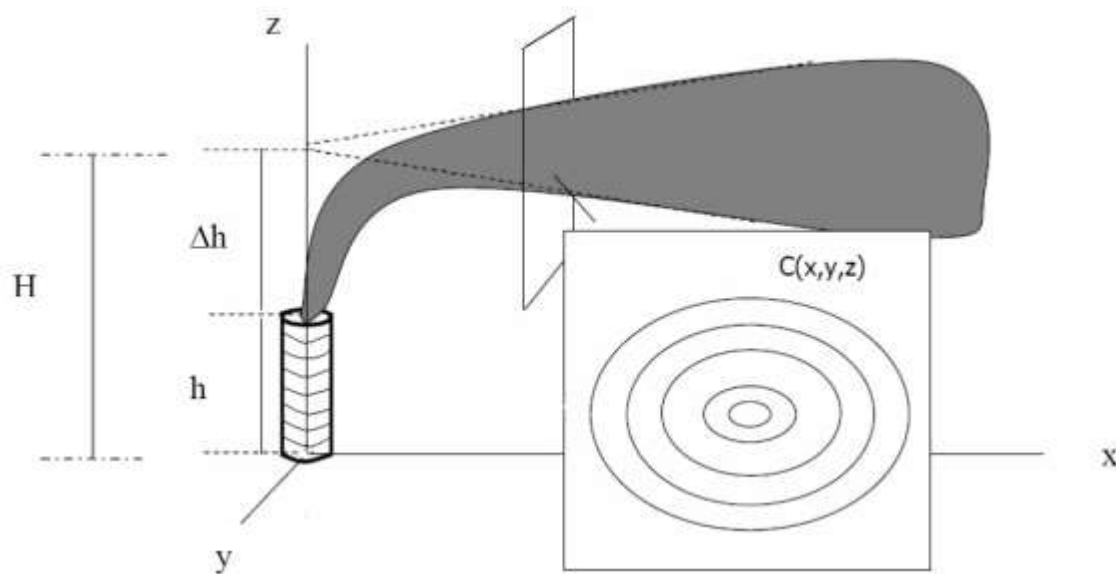
Cabe hacer notar que estos modelos son aptos para estimar efectos locales y que su grado de precisión y acierto es, en general, decreciente en tanto se aplican en localidades con relieve complejo y caracterizados por circulaciones atmosféricas complejas (US EPA, 1986).

### 4.3.1 Formula Matemática

Como se observa en la figura 4.3.1, la pluma se eleva a una altura adicional  $\Delta h$  (por sobre la de la chimenea  $h$ ), debido a que los gases calientes flotan y además del propio movimiento vertical que tienen cuando salen de la chimenea.

Así, la altura efectiva de la chimenea es  $H = h + \Delta h$ , donde:

- $z$ : Dirección Vertical.
- $x$ : Distancia en la dirección del Viento.
- $h$ : Altura de la chimenea.
- $\Delta h$ : Elevación de la pluma.
- $H$ : Altura efectiva de la chimenea.  $h + \Delta h$



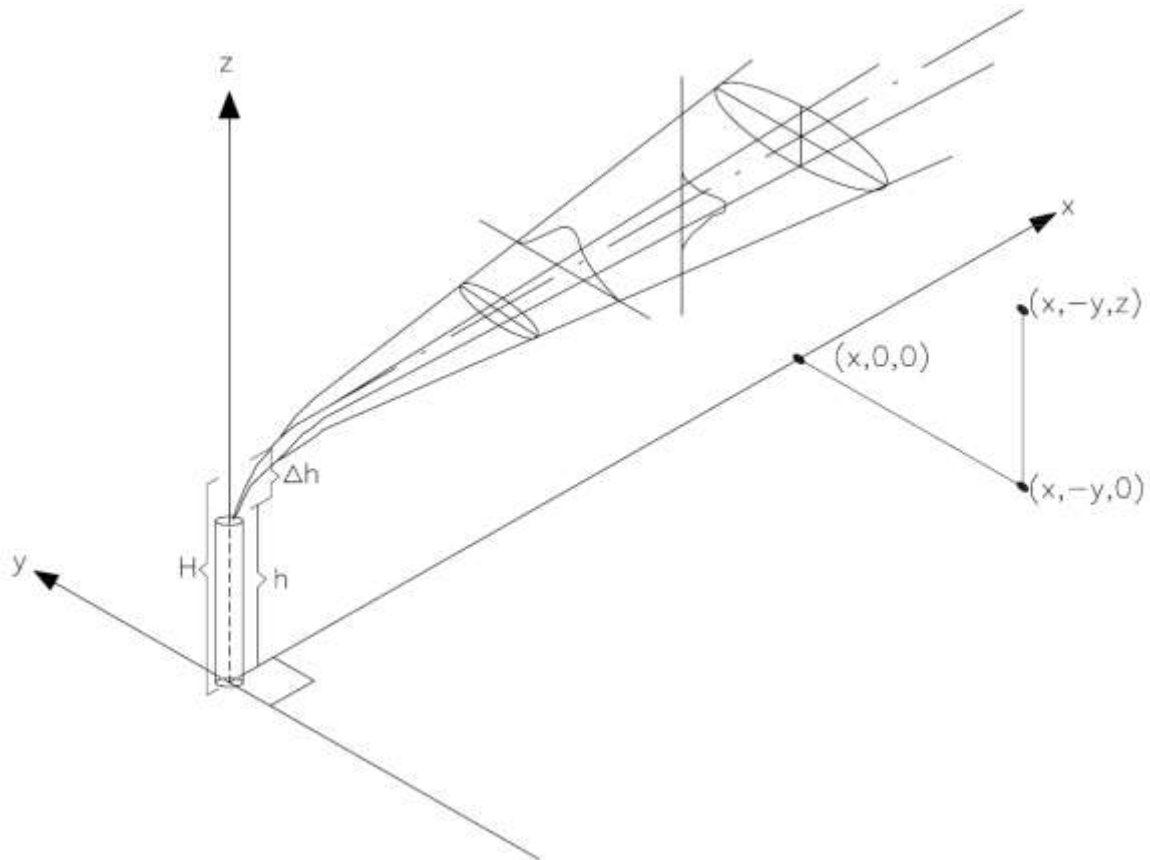
**Figura 4.3.1:** Modelo de dispersión con una fuente puntual virtual a una altura efectiva ( $H$ ) de la chimenea.

**Fuente:** Gallardo, 2003

### Suposiciones fundamentales del modelo

- La fuente emite un valor constante
- La velocidad del viento es constante ( en tiempo y espacio)

- El contaminante es conservador ( no se descompone, reacciona o sedimenta)
- El terreno es relativamente plano



**Figura 4.3.2:** Sistema de Coordenadas y Geometría del Penacho.

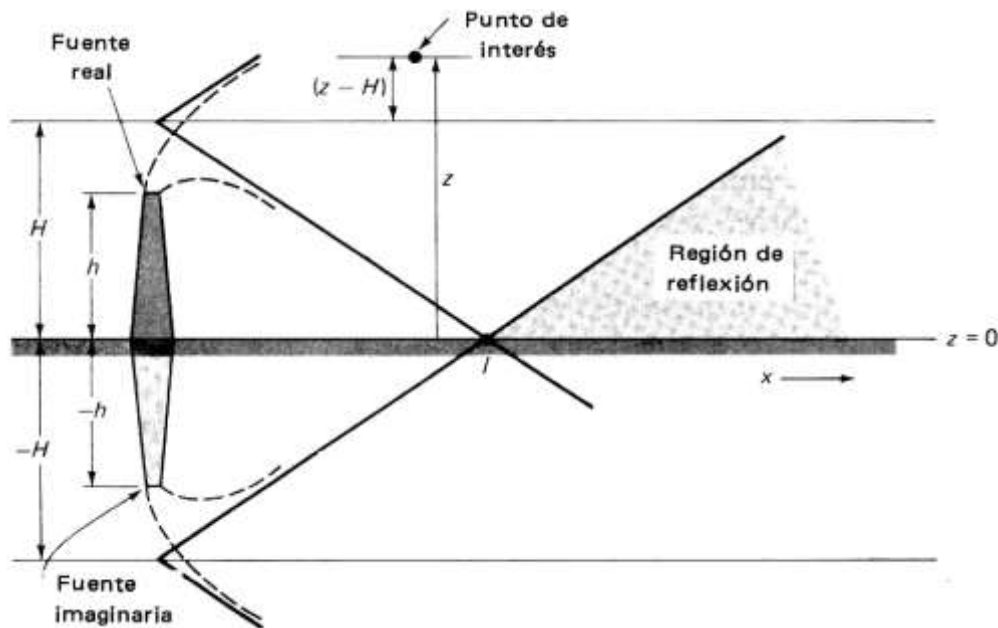
**Fuente:** Apuntes diplomado en Tecnología y Gestión Ambiental, Pedro Cisterna 2011

Para el caso en el que los contaminantes emanan a la altura de la chimenea y sin efecto de la reflexión del suelo, se tiene la siguiente ecuación:

$$C = \frac{Q}{u \cdot 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{\left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} \right) \right]} \quad \text{..... Ec (4.3.1)}$$

Una modificación de la ecuación (4.3.1) se refiere a que el contaminante se reflejará a partir de una cierta distancia en  $x$ . Al dispersarse a la Atmósfera este contaminante se refleja desde el nivel del suelo, lo que implica además, que el suelo no es sumidero de dicho contaminante.

Para modelar lo anterior, se hace necesario usar una fuente puntual imaginaria, tal como se muestra en la figura (4.3.3) con una altura efectiva  $z = -H$ , donde se tiene una imagen correspondiente a un espejo de la fuente original. La concentración será mayor a la determinada sin tomar en cuenta la reflexión del contaminante ya que existe una superposición de dos curvas gaussianas, donde la primera corresponde a una fuente virtual en  $H$  y la otra en  $-H$ .



**Figura 4.3.3:** Efecto de la reflexión del suelo.  
Fuente: Gallardo, 2003

La ecuación (4.3.2) corresponde a la formulación matemática descrita anteriormente.

$$C = \frac{Q}{u \cdot 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot e^{\left(\frac{-y^2}{\sigma_y^2}\right)} \left[ e^{\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + e^{\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right] \dots \text{Ec. (4.3.2)}$$



Donde:

$C$ : Concentración del contaminante en  $\mu\text{g} / \text{m}^3$ .

$Q$ : Emisión de gas en  $\text{g} / \text{s}$ .

$z$ : Distancia eje  $z$  en m.

$y$ : Distancia eje  $y$  en m.

$h$ : Altura de la chimenea en m.

$H$ : Altura efectiva de la chimenea en m.

$\sigma_y, \sigma_z$ : Coeficientes de dispersión o desviaciones normales horiz. Y vert. en m

Significado de cada uno de los términos de la ecuación:

$e^{\left[ \frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right]}$ : Parámetro de dispersión de viento cruzado.

$e^{\left[ \frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right]}$ : Dispersión vertical sin reflexión.

$e^{\left[ \frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right]}$ : Dispersión vertical por reflexión desde el suelo.

#### 4.3.2 Determinación De Los Coeficientes De Dispersión $\sigma_y$ , $\sigma_z$ .

##### Empleo de Correlación de Delance O. Martin:

La propuesta de Delance O. Martin (1976) se muestra en las ecuaciones (4.3.3) y (4.3.4):

$$\sigma_y = ax^b \dots\dots\dots\text{Ec. (4.3.3)}$$

$$\sigma_z = cx^d + f \dots\dots\dots\text{Ec. (4.3.4)}$$

Donde:

$$b = 0.894$$

$a$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $f$  están en función de la clave de categoría de estabilidad (Pasquill).

$x$  : Distancia en dirección del viento en kilómetros.

Los valores de las constantes  $a$ ,  $c$ ,  $d$  y  $e$ , se muestran en la tabla 4.3.2.

	$x \leq 1 \text{ km}$				$x > 1 \text{ km}$		
Estabilidad	A	C	D	f	c	D	F
A	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2
C	104	61	0.911	0	61	0.911	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34
F	34	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.180	-48.6

**Tabla 4.3.2:** Valores de las constantes en ecuación de Delance O. Martin para el cálculo de  $\sigma_y$  y

$\sigma_z$  en función de la distancia en la dirección del viento y la condición de estabilidad.

