

ORD. N°

143

**MAT:** Envía Solicitud de Aprobación Plan de Compensaciones de Material Particulado Complejo Termoeléctrico Santa María de Coronel, COLBUN S.A.

Concepción,

11 FEB 2011

**PARA: SEGÚN DISTRIBUCION**  
**DE: BOLIVAR RUIZ ADAROS**  
**DIRECTOR REGIONAL**  
**SERVICIO DE EVALUACION AMBIENTAL**  
**REGIÓN DEL BIOBÍO**

De mi consideración,

Con fecha 10 de Febrero del año en curso, según carta GDG 023/2011, la empresa COLBUN S.A. Envía Solicitud de Aprobación Plan de Compensaciones de Material Particulado relacionadas al Complejo Termoeléctrico Santa María de Coronel.

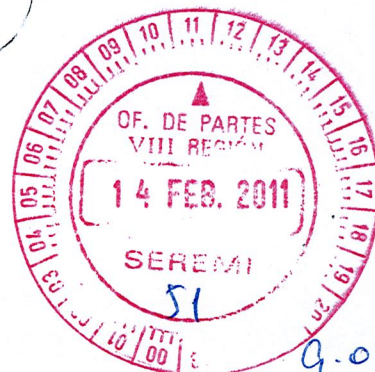
En el marco de los compromisos adquiridos según indica la Resolución Exenta N°176/2007 de la COREMA Región del Biobío, informamos y enviamos copia para vuestro seguimiento ambiental, observaciones y/o aprobación del plan.

En el caso de requerir nuevos antecedentes o tener observaciones a la propuesta de la empresa, rogamos hacerla llegar a ella, con copia a este servicio, **a más tardar el día 18 de Marzo del año en curso.** Vencido este plazo se continuará con el proceso dando por entendido que usted está conforme con los antecedentes presentados por el titular.

Sin otro particular, saluda atentamente a usted,



**Bolívar Ruiz Adaros**  
Director, Servicio de Evaluación Ambiental  
Región del Biobío



BRA/CUN

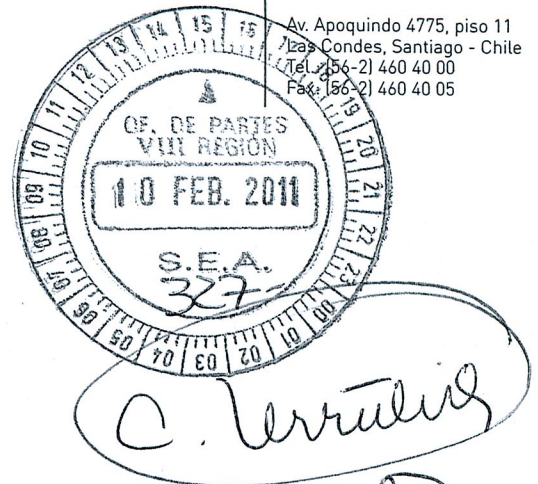
C/c:

- SEREMI de Medio Ambiente, Región del Biobío.
- SEREMI de Salud, Región del Biobío.

g.oyola

Santiago, 8 de febrero de 2011  
GDG N°023/2011

Señor  
Bolívar Ruiz Adaros  
Secretario  
Comisión Evaluadora, Región del Biobío  
Lincoyán 145  
Concepción



Ref.: **Complejo Termoeléctrico Santa María de Coronel**  
**Solicitud Aprobación Plan de Compensación de Material Particulado**

De nuestra consideración:

En el marco de la Resolución Exenta N° 176/2007 de fecha 12 de julio del año 2007, en adelante RCA, que aprobó ambientalmente el proyecto Complejo Termoeléctrico Santa María de Coronel, en adelante CTSM, de propiedad de Colbún S.A., en adelante Colbún, solicitamos a usted ratificar que la implementación de las medidas de compensación de emisiones de Material Particulado, en adelante MP, que a continuación se enumeran, cumplen con lo requerido en el numeral 7.7 de la RCA:

- (i) Retiro de calderas en Forestal La Esperanza;
- (ii) Implementación y mantención del "Parque Botánico Coronel"
- (iii) Instalación de superficie de pasto sintético en cancha de fútbol;
- (iv) Recambio de estufas a leña,

Lo anterior, teniendo en consideración que en el numeral 4.2.1 de la RCA, se indica que *"la compensación de Material Particulado la realizará en una fuente de combustión"*, y que el Plan que presentamos si bien incorpora fuentes de combustión también considera fuentes alternativas de reducción de emisiones de MP.

Adicionalmente presentamos una propuesta para la contabilización interanual de la acreditación de compensación de emisiones.

1. Compensación de emisiones de MP mediante el retiro de calderas en Forestal La Esperanza
  - 1.1 Tal como señalamos a la autoridad en la carta GDG N°109/2010 enviada el 23 de julio de 2010 (ver Anexo 1), esta medida de compensación consiste en retirar dos calderas de la empresa Forestal La Esperanza S.A., ubicadas en la Comuna de Coronel, las cuales operan con biomasa húmeda como combustible y que son utilizadas en el proceso de secado de madera.

- 1.2 De acuerdo a lo señalado por la autoridad en el Ord. 291/2010 de fecha 15 de septiembre de 2010 (Ver Anexo 2), en respuesta a nuestra carta GDG N°109/2010, las emisiones a ser compensadas por el retiro e inutilización total de las calderas señaladas corresponderá a 281 kg/día de MP, equivalentes a 102 toneladas de MP anuales.
2. Compensación de emisiones de MP mediante la implementación y mantención del Parque Botánico Coronel

Esta medida consiste en implementar y mantener un Parque Botánico en la comuna de Coronel, el cual, mediante el efecto de filtrado y limpieza del aire que genera la superficie de las hojas y tallos de los árboles y arbustos (fenómeno de deposición seca), permitirá compensar parte de las emisiones de MP del CTSM.

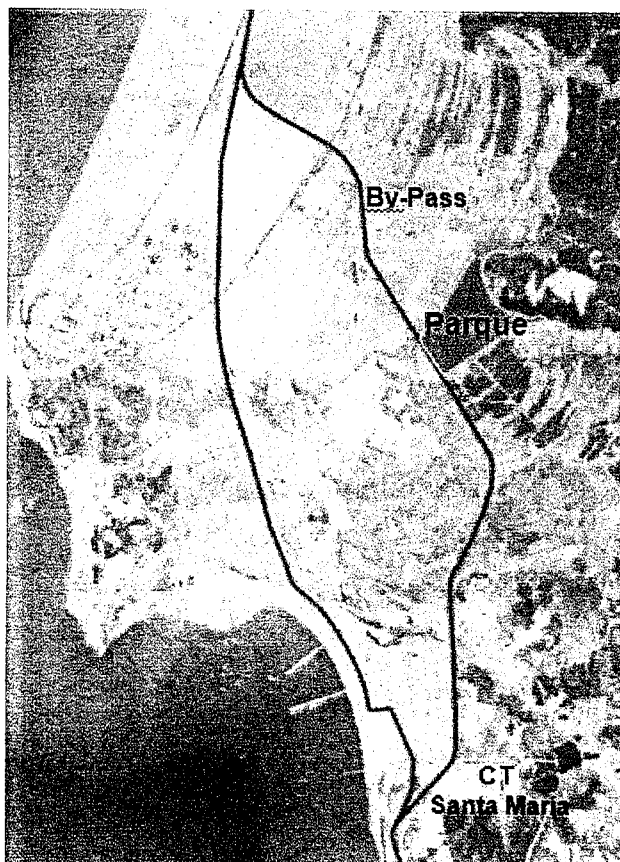
2.1 *Situación actual del sector de emplazamiento Parque Botánico Coronel*

El referido parque se habilitará en el Fundo Calabozo, inmueble de aproximadamente 50 hectáreas, cuyo acceso se encuentra por la ruta 160 a 1,2 km al este de la Plaza de Peaje del bypass Coronel - Lota, Provincia de Concepción, Región del Biobío. El lugar ya cuenta con aproximadamente 15.000 árboles plantados, de los cuales el 58% corresponde a coníferas, y el resto son individuos caducifolios y de otros tipos.

2.2 *Características principales Proyecto Parque Botánico Coronel*

En función de la condición actual y del interés de implementar un parque botánico que tenga una abundante riqueza de especies, se desarrollará un plan de reforestación que incluye plantar nuevos individuos de diferentes especies y realizar un programa paulatino de recambio de algunas de ellas. Producto de lo anterior, se estima que el Parque Botánico Coronel contará en el futuro con aproximadamente 27.000 ejemplares, de los cuales un 35% corresponderán a coníferas y el resto serán especies caducifolias y otras. A continuación se muestra la ubicación del Parque y algunas fotografías donde se presenta la situación actual y simulaciones del futuro Parque, a modo de referencia.

**Figura 1: Ubicación referencial del Parque Botánico Coronel**



**Figura 2: Fotografías Parque Botánico Coronel (referencial)**

**Situación actual**



**Situación propuesta (simulación referencial)**

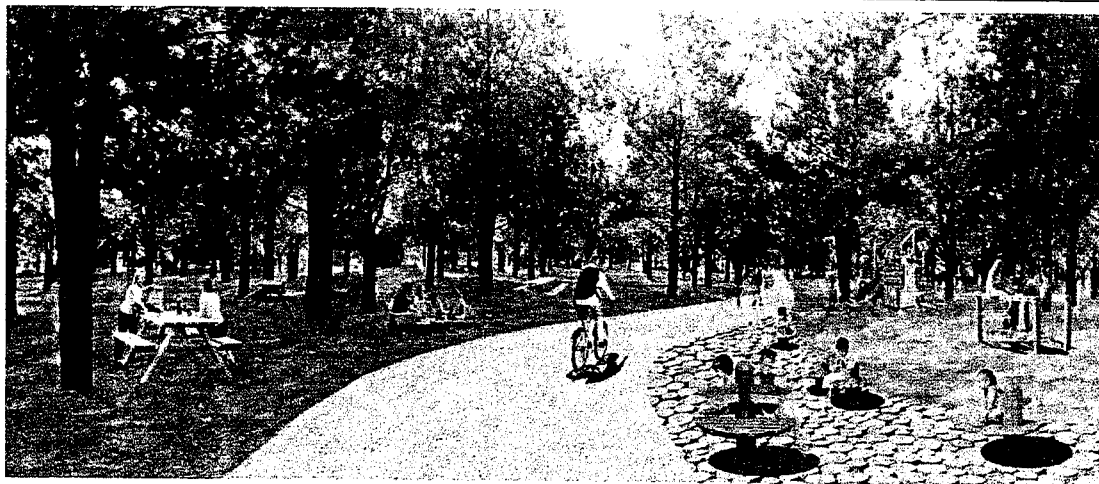


**Figura 3: Fotografías Parque Botánico Coronel (referencial)**

**Situación actual**



**Situación propuesta (simulación referencial)**



### 2.3 Estimación de emisiones a compensar

- 2.3.1 Dadas las características propias del Parque, las emisiones compensadas por esta medida aumentarán en forma gradual, conforme se desarrolle la nueva vegetación a implementar. En el primer año (denominado Año 0) la compensación de emisiones equivaldrá a 130 toneladas de MP<sup>1</sup>, cifra correspondiente a la compensación de emisiones asociada a la vegetación existente. Luego esta reducción aumentará gradualmente hasta el año 5, a partir del cual las emisiones compensadas corresponderán a 200 toneladas de MP anuales. A partir del año 5, las emisiones compensadas adicionales a las 200 toneladas de MP, generadas como consecuencia del crecimiento de los ejemplares plantados (aproximadamente 27.000), no serán contempladas para efectos de compensar las emisiones de MP del CTSM.
- 2.3.2 Se considera que el Año 0 corresponde a aquel año en que se inician las labores en terreno para implementar el Parque Botánico Coronel.
- 2.3.3 A continuación se presenta una tabla con las emisiones compensadas para cada año.

**Tabla 1: Compensación de emisiones de MP por Parque Coronel**

Año	Emisiones compensadas (ton MP/año)
Año 0	130
Año 1	144
Año 2	158
Año 3	172
Año 4	186
Año 5 en adelante	200

Cabe señalar que las emisiones a compensar cada año fueron calculadas bajo un escenario conservador. Mayores antecedentes sobre el cálculo de la reducción de emisiones de esta medida se encuentran en el documento "Bases Técnicas para el Cálculo de Reducción de Emisiones dentro del Plan de Compensación de Material Particulado – Complejo Termoeléctrico Santa María", de enero de 2011, elaborado por la consultora DSS, el cual se adjunta a la presente carta (ver Anexo 3).

### 3. Compensación de emisiones de MP mediante la instalación de superficie de pasto sintético en la cancha de fútbol existente en el Estadio Municipal Bernardino Luna de Coronel

<sup>1</sup> Si bien la reducción de material particulado (MP) del Parque Coronel será mayor a 130 ton/año, pues dicho valor corresponde sólo a la fracción respirable de material particulado (MP10). Sin perjuicio de ello, y para efectos de contabilización de la reducción de emisiones de MP, Colbún ha asumido de manera conservadora que la reducción de MP del parque es equivalente a la calculada para MP10.

Esta medida está orientada a ser implementada sobre la actual cancha de tierra del Estadio Municipal Bernardino Luna de Coronel, la cual es usada intensivamente por escuelas, liceos y particulares, cuestión que se traduce en emisiones de material particulado por efectos de la erosión eólica. La medida consiste en instalar una superficie de pasto sintético para estabilizar la cancha y así evitar las emisiones de MP, y a su vez generar un beneficio a la comunidad.

### 3.1 *Estimación de emisiones a compensar*

3.1.1 El potencial de emisión de MP de una cancha de fútbol de tierra se calculó utilizando el modelo de erosión por viento propuesto por la US EPA (EPA AP-42, 13.2.5 Industrial Wind Erosion).

3.1.2 Para la estimación del potencial de emisión de polvo fugitivo de la cancha de fútbol, se consideró un período base de 1 año durante el cual se utiliza la cancha durante 50 semanas con una frecuencia de 3 partidos/entrenamiento por semana. Esto implica que en un año la superficie de la cancha podría experimentar 150 disturbios.

3.1.3 Los resultados obtenidos de la modelación indican que la reducción de emisiones de MP asociada a esta medida asciende a 12,4 toneladas de MP anuales.

Mayores antecedentes sobre el cálculo de la reducción de emisiones producto de la implementación de esta medida se encuentran en el documento "Bases Técnicas para el Cálculo de Reducción de Emisiones dentro del Plan de Compensación de Material Particulado – Complejo Termoeléctrico Santa María" de enero de 2011, elaborado por la consultora DSS (ver Anexo 3).

## 4. Compensación de emisiones de MP mediante el recambio de estufas a leña y/o carbón

Esta medida consiste en el recambio de calefactores residenciales a leña y/o carbón con una elevada emisión de MP por calefactores de mayor eficiencia energética, con cámara de doble combustión y que generen menos emisiones de MP, y que cumplan con los estándares exigidos por la normativa vigente.

### 4.1 *Características principales del recambio de estufas a leña y/o carbón*

4.1.1 Se contempla realizar el recambio de 2.000 calefactores a leña y/o carbón (1.000 calefactores por cada unidad del CTSM), en varias etapas, en tanto se ubiquen dentro del área de latencia por MP, es decir en las Comunas de Concepción, Talcahuano, San Pedro de la Paz, Hualpén, Chiguayante, Hualquí, Lota, Coronel, Penco o Tomé.



- 4.1.2 Los calefactores antiguos serán destruidos, de tal forma de impedir su reutilización.
- 4.1.3 Se enviarán a la autoridad, con la debida anticipación, las especificaciones de los nuevos calefactores y el cronograma de implementación de la medida.
- 4.1.4 Cabe señalar que esta medida ya fue aprobada por la entonces Comisión Regional de Medio Ambiente del Biobío, la cual manifestó en su Of. Ord. N° 372, del 28 de julio de 2010, que “no tiene inconvenientes para aceptar dicha propuesta, la que deberá implementarse según los estándares y criterios ya aceptados por la CONAMA Biobío”.

4.2 *Estimación de emisiones a compensar*

- 4.2.1 Para la estimación de la reducción de emisiones asociadas a esta medida se utilizaron los resultados del “Estudio del uso de leña en el Gran Concepción UDT 2004, CONAMA” de donde se obtuvo la siguiente información:

**Tabla 2: Emisiones de MP10 asociadas al funcionamiento de estufas domiciliarias**

Variable	Ton MP10/año/hogar
Emisión estimada por hogar (1 estufa)	0,079
Emisión estimada por nueva normativa (Calefactores certificados de tipo A, B, C de la norma de emisión para artefactos de uso residencial)	0,0016
Reducción estimada de MP10/año/estufa	0,0774

Fuente: “Estrategias para el control de emisiones domiciliarias y planes de compensación en el PPCA” Elaboración del PPCA-CM, 2008.

- 4.2.2 En carta N°522 de fecha 11 de octubre de 2009, enviada por el Secretario de la Comisión Regional de Medio Ambiente, se aprobó esta alternativa como una medida válida de reducción de emisiones, pero con un valor unitario de 0,060 Ton MP/año. De acuerdo a este valor, la cantidad total de reducción de emisiones asociadas al recambio de estufas será de 60 Ton MP/año por cada 1.000 unidades.

- 4.2.3 Considerando que el recambio de las 2.000 estufas se realizará en forma gradual, se estima que las actividades de recambio de las primeras 1.000 unidades, asociadas a la operación de la Fase 1 del CTSM, se podrían iniciar el segundo semestre del 2011.

## 5. Propuesta para contabilización de compensación de emisiones

### 5.1 *Antecedentes*

Tal como se indica en la sección 4.2.1 de la RCA ("Emisiones Atmosféricas en Etapa de Operación"), la emisión de MP durante la etapa de operación se estima en 15 g/s para cada unidad. Lo anterior se traduce en una emisión anual máxima por unidad de 473 toneladas de MP, en caso que operen la totalidad del tiempo.

Cabe señalar que el Titular debe dar cumplimiento a la exigencia de compensar las emisiones de MP efectivamente generadas por el CTSM, por lo que en consideración a la variabilidad intrínseca de la generación eléctrica, que depende de lo que disponga el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC), la contabilización de la reducción de emisiones requiere de la incorporación de criterios para flexibilizar la acreditación de las exigencias de compensación de MP. En la legislación chilena, en particular en la Ley 19.300 (Ley de Bases del Medio Ambiente) se señala la posibilidad de implementar ciertos instrumentos que otorgan flexibilidad, como por ejemplo los permisos de emisión transables y otros instrumentos que buscan incentivar acciones de mejoramiento y reparación ambientales. Al respecto, cabe señalar que la generación eléctrica tiene una variabilidad considerablemente mayor en comparación a las medidas de compensación de emisiones, las cuales son estáticas a lo largo del tiempo en cuanto al monto de emisiones compensadas, y no dependen de factores externos.

Por otra parte, y acorde al principio de eficiencia que inspira la Ley 19.300, mediante la implementación de ciertos criterios de flexibilidad se incentivaría la eficiencia en los mecanismos de reducción de emisiones y la implementación de medidas de compensación de emisiones de una mayor escala, lo que a su vez redundaría en un mayor beneficio para la comunidad.

### 5.2 *Propuesta*

En ausencia de un mecanismo normado para la contabilización de la compensación de emisiones efectivas de MP para el CTSM, a continuación describimos la propuesta que considera los criterios de flexibilidad referidos anteriormente.

Respecto a la forma y plazos para compensar las emisiones de MP, consideramos que para una adecuada contabilización de la compensación de emisiones de MP se deben considerar algunos criterios sobre las emisiones, medidas de compensación y contabilización de la compensación, los cuales se detallan a continuación.

#### 5.2.1 Criterios a considerar sobre las emisiones

- Fecha entrada en operación de CTSM: Se espera que la unidad 1 comience a operar durante el 2011. Por lo tanto, la contabilización de las emisiones deberá considerar la fecha efectiva de puesta en servicio, la que se establecerá en base a la información oficial comunicada por Colbún al CDEC-SIC.

- Medición MP total: El CTSM contará con un equipo de monitoreo continuo de emisiones (CEM) en cada unidad, mediante el cual se podrá determinar la cantidad anual de emisiones efectivas de MP. Cabe señalar que las emisiones efectivas medidas de esta manera podrán ser inferiores a la estimación de emisiones máximas de 15 g/s presentada en el EIA.

#### 5.2.2 Sobre las medidas de compensación

- La implementación de las distintas fuentes de compensación de emisiones no necesariamente se realizará al mismo tiempo que el inicio de la operación del CTSM.
- Los hitos de implementación de las distintas medidas de compensación de emisiones que se indican en este documento, para efectos del inicio de la contabilización de su reducción efectiva de emisiones, serán las siguientes:
  - Retiro de Calderas en Forestal La Esperanza: En el momento en que las calderas existentes hayan sido efectivamente clausuradas o desmanteladas.
  - Parque Botánico Coronel: En el momento que se inician los trabajos en terreno para la habilitación del parque se considerará una reducción de emisiones de 130 ton MP/año, las cuales irán en aumento hasta un valor de 200 ton MP/año en el Año 5, de acuerdo a la tabla indicada en el punto 2.3.3. anterior.
  - Remodelación de Cancha de Fútbol: En el momento que la cancha con la nueva superficie de pasto quede disponible para su uso.
  - Recambio de Estufas a Leña y/o Carbón: En el momento en que cada estufa quede instalada y en operación. Como la instalación de estufas se irá haciendo de acuerdo a un programa, al final de cada mes se llevará a cabo una contabilización de estufas instaladas, y anualmente se contabilizará el total de reducciones anuales teniendo en consideración el mes en que fueron instaladas.

Para estos efectos, daremos aviso con la debida anticipación a la autoridad ambiental de la fecha de cumplimiento de cada hito, de manera de que en caso de que se solicite, se pueda certificar en terreno lo anterior.

#### 5.2.3 Sobre la contabilización

Al final de cada año calendario se hará una contabilización de la cantidad de emisiones de MP que ha emitido el CTSM, que a su vez se comparará con el monto total de ton MP/año correspondientes a las medidas de compensación de emisiones ya implementadas durante el período.

De acuerdo al resultado del balance anterior, proponemos el siguiente mecanismo para la contabilización de la acreditación de las exigencias de compensación de emisiones de MP:

- En caso que un determinado año la compensación de emisiones exceda las emisiones de MP del CTSM, el excedente quedará disponible para compensar las emisiones de MP a generar durante los 2 años siguientes.
- Asimismo, en caso que un año calendario finalice con un déficit de reducción de emisiones, podremos compensarlo en los 2 años siguientes, ya sea a través de reducción de emisiones ejecutadas por Colbún o adquiridas a terceros.
- En caso que se tenga déficit interanual de compensación de emisiones, este deberá ser inferior al 50% de las emisiones de MP generadas por el CTSM cuando opera a su máxima capacidad. Es decir, el déficit interanual podrá ser de un máximo de 237 ton/año en caso que esté funcionando una unidad y de 473 ton/año en caso que estén funcionando las dos unidades.
- Aquellos excedentes de reducción de emisiones de MP que no hayan sido requeridos en un plazo de 3 años, podrán ser transados durante el cuarto año con terceros que tengan exigencias de reducción de emisiones de este parámetro en el marco de la declaración de Zona Latente de MP10 para 10 comunas de Concepción Metropolitano (D.S. N° 41/2006 del Minsegres).

Respecto al período de vigencia de los excedentes o déficit de reducción de emisiones antes señalado (3 años), estimamos que es el adecuado considerando la variabilidad interanual de la generación eléctrica y el criterio temporal considerado para la evaluación del cumplimiento de la norma primaria anual de calidad del aire para MP10 (ver D.S. N° 59/1998 del MINSEGPRES) que establece que se debe considerar el promedio aritmético de tres años calendario consecutivos.

Cabe señalar que esta propuesta utiliza los criterios que se han aplicado en otros ámbitos de la legislación chilena, como en el caso de la Ley 20.257 (modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto a la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales), en particular en lo referido a la acreditación del cumplimiento de las exigencias de generación de energía renovable no convencional. Esta regulación permite, por un lado, la postergación de las exigencias de un año al siguiente y, por otro lado, el traspaso entre años calendarios de los excedentes de generación ERNC.

En el Anexo 4 se presentan algunos ejemplos que reflejan de mejor forma como operaría este mecanismo para la contabilización de la acreditación de las exigencias de compensación de emisiones de MP

En consecuencia, de conformidad con lo presentado en este documento, solicitamos a usted ratificar lo siguiente:

- Que el Plan Parcial de Compensación de MP presentado cumple con lo requerido en el numeral 7.7 de la RCA.
- Que se aceptan las medidas para la compensación de emisiones de MP presentadas y sus tasas anuales de compensación de emisión de MP correspondientes expresadas en ton MP/año.
- Que se acepta que el Plan de Compensación de MP presentado es una alternativa válida a la compensación de MP únicamente a través de fuentes de combustión tal como está indicado en la RCA
- Que se acepta la propuesta de contabilización de compensación de emisiones.

Sin otro particular y a la espera de una favorable acogida, saluda atentamente a usted,

**COLBUN S.A.**

*pp. Manuel Moscoso*

**Enrique Denoso Moscoso**  
**Gerente División Generación**

Adj: Lo indicado

# ANEXO N° 1



A. Apoyado a 20, base 11  
Las Torres, Santiago - Chile  
Tel: 56 2 240 4400  
Fax: 56 2 240 4401

Santiago, 19 de julio de 2010

GDG N°109/2010

Señor  
**Bolívar Ruiz Adaros**  
**Secretario Ejecutivo Comisión Regional del Medio Ambiente**  
**CONAMA Región del Bío Bío**  
**Lincoyán 145**  
**Concepción**

Ref.: **Complejo Termoeléctrico Santa María de Coronel**  
**Solicitud Aprobación Compensación Material Particulado**

De nuestra consideración:

En el marco de la Resolución Exenta N° 176/2007 de fecha 12 de julio del año 2007 que aprobó ambientalmente el proyecto de la referencia, solicitamos a usted ratificar, para efectos de avance en el cumplimiento del programa de compensación de material particulado indicado en el numeral 7.7 de la citada Resolución, la compensación de emisiones asociada a dos calderas de la empresa Forestal La Esperanza S.A. ubicadas en la Comuna de Coronel.

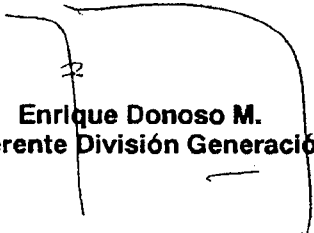
El monto de las emisiones compensadas será de 100,01 toneladas de material particulado al año que se generarán por concepto de eliminación de dos calderas que utilizan biomasa húmeda como combustible y que son utilizadas para el proceso de secado de madera. Todo ello según se acredita en los antecedentes que forman parte del informe técnico "Proyecto Compensación de Emisiones de Material Particulado en Forestal La Esperanza S.A." (Proterm, Julio 2010) que se adjunta a la presente carta.

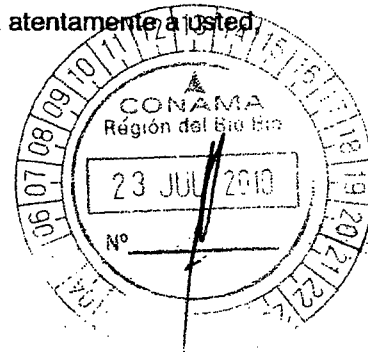
Cabe mencionar que el procedimiento de eliminación de las calderas contempla las siguientes etapas:

- Etapa 1. Inutilización inmediata de los principales elementos de las calderas previo al desmantelamiento.
- Etapa 2. Proceso de desmantelado de las calderas y reducción a chatarra, asegurando la inutilización de todos los componentes de éstas.
- Etapa 3. Recepción en lugar autorizado como chatarra de las calderas inutilizadas.

Sin otro particular y a la espera de una favorable acogida, saluda atentamente a usted

COLBUN S.A.

  
**Enrique Donoso M.**  
**Gerente División Generación**





# Proterm

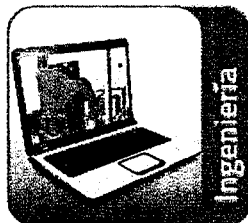
Ambiente y Energía



Mediciones



Laboratorio



Ingeniería



Diagnóstico



Asesoría

## Proyecto Compensación de Emisiones de Material particulado en Forestal La Esperanza S.A.

12 de julio de 2010  
Inf03E2.09-195





## Datos del Proyecto

**Empresa Cedente** : Forestal La Esperanza S.A.

**Planta** : Recinto Ex Schwager S/N

**Empresa Cesionaria** : Colbún S.A.

**Contraparte F. Esperanza** : Pedro Sebok (Gerente)

**Jefe de Proyecto** : Manfred Hellwig (Proterm)

**Encargado de Proyecto** : Sebastián Henning (Proterm)

**Fecha** : 12 de julio de 2010

Emisión	Datos	Preparó	Revisó	Aprobó
1	Nombre	SHG	MHF	MHF
	Fecha	30/06/2010	30/06/2010	30/06/2010
2	Nombre	GDC	SHG	SHG
	Fecha	12/07/2010	12/07/2010	12/07/2010
	Nombre			
	Fecha			



## ÍNDICE

<b>Datos del Proyecto.....</b>	<b>2</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Presentación del Proyecto.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Proyección de las emisiones sometidas a compensación .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Acreditación cumplimiento de eliminación de las fuentes de emisión. ....</b>	<b>6</b>
<b>4. Marco normativo del proyecto de compensación de emisiones.....</b>	<b>6</b>



## 1. Presentación del Proyecto

### 1.1. Objetivo del proyecto

El objetivo del presente proyecto, cuyo titular es la empresa Forestal la Esperanza S.A, es poder concretar la transferencia de sus emisiones de material particulado a un tercero, que se generaría a partir la detención definitiva de las fuentes emisoras que tiene en la comuna de Coronel, representada por dos calderas que operan con biomasa húmeda como combustible y que son utilizadas para el proceso de secado de madera.

### 1.2. Características de las fuentes emisoras

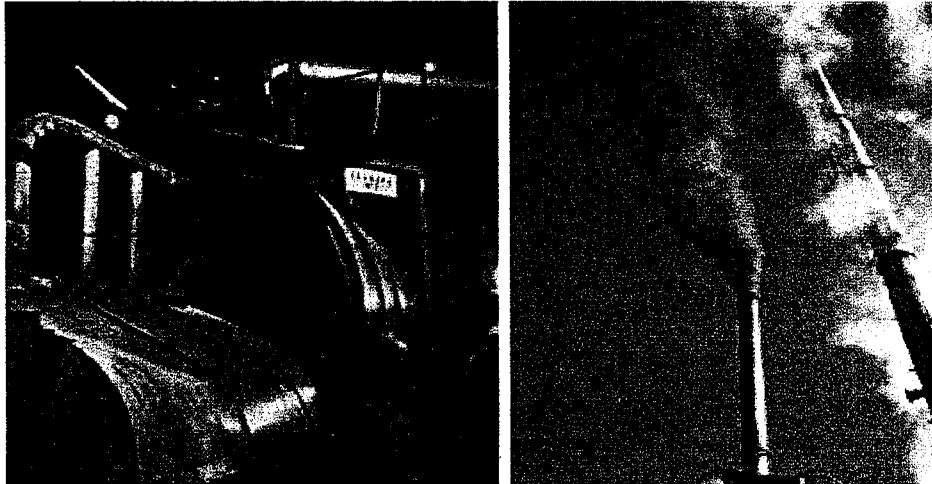
Las características principales de dichos equipos se presentan en la tabla siguiente<sup>1</sup>:

	Capacidad calderas	Nº de Registro	Fabricante	Año de fabricación
Caldera 1	7.300 kg/h vapor	SSConc-124.	Inbomasa	2004
Caldera 2	1.600 kg/h vapor	SSConc-114	Ind. y Maestranza Boca Maule S.A	2004

Ambas fuentes poseen como sistema de abatimiento un ciclón único. Desde el punto de vista operacional ambas calderas se caracterizan por generar de manera periódica altas emisiones de humos negros. Estas emisiones, que no son necesariamente cuantificadas en las mediciones oficiales de material particulado, se generan debido a que su sistema de control es limitado a una operación on-off apagándose la combustión sobre la parrilla. En la fotografía de la izquierda se muestra la caldera N°2 y en la de la derecha se muestra un período de altas emisiones de humos negros.

---

<sup>1</sup> Se adjunta en Anexo N°3 el certificado oficial de revisiones y pruebas de ambas calderas donde se indican sus correspondientes números de registro, así como también carta de Seremi de Salud donde se ratifica la propiedad de las mismas por parte de Forestal la Esperanza.



## 2. Proyección de las emisiones sometidas a compensación

Se presenta a continuación el monto la emisión histórica, futura y la tasa de reducción asociadas a este proyecto. La justificación de dichos valores se presenta en detalle en los Anexos N°1 y N°2.

- **288 kg/día** Reducción de emisiones presentada en informe Proterm Inf01E1.09-195 según mediciones isocinéticas realizadas el año 2005 y metodología incluida en Anexo N°1 del presente informe.
- **274 kg/día** Reducción de emisiones indicada por CONAMA según ORD N°136/2010 del 31 de marzo<sup>2</sup>.
- **100,01 ton/año** Equivalencia de los 274 kg/día indicadas por CONAMA, en toneladas anuales<sup>3</sup>.

De acuerdo a lo presentado en anexos, se considera en el cálculo los niveles de concentración actual expresados en concentración y carga a partir de mediciones oficiales realizadas el año 2005 en ambas calderas, así como también el nivel de operación de la fuente de 93% informada por la empresa. La metodología no considera la alta emisión de humos negros con lo cual la estimación de compensación por eliminación de las calderas corresponde a un criterio ambientalmente conservador<sup>4</sup>.

<sup>2</sup> Se adjunta en Anexo N°4 la carta ORD N°136/2010 del 31 de marzo

<sup>3</sup> Considerando 365 días al año. Se hace notar que el valor de 274 kg/día ya tiene incluida el factor de operación de las calderas con lo cual ya está descontados los días no hábiles de operación.

<sup>4</sup> De la experiencia del consultor se determina que la operación de la caldera bajo condiciones típicas con emisión de humos negros genera concentraciones incluso por sobre los 1.000 mg/m<sup>3</sup>.



### 3. Acreditación cumplimiento de eliminación de las fuentes de emisión.

Para la materialización del proyecto de compensación es necesario que las fuentes emisoras se eliminen. Para lo anterior, y tratándose de equipos generadores de vapor sometidos a registro, es indispensable solicitar la eliminación del respectivo registro de calderas del Servicio de Salud de Concepción, actual Autoridad Sanitaria.

Una vez efectuada la eliminación del registro se define el siguiente procedimiento de eliminación de las calderas contemplando las siguientes etapas:

- **Etapa 1.** Inutilización inmediata de los principales elementos de las calderas previo al desmantelamiento específicamente corte irreversible del cuerpo de presión de la caldera. Envío de registro gráfico a CONAMA/Salud.
- **Etapa 2.** Proceso de desmantelado de las calderas y reducción a chatarra, asegurando la inutilización de todos los componentes de éstas. Envío de registro gráfico y auditoría en terreno de CONAMA/Salud.
- **Etapa 3.** Recepción en lugar autorizado como chatarra de elementos inutilizados de las calderas. Envío de registro de recepción y registro gráfico a CONAMA y Autoridad Sanitaria.

La acreditación formal de dicha eliminación se efectuará mediante la solicitud respectiva que realice la empresa cedente a la Autoridad Sanitaria y la resolución sanitaria que cierre el ciclo administrativo pertinente.

### 4. Marco normativo del proyecto de compensación de emisiones.

En el ámbito territorial del Gran Concepción, el marco normativo para este tipo de proyectos se compone de los siguientes cuerpos legales:

- Ley 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente.
- Decreto Supremo N° 95/2001, Minseges, Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental
- Decreto Supremo N° 41/2006, Minseges, Declara Zona Latente por MP10 como concentración de 24 horas, a las comunas que integran el área metropolitana de Concepción.
- Decreto Supremo N° 48/1984, Minsal, Reglamento de calderas y equipos generadores de vapor.