Fuente: Delance o Martin 1965

### 4.3.3 Estimación De La Elevación De La Pluma $\Delta h$ .

La elevación del penacho ( $\Delta h$ ) se define como la diferencia entre la altura de la línea central final del penacho y la altura inicial de la fuente.

Esta elevación está originada por la fuerza ascensional (capacidad de flotación), que tienen los gases a temperaturas altas y el impulso vertical del efluente.

La temperatura de salida del efluente en el caso de que supere en más de 50 °C la temperatura ambiental, tiene mayor influencia que el impulso vertical en la determinación de la altura que alcanzará el penacho.

Como regla general la elevación del penacho es directamente proporcional al contenido calorífico del efluente y a la velocidad de salida del mismo, e inversamente proporcional a la velocidad local del viento.

En la estimación de  $\Delta h$ , se utilizaran las ecuaciones o modelo de Correlación De Briggs.

## Correlación De Briggs

Esta es la correlación utilizada por la Agencia de protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

La utilización de esta correlación presenta los mejores resultados respecto a las demás ecuaciones en el caso de estudios de plantas que utilizan combustibles como carbón. La ecuación que la describe es la 4.3.5.

$$\Delta h = \frac{114 C F^{1/3}}{u} \dots \dots \dots \text{Ec. (4.3.5)}$$

$$F = \frac{g \cdot V_s d^2 (T_s - T_a)}{4 T_a} \dots \dots \dots \text{Ec. (4.3.6)}$$

Donde:

$g$ : Aceleración de gravedad 9,8 m/s<sup>2</sup>

$$C = 1.58 - 41.4 \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta z} \right);$$

$\left( \frac{\Delta \theta}{\Delta z} \right)$ : Gradiente de temperatura en (K/m).

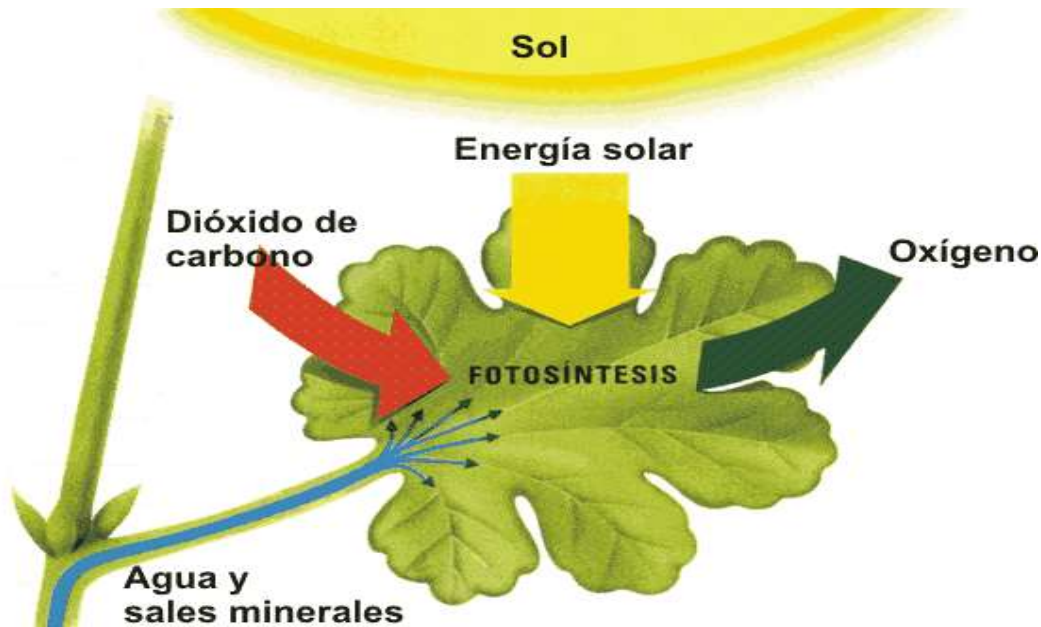
## 4.4 Fotosíntesis

En la naturaleza, existen organismos que se alimentan de otros seres vivos, y son llamados heterótrofos. También existen unos capaces de sintetizar su propio alimento sin necesidad de usar materia orgánica de otros seres vivos. A estos organismos se les llama autótrofos. Dentro de esta categoría se incrustan las plantas verdes, que realizan un proceso denominado fotosíntesis.

La fotosíntesis puede definirse como un proceso químico mediante el cual se sintetizan sustancias orgánicas a partir de la energía lumínica solar. Gracias a esta energía, las plantas convierten el agua del suelo y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire en glucosa, un nutriente esencial que les provee energía y permite la fabricación de la celulosa.

La fotosíntesis, forma básica de nutrición del reino Plantae, tiene lugar en los cloroplastos, que presentan un pigmento llamado clorofila. Éste interviene en el proceso fotosintético y dota del característico color verde a las plantas.

Todas las plantas que realizan la fotosíntesis son organismos fotoautótrofos. La fuente de energía de éstos es la luz del sol y su principal fuente de hidrógeno es el agua.



**Figura 4.4:** Proceso de Fotosíntesis.  
**Fuente:** Fotosíntesis, Isaac Asimov.

#### 4.4.1 El CO<sub>2</sub> y La Fotosíntesis

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es un componente natural de la atmósfera y su densidad es de 679.97 mg/metro cúbico de aire. Su concentración en la composición del aire es apenas del 0.032%; sin embargo, es el compuesto orgánico más importante para el sostenimiento de la biosfera (conjunto de todos los seres vivos en la tierra).

Sin el CO<sub>2</sub> la vida de los organismos fotosintéticos y de los animales no sería posible, pues el CO<sub>2</sub> sirve como base para la formación de compuestos orgánicos que son nutrientes para las plantas y los animales.

A través de la fotosíntesis, los organismos con clorofila toman el CO<sub>2</sub> atmosférico o disuelto en agua para formar moléculas más complejas, como carbohidratos, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.

La fórmula general de la fotosíntesis es la siguiente:



El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es fijado en el tejido conectivo del cloroplasto. Luego, el dióxido de carbono fijado se utiliza en el citoplasma para sintetizar sacarosa.

El organismo con clorofila absorbe luz, CO<sub>2</sub> y agua del entorno. La molécula de agua se rompe y el Hidrógeno de dicha molécula se adhiere a las moléculas de bióxido de carbono para formar glucosa. El Oxígeno de las moléculas de agua es liberado al ambiente, en tanto que la energía proporcionada por los fotones queda atrapada en los enlaces de la molécula de glucosa.

Se ha determinado experimentalmente que la densidad de dióxido de carbono para el desarrollo óptimo de toda clase de plantas es el de 895 mg/metro cúbico (895.000 microgramo/metro cubico) de aire (cerca de 500 ppmv).

#### 4.4.2 Ciclo del Carbono

El carbono es un elemento químico no metálico cuyo símbolo es C. Es uno de los elementos más importantes y abundantes en la corteza de la Tierra, y forma parte de todos los seres vivos. Gracias a su versatilidad y la capacidad de sus átomos de unirse a los principales bioelementos, se forman diferentes combinaciones que son la base de las moléculas de los organismos. En suma, el carbono es el principal componente de la materia orgánica.

En principio, el carbono se encuentra en la atmósfera en forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El ciclo del carbono se define como un ciclo biogeoquímico por el cual se intercambia carbono entre los distintos organismos de la Tierra a través de diversas reacciones entre la biosfera (suma de los ecosistemas), la litosfera (capa sólida superficial del planeta), la hidrosfera (aguas bajo y sobre la superficie del planeta) y la atmósfera (aire). Este intercambio permite que el carbono regrese a la atmósfera y que retorne a los seres vivos.

Es un proceso complejo y no lineal, es decir, muchas de las reacciones por las que el carbono se intercambia suceden al mismo tiempo. Para entenderlo, hay que partir de la presencia del dióxido de carbono en la atmósfera, que es el principal depósito de C.

-El dióxido de carbono como desecho de la respiración de los seres vivos y de otros procesos de combustión entra en la atmósfera.

-Algunos procesos geológicos, como las erupciones volcánicas y la emisión de gases de los géiseres, liberan al aire una gran cantidad de carbono, contenido como dióxido de carbono.

-Las plantas absorben el CO<sub>2</sub> del aire a través de los estomas de sus hojas para realizar su proceso de fotosíntesis. Una vez que el compuesto está en su interior, el CO<sub>2</sub> y el agua captada del suelo son sintetizados con ayuda de la clorofila para producir azúcares. Después, las plantas sintetizan dichos azúcares en compuestos complejos de carbono en los tejidos.

-Una pequeña parte del CO<sub>2</sub> regresa a la atmósfera como desecho de la respiración vegetal, otra se queda en el suelo y otra más pasa a los seres vivos que se alimentan de las plantas.

-Aquellos animales que consumen plantas ingieren también compuestos de carbono y estos se convierten en materia orgánica, es decir, carne. Al respirar, exhalan dióxido de carbono como desecho del intercambio de gases.

-Los animales consumidores de plantas sirven de alimento para otros: los carnívoros. Entonces, el carbono también pasa a su cuerpo y les es útil para formar sus propios órganos, huesos, tejidos, etcétera. Por supuesto, estos también desechan dióxido de carbono al respirar, el cual pasa a la atmósfera.

-Naturalmente, los seres vivos mueren en algún momento. Pequeños organismos descomponedores (como bacterias y hongos) se alimentan de los cuerpos y los disuelven en partes más pequeñas que quedan en el suelo. Al mismo tiempo, liberan dióxido de carbono.

-A través de sus raíces, las plantas absorben las partículas del suelo con carbono, y este pasa entonces a su estructura.

-Al realizar la fotosíntesis, las plantas liberan CO<sub>2</sub> y este vuelve a la atmósfera.

-En ocasiones, la materia orgánica permanece en el suelo sin descomponerse ni ser usada por las plantas o animales, y durante miles o millones de años permanece en la litosfera en forma de carbón, petróleo y gas natural, y en

arrecifes de coral y roca caliza. Los primeros 3 son combustibles fósiles que posteriormente pueden ser sometidos a la combustión.

-En el mar, el carbonato de calcio de las conchas de algunos animales, como los caracoles, pasa al fondo marino cuando ellos mueren y a veces forma roca caliza. Si esta es expuesta al aire libre, se degrada y libera dióxido de carbono a la atmósfera.

La fotosíntesis de las plantas y la disolución en los océanos eliminan el dióxido de carbono del aire, el cual es devuelto a él por medio de la respiración de seres vivos, la quema de combustibles fósiles y la descomposición de la roca caliza.