Dr. Manfred Héllwig F.  
Gerente Proterm

Sebastián Henning  
Subgerente Ambiental Proterm



## Anexo N°1

### Determinación del potencial de compensación de material particulado

Las emisiones actuales y futuras para ambas calderas se basan en los siguientes criterios:

- La emisión actual considerada se determina a partir de las mediciones isocinéticas realizadas por Proterm en el año 2005 según informes oficiales Proterm N°05-74.FLE.mpt.cald1 y N°05-74.FLE.mpt.cald1, cuyo detalle se entrega en Anexo N° 2. La siguiente tabla resume estos valores.

<b>Emisiones reales según mediciones oficiales año 2005</b>			
	Concentración	Flujo Gases	
	mg/m <sup>3</sup> std	m <sup>3</sup> std/h	kg/día
Caldera 1	813	14.198	274
Caldera 2	213	6.883	35
		<b>TOTAL</b>	<b>309</b>

Considerando el factor de carga de la fuente para el mismo año de las mediciones de un 93%, se corrigen tanto el valor actual emitido como el futuro de acuerdo al siguiente cuadro:

<b>Emisiones Corregidas por factor de operación de la fuente [kg/día]</b>			
	Operación Continua	Factor de operación	Corregida por factor operación
Actual	309	93%	288
Futura	0	93%	0
Reducción	309	-	<b>288</b>

- La emisión futura para ambos casos es nula debido a la eliminación definitiva de las calderas con lo cual el potencial de compensación se obtiene es equivalente a las emisiones actuales.



# Anexo N°2

## Resultados mediciones isocinéticas de MP

### Resultados Medición Oficial Caldera N° 1

PROTERM LTDA.							V.2.0
<b>RESULTADOS MEDICIÓN ISOCINETICA MATERIAL PARTICULADO</b>							
Empresa	:	Forestal La Esperanza					
Fuente	:	Caldera N°1					
Lugar de medición	:	Salida Chimenea					
Ensayo N°	:	2005-M-824					
Fecha	:	19 de Julio de 2005					
Condiciones Estándar	:	Temperatura	25 °C				
		Presión	760 mm Hg				
Item	Parámetro	Fecha	19-jul	19-jul	19-jul	Promedio	Desviación estándar
		Hora	14:45-15:31	15:57-16:52	17:04-17:41		
		Corrida N°	1	2	3		
		Filtro N°	1.146	1.151	1.159		
<b>1.0</b>	<b>Datos de la fuente</b>						
1.1	Diámetro chimenea	m	0,750	0,750	0,750		
1.2	Tipo combustible		DHM	DHM	DHM		
1.3	Máximo exceso aire	%	150	150	150		
<b>2.0</b>	<b>Datos del equipo</b>						
2.1	Coefficiente @H	mm Hg	46,904	46,904	46,904		
2.2	Coefficiente Y		1,023	1,023	1,023		
2.3	Coefficiente pitot		0,863	0,863	0,863		
2.4	Diámetro boquilla	mm	7,94	7,94	7,94		
<b>3.0</b>	<b>Datos de terreno</b>						
<b>3.1</b>	<b>Ambiente</b>						
3.1.1	Temperatura	°C	12,0	13,0	11,0	12,0	
3.1.2	Humedad	%	78	80	80	79	
3.1.3	Presión	mm Hg	761	760	760	760	
<b>3.2</b>	<b>Fuente</b>						
3.2.1	Temperatura	°C	125	124	114	121	
3.2.2	Presión	mm c.a.	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	
3.2.3	CO2	%	10,0	8,5	4,5	7,7	
3.2.4	O2	%	10,5	10,8	13,9	11,7	
3.2.5	CO	%	0,5	1,2	0,1	0,6	
3.2.6	Humedad estimada	%-vol.	25,0	25,0	25,0		
<b>3.3</b>	<b>Equipo</b>						
3.3.1	Temperatura DGM	°C	14	17	20		
3.3.2	Presión DGM	mm c.a.	51	37	65		
3.3.3	Volumen DGM	m3	0,850	0,851	0,850		
3.3.4	Tiempo muestreo	min.	46,00	55,00	37,00		
3.3.5	Delta p pitot	mm c.a.	10,2	9,4	10,2		



<b>4.0 Datos de Laboratorio</b>						
4.1	Volumen condensado	ml	40,6	40,7	40,6	
4.2	Agua en sílica	gr	10,7	10,7	10,7	
4.3	Peso material en filtro	mg	718,3	1.016,9	233,4	
4.4	Peso material en acetona	mg	84,7	86,5	58,1	
<b>Resultados intermedios</b>						
5.1	Peso material total	mg	803,0	1.103,4	291,5	
5.2	Humedad gases					
5.2.1	Volumen agua	ml	51	51	51	
5.2.2	Volumen vapor	m3(std)	0,070	0,070	0,070	
5.2.3	Humedad real	%	7,1	7,2	7,2	0,07
5.3	Volumen DGM	m3(std)	0,909	0,898	0,890	
5.5	Factor de combustible F0		1,040	1,188	1,556	
5.6	Peso molecular					
5.6.1	seco	g/g-mol	30,1	30,1	29,3	
5.6.2	húmedo	g/g-mol	29,3	29,2	28,5	
5.8	Velocidad gases	m/s	12,9	12,4	12,9	12,7
5.9	Exceso de aire	%	95,9	92,1	180	123
5.10	Isocinetismo	%	74	64	88	75
<b>6. Resultados finales</b>						
6.1	<b>Flujo gases</b>					
6.1.1	real húmedo	m3/h	20.490	19.670	20.499	20.220 476
6.1.2	estándar húmedo	m3(std)/h	15.356	14.759	15.779	15.298 512
6.1.3	estándar seco	m3(std)/h	14.264	13.696	14.635	14.198 473
6.1.4	normal húmedo	Nm3/h	14.068	13.521	14.455	14.015 469
6.1.5	normal seco	Nm3/h	13.068	12.547	13.407	13.007 433
6.2	<b>Concentración partículas</b>					
6.2.1	estándar seco	mg/m3(std)	884	1.229	328	813 455
6.2.2	corregido exceso aire	mg/m3(std)	884	1.229	393	835 420
6.2.3	normal seco	mg/Nm3	965	1.342	358	888 496
6.2.4	corregido 8 % O2	mg/Nm3	1.195	1.710	655	1.186 528
6.3	<b>Emisión material particulado</b>					
6.3.1	Emisión horaria	kg/h	12,6	16,8	4,79	11,4 6,11
6.3.2	Emisión diaria	kg/día	303	404	115	274 147





## Resultados Medición Oficial Caldera N° 2

PROTERM LTDA.							V.2.0
<b>RESULTADOS MEDICIÓN ISOCINETICA MATERIAL PARTICULADO</b>							
Empresa	:	Forestal La Esperanza					
Fuente	:	Caldera N°2					
Lugar de medición	:	Salida Chimenea					
Ensayo N°	:	2005-M-823					
Fecha	:	18 de Julio de 2005					
Condiciones Estándar	:	Temperatura	25 °C				
		Presión	760 mm Hg				
Ítem	Parámetro	Fecha	18-jul	18-jul	18-jul	Promedio	Desviación estándar
		Hora	14:13-15:14	15:30-16:22	16:44-17:35		
		Corrida N°	1	2	3		
		Filtro N°	1.143	1.144	1.145		
<b>1.0</b>	<b>Datos de la fuente</b>						
1.1	Diámetro chimenea	m	0,500	0,500	0,500		
1.2	Tipo combustible		DHM	DHM	DHM		
1.3	Máximo exceso aire	%	150	150	150		
<b>2.0</b>	<b>Datos del equipo</b>						
2.1	Coefficiente @H	mm Hg	46,904	46,904	46,904		
2.2	Coefficiente Y		1,023	1,023	1,023		
2.3	Coefficiente pitot		0,863	0,863	0,863		
2.4	Diámetro boquilla	mm	6,35	6,35	6,35		
<b>3.0</b>	<b>Datos de terreno</b>						
<b>3.1</b>	<b>Ambiente</b>						
3.1.1	Temperatura	°C	12,5	12,5	12,5	<b>12,5</b>	
3.1.2	Humedad	%	80	80	80	<b>80</b>	
3.1.3	Presión	mm Hg	764	764	764	<b>764</b>	
<b>3.2</b>	<b>Fuente</b>						
3.2.1	Temperatura	°C	125	132	135	<b>131</b>	
3.2.2	Presión	mm c.a.	-3,3	-3,3	-3,3	<b>-3,3</b>	
3.2.3	CO2	%	5,5	8,3	7,5	<b>7,1</b>	
3.2.4	O2	%	14,4	13,0	12,0	<b>13,1</b>	
3.2.5	CO	%	0,1	0,0	0,0	<b>0,0</b>	
3.2.6	Humedad estimada	%-vol.	25,0	25,0	25,0		
<b>3.3</b>	<b>Equipo</b>						
3.3.1	Temperatura DGM	°C	14	18	18		
3.3.2	Presión DGM	mm c.a.	34	34	30		
3.3.3	Volumen DGM	m3	0,850	0,850	0,850		
3.3.4	Tiempo muestreo	min.	61,00	52,00	51,00		
3.3.5	Delta p pitot	mm c.a.	12,0	13,1	11,4		



<b>4.0</b>	<b>Datos de Laboratorio</b>							
4.1	Volumen condensado	ml	47,4	47,4	47,4			
4.2	Agua en sílica	gr	10,7	10,7	10,7			
4.3	Peso material en filtro	mg	149,4	142,7	127,9			
4.4	Peso material en acetona	mg	69,3	27,4	61,3			
	<b>Resultados intermedios</b>							
5.1	Peso material total	mg	218,7	170,1	189,2			
5.2	Humedad gases							
5.2.1	Volumen agua	ml	58	58	58			
5.2.2	Volumen vapor	m3(std)	0,079	0,079	0,079			
5.2.3	Humedad real	%	8,0	8,1	8,1	8,0	0,06	
5.3	Volumen DGM	m3(std)	0,911	0,898	0,898			
5.5	Factor de combustible F0		1,182	0,952	1,187			
5.6	Peso molecular							
5.6.1	seco	g/g-mol	29,5	29,9	29,7			
5.6.2	húmedo	g/g-mol	28,6	28,9	28,7			
5.8	Velocidad gases	m/s	14,1	14,8	13,9	14,3		
5.9	Exceso de aire	%	211	167	129	169		
5.10	Isocinetismo	%	80	90	99	90		
<b>6.</b>	<b>Resultados finales</b>							
6.1	<b>Flujo gases</b>							
6.1.1	real húmedo	m3/h	9.981	10.459	9.819	10.086	332	
6.1.2	estándar húmedo	m3(std)/h	7.510	7.734	7.207	7.484	264	
6.1.3	estándar seco	m3(std)/h	6.912	7.110	6.626	6.883	243	
6.1.4	normal húmedo	Nm3/h	6.880	7.085	6.603	6.856	242	
6.1.5	normal seco	Nm3/h	6.332	6.513	6.070	6.305	223	
6.2	<b>Concentración partículas</b>							
6.2.1	estándar seco	mg/m3(std)	240	189	211	213	25,5	
6.2.2	corregido exceso aire	mg/m3(std)	339	210	211	253	73,9	
6.2.3	normal seco	mg/Nm3	262	207	230	233	27,8	
6.2.4	corregido 8 % O2	mg/Nm3	516	336	332	395	105	
6.3	<b>Emisión material particulado</b>							
6.3.1	Emisión horaria	kg/h	1,66	1,35	1,40	1,47	0,17	
6.3.2	Emisión diaria	kg/dia	39,8	32,3	33,5	35,2	4,04	

# ANEXO N° 2

ORD. Nº **291** / 2010

ANT.: Carta GDG-109/2010 de fecha 23 de julio de 2010  
Ord. Nº136/2010 de fecha 31 de marzo de 2010, de CONAMA Biobío  
Ord. Nº 635/2010 de fecha 14 de septiembre de 2010, de SEREMI de Salud Biobío



MAT: Responde solicitud de compensación de emisiones material particulado

Concepción, 15 de Septiembre de 2010

A: **SR. ENRIQUE DONOSO M.**  
**GERENTE DIVISIÓN GENERACIÓN**  
**COLBUN S.A.**

DE: **SR. BOLIVAR RUIZ ADAROS**  
**DIRECTOR REGIONAL DE CONAMA**

De nuestra consideración,

En atención a lustra solicitud, y analizados los antecedentes entregados en los documentos de ANT, tanto por esta Dirección Regional, como por los profesionales de la SEREMI de Salud de la Región del Biobío, estamos en condiciones de señalar lo siguiente:

1.- Vistos los antecedentes entregados, la visita realizada a forestal La Esperanza por ambas entidades públicas y finalmente la información adicional entregada por don Pedro Sebok Kalman, representante de dicha empresa, se concluye que un nivel de actividad realista y conservador corresponde a **91%**.

2.- Las emisiones que serán reconocidas para dicha fuente corresponden a:

Caldera 1:	274 kg/día
Caldera 2:	35 kg/día
<b>Total:</b>	<b>309 kg/día</b>

Por lo tanto, dadas las emisiones señaladas y el nivel de actividad considerado las emisiones a ser compensadas por el retiro e inutilización total de las calderas señaladas corresponderá a **281 kg/día** de material particulado equivalentes a **102 toneladas anuales**.

Lo anterior implica el envío de una programación detallada del proceso de inutilización y destino final de los equipos mencionados en el punto 2, anterior, esto con la finalidad de que personal de la autoridad fiscalizadora pueda hacerse presente en dichas labores.

Por otra parte, respecto de los montos reconocidos susceptibles de compensación (102 ton/año), estos serán validos en tanto se pueda demostrar en el tiempo que forestal La Esperanza S.A. o quien es sus derechos le suceda, no presente aumentos de emisiones que estén fuera de lo que en su momento establezca el Plan de Prevención de la Contaminación Atmosférica de Concepción Metropolitano (PPACM), a partir del momento de su entrada en vigencia.

Sin otro particular, le saluda cordialmente.



**COMISIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE**  
**DIRECTOR REGIONAL**  
**REGION DEL BIO BIO**  
**BOLIVAR RUIZ ADAROS**  
**DIRECTOR REGIONAL CONAMA**  
**REGION DEL BIOBIO**

Distribución:

- SEREMI de Salud, Región del Biobío
- Forestal La Esperanza S.A.
- Archivo CONAMA Región del Biobío
- Expediente "Central Termoeléctrica Santa María de Coronel"

# ANEXO N° 3

## ANEXO N° 3.1

**BASES TÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DE REDUCCIÓN  
DE EMISIONES DENTRO DEL PLAN DE  
COMPENSACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO  
COMPLEJO TERMOELÉCTRICO SANTA MARÍA**

**Enero 2011**



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCION.....	3
2.	PARQUE BOTÁNICO CORONEL.....	4
2.1.	SITUACIÓN ACTUAL.....	4
2.2.	SITUACIÓN FUTURA.....	5
2.3.	BASES TÉCNICAS.....	6
2.3.1.	Antecedentes administrativos.....	6
2.3.2.	Antecedentes científicos.....	6
2.4.	ESTIMACIÓN DE REMOCIÓN MP EN PARQUE BOTÁNICO CORONEL.....	9
2.4.1.	Cálculo de la remoción de MP.....	9
2.4.2.	Verificación de Implementación y Mantenimiento Parque Botánico Coronel.....	12
3.	REMODELACIÓN DE SUPERFICIE DE CANCHA DE FÚTBOL.....	14
4.	BIBLIOGRAFÍA.....	16
5.	ANEXO.....	16

## 1. INTRODUCCION

Colbún S.A. cuenta con la Resolución Exenta N°176 del 12 de julio del año 2007 de la COREMA Región del Biobío (en adelante RCA N°176/2007) que aprobó ambientalmente el proyecto "Central Termoeléctrica Santa María" y que establece que debe presentar un Plan de Compensación de Material Particulado, MP10, para el 100% de sus emisiones.

Las emisiones estimadas a compensar por unidad generadora instalada son:

**Tabla 1:** Emisiones estimadas de MP10 por unidad generadora

<b>Unidad</b>	<b>Ton MP10/año</b>
1 (350 MW)	473
2 (350 MW)	473
<b>Total Emisión</b>	<b>946</b>

**Fuente:** Elaboración Propia basado en RCA N°176/2007.

Si bien en la Tabla 1 se presenta una estimación del total de emisiones a compensar, es necesario especificar que las compensaciones se realizarán sobre las emisiones medidas cuando la planta esté en operación. Por lo anterior, en la RCA N°176/2007 se establece un completo plan de monitoreo de las emisiones atmosféricas.

Por otra parte, cabe mencionar que en el EIA de la Central Termoeléctrica Santa María, Colbún asume como compromiso voluntario la compensación de emisiones de MP, considerando que la comuna de Coronel forma parte del territorio del Gran Concepción, que está declarado Zona Latente por Material Particulado Respirable (MP) por la COREMA VIII. De acuerdo a lo señalado en la RCA N°176/2007, las compensaciones de MP se realizarán mediante fuentes de combustión. Lo anterior genera un amplio campo de alternativas, entre las que se encuentran:

- fuentes de combustión industriales
- fuentes de combustión residenciales (recambio de estufas)
- control de incendios forestales
- provisión de leña seca

No obstante lo anterior, debido a la necesidad de garantizar el cumplimiento de la compensación de emisiones, a la limitada disponibilidad de fuentes de combustión industriales para su eliminación y a los beneficios adicionales que generaría un área verde en la comuna de Coronel, se quiere incorporar un mecanismo de reducción de emisiones basado en el efecto de filtrado y limpieza del aire que generan la superficie de las hojas y tallos de los árboles y arbustos conocido como fenómeno de deposición seca. La implementación de esta medida de compensación se realizará mediante la construcción y mantenimiento del "Parque Botánico Coronel", cuyas características se detallan en la sección siguiente.

## 2. PARQUE BOTÁNICO CORONEL

El proyecto "Parque Botánico Coronel" considera la implementación y mantención de un Parque en la región del Biobío, comuna de Coronel, específicamente en el Fundo Calabozo, al cual se accede a través de la ruta 160, 1,2 km al este de la Plaza de Peaje del bypass Coronel – Lota. El lugar donde se habilitará el Parque actualmente alberga una riqueza considerable de especies vegetales, condición que se incrementaría al implementar el Parque Botánico, el cual podrá utilizar la totalidad del predio, aumentando su superficie a un total de aproximadamente 50 Ha.

### 2.1. Situación Actual

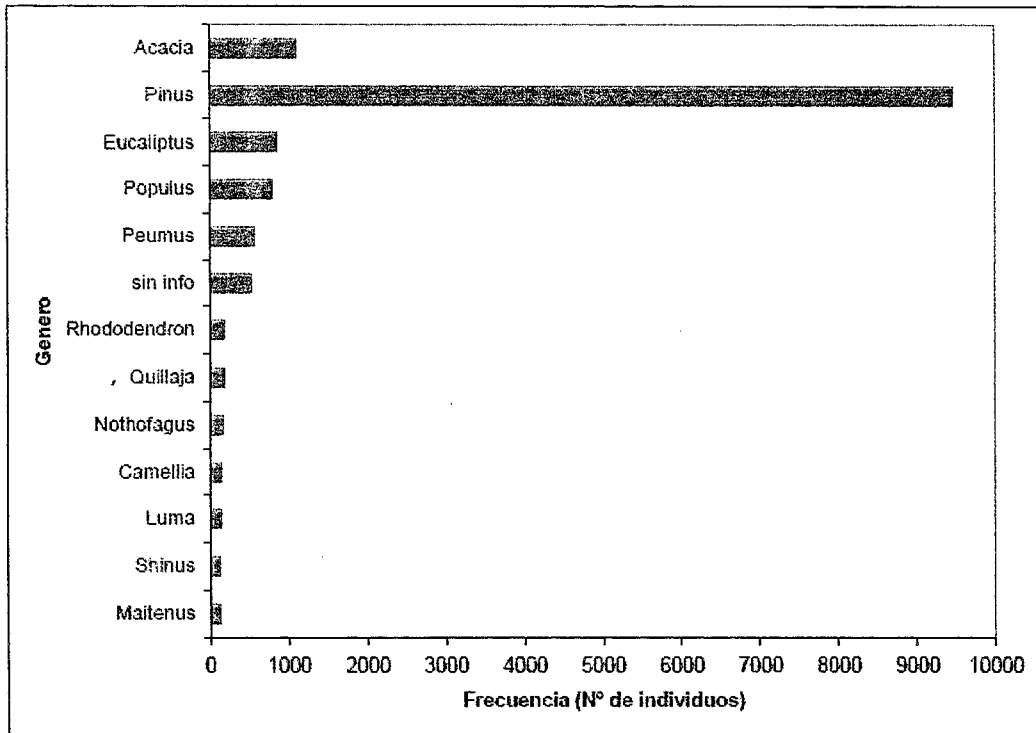
En la Tabla 2 se resumen los resultados de un estudio realizado en 2009 por la consultora Biomás, orientado a identificar el número de géneros y especies arbóreas y arbustivas, y contabilizar el número de individuos que componen el terreno donde se emplazará el Parque Botánico Coronel.

**Tabla 2:** Cantidad existente de individuos según tipo de crecimiento.

<b>Tipo de crecimiento</b>	<b>Cantidad de individuos</b>
Árbol	15.465
Arbusto	703
No clasificado	50
Total	16.218

**Fuente:** Catastro de Flora y Vegetación Parque Botánico Coronel, Biomás, 2009

Se identificaron un total de 133 géneros, representados por una amplia diversidad de géneros y de especies (fueron identificadas más de 120 géneros) y por una cantidad muy variable de individuos. Los géneros más abundantes en cantidad de individuos fueron *Pinus* y *Acacia*, con 9.457 y 1.019 individuos para las especies *Pinus radiata* y *Acacia melanoxylon* respectivamente (ver figura 1).



**Figura. 1:** Frecuencia por género (más relevantes)

En resumen, la composición actual es la siguiente:

**Tabla 3.** Composición actual de especies

<b>Especie</b>	<b>Cantidad de individuos</b>	<b>% individuos</b>
Conífera	9.457	58%
Caducifolio (exóticos y nativos) + otros	6.761	42%
<b>TOTAL</b>	<b>16.218</b>	<b>100%</b>

## 2.2. Situación futura

En función de la condición actual y del interés de implementar un parque que cuente con una abundante riqueza tanto de ejemplares como de especies vegetales, se requiere desarrollar un plan de reforestación que considera plantar nuevos individuos de diferentes especies y realizar un programa paulatino de recambio traslapado (sin efecto en las áreas foliares) de algunas especies.

De esta manera la composición vegetal proyectada será la siguiente:

**Tabla 4.** Composición futura de especies en Parque Botánico Coronel

Especie	Cantidad de individuos	% individuos	Variación con respecto a situación actual
Conífera	9.457	35%	Sin variación
Caducifolio (exóticos y nativos) + otros	17.543	65%	Aumento de 159%
TOTAL	27.000	100%	Aumento de 66 %

↳ cómo se distribuyen (EUCALIPTO)

### 2.3. Bases Técnicas

En la actualidad los árboles tienen una función muy importante para las zonas urbanas. Varias ciudades latinoamericanas, entre ellas Ciudad de México, São Paulo y Santiago, han integrado árboles y otros tipos de vegetación como parte de programas, políticas y/o medidas para mejorar ambientalmente los centros urbanos, en particular para reducir los niveles de material particulado y otras sustancias contaminantes (Escobedo et al., 2008).

#### 2.3.1. Antecedentes administrativos

Bajo este contexto, diversos Titulares de Proyectos han propuesto la arborización como medida de compensación de las emisiones de los Proyectos en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Entre ellas la Central de Gas Sur, Newén, ubicado en la VIII Región, donde se compromete la arborización de aproximadamente 3 hectáreas (se establece un potencial de remoción de 22,5 kg MP10/árbol). Similarmente, se propone la arborización como una de las medidas de mitigación en el estudio "Propuesta y Análisis de Medidas de Reducción de Emisiones en la Zona Industrial de Ventanas". Esta medida de compensación quedó comprometida dentro de la RCA del proyecto "Planta Industrial de Molienda de Cemento, Ventanas, V Región". En este documento se reconoce un potencial de reducción de un árbol al año de 22,5 kg MP10. Otros casos disponibles se encuentran en la Región Metropolitana y en la Región del Biobío (DIA "Planta de Molienda de Cemento Coronel", ingresada recientemente al SEIA).

#### 2.3.2. Antecedentes científicos

El mecanismo de remoción física de contaminantes por medio de la vegetación es denominado deposición seca. Comúnmente las partículas se depositan en la superficie de las hojas y tallos por impacto debido principalmente a la acción del viento que arrastra consigo los contaminantes hacia la superficie de las hojas y tallos de las plantas, donde éstos finalmente quedan adheridos. Las tasas de remoción de contaminantes atmosféricos debido a la presencia de cobertura foliar de los árboles y arbustos depende principalmente de la velocidad de deposición de la sustancia en la superficie de las hojas (variable ligada a la velocidad del viento) y de la concentración ambiental de la sustancia. Lo anterior puede representarse mediante la siguiente ecuación:

$$F = V_d * C$$

Donde:

F: Flujo de sustancia contaminante hacia la cobertura foliar ( $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

$V_d$ : velocidad de deposición ( $\text{m s}^{-1}$ )

C: Concentración ambiental de la sustancia contaminante ( $\text{g m}^{-3}$ )

Por otra parte, la remoción de material particulado en un árbol se calcula de la siguiente manera:

$$\text{MP removido/árbol/año} = F (\text{kg/m}^2/\text{año}) * A\text{-foliar} (\text{m}^2)$$

Donde:

A-foliar = Área en planta del árbol \* IAF

IAF: índice área foliar ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )

El IAF para coníferas tiene un valor aproximado de 4 a los 3 años (Flores y Allen, 2004) y el IAF para eucaliptos es de aproximadamente 3,8 (Muñoz et al. 2008).

#### A. Velocidad de deposición

En la extensiva revisión internacional realizada por Litschke y Kuttler (2008) se analizó la experiencia creciente en la inclusión de parques urbanos para la remoción de material particulado atmosférico, a través de la remoción tipo filtro, donde la velocidad de deposición es la variable de medición de la magnitud de la filtración.

Las variables relevantes analizadas en este artículo se refieren a:

- i) **Diámetro de la partícula:** para partículas mayores la deposición está gobernada por la sedimentación y para partículas menores los fenómenos dominantes son el impacto y la intercepción.
- ii) **Humedad ambiental:** debido a que las partículas son higroscópicas, por lo que un aumento de tamaño implica un aumento en la velocidad de deposición (situación dominante en la zona del Parque).
- iii) **Velocidad del viento:** se ha demostrado que cerca de las emisiones, mayor velocidad del viento tiene como consecuencia una mayor velocidad de deposición (ubicación del Parque cerca de las emisiones y en dirección del viento predominante).
- iv) **Especies y propiedades de las hojas:** Existe una variabilidad significativa en la velocidad de deposición, reflejándose como valor característico  $1 \text{ cm/s}$  con una tendencia a que sea mayor a ese valor. A modo de ejemplo, experimentos controlados indican que las hojas de coníferas (pinos y cipreses) tienen una mayor velocidad de deposición que árboles de hojas caducas (arces y álamos), además de no perder las hojas durante todo el año.

- v) **Resuspensión:** en general se puede considerar un cierto factor por resuspensión en las hojas.

Por lo tanto, se puede concluir que las condiciones particulares del Parque Coronel, con su ubicación respecto de la fuente, dirección del viento y presencia de coníferas de hoja perenne, la velocidad de deposición es particularmente relevante en este caso.

*B. Concentración ambiental de material particulado*

En base a lo anterior, es necesario establecer la concentración de MP10 en la zona que se implementará el parque, para así contextualizar la realidad local. Considerando esto, se ha verificado las concentraciones de MP10 en el aire mediante las mediciones de estaciones de monitoreo ubicadas en las cercanías del proyecto. Las estaciones consideradas se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 5:** Monitoreo de MP10 en las cercanías del Parque Botánico Coronel

Estación	Ubicación WGS-84		Distancia a la Central Termoeléctrica Santa María (km)	Distancia al Parque Botánico Coronel (km)	Estimación Promedio anual Concentración MP10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	N	E			
Coronel	5902576	665013	4,1	1,2	64
Escuadrón	5908924	664801	10,3	5,2	50
			PROMEDIO		57

**Fuente:** EIA Proyecto Complejo Termoeléctrico Coronel.

En la Tabla 6 se verifica que los niveles de contaminación por MP10 en la zona de estudio están en el orden de los  $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual.



**Figura 2:** Ubicación de las estaciones, de CT Santa María de Coronel y Parque Botánico Coronel

## 2.4. Estimación de remoción MP en Parque BOTÁNICO Coronel

Se presentan en este capítulo el cálculo de la remoción de material particulado estimado para el Parque Botánico Coronel y la forma de verificación en el tiempo del desarrollo y mantención de éste.

### 2.4.1. Cálculo de la remoción de MP

De acuerdo a la información presentada en Litschke y Kuttler (2008), las velocidades de deposición para distintas especies de árboles se entregan en la Tabla 5.

**Tabla 6** Velocidades de deposición por especie

Sitio	Velocidad de Deposición MP10 (cm/s)				
	Pino	Ciprés	Arce	Álamo	Mostajo
Sitio 1	2,8	3,4	3,6	0,6	5,4
Sitio 2	4,7	6,2	1,8	0,4	3,3

Fuente: Litschke y Kuttler (2008)

Adicionalmente, estudios recientes (Escobedo et al., 2008) realizados en la ciudad de Santiago, para analizar el costo y efectividad de las políticas de utilización de bosques urbanos para mejorar la calidad del aire, estimaron que la capacidad media de remoción de material particulado respirable (MP10) por estos bosques urbanos se encuentra en el orden de 14.8 g/m<sup>2</sup>/año, que incluyen árboles, arbustos y pasto. Similar estimación fue realizada para los bosques urbanos en Beijing, China donde se estimó una tasa mayor de remoción de MP10 de 27.5 g/m<sup>2</sup>/año. La tasa de remoción de MP10 estimada para los bosques urbanos de la ciudad de Beijing fue mayor que la tasa estimada para los bosques urbanos de Santiago, como una consecuencia de los mayores niveles de contaminación del aire registrados en la capital China en comparación con Santiago.

Con los antecedentes entregados en los puntos anteriores, se ha realizado una estimación de la remoción de material particulado en el Parque Botánico Coronel en su condición actual y futura, con los siguientes valores:

- Velocidades de deposición basadas en Litschke y Kuttler (2008).

**Tabla 7.** Estimación de velocidades de deposición (cm/s) de especies del Parque Coronel

Especie	Velocidad de Deposición (cm/s)
Coníferas	3,8 (*)
Caducifolios	3,5 (**)

(\*): basado en pino, (\*\*): basado en arce y mostajo

$$3,8 \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}$$



- Diámetros de copa e IAF distintos etapas del Parque basado en Muñoz et al. (2008) y Flores y Allen (2004).

Para los diámetros de copa y los Índices de Área Foliar se consideraron 3 tipos de árboles de crecimiento en un período de 15 años:

- A1 - Rápido Crecimiento
- A2 - Crecimiento normal
- A3 - Crecimiento Moderado

Para el tramo 20 a 30 años se ha asumido que se mantienen los valores calculados para el año 15.

**Tabla 8.** Estimación del diámetro de copa de especies del Parque Botánico Coronel

Especie	Diámetro copa actual (m)			Diámetro copa en 5 años (m)			Diámetro copa en 10 años (m)			Diámetro copa en 15 años (m)		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Coníferas actuales	8	8	8	9	9	9	10	10	10	10	10	10
Caducifolios actuales	7	7	7	10	9	8	10	10	9	10	10	10
Caducifolios a ser plantados	0	0	0	5	3	2	10	5	4	10	8	5

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi \cdot 25}}$$

**Tabla 9.** Estimación del índice de área foliar de especies del Parque Botánico Coronel

Especie	Índice Área Foliar actual (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )			Índice Área Foliar en 5 años (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )			Índice Área Foliar en 10 años (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )			Índice Área Foliar en 15 años (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )		
	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Coníferas actuales	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Caducifolios actuales	2	2	2	2,5	2,5	1,5	2,5	2,5	2	2,5	2,5	2,5
Caducifolios a ser plantados	0	0	0	2	1,5	1	2,5	2	1,5	2,5	2	2

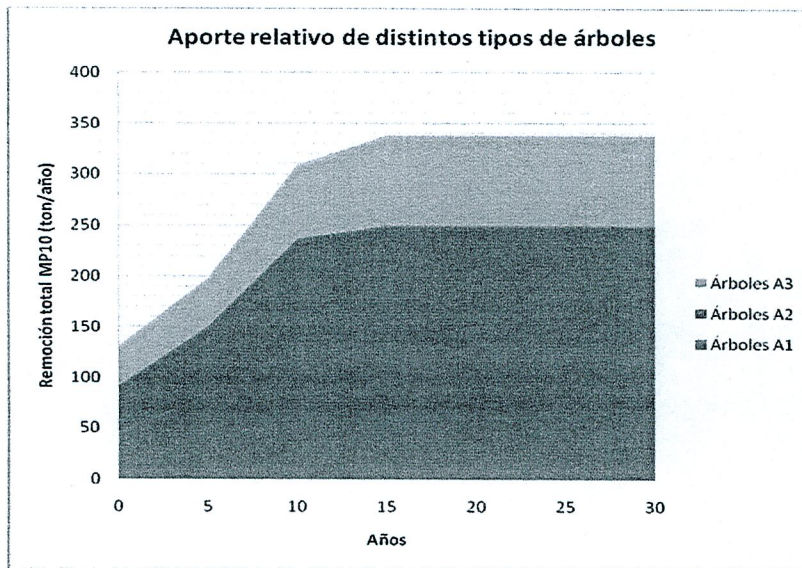
Para efectos de la estimación de remoción de material particulado a través del Parque Botánico Coronel, considerando los 3 tipos de árboles antes mencionados, y considerando una proporción relativa de cada tipo de árbol de 35%, 35% y 30% respectivamente, es posible obtener los resultados que se resumen en la tabla 10. En esta tabla se ha

incorporado la propuesta de compensación de emisiones que considera un valor máximo de 200 tonMP/año.

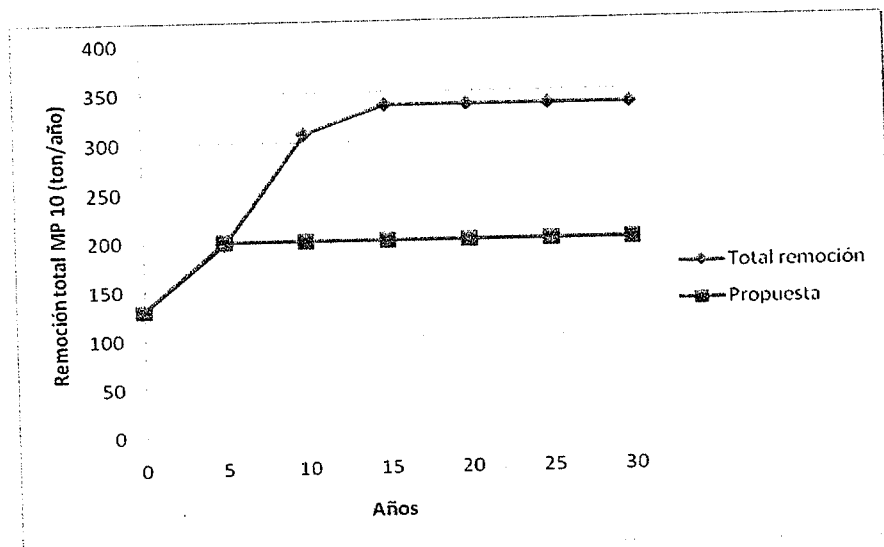
**Tabla 10.** Compensación de MP Parque Coronel ante escenarios de crecimiento y Propuesta

Año	Remoción (tonMP/año)				Propuesta Remoción
	Árboles A 1	Árboles A2	Árboles A3	Total remoción	
0	46	46	39	130	130
5	82	69	47	198	200
10	135	102	72	309	200
15	135	115	88	338	200
20	135	115	88	338	200
25	135	115	88	338	200
30	135	115	88	338	200

La figura 3 muestra el aporte relativo de los distintos tipos de árboles (A1, A2 y A3) en la reducción total de emisiones de MP del Parque. La Figura 4 presenta un gráfico de la remoción estimada entre los años 0 y 30 por el Parque Botánico Coronel, junto a la propuesta de Colbún para la acreditación de parte de dicha reducción. En la figura es posible observar que, a partir del año 5, la Propuesta se encuentra por debajo de los valores calculados, lo que implica que el Parque Botánico Coronel reducirá una mayor cantidad de material particulado del que se contabilizará para el Plan de Compensación.