*El ciclo del carbono es uno de los ciclos biogeoquímicos más complejos y es crucial para el equilibrio de la Tierra al ser el carbono el principal componente de la materia de los seres vivos. Asimismo, el dióxido de carbono influye en el clima del planeta, ya que atrapa parte de la radiación del Sol y así el calor se mantiene constante e idóneo para la supervivencia. Sin embargo, en las últimas décadas los niveles de dióxido de carbono han aumentado bastante, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles, lo que ha contribuido al fenómeno conocido como calentamiento global, y subsecuentemente, al cambio climático.*

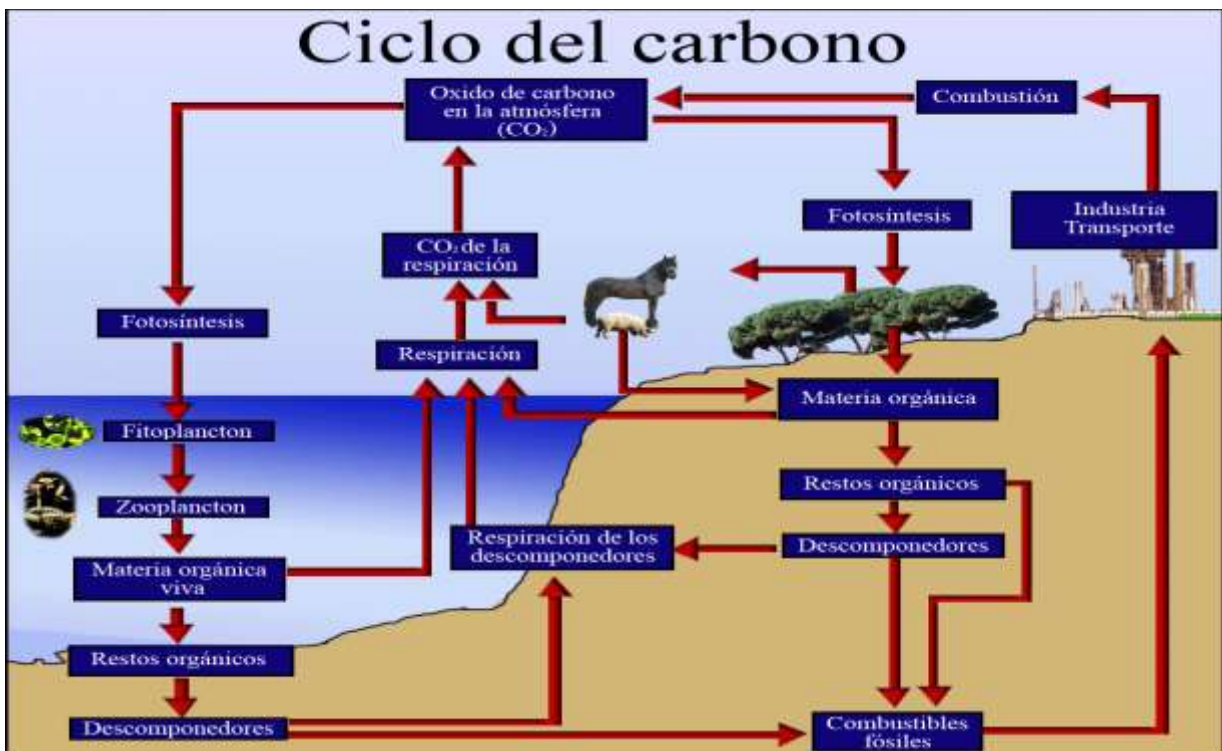


Figura 4.4.2: Ciclo del Carbono.  
Fuente: Bioenciclopedia.

#### 4.4.3 Bosques y Captación de CO<sub>2</sub>

La captura de carbono se realiza únicamente durante el desarrollo de los árboles. Los árboles absorben dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) atmosférico junto otros elementos en suelos y aire para convertirlos en madera. La cantidad de CO<sub>2</sub> que un árbol captura durante un año, consiste sólo en el pequeño incremento anual de la biomasa en el árbol multiplicado por la biomasa del árbol que contiene carbono.

Aproximadamente 42% a 50% de la biomasa de un árbol (materia seca) es carbono. Hay una captura de carbono neta, únicamente mientras el árbol se desarrolla para alcanzar madurez. Cuando el árbol muere, emite hacia la atmósfera la misma cantidad de carbono que capturó. En estado estable, un bosque en plena madurez aporta la misma cantidad de carbono que captura. Por tanto, no es importante cuanto carbono el árbol captura inmediatamente, sino cuanto carbono captura durante toda su vida.

Para calcular la captura de carbono es necesario conocer el período en cual el bosque alcanzará su madurez. Los índices de captura de carbono varían de acuerdo al tipo de árboles, suelos, topografía y prácticas de manejo en el bosque.

La acumulación de carbono en bosques y suelos llega eventualmente a un punto de saturación, a partir del cual la captura de carbono resulta imposible. Esto sucede, por ejemplo, cuando los árboles alcanzan su madurez o cuando la materia orgánica en los suelos se transforma a su estado original.

Deben continuar las prácticas para captura de carbono, aún después de haber llegado al punto de saturación para impedir la emisión de carbono nuevamente a la atmósfera. Plantas, humanos y animales, son formas de vida basadas en el carbono que utilizan energía solar para obtener el carbono necesario para la química en las células. Los árboles absorben CO<sub>2</sub> a través de los poros en sus hojas. Particularmente por la noche, los árboles emiten más CO<sub>2</sub> del que absorben a través de sus hojas.

**Una tonelada de carbono en la madera de un árbol ó en la biomasa de un bosque representa alrededor de 3.5 toneladas de CO<sub>2</sub> atmosférico.** Esto significa que 100 Kg. de madera seca contienen 45 Kg. de carbono equivalente a 165 Kg. de CO<sub>2</sub>. Árboles maduros, plantados a distancia de 5 metros forman un bosque de 400 árboles por hectárea con 300 Kg. de carbono en cada árbol. Si bien generalmente 42% de la biomasa en el árbol es carbono, esto significa que cada árbol pesa 714 Kg.

Estimaciones sobre captura de carbono durante 100 años oscilan entre 75 y 200 toneladas por hectárea, dependiendo en el tipo de árbol. Es posible entonces



asumir 100 toneladas de carbono capturado por hectárea, equivalente a 350 toneladas de CO<sub>2</sub> por hectárea en 100 años. Esto es igual a una tonelada de carbono y 3.5 toneladas de CO<sub>2</sub> por año y por hectárea, sin tomar en cuenta la pérdida de árboles. Calculando la pérdida de árboles en 25% por hectárea. Entonces la captura de carbono es de 75 ton/ha. equivalente a 2.6 ton de CO<sub>2</sub> por año y por hectárea.

El promedio mundial de emisiones de CO<sub>2</sub> por persona, fue 3.9 ton. en 2001. Entonces se necesitarían por persona 1.5 ha. plantadas con árboles en regiones sin forestación para compensar las emisiones de esta sola persona. Adicionalmente se necesitarían 9,000 millones de hectáreas para compensar las emisiones de 6,000 millones de habitantes en el mundo. Sin embargo, la población y emisiones de CO<sub>2</sub> aumentan diariamente, por lo que se necesitarían mucho más hectáreas.

## **CAPITULO 5**

### **CALCULO DE EMISIONES Y CONCENTRACION DE CO2**

#### **5.1 Emisiones De Co2**

En este capítulo se calcularon las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas por la central a carbón. Se utilizó información como referencia de la Termoeléctrica Bocamina, perteneciente a ENEL, ubicada en la ciudad de Coronel, Octava Región de Chile.

##### **Datos de Termoeléctrica Bocamina:**

Combustible: Carbón Bituminoso (6000 kcal/kg).

Contenido de carbono del carbón bituminoso: Entre 75% y 90%. En este estudio se consideró un 80% de contenido de C.

Cantidad de Carbón:

- 1 millón de toneladas por año.
- 2739,726 toneladas por día.

##### **Cantidad de Carbono presente en el combustible:**

Del 100% de carbón quemado, solo el 80% corresponde a C.

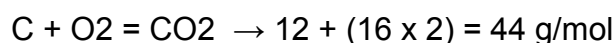
$$2739,726 \text{ ton/día} \times 0,8 = 2191,78 \text{ ton/día de C}$$

La Termoeléctrica Bocamina quema 2191,78 ton/día de Carbono.

##### **Emisiones De CO2 Producidas En La Combustión Del C.**

Peso atómica del oxígeno: 16 gr/mol

Masa atómica del carbono: 12 gr/mol



12 C → 2191,78 ton/día

44 CO<sub>2</sub> → X tonCO<sub>2</sub>/día

X= 8036,53 [tonCO<sub>2</sub>/día] = 9,30154E10 [ugrCO<sub>2</sub>/s]

Al hacer reaccionar 2191,78 ton/día de C con O<sub>2</sub> se producen 9913,163 [ton/día] de CO<sub>2</sub> o 9,30154E10 [ug/s] de CO<sub>2</sub>.

## 5.2 Concentraciones de Co2 en función de la distancia al punto de vertido

### Modelo de Dispersión Gaussiano

El Modelo de Dispersión Gaussiano permite cuantificar la concentración de CO<sub>2</sub> en función de las coordenadas geográficas y la distancia al punto de origen.

$$C = \frac{Q}{u \cdot 2\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} * e^{\left(-\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)} * e^{\left(-\frac{(-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)}$$

#### Donde:

C: Concentración del contaminante en  $\mu\text{g} / \text{m}^3$ .

Q: Emisión de gas en  $\mu\text{g} / \text{s}$ .

z: Distancia eje z en m.

y: Distancia eje y en m.

h: Altura de la chimenea en m.

H: Altura efectiva de la chimenea en m.

$\sigma_y, \sigma_z$ : Coeficientes de dispersión o desviaciones normales horiz. y vert. en m.

**Datos Termoeléctrica Bocamina:**

- Q: 9,30154E10 [ugrCO2/s]
- X: 400 [m] – 600 [m] – 800 [m] – 1200 [m] – 1600 [m] – 2000 [m]
- Y: 0 [m]
- Z: 0 [m]
- h: 100 [m]
- H: h+ Δh [m]

**Calculo de H: H= h+ Δh [m]**

$$\Delta h = \frac{114 CF^{1/3}}{u}$$

- u: 2,6 m/s Velocidad del viento a la altura efectiva de la chimenea.
- $C = 1.58 - 41.4 \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta z}\right)$ ;  $\frac{\Delta\theta}{\Delta z} = -0,001$ , gradiente de temperatura potencial

$$C = 1,6214$$

- $F = \frac{g \cdot V_s d^2 (T_s - T_a)}{4T_a}$

Donde:

$$g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$V_s = 13,6 \text{ [m/s]}$$

$$d_1 = 6,25 \text{ [m]}$$

$$d_2 = 2 \text{ [m]}$$

$$T_s = 80^\circ\text{C} = 353,15 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_a = 13,6 \text{ °C} = 286,75 \text{ °K}$$

Fuente de los datos: ENEL, Termoeléctrica Bocamina.

**Caso 1: Diámetro de la Chimenea 6,25 [m]**

$$F = \frac{9,8 * 13,6 * 6,25^2(353,15 - 286,75)}{4 * 286,75}$$

$$F = 301,39058$$

$$\Delta h = \frac{114 * 1,6214 * 301,39058^{1/3}}{3,98}$$

$$\Delta h = 311,37842 \text{ [m]}$$

$$H : 100 \text{ [m]} + 311,37842 \text{ [m]} = 411,37842 \text{ [m]}$$

**Caso 2: Diámetro de la Chimenea 2 [m]**

$$F = \frac{9,8 * 13,6 * 2^2(353,15 - 286,75)}{4 * 286,75}$$

$$F = 30,862396$$

$$\Delta h = \frac{114 * 1,6214 * 30,862396^{1/3}}{3,98}$$

$$\Delta h = 145,67616 \text{ [m]}$$

$$H : 100 \text{ [m]} + 145,67616 = 245,67616 \text{ [m]}$$

Para el cálculo de la concentración con la cual llega el flujo de CO<sub>2</sub> a una determinada distancia, se utilizaron las dos alturas efectivas (H) calculadas anteriormente, más dos nuevas alturas efectivas propuestas para sensibilizar y comparar las concentraciones, las cuales serán de 100 [m] y 150[m].

### Cálculo de $\sigma_y, \sigma_z$ : Empleo de Correlación de Delance O. Martin

- $\sigma_y = ax^b$
- $\sigma_z = cx^d + f$

Donde:

$$b = 0.894$$

$a, c, d, f$  están en función de la clave de categoría de estabilidad (Pasquill).

$x$  : Distancia en dirección del viento en kilómetros.

Los valores de las constantes a, c, d y e, se muestran en la tabla 4.3.2.

Antes de calcular los coeficientes de dispersión, cabe mencionar que en el presente proyecto de título se trabajó con las Categorías de Estabilidad de Pasquill A, B, C, E y F. Estas categorías son las que se presentan en la zona donde se encuentra la Termoeléctrica Bocamina (Coronel), según la tabla 4.1.

### Coefficientes de dispersión horizontal $\sigma_y$

	Coeficiente Horizontal (y)					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
$\sigma_y - A$	93,8904	134,911	174,479	250,708	374,237	395,822
$\sigma_y - B$	68,7648	98,8079	127,787	183,617	237,47	289,898
$\sigma_y - C$	45,8432	65,872	85,1914	122,411	158,313	193,265
$\sigma_y - E$	22,2604	31,9859	41,367	59,4401	76,8731	93,8452
$\sigma_y - F$	14,9872	21,5351	27,851	40,0191	51,7562	63,1829

**Tabla 5.3.2:** Coeficientes De Dispersión Horizontal.

Fuente: Elaboración Propia.

### Coefficientes de dispersión vertical $\sigma_z$

	Coeficiente vertical (z)					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
$\sigma_z - A$	83,7158	172,813	295,121	663,811	1220,39	1953
$\sigma_z - B$	40,4984	62,5725	85,7912	134,181	183,28	233,61
$\sigma_z - C$	26,4732	38,3024	49,7788	72,0218	93,6016	144,701
$\sigma_z - E$	10,9499	14,8258	18,293	24,568	29,9391	34,4422
$\sigma_z - F$	6,93411	9,48295	11,8157	16,0885	19,5265	22,3185

**Tabla 5.3.2:** Coeficientes De Dispersión Vertical.

Fuente: Elaboración Propia.

Basado en los datos y resultados obtenidos anteriormente, se obtuvieron las siguientes concentraciones de CO<sub>2</sub> dependiendo de la altura efectiva, tipo de estabilidad presente en la atmosfera y la distancia a la que se ubicara el bosque para la captación del GEI.

Concentración [ug/m3] - H= 100 [m]						
Estabilidad de Pasquill	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
A	709842	413139	208813	67653,6	24850,1	14712
B	193935	513626	526587	350123	225457	153428
C	7480,4	149405	356998	492630	434293	320700
E	3,62E-11	0,003	4,88	1969,55	18700,2	52050
F	7,55E-38	3,97E-17	9,67E-9	0,07	22,73	353.013

**Tabla 5.3.3:** Concentraciones de CO2 para una chimenea con altura efectiva de 100 [m]

Fuente: Elaboración Propia.

Concentración [ug/m3] - H= 150 [m]						
Estabilidad de Pasquill	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
A	290978	335126	194353	66700,8	24746	14688
B	4292,32	104084	225258	247436	187180	136826
C	1,00204	2109,57	28658,9	147652	212800	237938
E	8,33E-34	1,42E-15	3,78E-8	0,062	17,52	268,088
F	2,66E-94	2,60E-47	3,49E-28	2,35E-12	0,00	0,001

**Tabla 5.3.4:** Concentraciones de CO2 para una chimenea con altura efectiva de 150 [m]

Fuente: Elaboración Propia.

Concentración [ug/m3] - H= 246 [m]						
Estabilidad de Pasquill	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
A	19318,2	177333	156247	63884,7	24432,2	14615
B	0,0397	810,93	17025	86092	106295	96584
C	1,67E-12	0,005	13,3604	3782,59	24307,9	95986,2
E	1,18E-102	3,94E-53	8,09E-33	1,32E-15	1,08E-08	0,00003
F	5,46E-266	4,14E-139	2,59E-87	3,01E-44	3,9E-28	3,36E-20

**Tabla 5.3.5:** Concentraciones de CO2 para una chimenea con altura efectiva de 246 [m]

Fuente: Elaboración Propia.

Concentración [ug/m3] - H= 411,4 [m]						
Estabilidad de Pasquill	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
A	8,23	28719,1	83698,4	56490,5	23556,4	14408
B	1,597E-16	0,0008	10,55	4201,97	21067,8	35665,9
C	3,39E-46	4,01E-19	3,96E-09	0,106	49,1	7154,07
E	1,40E-299	1,50E-160	2,24E-103	1,0E-54	4,9E-35	3,7E-25
F	1,44E-755	1,134E-401	1,96E-256	1,82E-135	4,59E-90	1,33E-67

**Tabla 5.3.6:** Concentraciones de CO2 para una chimenea con altura efectiva de 411,4 [m]

Fuente: Elaboración Propia.



En la tabla 5.3.7 se presentan las Concentraciones de CO<sub>2</sub> a nivel planeta, determinados por la Organización Meteorológica Mundial:

	Concentración de CO <sub>2</sub>	
	Ppm	ug/m <sup>3</sup>
<b>Al aire libre</b>	400	720.000
<b>Ciudades</b>	700	1.260.440

**Tabla 5.3.7:** Concentraciones de CO<sub>2</sub> a Nivel Planeta.

**Fuente:** Organización Meteorológica Mundial.

## CAPITULO 6

### CÁLCULO DE CAPTACION DE CO2 POR LOS BOSQUES

#### 6.1 Características de los Bosques

A continuación, en la tabla 6.1 se presenta la información del tipo de árboles que se utilizó para el presente proyecto de título, datos obtenidos de la Corporación Nacional Forestal (CONAF).

	<b>Eucalipto</b>	<b>Pino Radiata</b>
<b>Altura</b>	Entre 50 [m] y 70 [m]	Entre 40 [m] y 50 [m]
<b>Diámetro</b>	Entre 1.50 [m] y 2 [m]	Sobre 0.5 [m]
<b>Captura de CO2 [ton/año/ha]</b>	29,9	17,1
<b>Captura de CO2 [kg/día/ha]</b>	81,92	46,85
<b>Edad de Madurez</b>	15 años	20 años

**Tabla 6.1:** Características Eucalipto y Pino Radiata.

**Fuente:** Elaboración Propia. Información CONAF

Se decidió utilizar este tipo de árboles, debido a que son los que poseen la mayor tasa de captación de CO2 por hectárea al año según estudios de la CONAF.

#### 6.2 Cálculo del caudal de gas que llega al bosque

Los cálculos fueron realizados para una hectárea de bosque y para una altura de 20 [m] en el caso del Pino Radiata y 30 [m] en el caso del Eucalipto.

$$\text{Caudal de gas} = \text{Área del bosque} \times \text{Velocidad del viento}$$

##### **Pino Radiata:**

- Área = 100 [m] x 20 [m]

$$\text{Área} = 2000 \text{ m}^2$$

- Velocidad del viento = 2,6 m/s
- Caudal Gaseoso= 5200 m<sup>3</sup>/s

El caudal de gas que llega a impactar con el bosque se Pino Radiata es 5200 m<sup>3</sup>/s.

#### **Eucalipto:**

- Área = 100 [m] x 30 [m]  
Área = 3000 m<sup>2</sup>
- Velocidad del viento = 2,6 m/s
- Caudal Gaseoso = 7800 m<sup>3</sup>/s

El caudal de gas que llega a impactar con el bosque de Eucalipto es 7800 m<sup>3</sup>/s.

### **6.3 Cálculo del flujo de CO<sub>2</sub> que llega al bosque**

Los cálculos de este capítulo se efectuaron para las cuatro alturas efectivas de las chimeneas y para las 6 distancias a las cuales se ubicó el bosque, propuestas en el capítulo 5.2. Además se trabajó con el tipo de estabilidad atmosférica A (muy inestable), ya que es la estabilidad atmosférica que presenta las menores concentraciones de CO<sub>2</sub> de las tres mayores (estabilidad A, B y C), por ende si la captación de los árboles es baja en este caso, para la estabilidad B y C que presentan mayores concentraciones será mucho menos eficiente.

#### **Flujo de CO<sub>2</sub> que llega al bosque:**

$$\text{Flujo Másico [kg/s]} = \text{Caudal Gaseoso [m}^3\text{/s]} \times \text{Concentración de CO}_2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

**Pino Radiata:**

Caudal Gaseoso = 5200 m<sup>3</sup>/s

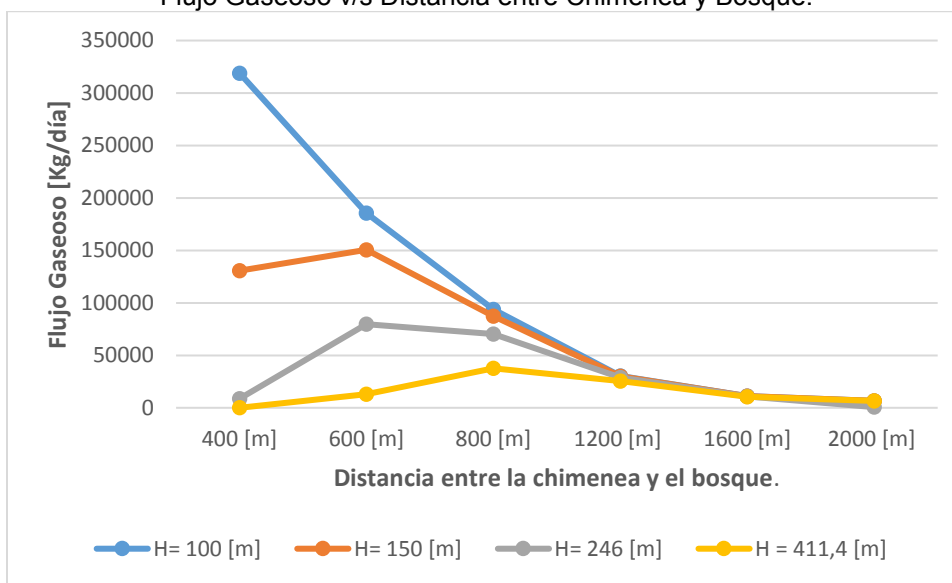
	Flujo Másico [kg/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
H= 100 [m]	318917,8	185615,1	93815,5	30395,4	11164,7	6609,8
H= 150 [m]	130730,5	150565	87319	29967,3	11118	6599
H= 246 [m]	8679,3	79672,2	70198,7	28702	10977	657
H = 411,4 [m]	3,7	12903	37604	25380	10583,4	6473

**Tabla 6.3.1:** Flujo Gaseoso que llega al bosque de Pino Radiata.

Fuente: Elaboración Propia.

**GRAFICO D FLUJO GASEOSO QUE LLEGA AL BOSQUE**

Flujo Gaseoso v/s Distancia entre Chimenea y Bosque.



**Gráfico 6.3.1:** Flujo Gaseoso que llega al bosque de Pino Radiata.

Fuente: Elaboración Propia.

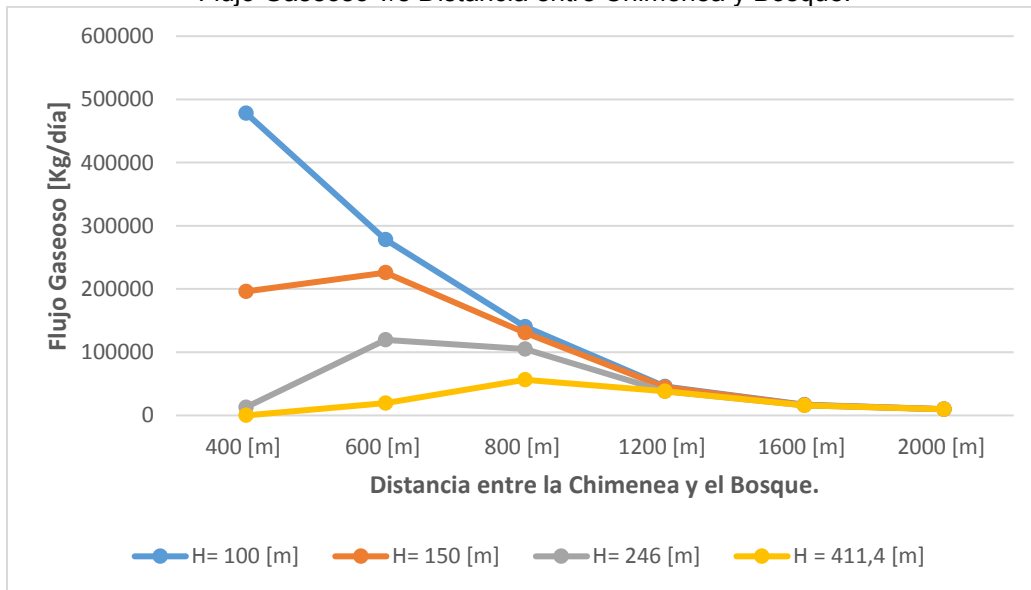
**Eucalipto:**

Caudal Gaseoso = 7800 m<sup>3</sup>/s

	Flujo Másico [kg/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
H= 100 [m]	478377	278423	140723,3	45593	16747	9915
H= 150 [m]	196096	225848,1	130978	44951	16677	9899
H= 246 [m]	13019	119508,3	105298	38070	15875	9719
H = 411,4 [m]	5,55	19354,4	56406	38070	15875,1	9710

**Tabla 6.3.2:** Flujo Gaseoso que llega al bosque de Eucalipto.  
Fuente: Elaboración Propia.

**GRAFICO DE FLUJO GASEOSO QUE LLEGA AL BOSQUE**  
Flujo Gaseoso v/s Distancia entre Chimenea y Bosque.



**Grafico 6.3.2:** Flujo Gaseoso que llega al bosque de Eucalipto.  
Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a la condición atmosférica estudiada (A) y su estabilidad frente a la dispersión, se observa que tiende a disminuir la concentración de CO<sub>2</sub> con la que el flujo gaseoso llega a impactar sobre el bosque a medida que la distancia entre la chimenea y el bosque aumenta.