**Figura 3:** Aporte relativo de distintos tipos de árboles, según su velocidad de crecimiento, a la reducción de emisiones de MP10 del Parque Coronel.

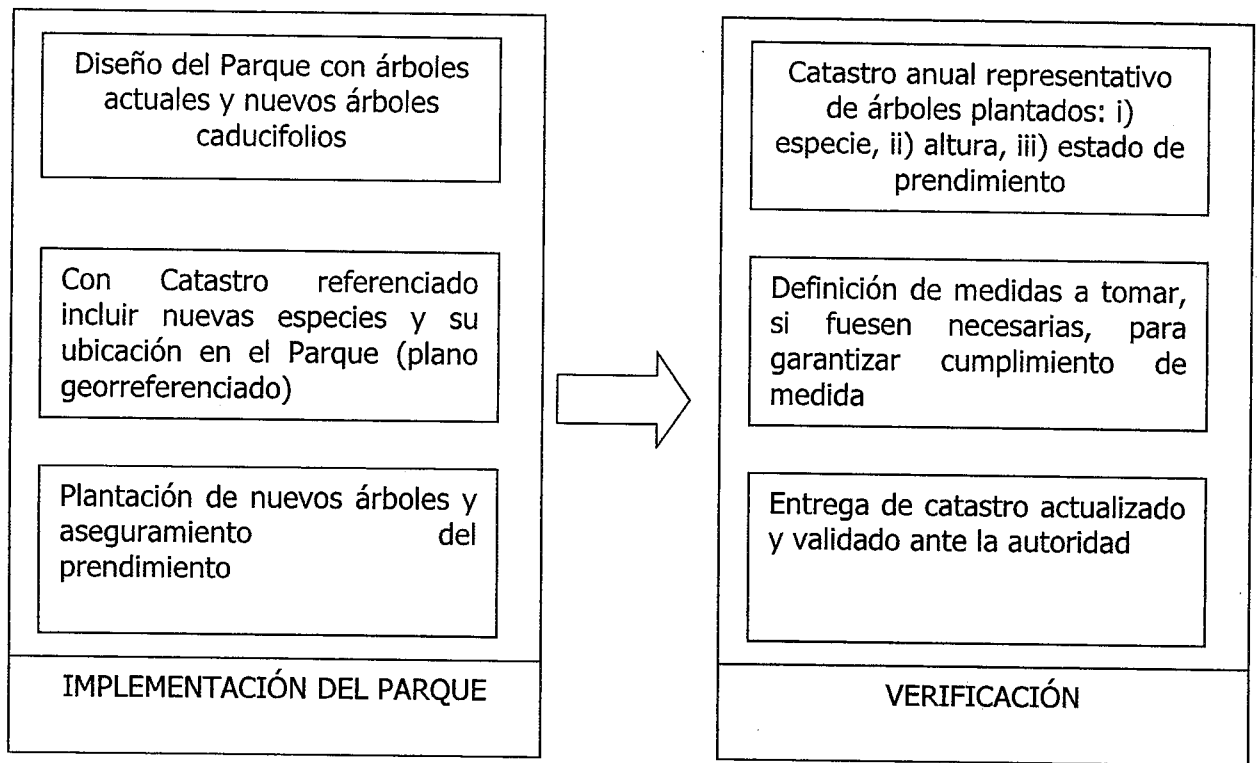


**Figura 4:** Reducción de emisiones de MP10 del Parque Coronel y propuesta.

#### 2.4.2. Verificación de Implementación y Mantenimiento Parque Botánico Coronel

- Se validará el catastro de árboles en su condición actual.
- Se incluirá dentro de este catastro el plan de desarrollo de plantación de nuevas especies e individuos.
- De manera anual se realizará un muestreo representativo de manera de validar el catastro actualizado de árboles del Parque.
- Se realizarán mediciones de material particulado en el entorno o en el interior del Parque, de manera de validar las mediciones de las estaciones Coronel Norte y Coronel Sur.

Se presentará anualmente a la autoridad un catastro actualizado de los árboles existentes en el Parque. Además se realizará un muestreo representativo y se entregará un catastro de los individuos nuevos plantados, indicando la altura, radio de copa, estado de prendimiento de los mismos, y un registro fotográfico, señalando además las medidas a tomar para un manejo adecuado del Parque.



**Figura 5:** Esquema Implementación y Verificación del Parque Coronel

### 3. REMODELACIÓN DE SUPERFICIE DE CANCHA DE FÚTBOL

El potencial de emisión de material particulado de una cancha de fútbol de tierra se genera cuando la superficie de ésta sufre de perturbaciones (en un partido de fútbol) y se cumplen las condiciones de velocidad del viento entre perturbaciones para que se genere la resuspensión de polvo a la atmósfera. El potencial de emisión de MP10 se calculó utilizando el modelo de erosión por viento propuesto por la US EPA (EPA AP-42, 13.2.5 Industrial Wind Erosion), el cual se muestra a continuación:

$$E = k \times A \times \sum_{i=1}^N P_i$$

Donde:

E = Emisión total de material particulado [kg MP10].

k = Constante multiplicador dependiente del tamaño de partícula que hay en el terreno. Para este caso se considera que el tamaño de las partículas en una cancha de futbol es menor que 10  $\mu\text{m}$  por lo que k es 0,5 (EPA AP-42, 13.2.5 Industrial Wind Erosion).

$P_i$  = Potencial erosión entre los disturbios que sufre el terreno por efecto de una ráfaga de viento, Factor de emisión [g MP10 /m<sup>2</sup>]

A = Área donde ocurre el evento [m<sup>2</sup>] (aproximadamente 7040 m<sup>2</sup>).

Por lo que se observa de la ecuación, este método se basa en la sumatoria de emisiones, dependientes de los eventos o disturbios que ocurran en el terreno por cierto periodo de tiempo.

El potencial de erosión, P para cada superficie seca y expuesta al viento se determina utilizando la siguiente relación empírica:

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*), \quad P = 0, u^* \leq u_t^*$$

$u^*$  = velocidad de fricción, m s<sup>-1</sup>

$u_t^*$  = velocidad umbral de fricción, m s<sup>-1</sup>

Para la estimación del potencial de emisión de polvo fugitivo de la cancha de fútbol, se consideró un periodo base de 1 año donde se utiliza la cancha 50 semanas con una frecuencia de 3 partidos/entrenamiento por semana. Esto implica que en un año la superficie de la cancha podría experimentar 150 disturbios.

Los resultados obtenidos de la modelación de esta mediada de compensación se muestran en la

Tabla 111.

**Tabla 11:** Resultados por estabilizar el terreno de una cancha de fútbol.

<b>Variable</b>	<b>Valores</b>
Ton MP10/año/cancha	12,4

**Fuente:** Elaboración propia

Por otro lado, el potencial de reducción de emisiones fugitivas de MP10 por depositación foliar de esta superficie de pasto es poco significativo en relación a la reducción de emisiones por estabilización del terreno.

#### **4. BIBLIOGRAFÍA**

Escobedo F.J, J. Wagnerb, D. Nowakc, C. De la Mazad, M. Rodríguez, D. Cranec. Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management* 86 (2008) 148–157.

Flores F.J. y L. Allen. Efectos del clima y capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la productividad de rodales de pino radiata en Chile: un análisis utilizando el modelo 3-PG. *Bosque* 25(3): 11-24, 2004.

Litschke T. y W. Kuttler. On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 3, 229-240 (June 2008)

Muñoz F., M. Espinosa, J. Cancino, R. Rubilar, M. Herrera. Efecto de poda y raleo en el área foliar de *Eucalyptus nitens*. *Bosque* 29(1), 44-51, 2008.

#### **5. ANEXO**

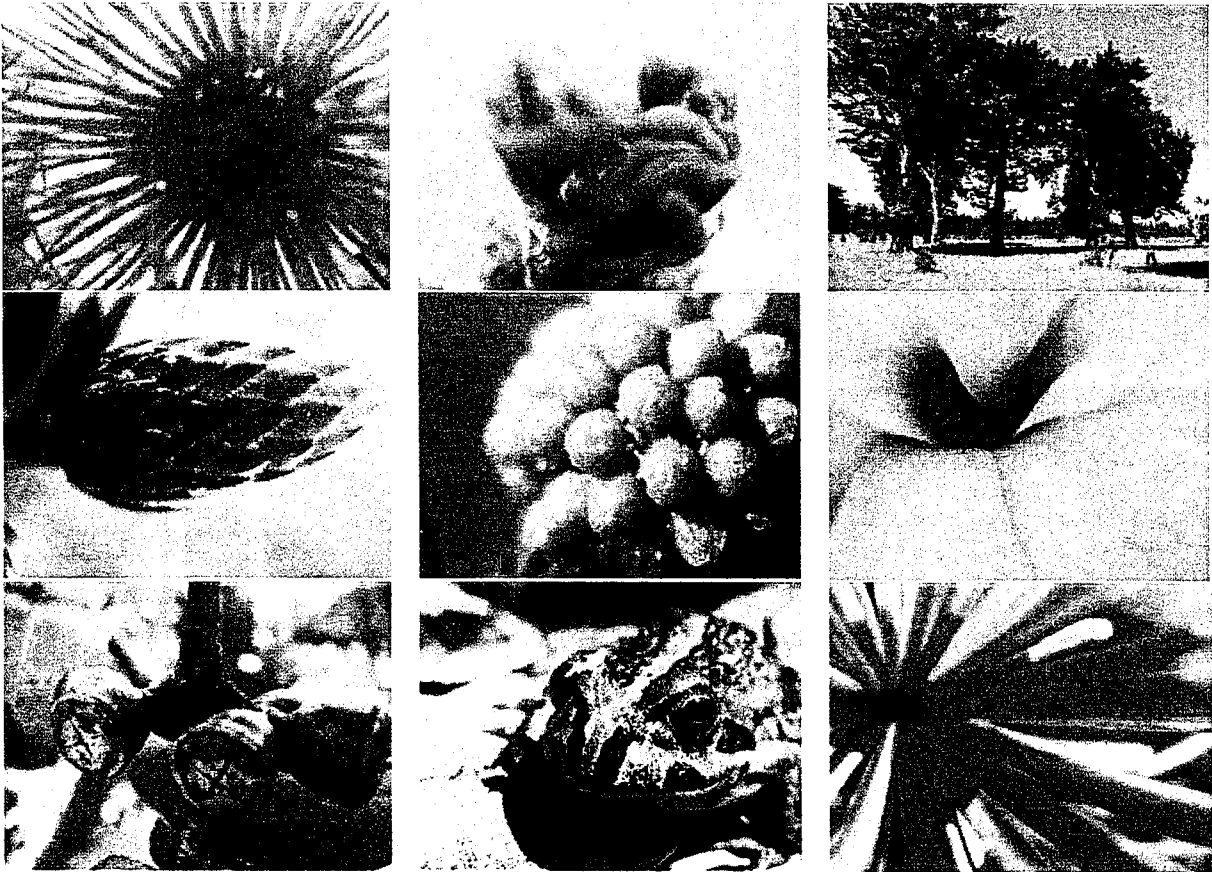
Catastro de Flora y Vegetación, Parque Botánico Coronel, Francisco Perry Otárola, Concultora Biomas, 2009.

Litschke T. y W. Kuttler. On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 17, No. 3, 229-240 (June 2008)



## ANEXO N° 3.2

CATASTRO DE FLORA Y VEGETACION



**PARQUE BOTANICO CORONEL**

Autor  
Francisco Perry Otarola



## 1 INTRODUCCION

El Parque Botánico Coronel alberga una riqueza considerable de diversidad en especies del reino vegetal, sin embargo no existe información detallada respecto a la cantidad de especies y ejemplares de cada una ellas, como tampoco la cobertura de las diferentes unidades territoriales que lo componen.

A simple vista se puede observar que se conjugan en el dos objetivos de manejo principalmente, paisajismo en el caso del área utilizada como parque y productivo, en el caso de las plantaciones forestales.

Los objetivos centrales de este estudio es determinar la cantidad de géneros y especies posibles de identificar y la cantidad de individuos que las o los representan; medir algunos parámetros dasométricos que permitan generar a futuro algún tipo de información mas compleja; establecer relaciones entre aquellos parámetros; identificar y delimitar unidades de vegetación y la superficie que cubren; y finalmente representar la información obtenida en cartografía temática.

## 2 MATERIAL Y METODO

### 2.1 Área de estudio

Corresponde al Parque Botánico Coronel, emplazado dentro de los límites del Fundo Calabozo. El acceso a este se encuentra a por la ruta 160 a 1,2 km. Al este de la Plaza de Peaje del By Pass Coronel - Lota, Provincia de Concepción, Región del Bio Bio. El predio cuenta con una superficie de 59,5 ha.

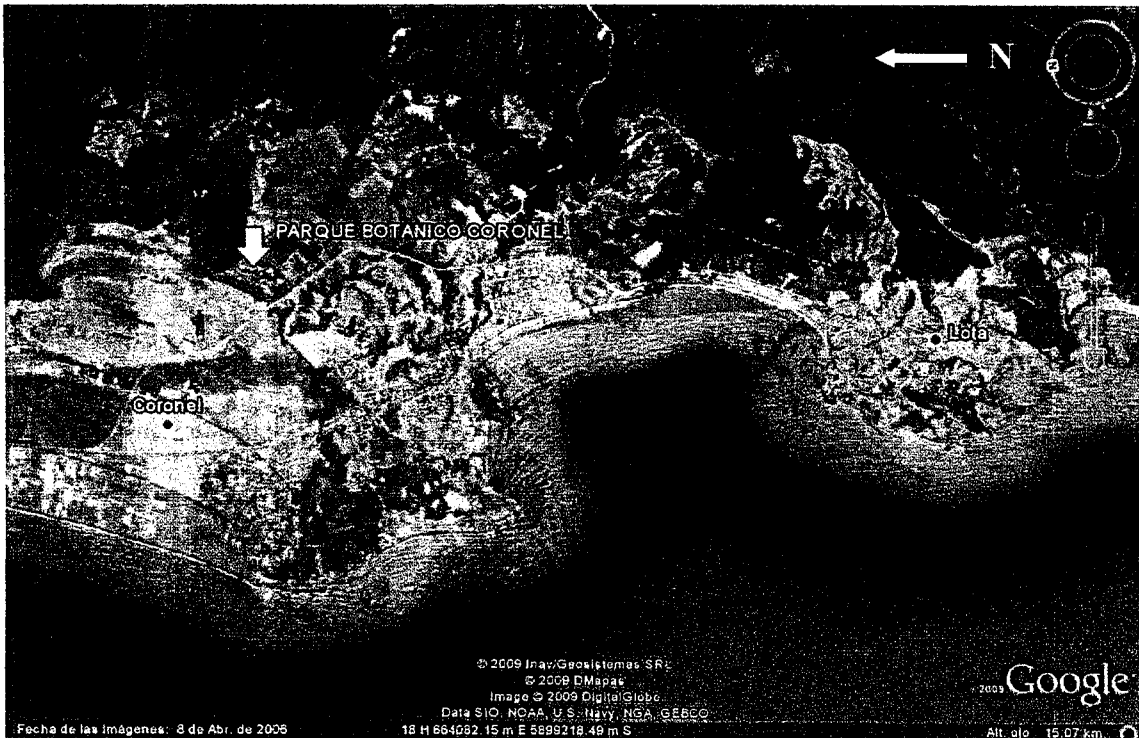


Imagen 1: Ubicación Parque Botánico Coronel, contexto local.  
Fuente: Google Earth

## **2.2 Materiales e instrumentos**

Para la medición y marcación de árboles y arbustos se uso: Hipsómetro Merrit, Navegador GPS (2), Huincha métrica de 30m, cinta de marcar color rosa, etiquetas de PVC y corchetes.

## **2.3 Catastro de la vegetación y flora**

Se recorrió el predio por completo caminando, con el fin de reconocer el área y realizar una zonificación básica para facilitar la organización de la campaña de terreno.

Para la confección del catastro lo principal fue construir una base de datos que incluyera los siguientes campos: numero correlativo, código de etiqueta, coordenadas UTM, tipo de crecimiento, genero, especie, nombre común, cantidad de individuos en el punto registrado, altura del árbol o arbusto, numero de vástagos y observaciones. Para la captura de datos el trabajo consistió en ubicarse junto cada árbol o conjunto de ellos, lo mismo para los arbustos y anotar todas las variables mencionadas anteriormente, para georeferenciar se utilizo el navegador GPS y para medir altura solo se uso el Hipsómetro en ciertas ocasiones ya que se suponía una estimación visual previo entrenamiento, a fin de agilizar el proceso, el objetivo era ubicar ese valor en un rango de variación de 5 m como máximo.

En general para los arbustos como también para algunos árboles, cuando estos estuvieren agrupados, correspondieran a la misma especie y presentaran características similares, solo fue marcado y georeferenciado el ejemplar central, destacando si la cantidad de ellos asociados al punto.

Las marcas realizadas consistían en una etiqueta fabricada en PVC de aproximadamente 3x4 cm, las que se fijaban con un corchete en la base del fuste orientadas hacia el este, en lo posible. Cuando la planta no presento un tallo leñoso engrosado y robusto, la marcación se realizo con cinta color rosa atándolo al cuello o a alguna rama.

El objetivo de la marca era plasmar el código para su posterior revisión y/o monitoreo.

## **2.4 Cartografía y zonificación final**

Mediante el uso de una imagen aérea de alta resolución (Google Earth Pro), puntos de control tomados en terreno y el uso de SIG, se realizo la fotointerpretación y la posterior zonificación o subdivisión del predio.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Catastro de especies leñosas

##### 3.1.1 Tipo de Crecimiento

Mediante el análisis de la base de datos generada, la cual contenía información de árboles o arbustos de todos los puntos estudiados, se llegó a contar la cantidad de árboles y arbustos que muestra la tabla 1. Es necesario mencionar que por ser inicio de primavera muchos árboles y/o arbustos de hoja caduca se encontraban en período de latencia por lo que al no presentar hojas o alguna estructura clara que los pudiera identificar, estos no pudieron ser clasificados según el tipo de crecimiento.

Cuadro 1: Cantidad de individuos según tipo de crecimiento.

Tipo de crecimiento	Cantidad de individuos
Árbol	15.465
Arbusto	703
No clasificado	50
Total	16.218

##### 3.1.2 Géneros

Se identificaron un total de 133 géneros, representados por distintas especies y por una cantidad muy variable de individuos. Los géneros más abundantes en cantidad de individuos fueron *Pinus* y *Acacia*, con 9.457 y 1.019 individuos para las especies *Pinus radiata* y *Acacia melanoxylon* respectivamente.

Las figuras 1.a, 1.b, 1.c y 1.d muestran la cantidad de árboles por género según 3 diferentes rangos de frecuencia.

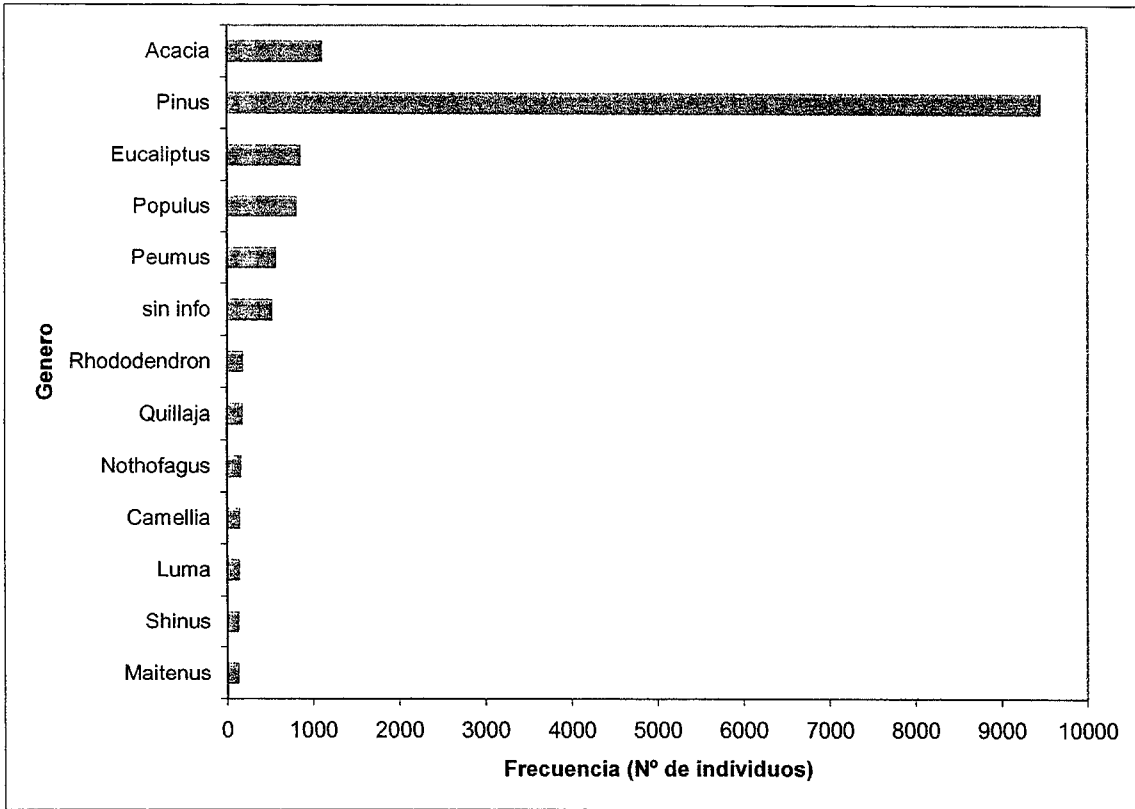


Figura 1.a: Frecuencia por género.

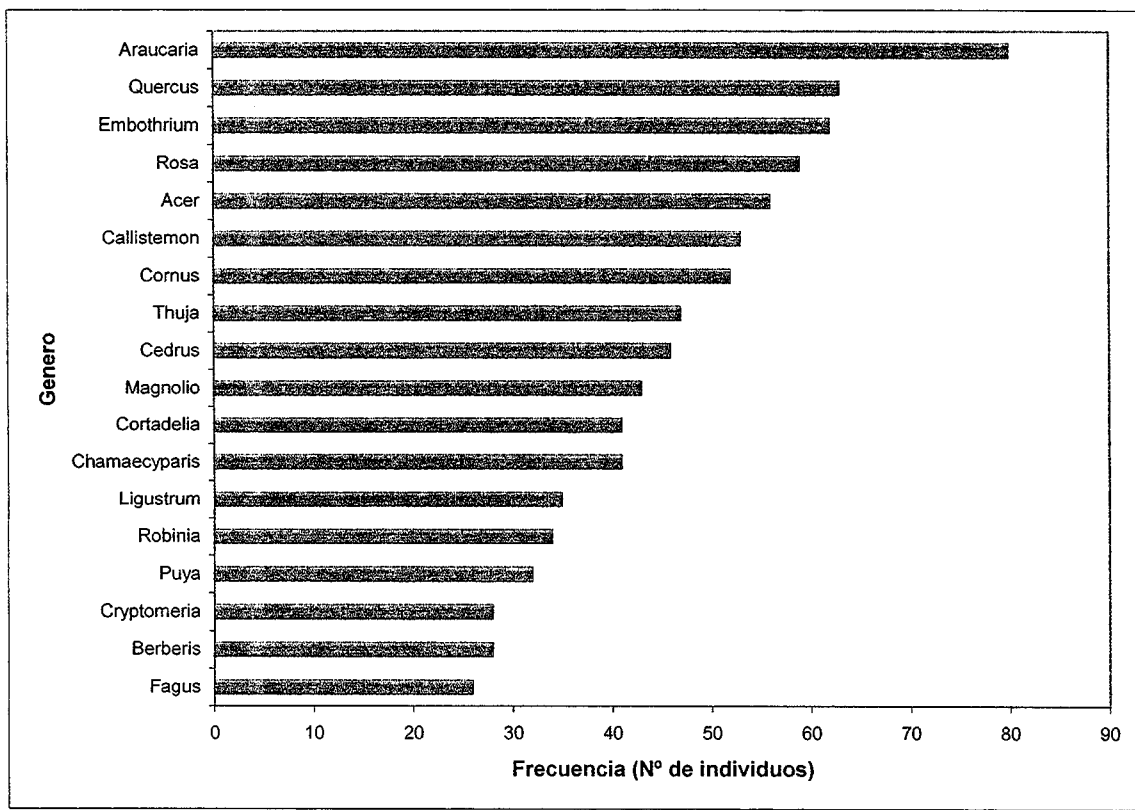


Figura 1.b: Frecuencia por género.

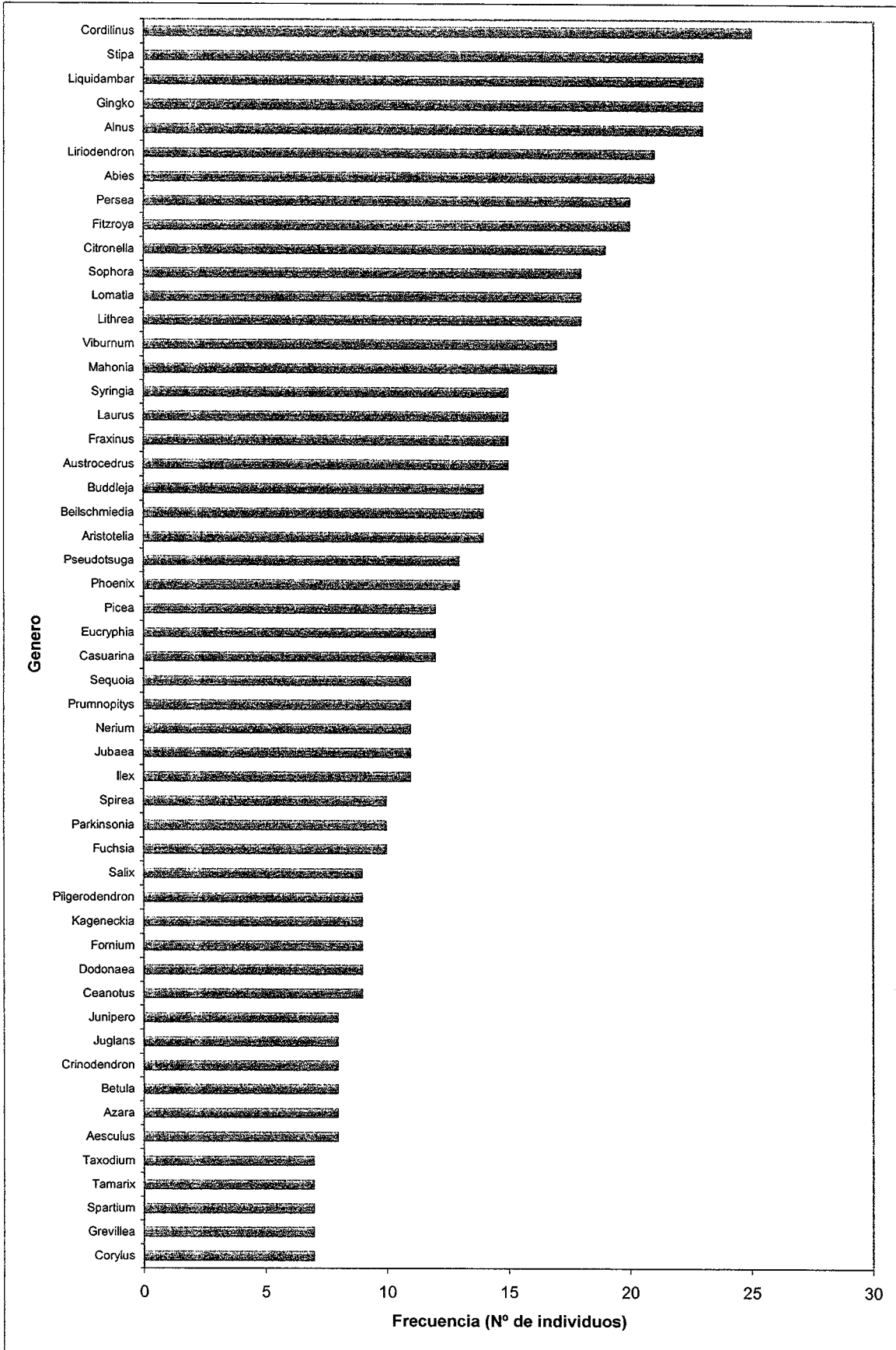


Figura 1.c: Frecuencia por género.

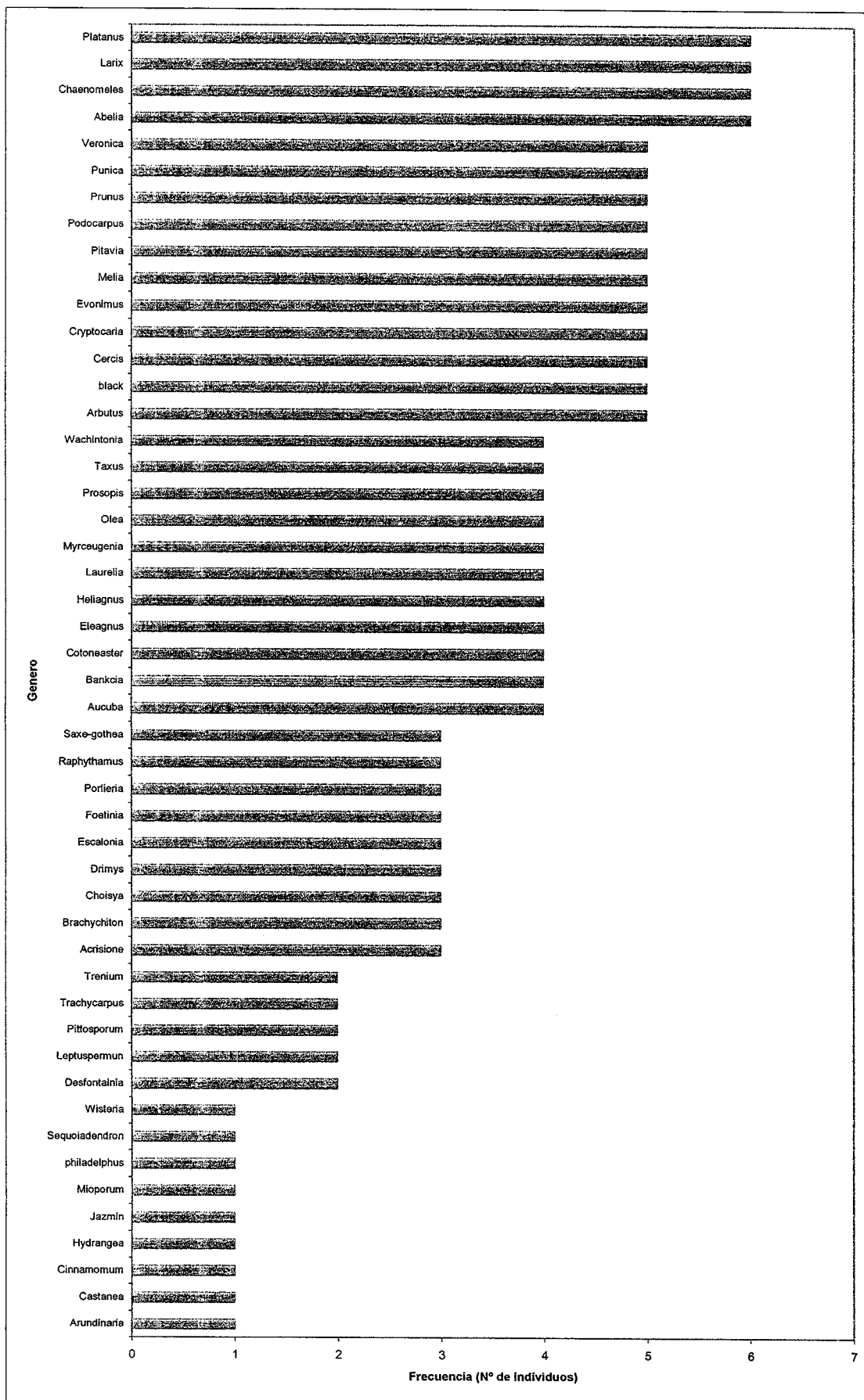


Figura 1.d: Frecuencia por género.



### 3.1.3 Altura

Para ambas formas de crecimiento se determino la altura, la figura 2 muestra la proporción de individuos por rango de altura.

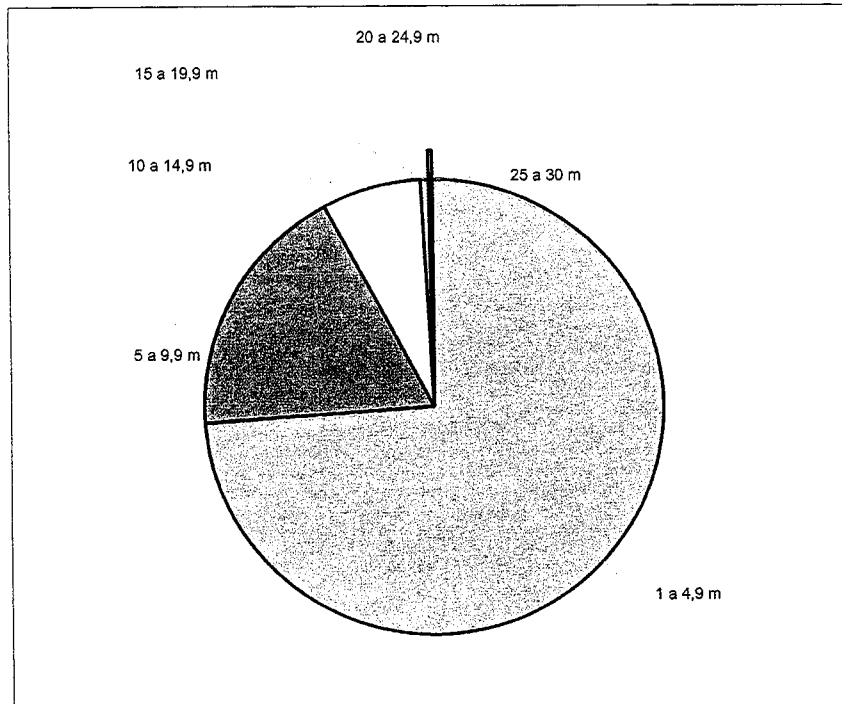


Figura 2: Porcentaje de individuos (árboles y arbustos) correspondientes a distintas clases de altura.

### 3.1.4 Origen

Según el origen, nativo, exótico, la figura 3 muestra el porcentaje de individuos perteneciente a cada uno.