## 6.4 Porcentajes de CO2 captado por el bosque

Con los valores de la tabla 6.3.1, tabla 6.3.2 y las cantidades de captación de CO2 (tabla 6.1) dependiendo del tipo árbol (Pino Radiata o Eucalipto) se obtuvieron los siguientes porcentajes de captación:

### Pino Radiata:

1 hectárea de Pino Radiata captura 46,85 [kgCO2/día].

Se trabajó sobre los valores obtenidos en la tabla 6.3.1.

	Porcentajes de captación de CO2 por hectárea de bosque [%/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
H= 100 [m]	0,01	0,02	0,05	0,15	0,41	0,69
H= 150 [m]	0,04	0,03	0,05	0,15	0,41	0,69
H= 246 [m]	0,54	0,05	0,07	0,16	0,43	7,13
H = 411,4 [m]	100	0,36	0,12	0,18	0,44	0,72

**Tabla 6.4.1:** Porcentaje de captación de CO2 por el bosque de Pino Radiata.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### Eucalipto:

1 hectárea de Eucalipto capta 81,92 [kgCO2/día].

Se trabajó sobre los valores obtenidos en la tabla 6.3.2.

	Porcentajes de captación de CO2 por hectárea de bosque [%/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
H= 100 [m]	0,02	0,03	0,06	0,18	0,49	0,83
H= 150 [m]	0,04	0,04	0,06	0,18	0,49	0,83
H= 246 [m]	0,63	0,07	0,08	0,22	0,52	0,84
H = 411,4 [m]	100	0,42	0,15	0,22	0,52	0,84

**Tabla 6.4.2:** Porcentaje de captación de CO2 por el bosque Eucalipto.

**Fuente:** Elaboración Propia.

La chimenea con altura efectiva de 100 [m] es quien presenta la menor tasa de captación de CO2, tanto para Pino Radiata como para Eucalipto, esto se debe a

que al poseer una menor altura el flujo logra una menor dispersión y llega más concentrado al punto de estudio, debido a las condiciones atmosféricas presentes en el lugar. El hecho de que llegue más cantidad de CO<sub>2</sub> no es directamente proporcional a la captación de CO<sub>2</sub> que poseen los árboles en su proceso de fotosíntesis.

### 6.5 Flujo y Concentración de CO<sub>2</sub> post impacto con el bosque

En este punto se trabajó bajo las condiciones de la chimenea que posee una altura efectiva de 100 [m], ya que es en donde existe la mayor concentración de CO<sub>2</sub> y en donde existe la menor tasa de captación, tanto para Pino Radiata como Eucalipto. Caso más desfavorable.

**Pino Radiata:**

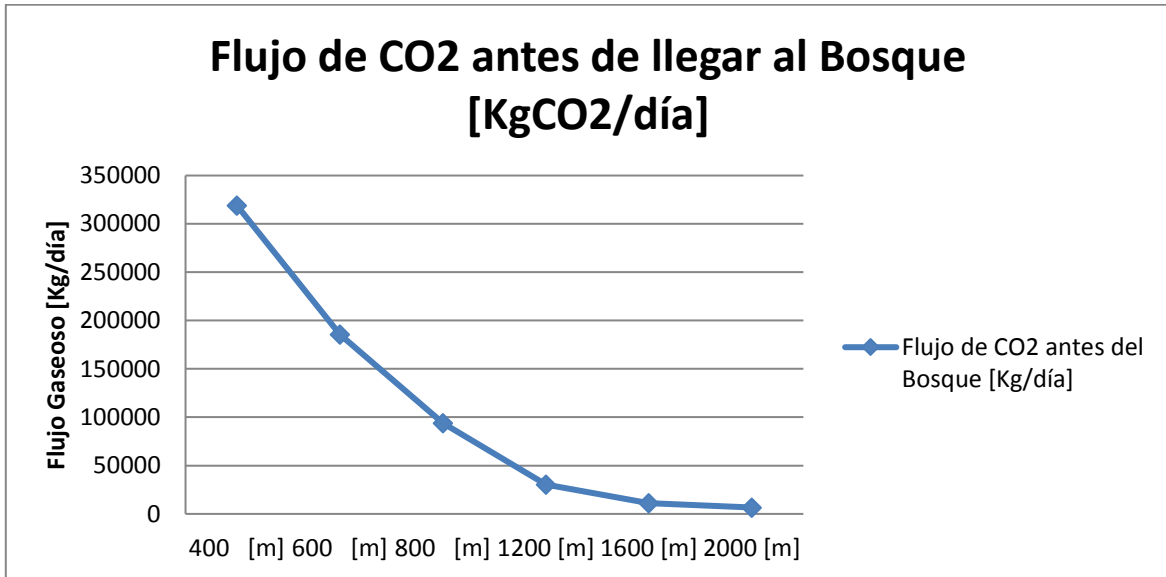
**Capta = 46,85 [KgCO<sub>2</sub>/día/ha)**

	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
<b>Flujo de CO<sub>2</sub> antes del Bosque [Kg/día]</b>	318918	185615	93816	30395	11165	6610
<b>Flujo de CO<sub>2</sub> después del Bosque [Kg/día]</b>	318871	185568	93769	30349	11118	6563
<b>Concentración de CO<sub>2</sub> antes del Bosque [ug/m<sup>3</sup>]</b>	710000	413000	209000	68000	25000	15000
<b>Concentración de CO<sub>2</sub> después del Bosque [ug/m<sup>3</sup>]</b>	710000	413000	209000	68000	25000	15000

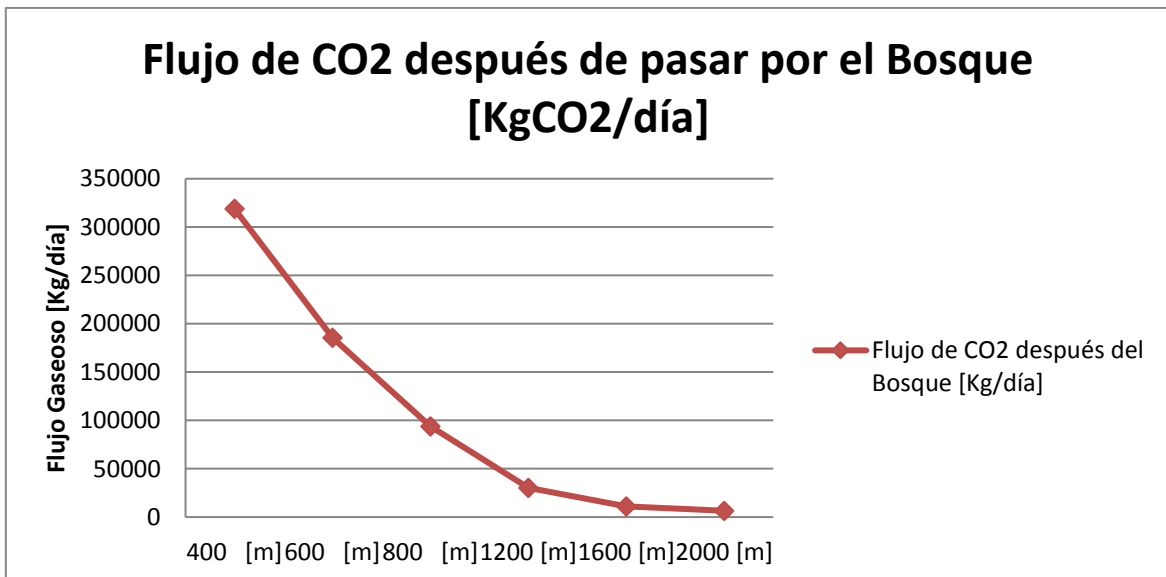
**Tabla 6.5.1:** Flujos y Concentración de CO<sub>2</sub> antes y después de pasar por el bosque de Pino Radiata.

**Fuente:** Elaboración Propia.

**Gráficos comparativos antes y post captura de CO2:**



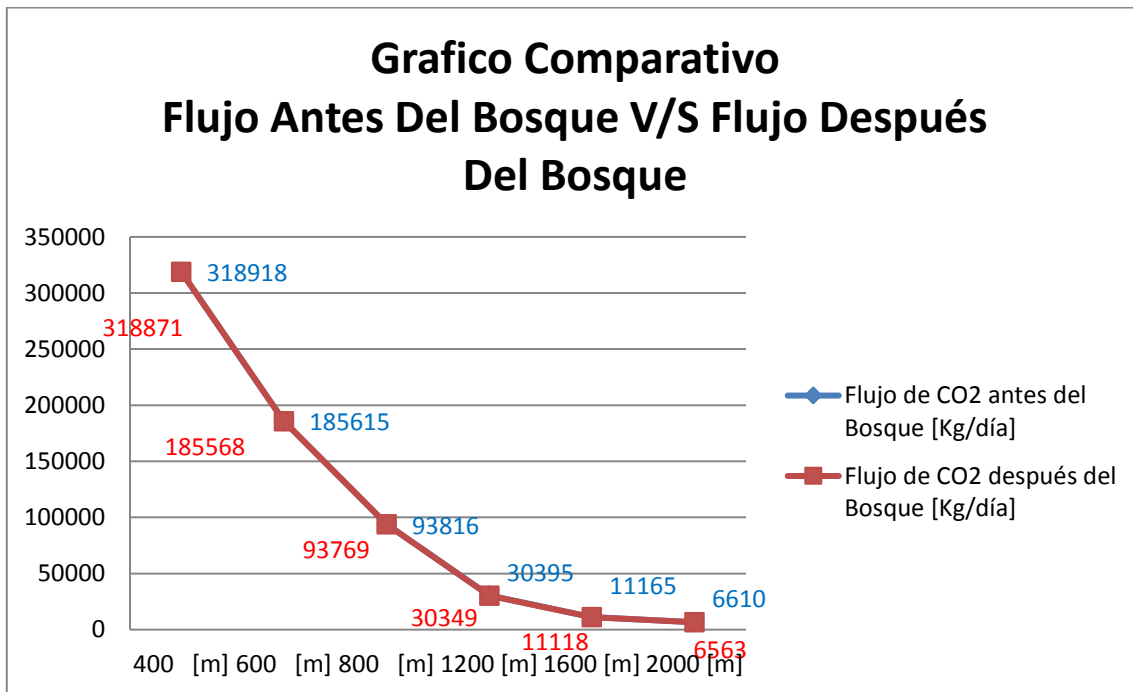
**Grafico 6.5.1:** Flujo de CO2 antes de pasar por el bosque de Pino Radiata.  
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Grafico 6.5.2:** Flujo de CO2 después de pasar por el bosque de Pino Radiata.  
**Fuente:** Elaboración Propia.



Superposición de ambos gráficos:



**Gráfico 6.5.3:** Gráfico Comparativo de Flujos de CO2.  
**Fuente:** Elaboración Propia.

Ambas curvas son prácticamente iguales, lo que indica que la absorción de CO2 durante el proceso de fotosíntesis del bosque de Pino Radiata es muy poco eficiente para la captación de las emisiones producidas por la termoeléctrica.