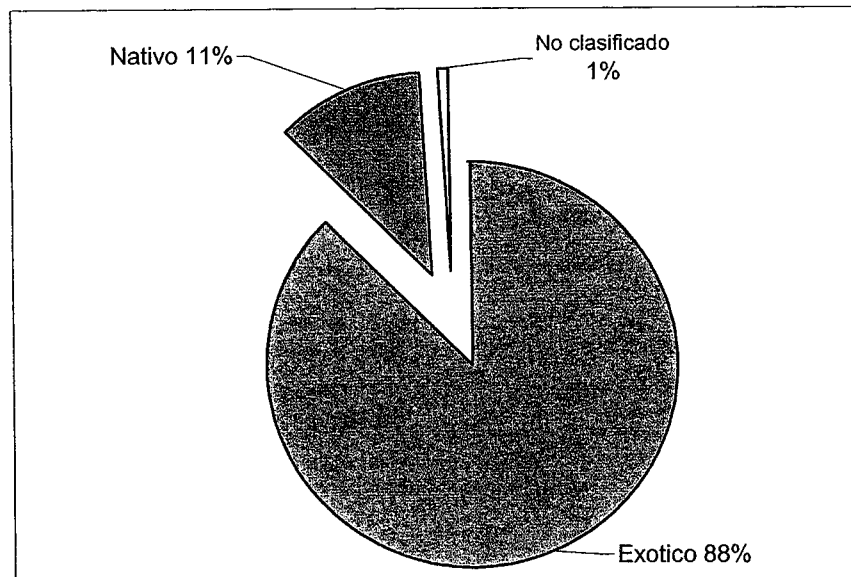


Figura 3: porcentaje de individuos (árboles y arbustos) según origen (Nativo o Exótico)

### 3.2 Análisis territorial

En el predio se pudieron identificar 4 grandes áreas, caracterizadas por el uso del suelo. Las superficies que esta cubren se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2: distribución de superficies por uso del suelo.

<b>Área</b>	<b>Superficie (ha.)</b>
Humedal	6,6
Parque Botánico	17,6
Plantaciones forestales	15,8
Áreas marginales	3,1
Áreas con vegetación mixta y de baja cobertura	16,4
<b>Total</b>	<b>59,5</b>

El Parque Botánico considera 5 subdivisiones, las cuales tienen como límites los caminos de tránsito interno principalmente. Estas áreas de menor jerarquía, se diferencian por estar constituidas por especies de diferentes continentes o zonas geográficas mundiales, sin embargo fue frecuente el hallazgo de elementos florísticos incongruentes en términos de origen con otros de la misma área. En el cuadro 3 se presentan dichas áreas con sus respectivas superficies.

Cuadro 3: Áreas del Parque Botánico

<b>Área del Parque</b>	<b>Superficie (ha.)</b>
Asia menor, regiones mediterráneas y Europa	6,9
Asia y Japón	1,4
América del Norte	4,3
Australia	1,6
Chile	3,5
Total	17,6

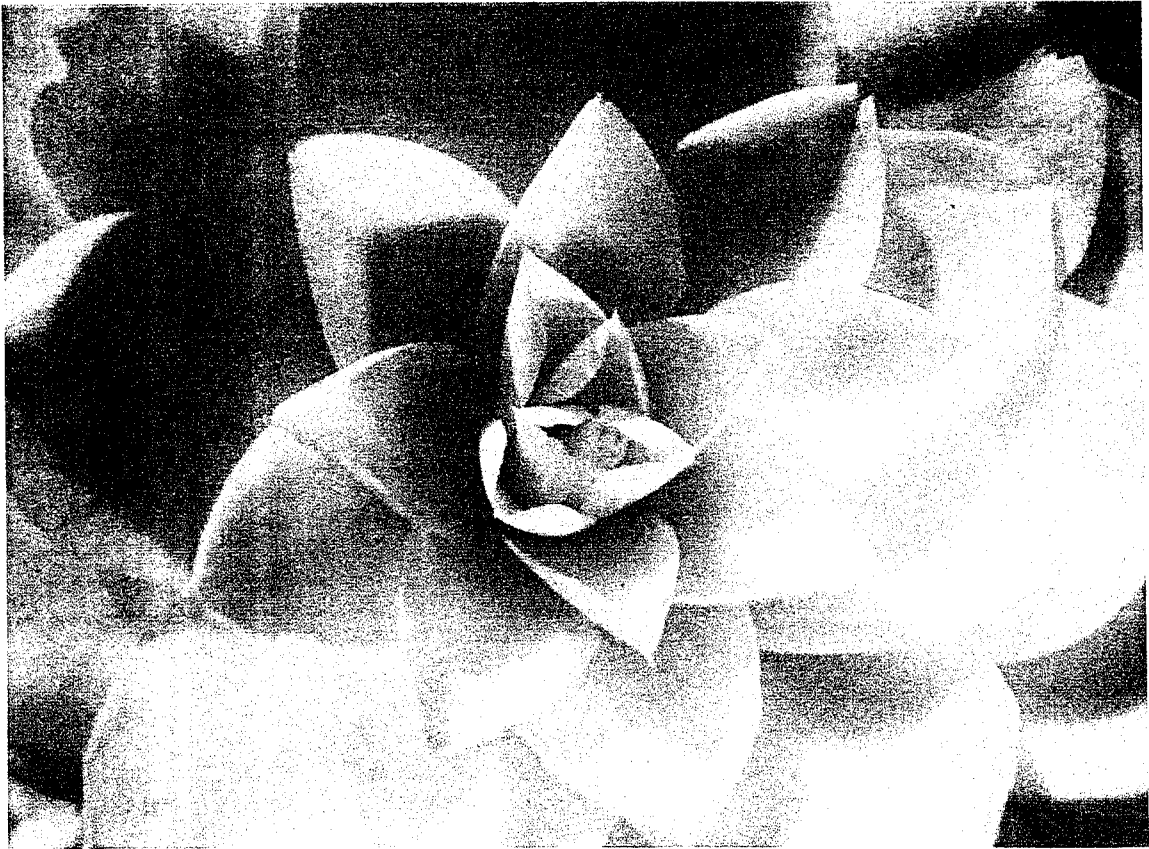
#### 4 BIBLIOGRAFIA

Adriana E. Hoffman J. "Flora Silvestre de Chile ,Zona araucana ,árboles arbustos y enredaderas leñosas". Quinta edición. 2005. Ediciones Fundación Claudio Gay.

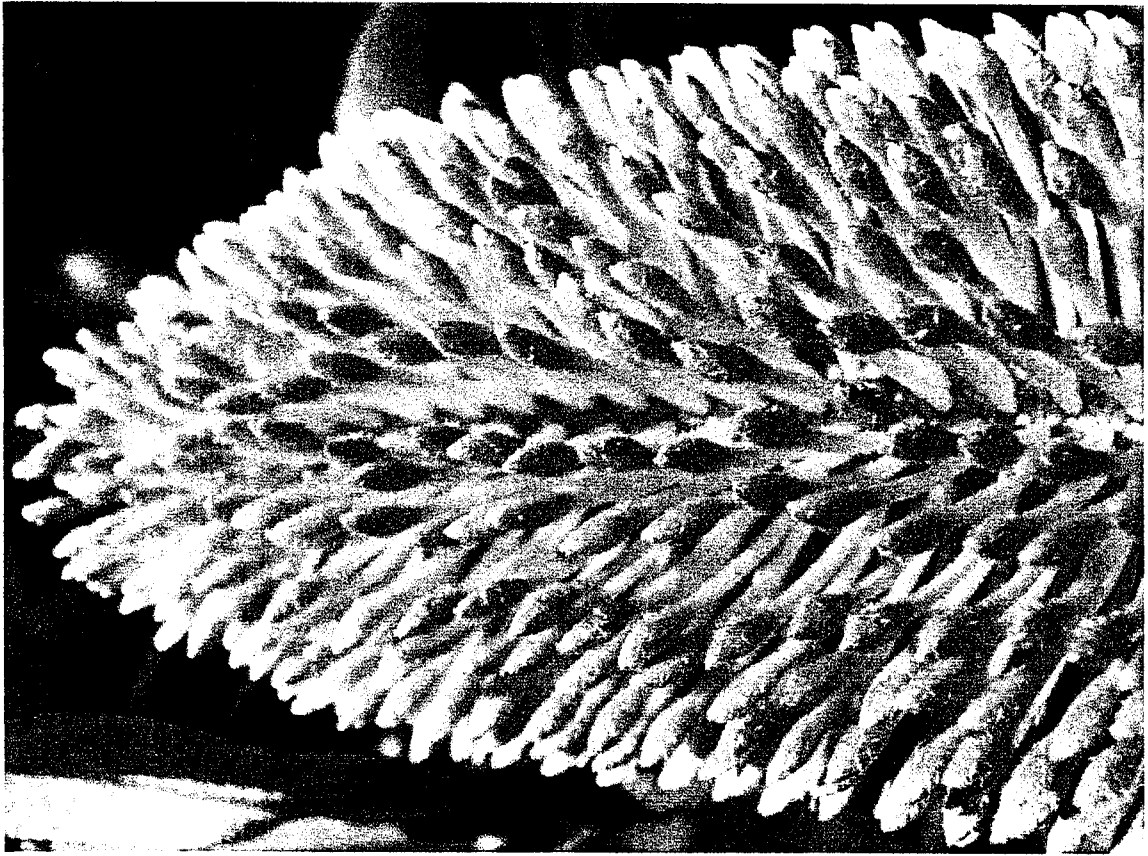
Adriana E. Hoffman J. "El árbol urbano en Chile".. Tercera edición 1998. Ediciones Fundación Claudio Gay.

DR. D.G. Hessayon. "Árboles y arbustos de jardín, Manual de cultivo y conservación".. Blume.2006.

Anexo fotográfico











## ANEXO N° 3.3

# On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review

TOM LITSCHKE\*<sup>1</sup> and WILHELM KUTTLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>current affiliation: TÜV Nord Umweltschutz, Hamburg, Germany

<sup>2</sup>Applied Climatology and Landscape Ecology, University of Duisburg-Essen, Germany

(Manuscript received November 22, 2007; in revised form January 11, 2008; accepted March 11, 2008)

## Abstract

In order to assess the filtration performance of plants with respect to atmospheric dust, deposition on vegetation has been investigated by a number of different methods (field studies, numerical and physical modelling) over the past few years. The intention of this review is to assess the extent to which a reduction in particle concentration (especially PM<sub>10</sub>) can be accomplished by existing vegetation or targeted planting on the basis of international publications. The range of this assessment however is limited to the quantitative filtration potential of urban vegetation. Deposition velocity was taken as a measure of filtration performance as a particle deposited on a plant is in effect taken from the atmosphere. As regarding published deposition velocities, there are differences of an order of magnitude between measured values and the results of model calculations. The average published value ( $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$ ) corresponds to a reduction in pollutant concentration (PM<sub>10</sub>) of about 1 % in urban areas. In addition, analyses carried out for a busy arterial road show that very large vegetation areas (in excess of 10,000 m<sup>2</sup>) would be needed to compensate for local emissions of particles (PM<sub>10</sub>) by vehicles at a deposition velocity of 1 cm s<sup>-1</sup>. However, current *in-situ* measurements indicate deposition velocities considerably higher than 1 cm s<sup>-1</sup> and, for PM<sub>1</sub>, velocities above 10 cm s<sup>-1</sup>. If these results were confirmed by further measurements, local planting campaigns covering small areas could also be beneficial for a reduction of particle concentrations.

## Zusammenfassung

Um die Filterwirksamkeit von Pflanzen gegenüber Partikeln zu bestimmen, wurde in den vergangenen Jahren mit einer Vielzahl von Methoden (Feldstudien, Modellierung, Windkanal) die Deposition auf Vegetationsoberflächen untersucht. Die Intention dieses Reviews ist es auf der Basis von internationaler Literatur zu bewerten, inwieweit eine Reduktion der Immissionskonzentration von Partikeln (insbesondere von PM<sub>10</sub>) durch vorhandene Vegetation bzw. durch gezielte Pflanzmaßnahmen möglich ist. Diese Einschätzung beschränkt sich jedoch vom Umfang her auf das quantitative Filterungspotential städtischer Vegetation. Als Maß für die Filterleistung wurde die Depositionsgeschwindigkeit herangezogen, da mit der Deposition auf den Pflanzen auch eine Entnahme aus der Luft einhergeht. Die veröffentlichten Depositionsgeschwindigkeiten zeigen Unterschiede von bis zu einer Größenordnung zwischen den gemessenen Werten und den Ergebnissen aus Modellrechnungen. Berechnet man mit einem Mittelwert der veröffentlichten Werte ( $\sim 1 \text{ cm s}^{-1}$ ) das Reduktionspotential für den städtischen Raum, erhält man eine Verringerung der Immissionskonzentration (PM<sub>10</sub>) von ca. 1 %. Analysen für eine belastete Ausfallstraße zeigen außerdem, dass bei einer Depositionsgeschwindigkeit von 1 cm s<sup>-1</sup> beispielsweise eine Kompensation der lokalen Kfz-Emissionen von PM<sub>10</sub> erst bei sehr großen Vegetationsflächen (> 10 000 m<sup>2</sup>) möglich ist. Aktuelle *in-situ* Messungen weisen jedoch auf Depositionsgeschwindigkeiten hin, die deutlich größer als 1 cm s<sup>-1</sup> sind und für PM<sub>1</sub> wurden sogar Geschwindigkeiten > 10 cm s<sup>-1</sup> gemessen. Sollten diese Ergebnisse in weiteren Messungen bestätigt werden, wären auch kleinräumige, lokale Begrünungsmaßnahmen sinnvoll für eine Reduktion der Partikelkonzentrationen.

## 1 Introduction

Since the introduction of a short term standard for particles (PM<sub>10</sub>) in air on 1 January 2005 (National implementation of European Council Directive 1999/30/EC, e.g. 22. BImSchV in Germany), attention has once again focussed on the filtration of atmospheric particles by vegetation. The reduction of particle concentration by deposition on urban vegetation (such as street trees, ver-

tical gardens and roof gardens) could prove to be an effective long-term alternative to disputed measures such as the wet cleaning of streets or the exclusion of vehicles for the improvement of air quality. Therefore this review focuses on the assessment of the quantitative filtration potential of urban vegetation. A review on particle deposition with a wider approach concerning all surfaces has been given by PRYOR et al. (2008), MCPHERSON (2007) discussed vegetation-atmosphere interactions as a whole, including e.g. effects on radiation, wind and energy fluxes.

\*Corresponding author: Tom Litschke, TÜV Nord Umweltschutz, Große Bahnstr. 31, 22525 Hamburg, Germany, e-mail: tlitschke@tuev-nord.de

It was already known at the beginning of the 20<sup>th</sup> century that dust is deposited on plant surfaces. However, the possibility of using plants to filter the air was not discussed at that time because dust concentrations were so high that plant growth was reduced or even inhibited (e.g. WIELER, 1911). KRATZER (1956) deals with urban aerosol pollution in a prominent position in his summarizing chapter on urban air and refers to the filtration effect of parks and gardens, which is, for example, clearly evident in an early dust concentration map of Leipzig (LOEBNER, 1935). HENNEBO (1955) devotes 60 pages to the topic in his work on the filtration of dust by parks and gardens. He also discusses the importance of urban parks and gardens for the filtration of dust-laden air and makes proposals for urban planning measures to reduce particulate concentration on the basis of existing vegetation structures.

Whereas Hennebo focuses on the micro-scale effect of small wooded areas, GUDERIAN (1975) for example transfers this approach to larger areas. He proposes that planted regeneration areas should be created in the surroundings of pollution source areas with a view not only to reducing pollutant concentrations in the atmosphere but also to preventing the convergence of source areas. However, as a result of technical improvements and the introduction of more stringent legislation (BImSchG – Federal Pollution Control Act, 1974), average annual concentrations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and suspended particles sank in Germany (FRICKE et al., 2001) in the 1970s. For example, at the Deuselbach (Hunsrück) station of the German Federal Environmental Agency, average total suspended particle (TSP) concentration fell below 40 µg m<sup>-3</sup> for the first time in 1977 and has remained below this level with the exception of 1982. Following 1999 particles have been measured as PM<sub>10</sub>, which accounts for approximately 76–79 % of TSP at urban background stations and 82–85 % at traffic stations (LENSCHOW et al., 2001). In other countries, such as the United Kingdom (CLEAN AIR ACT, 1956) and the USA (CLEAN AIR ACT, 1963), similar laws came into effect, in some cases earlier than in Germany, resulting in a large-scale reduction in atmospheric pollutant concentrations. However, AULICIEMS and BURTON (1972) demonstrated that the reduced pollution was chiefly due to technical improvements in industry and socio-economic factors such as the changeover from coal to oil in residential and commercial heating.

Decreasing pollutant concentrations meant that scientific attention was no longer focussed on the impairment of human health and therefore on dust filtration by vegetation. However, the other side of the coin, i.e. the damage caused to plants by filtering polluted air, was investigated comprehensively from the beginning of the 20<sup>th</sup> century onwards as the negative impact of polluted air was evident through permanent exposure

and the clear damage caused to plants. In 1916, WISLICENUS et al. already conducted controlled field tests to investigate damage to plants. These also included exposure to diesel particles (WISLICENUS et al., 1916). In their study, they confirmed the assumption that it was not particles but adsorbents (such as heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons) that were chiefly responsible for the reduced vitality of plants.

However, this review will only deal with damage to plants to the extent that sustained vitality is an essential prerequisite for the successful, sustained use of vegetation to remove particles from the atmosphere. For this reason, the detrimental effects of dust on vegetation need to be taken into consideration, especially with regard to the selection of resistant species. A comprehensive overview of the various detrimental effects is given, for example, by FARMER (1993) and GRANTZ et al. (2003).

More recently, scientific attention was once again focussed on the capacity of plants to filter dust-laden air by the introduction of a short term standard for particulate matter (PM<sub>10</sub>). In qualitative terms, the filtration potential of plants is not disputed; the main factors influencing the process of deposition on plant surfaces are discussed in Section 3 below.

Nevertheless, it is questionable whether the filtration capacity of plants will be adequate in quantitative terms to reduce current pollution concentrations as the particulate emissions of plants themselves and the reduction in near-surface air exchange must be set off against filtration performance (Section 4).

Taking an arterial road with heavy traffic as an example, an attempt is therefore made in Section 5 to assess the reduction potential of roadside vegetation as a function of the assumed velocity of deposition. However, before proceeding to this stage, it is necessary to explain the use of deposition velocity as a measure of filtration performance.