**Eucalipto:**

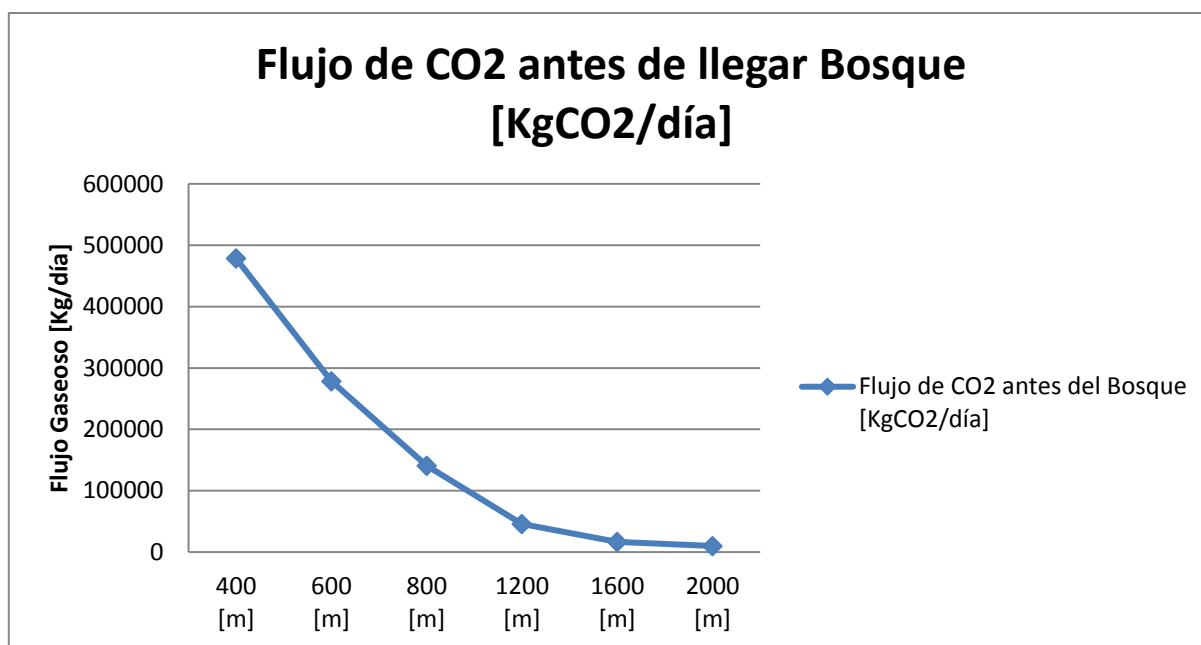
**Capta = 81,92 [KgCO2/día/ha)**

	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
<b>Flujo de CO2 antes del Bosque [KgCO2/día]</b>	478377	278423	140723,3	45593	16747	9915
<b>Flujo de CO2 después del Bosque [KgCO2/día]</b>	478295	278341	140641	45511,1	16665,1	9833,08
<b>Concentración de CO2 antes del Bosque [ug/m3]</b>	710000	413000	209000	68000	25000	15000
<b>Concentración de CO2 después del Bosque [ug/m3]</b>	710000	413000	209000	68000	25000	15000

**Tabla 6.5.2:** Flujo y Concentración de CO2 antes y después de pasar por el bosque de Eucalipto.

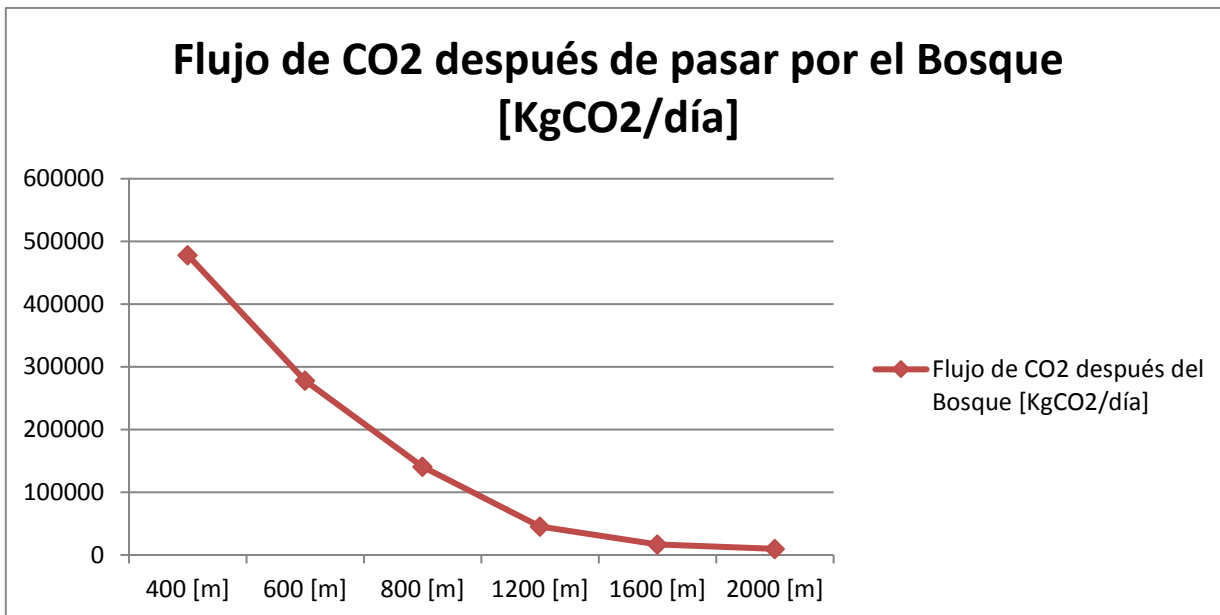
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Gráficos comparativos antes y post captura de CO2:**



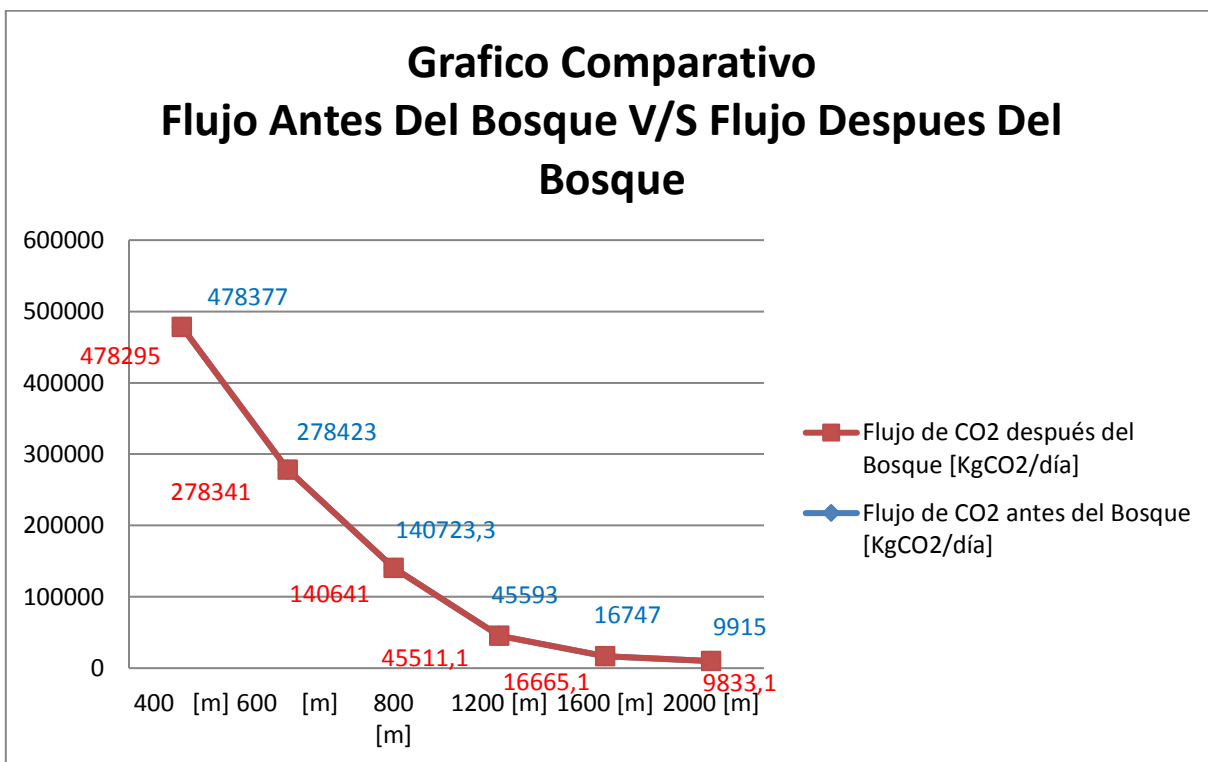
**Gráfico 6.5.4:** Concentración de CO2 antes de pasar por el bosque de Eucalipto.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Grafico 6.5.5:** Concentración de CO2 después de pasar por el bosque de Eucalipto.  
Fuente: Elaboración Propia.

**Superposición de ambos gráficos:**



**Grafico 6.5.6:** Grafico comparativo de Concentraciones de CO2.  
Fuente: Elaboración Propia.

Al igual que en el caso del Pino Radiata, la captura de CO<sub>2</sub> por el bosque de Eucaliptos es demasiado baja. Al superponer ambos gráficos (antes y después del bosque) se obtiene prácticamente la misma curva, esto indica que la captación de CO<sub>2</sub> es casi imperceptible en comparación al total de emisiones que llegan al bosque.

## 6.6 Hectáreas de bosque necesarias para captar el CO<sub>2</sub>

En este capítulo se estimaron las hectáreas necesarias para captar el 100 % de la concentración de CO<sub>2</sub> que llega a una determinada distancia. Se trabajó con los datos de la chimenea que posee 100 [m] de altura efectiva al igual que en el capítulo 6.5.

### Pino Radiata:

**1 hectárea capta 46,85 [Kg/día/ha]**

	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200[m]	1600[m]	2000[m]
Flujo de CO <sub>2</sub> antes de llegar al bosque [Kg/día]	318917,8	185615,1	93815,5	30395,4	11164,7	6609,8
Hectáreas necesarias para captar el 100% de la concentración de CO <sub>2</sub>	6807,21	3961,9	2002,5	648,781	238,307	141,084

Tabla 6.6.1: Hectáreas necesarias para captar el 100% del CO<sub>2</sub> que llega al Bosque de Pino Radiata.

Fuente: Elaboración Propia.

### Eucalipto:

**1 hectárea capta 81,92 [Kg/día/ha]**

	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200[m]	1600[m]	2000[m]
Flujo de CO <sub>2</sub> antes del Bosque [Kg/día]	478377	278423	140723,3	45593	16747	9915
Hectáreas necesarias para captar el 100% de la concentración CO <sub>2</sub>	5839,56	3398,72	1717,81	556,56	204,431	121,03

Tabla 6.6.2: Hectáreas necesarias para captar el 100% del CO<sub>2</sub> que llega al Bosque de Eucalipto.

Fuente: Elaboración Propia.

Si quisiéramos tener un punto de referencia para comparar la cantidad de hectáreas necesarias para captar el 100% del CO<sub>2</sub>, se puede utilizar como tal la Reserva de Nonguén, la cual posee un área de 3.055 hectáreas.

Para el caso en donde la distancia entre la chimenea y el bosque es de 400 [m] se necesita 2,23 veces del área de la reserva plantada solo con Pinos Radiata para lograr captar todo el CO<sub>2</sub> que llega al bosque y 1,9 veces el área de la reserva en el caso del bosque de Eucaliptos.

Si hacemos la misma evaluación para el caso en donde la distancia entre la chimenea y el bosque es de 2000 [m] se necesitaría solo el 21,65% en el caso del Pino Radiata y 25,2% en el caso del Eucalipto del área total de la reserva para captar el 100% del CO<sub>2</sub> que llega. El hecho de que se necesite menos bosque no necesariamente quiere decir que sería mejor ocupar una distancia de 2000 [m], ya que esto se debe a otros factores atmosféricos que hacen que el CO<sub>2</sub> se disperse antes de llegar al bosque, llegando a este con una concentración muy baja en comparación a la que llega al bosque ubicado a 400 [m].

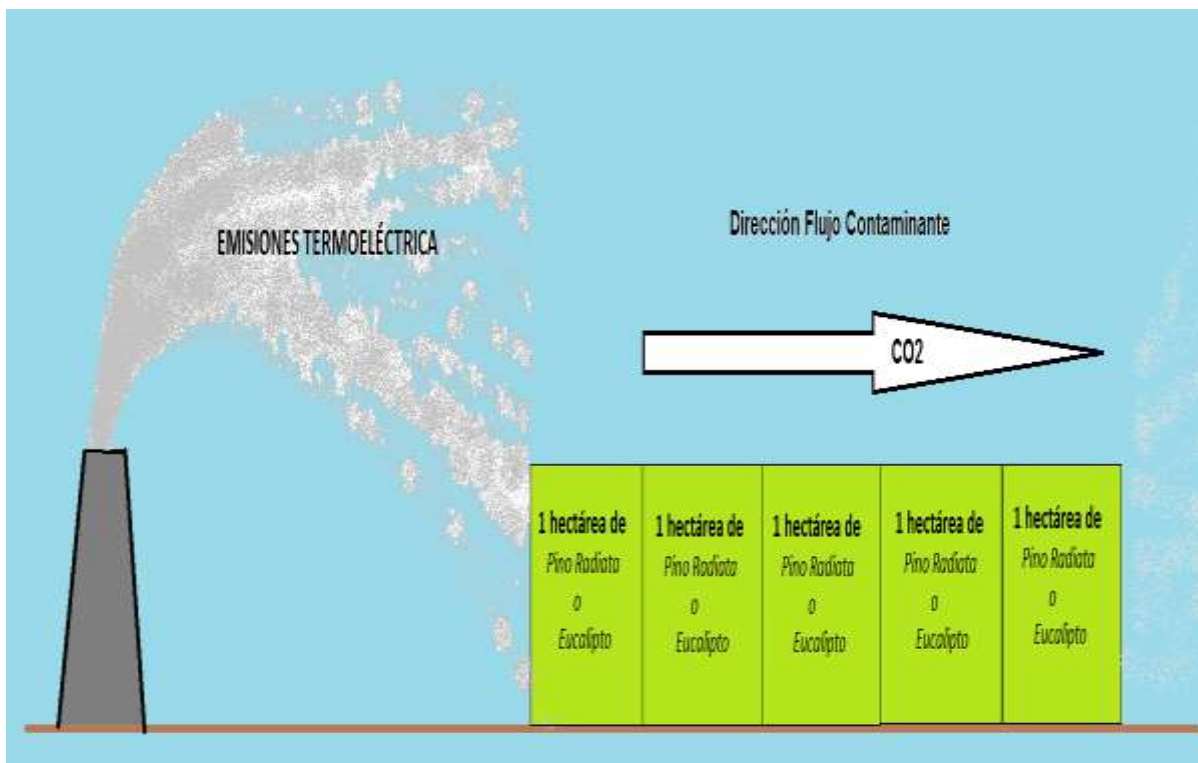
## CAPITULO 7

### ANÁLISIS COMPARATIVO

En este capítulo se realizó un análisis comparativo de la Termoeléctrica Bocamina con una Termoeléctrica de las mismas características, pero a menor escala. Se trabajó bajo las condiciones de la chimenea que posee una altura efectiva de 100 [m] y la estabilidad atmosférica muy inestable (A).

El análisis se basa en la captura del flujo contaminante, el cual posee una menor concentración de CO<sub>2</sub>, por una zona de bosque que posea una mayor área y así probar que la eficiencia del estudio puede mejorar o no.

*Supuesto:* La concentración de CO<sub>2</sub> es constante durante su recorrido al interior del bosque.



**Figura 7:** Captación de las emisiones de la termoeléctrica, mediante una zona forestal.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Se trabajó con la siguiente información:

**Termoeléctrica Bocamina:**

- Carbón Bituminoso: 2739,726 [ton/día]
- 350 Mw de Potencia térmica
- Emisión de CO<sub>2</sub>: 9,30154E10 [ug/s]
- Área de impacto: 5 hectáreas.

Concentración de CO <sub>2</sub> [ug/m <sup>3</sup> ] - H= 100 [m]						
Estabilidad de Pasquil	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
A	709842	413139	208813	67653,6	24850,1	14712

**Tabla 7.1:** Concentraciones de CO<sub>2</sub>, Termoeléctrica Bocamina.

**Fuente:** Elaboración Propia.

**Termoeléctrica comparativa:**

- Carbón Bituminoso: 234,834 [ton/día]
- 30 Mw de Potencia térmica
- Emisiones de CO<sub>2</sub>: 7,97275E9 [ug/s]
- Área de impacto: 5 hectáreas.

Concentración de CO <sub>2</sub> [ug/m <sup>3</sup> ] - H= 100 [m]						
Estabilidad de Pasquil	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
A	60843,6	35412	17898,2	5416,57	2130,01	1261

**Tabla 7.2:** Concentraciones de CO<sub>2</sub>, Termoeléctrica Comparativa.

**Fuente:** Elaboración Propia.

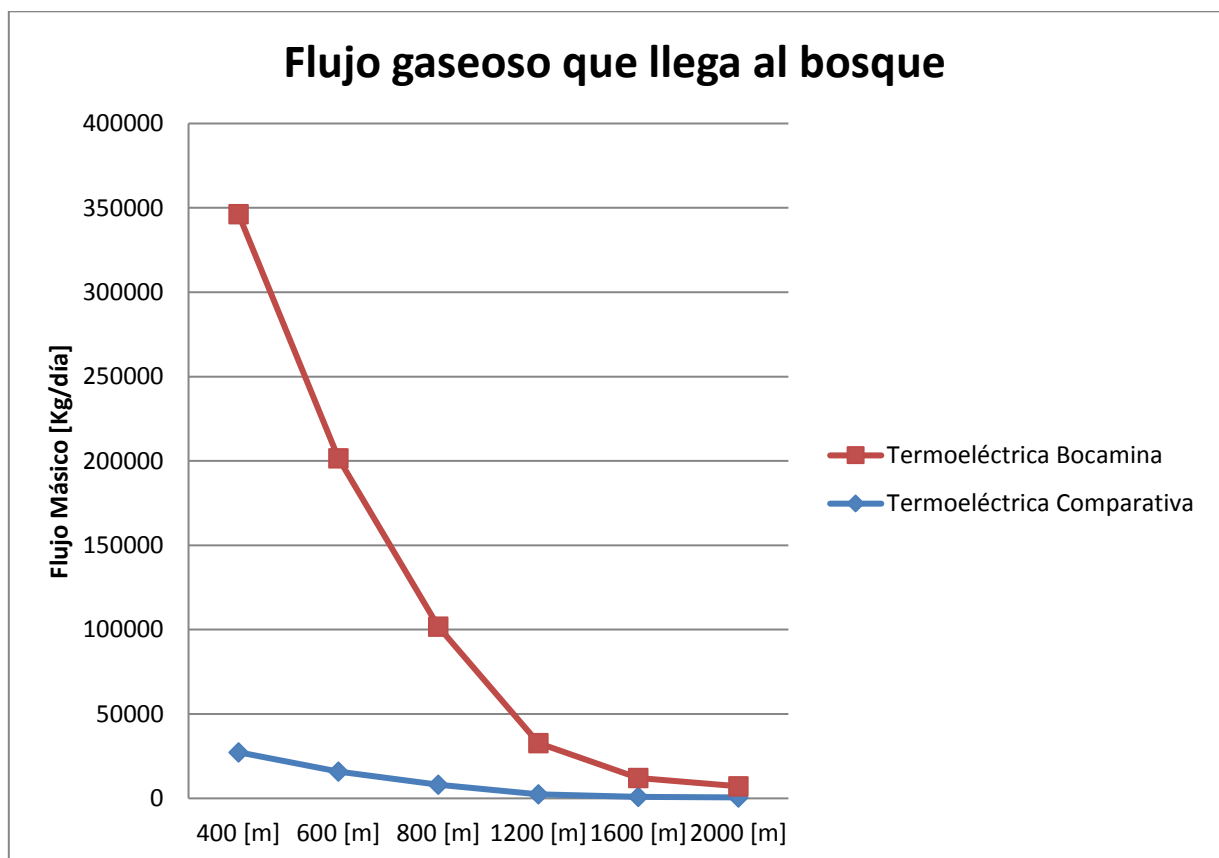
### 7.1 Flujo gaseoso que llega al área forestal

Flujo másico que llega al bosque de Pino Radiata.

	Flujo Másico [Kg/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
Termoeléctrica Bocamina	318917,8	185615,1	93815,5	30395,4	11164,7	6609,8
Termoeléctrica Comparativa	27335,8	15909,9	8041,3	2433,56	956,971	566,542

**Tabla 7.3:** Flujo gaseoso que llega al bosque de Pino Radiata.  
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico: Flujo Gaseoso v/s Distancia entre Chimenea y Bosque



**Gráfico 7.1:** Flujo gaseoso que llega al bosque de Pino Radiata.  
Fuente: Elaboración Propia.

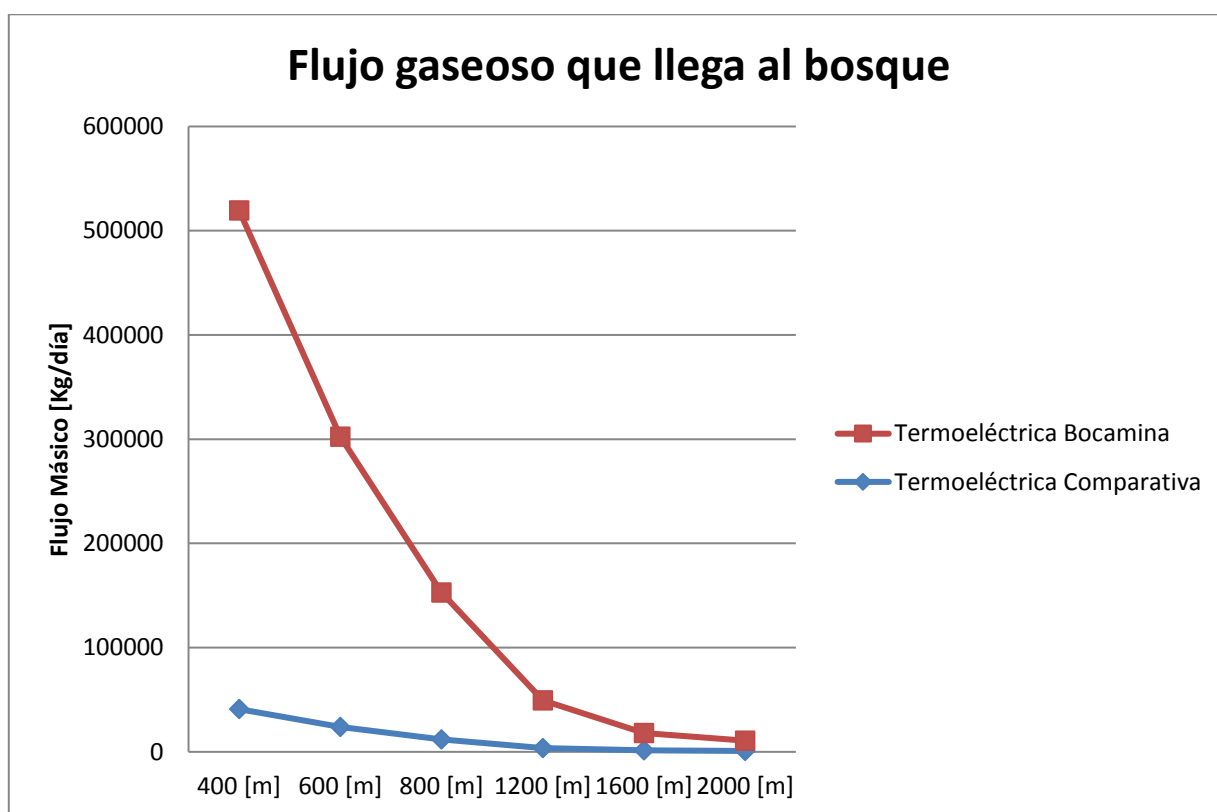


Flujo másico que llega al bosque de Eucaliptos.

	Flujo Másico [Kg/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
Termoeléctrica Bocamina	478377	278423	140723,3	45593	16747	9915
Termoeléctrica Comparativa	41003,7	23864,9	12062	3650,33	1435,46	849,813

**Tabla 7.4:** Flujo gaseoso que llega al bosque de Eucaliptos.  
Fuente: Elaboración Propia.

Gráfico: Flujo Gaseoso v/s Distancia entre Chimenea y Bosque



**Gráfico 7.2:** Flujo gaseoso que llega al bosque de Eucaliptos.  
Fuente: Elaboración Propia.

El flujo gaseoso que llega al bosque de Pino Radiata, como al de Eucaliptos, es mucho menor en el caso de la termoelectrica comparativa, esto se debe a la menor cantidades de emisiones de CO2 producidas en la cumbustion del carbono para producir 30 Mw.

## 7.2 Captación del área forestal

El bosque se ubicó a las mismas distancias utilizadas anteriormente en el proyecto de título.

### Pino Radiata:

Captura 46,85 KgCO<sub>2</sub>/día

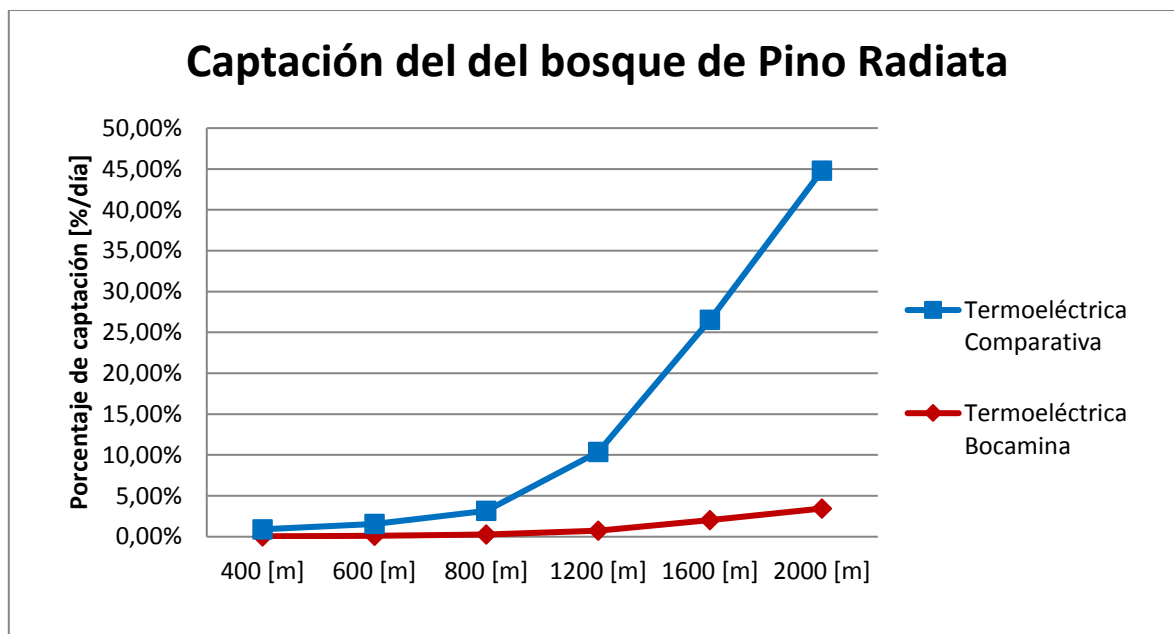
Área de bosque: 5 Hectáreas

	Porcentajes de captación de CO <sub>2</sub> por 5 hectárea de bosque [%/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
Termoeléctrica Bocamina	0,05%	0,10%	0,25%	0,75%	2,05%	3,45%
Termoeléctrica Comparativa	0,86%	1,47%	2,91%	9,63%	24,50%	41,34%

**Tabla 7.5:** Flujo gaseoso que llega al bosque de Pino Radiata.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Gráfico: Porcentajes de captación.



**Gráfico 7.3:** Porcentaje de captación del bosque de Pino Radiata.

**Fuente:** Elaboración Propia.

**Eucalipto:**

Captura 81,92 KgCO<sub>2</sub>/día

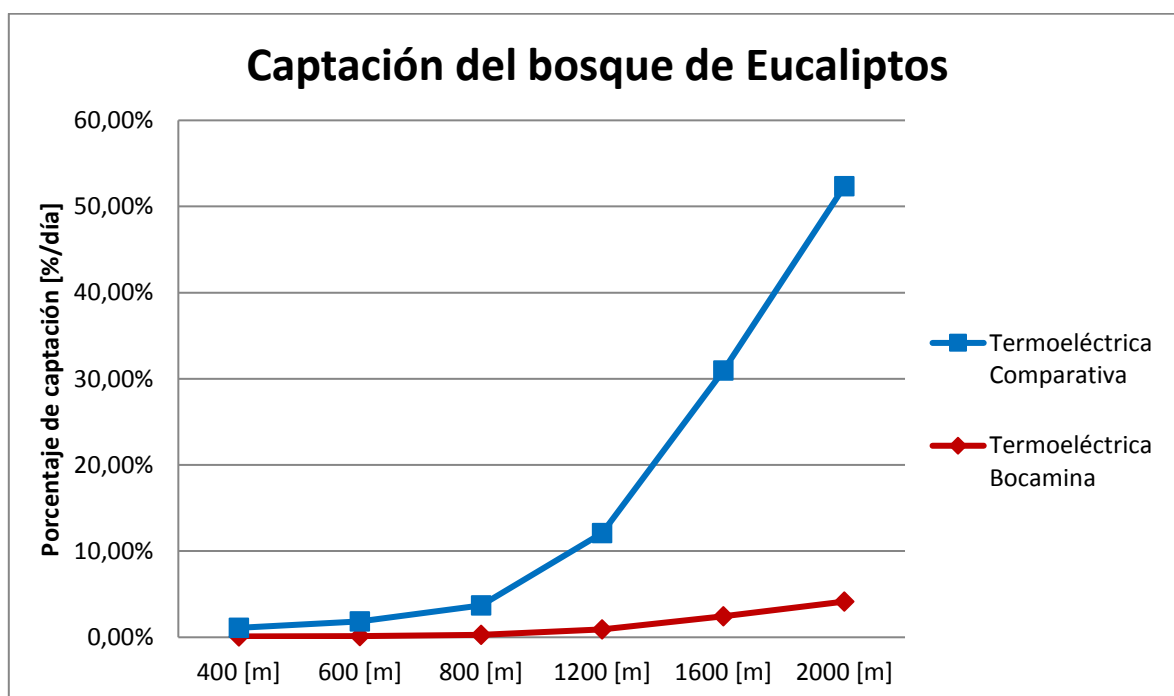
Área de bosque: 5 Hectáreas

	Porcentajes de captación de CO <sub>2</sub> por 5 hectárea de bosque [%/día]					
	400 [m]	600 [m]	800 [m]	1200 [m]	1600 [m]	2000 [m]
Termoeléctrica Bocamina	0,10%	0,15%	0,30%	0,90%	2,45%	4,15%
Termoeléctrica Comparativa	1,00%	1,70%	3,40%	11,20%	28,50%	48,20%

**Tabla 7.6:** Flujo gaseoso que llega al bosque de Eucaliptos.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Gráfico: Porcentajes de captación.



**Gráfico 7.4:** Porcentaje de captación del bosque de Eucaliptos.

**Fuente:** Elaboración Propia.

La eficiencia en la captación de CO<sub>2</sub> mejora notoriamente al aplicar el modelo sobre una termoeléctrica de menores proporciones en comparación a Bocamina. Ya que la cantidad de CO<sub>2</sub> que llega al área de bosque se asemeja más al total de

captura diaria que poseen, lo que mejora la eficiencia hasta llegar casi al 50% de captación en algunos casos donde es menor la concentración de CO<sub>2</sub> que llega al bosque.

## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES

De acuerdo a la presente memoria, se concluye lo siguiente:

- Mientras mayor sea el diámetro de la chimenea, mayor será la altura efectiva que logra el flujo de gas, lo que permitirá que la pluma de gas logre una mayor dispersión, disminuyendo la concentración del contaminante antes de llegar al suelo.
- La captación de CO<sub>2</sub> en el proceso de fotosíntesis de los bosques es demasiado baja con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas por las termoeléctricas que llegan a impactar en el área forestal.
- La altura efectiva de la pluma es relevante hasta los 1200 metros de distancia en la ubicación del bosque, a partir de ahí las concentraciones del contaminante convergen a una cantidad muy similar entre ellas.
- La termoeléctrica esta dimensionada sin considerar la generación de emisiones de CO<sub>2</sub>, ni el cambio climático y no hay posibilidad de mitigar eficientemente las emisiones vía captura de CO<sub>2</sub> por los árboles.
- La eficiencia de la propuesta mejora para el caso de termoeléctricas de menor producción energética, donde las emisiones de CO<sub>2</sub> son mucho menores en comparación a Bocamina, llegando a mitigar hasta casi el 50% de las emisiones que impactan con el área forestal, a diferencia de Bocamina que en el mejor de los casos se logra mitigar el 4% del gas contaminante que llega al área forestal.
- Se concluye del balance de CO<sub>2</sub> que la instalación de centrales termoeléctricas de gran magnitud no ha considerado criterios de sustentabilidad.

- Se debe tender a la construcción de centrales termoeléctricas de menor magnitud que permitan que una fracción importante del CO<sub>2</sub> generado sea captado por los bosques.

## BIBLIOGRAFIA

CDEC SING. (1992-2011). Estadísticas Operacionales SING 1992-2011. In CDEC-SING, Estadísticas Operacionales SING 1992-2011. Santiago, Chile.

CDEC-SIC. (1992-2011). 1992-2011, Estadísticas Operacionales SIC. In CDEC SIC, 1992-2011, Estadísticas Operacionales SIC. Santiago, Chile.

Comisión de Energía. (2012). CNE. Retrieved 2012 йил ABR L from [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

Comisión Nacional de Energía. (2012). Fijación de Precio Nudo Abril 2012 SING y SIC.

Comisión Nacional de Energía. (2012). Fijación de Precio Nudo Abril 2012 SING y SIC.

Comisión Nacional de Energía. (2012). Generación Bruta SIC-SING. From CNE: [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies . (s.f.). CO2CRC. Recuperado el 14 de 01 de 2012, de <http://www.co2crc.com.au/about/>

International Energy Agency. (2012). CO2 Emissions from Fuel Combustion. IEA Statistics.

International Energy Agency. (2010). CO2 pipeline Infrastructure: An Analysis of Global Challenges and Opportunities.

International Energy Agency. (2009). IEA Energy Statistics. Obtenido de <http://www.iea.org/stats/index.asp>

IPCC. (2012). IPCC. Retrieved 2012 from [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

IPCC. (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage.

Miller, B. (2005). Coal Energy Systems. California: Elsevier Academic Press.

MORALES, Raúl G. E. Contaminación atmosférica urbana. Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Santiago,

TURNER, D. Bruce. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates. 7<sup>a</sup> ed. U.S. Environmental Protection Agency Office of air programs E.P.A, AP-26, 1970.

BEYCHOCK, Milton R. Fundamentals of Stack Gas Dispersion. 4<sup>a</sup> ed. California, USA, 2005

PASQUILL, F. Atmospheric Diffusion, 2<sup>a</sup> ed. John Wiley and Sons, New York, 1974

HOLZWORTH, G. C. Mixing Heights, Wind Speeds and potentials of urban air pollution throughout the contiguous United States. U.S Environmental Protection Agency Office of air programs EPA. AP-101, 1972

MCMULLEN, R. W. The change of concentration standard desviations with distance, JAPCA, Octubre 1975

BRIGGS, G. A. Plume Rise Buoyancy Effects, Atmospheric Science and Power Production, Depto. De Energía de EE.UU. Reporte TIC-27601, 1984

Contaminación del aire: origen y control. Autores, Kenneth Wark, Cecil F. Warner. Edición, 9. Editor, Limusa, 1990.



INZUNZA, Juan. Meteorología Descriptiva. Concepción, Departamento de Geofísica Universidad de Concepción. 2005

GOBIERNO de Chile – CONAMA. “Informe de Gestión de la calidad del aire”. 1990

BUSTOS SALAS, Cristian. Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación del impacto ambiental: análisis del proceso Universidad de Chile, Depto. de postgrado y postítulo.

## **NORMAS**

Resolución N° 369 del Ministerio de Salud, establece Índice de calidad para determinar el nivel de contaminación atmosférica.

## **SITIOS WEB**

[www.conama.cl](http://www.conama.cl) Sitio Oficial de la Comisión Nacional del Medio Ambiente – Chile.

[www.sinia.cl](http://www.sinia.cl) Sistema Nacional de Información Ambiental - Chile

[http://www.puc.cl/sw\\_educ/contam/efect/efur06.htm](http://www.puc.cl/sw_educ/contam/efect/efur06.htm) “Altitud, Inversión térmica y contaminación.

<http://www.ipcc.ch> Grupo Intergubernamental de Expertos en el Cambio Climático.

<http://www.conaf.cl> Corporación Nacional Forestal – Chile.