## 2 Deposition velocity as a measure of filtration performance

In the following sections, deposition velocity ( $v_d$  in m s<sup>-1</sup>) is used as a measure of filtration performance. The deposition velocity is the quotient of the mass particle flow rate ( $F_p$  in µg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>) towards the leaf surface and the atmospheric particle concentration ( $C_p$  in µg s<sup>-1</sup> m<sup>-3</sup>). The resulting velocity is normally given in cm s<sup>-1</sup> (Eq. 2.1).

$$v_d = \frac{F_p}{C_p} \quad (2.1)$$

Even if resuspension is taken into consideration, particles are taken from the atmosphere and deposition on a leaf surface can therefore be equated with air filtration.

### 3 Parameters influencing the deposition of particles

The deposition of particles on plant surfaces is influenced by a variety of factors. Not only the diameter and shape of the particles but also meteorological parameters such as humidity, wind speed and turbulence are of decisive importance and have considerable impact on deposition velocity and the filtration performance of plants. In addition, the plant species and planting configuration also affect deposition as the special structure of the vegetation and the shape of the leaf surface are key factors in the deposition and resuspension of particles.

Although particle deposition on plant surfaces corresponds to particle removal from the air and therefore the reduction of pollutant concentration, it must also be noted that plants themselves may be sources of particles and represent an obstacle to air flow which can reduce air exchange compared with non-vegetated areas (RIES and EICHHORN, 2001; GROMKE and RUCK, 2007). In this context, the term "air exchange" is used to mean the frequency with which a given volume of air is exchanged per time unit. In the case of particle emitters located within a vegetated area (as, for example, a road with roadside vegetation), a reduction in air exchange would result in an accumulation of dust emissions. The reduction in pollutant concentration through deposition must therefore be set off against this contrary effect, which tends to increase pollutant concentration. The following paragraphs give an overview of the current state of knowledge regarding the key factors that influence deposition velocity.

#### 3.1 Effects of particle diameter

Theoretical deposition velocities as a function of particle diameter were modelled for example by SLINN (1982) and are generally recognized. Fig. 1 shows the deposition velocities calculated for two different friction velocities ( $u^*$ ). For particles with a diameter of  $d_p > 10 \mu\text{m}$ , *sedimentation* is the key deposition process. For particles with a diameter of  $d_p < 10 \mu\text{m}$ , deposition is generally reduced, reaching a minimum at  $d_p = 0.3 \mu\text{m}$ . Sedimentation is only significant up to a diameter of  $d_p > 1 \mu\text{m}$  as the mass of the particle and therefore also the acceleration due to gravity are reduced with decreasing diameter. Between  $1 \mu\text{m}$  and  $0.1 \mu\text{m}$  diameters, *impaction* and *interception* are the main processes acting on particles in the air. These processes involve air flowing around obstacles, where the flow path of the particle is either too near to the obstacle (interception) or is curved in such a way that the particles collide with the obstacle (impaction) as a result of their inertia (LEE and RAMAMURTHI, 1993).

For particles with diameter  $d_p < 0.1 \mu\text{m}$ , interception and impaction are less significant. As particle sizes

fall below this value, inertia and deposition are also reduced. In this size class, only diffusion is effective, but still results in high deposition rates. Near to surfaces, particles are continuously deposited by Brownian motion, resulting in a concentration gradient which induces a mass flow towards the surface.

FOWLER et al. (2004) and GALLAGHER et al. (1997) compared deposition velocities determined theoretically by SLINN (1982) with measurement results from 12 field studies (Fig. 1) and identified marked deviations from the theoretical curve for particle sizes of  $0.1 \mu\text{m} < d_p < 1 \mu\text{m}$ . FOWLER et al. (2004) explain these deviations of as much as an order of magnitude by phoretic processes along an electric potential gradient (electrophoresis) or a thermal gradient (thermophoresis) which were not taken into consideration in the model used by SLINN (1982).

To summarize, it can be stated that the considerable differences between modelled and measured deposition velocities indicate the need for further research in this area.

#### 3.2 Effects of air humidity

The fundamental effect of air humidity on deposition is due to the fact that particles are mainly hygroscopic and that their size varies as a result of the absorption or discharge of water (WINKLER, 1988). In turn, this leads to a change in their deposition properties as a function of diameter (cf. previous section). The size increase with reference to dry air is an exponential function of relative humidity (r.h.). Size increases by an average factor of 1.1 at 60 % r.h., 1.2 at 80 % r.h. and 1.7 near to saturation point. There is a slight variation in size increase as a function of the hygroscopicity of the measured aerosol, e.g. rural or urban aerosol (WINKLER, 1988).

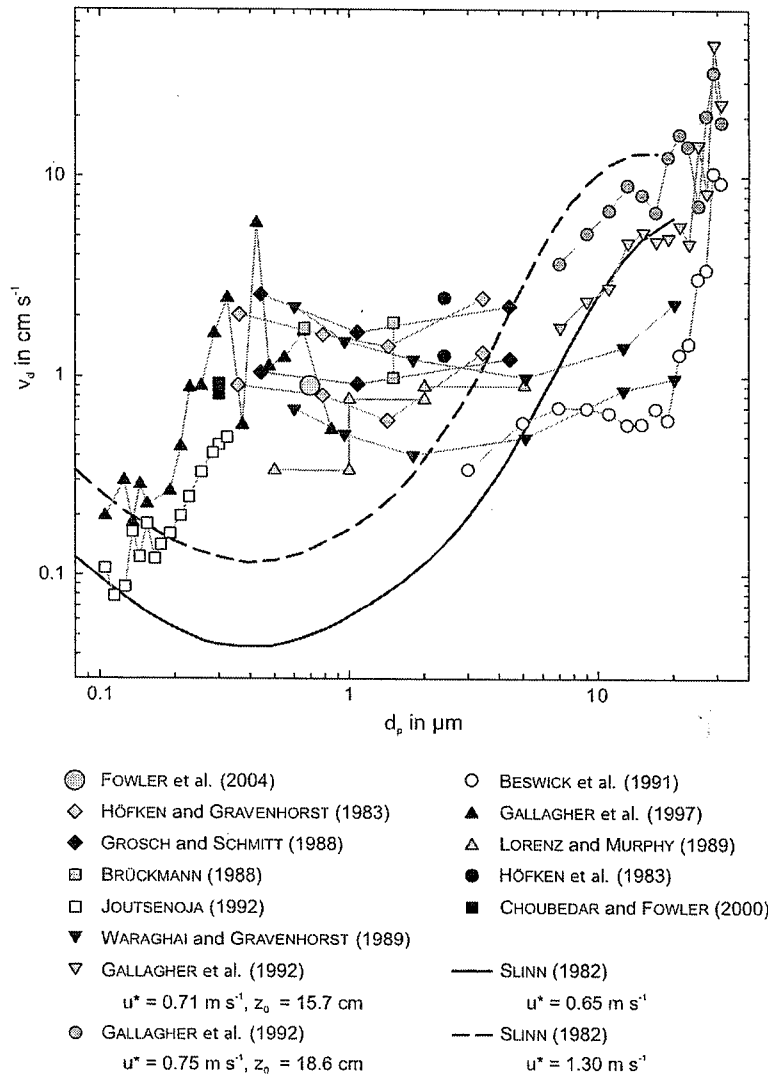
HÄNEL (1982) calculated the sedimentation mass flows of three aerosol types with reference to dry conditions (Tab. 1). The exponential character of the relationship is also clearly reflected in deposition velocities; especially in fog (99.9 % r.h.) the deposition of wet particles is increased by a factor of 16.6 to 24.8 compared with dry aerosol.

#### 3.3 Effects of wind speed

The effect of wind speed illustrates a basic dilemma of the potential filtration of particles using vegetation. As particle concentrations are at their highest in the direct vicinity of emitters, it can be found, by converting Eq. 2.1, that the mass flow to the surface at constant deposition velocity is also at its highest close to the emitters (Eq. 3.1)

$$F_p = v_d \cdot C_p \quad (3.1)$$

Investigations carried out by SPITSYNA and SKRIPAL'SHCHIKOVA (1992) even show an exponential decrease in the mass of dust deposited per unit surface area



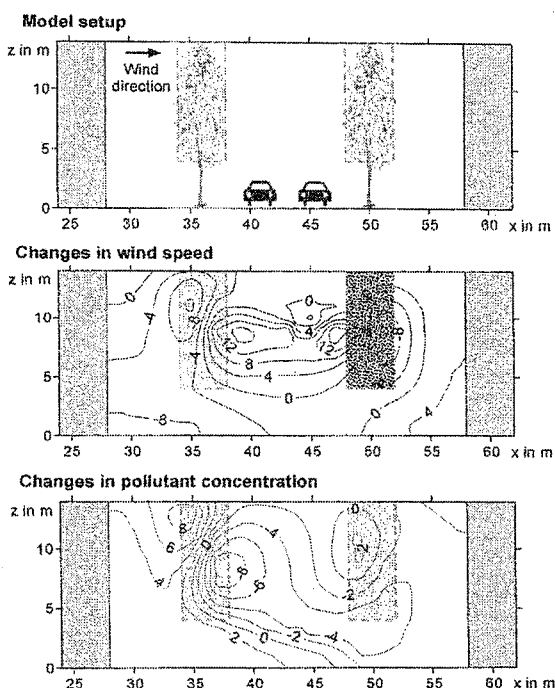
**Figure 1:** Comparison of modeled deposition velocity ( $v_{d,i}$ ) of aerosols with aerosol size ( $d_p$ ) for woodland (SLINN, 1982) with field measurements by a wide range of methods (after FOWLER et al., 2004; GALLAGHER et al., 1997). Roughness length ( $z_0$ ) and friction velocity ( $u^*$ ) are given for GALLAGHER (1992) and SLINN (1982).

with increasing distance from the emission source. In order to maximize the efficiency of filtration, the mass flow to the surface must also be maximized; in other words, vegetation is required as near as possible to the emission source. However, the special structure of vegetation reduces near-surface air exchange, leading to an increase in atmospheric particle concentration and thus deterioration in the pollution situation near to emission sources.

Ideally, a planting concept (or the existing vegetation) should take this condition into consideration by providing as great a plant surface as possible near to the emission source without significantly reducing air exchange. Conceivably, solutions could include vertical gardens or loose ground-level planting with adequate spacing between the plants to minimize the effects on air

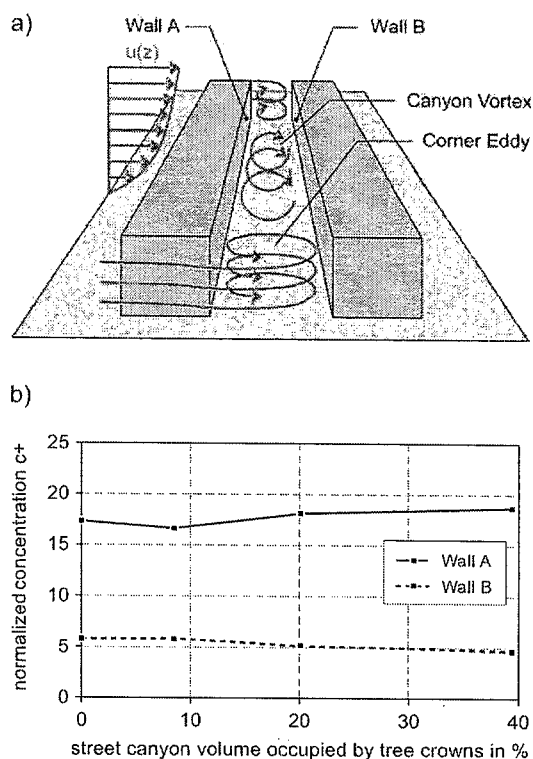
flow. However, this only applies to autochthonous emissions (from within, such as road vehicle emissions) with particles created on site and accumulating between the plants. In the case of allochthonous emissions (from the outside, such as industrial emissions) an obstacle to air flow could help in keeping local particle pollution low, as the concentration within the plant canopy would be lower than in the air coming from the outside.

In order to investigate the effects of reduced near-surface air exchange in quantitative terms, RIES and EICHHORN (2001) modelled a vegetation scenario for an urban street canyon (Fig. 2). In this two-dimensional model (width 30 m, height 14 m), rows of trees (deciduous, LAI approx. 5 with leaf area density maximum in 9–10 m height) were positioned on both sides of the



**Figure 2:** Calculated changes (in percent) in windspeed and pollutant concentration with model height ( $z$ ) and length ( $x$ ) after insertion of vegetation in the street canyon (RIES and EICHHORN, 2001; modified). Maximum absolute reduction in wind speed is  $4 \text{ cm s}^{-1}$ , maximum absolute increase in pollutant concentration is  $1.2 \mu\text{g m}^{-3}$ .

road and exposed to wind of  $5 \text{ m s}^{-1}$  (10 m above ground level) perpendicular to the canyon. A tracer was emitted as a line in the centre of the urban canyon (autochthonous emission type). The tracer was chemically inert, meaning that the calculated concentration changes could also be applied to particles. In comparison with the unplanted situation on the windward side of the inner wall of the urban canyon, wind speed near to ground level was reduced by 8 %, while wind speed was increased by 4 % on the other side. In the situation without vegetation, a rotor circulation mechanism would develop in the urban canyon during a perpendicular wind, with air flowing down the leeward side into the canyon, then across the floor of the canyon in a direction opposite to the general direction of flow to the inside windward wall, where it would leave the street (cf. Fig. 3). Vegetation reduces the cross section for downward flow on the leeward inside wall, resulting in a partial increase in the wind speed. In addition, vegetation reduces near-surface air flow in the urban canyon, leading to lower wind speeds behind the rows of plants. In the model situation, this reduction in air exchange on the windward inside wall leads to an increase of 2–4 % in tracer concentration compared with the scenario without vegeta-



**Figure 3:** a) Sketch of the wind tunnel setup and wind profile  $u(z)$ , the trees are located in the center of the canyon, b) dimensionless pollutant concentration values  $c^+$  for each wall depending on the street canyon volume occupied by tree crowns. Measured concentrations ( $c$ ) have been normalized with wind velocity at rooftop ( $u_{ref}$ ), building height ( $L_{ref}$ ) and tracer gas emission rate of the line source ( $Q_T/l$ ),  $c^+ = (c u_{ref} L_{ref}) / (Q_T/l)$ . (GROMKE and RUCK, 2007; modified).

tion. However, the results only apply to comparable urban canyons with a building height/road width ratio of about 0.5. In the case of narrower streets with a ratio of 1, the concentration increase near to ground level may be as high as 20 %.

GROMKE and RUCK (2007) investigated a street canyon with perpendicular flow in a wind tunnel and also found an increase in the tracer concentration on the windward inside wall (Wall A in Fig. 3) and a reduction on the leeward side (Wall B in Fig. 3). Fig. 3 also shows a sketch of the model configuration and the concentrations on the walls of the urban canyon as a function of different vegetation volumes (the volume taken up by the vegetation in the urban canyon). The conclusion reached was that there was no increase in tracer concentration with a vegetation volume of about 10 %. In contrast to the modelled situation, flow effects on the edges of the building blocks were also taken into consideration in the wind tunnel tests. Depending on the geometric shape of the urban canyon, the reduction in air

**Table 1:** Ratios of wet to dry deposition by sedimentation for different air humidities and types of aerosol (after HÄNEL, 1982).

Relative humidity (r.h.) in %	Deposition of wet aerosol (r.h. > 0) / Deposition of dry aerosol (r.h. = 0)		
	Maritime aerosol	Urban aerosol	Background aerosol
40	1,0	1,1	1,0
90	2,0	1,6	1,7
99	6,0	4,8	4,4
99,9	24,8	16,5	16,6

exchange may lead to an increase of up to 20 % in particle concentration which runs counter to the filtration effect of particle deposition.

In addition to reducing near-surface air exchange, vegetation also reduces the wind speed. Investigations carried out by BECKETT et al. (2000) in a wind tunnel with NaCl particles indicate a clear relationship between wind speed ( $u$ ) and deposition velocity, as greater  $u$  gives larger particle inertia and, hence, more effective impaction. The role of vegetation as an obstacle to air flow therefore has two negative effects on the pollutant concentration situation. Firstly, the reduced air exchange means that the particle-laden air is replaced less frequently. Secondly, the deposition mass flow is lower as a result of the reduced wind speed.

### 3.4 Effects of plant species and surface properties

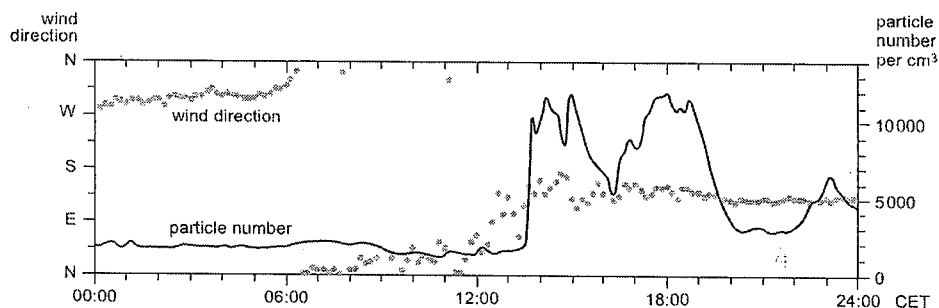
The effects of plants species on deposition depend on the size scale considered. Regarding the plant as a whole, deposition is mainly affected by the shape of the plant and the structure of the leaves or needles. Considering individual leaves, deposition may be increased or reduced by different surface structures.

The spatial structure of branches and twigs and the shape of leaves and needles play a key role in the filtration properties of a plant. Wind tunnel tests (BECKETT et al., 2000) have shown that the deposition of NaCl particles is significantly higher on selected conifers (pine and cypress) as a result of their more complex spatial structure than on deciduous trees (maple, poplar). A further disadvantage of deciduous trees is the lack of foliage outside the vegetation period which, considered in absolute terms, reduces their filtration performance. However, technical problems such as the need to ensure adequate drive-through heights, reduced solar access for inhabitants in winter and poor resistance to pollutants restrict the possible applications of conifers in urban areas. For this reason, of the 154 tree species which have been tested as street trees in Germany, only one is a conifer (Dawn Redwood, *Metasequoia glyp-*

*tostruboides*), which is not a domestic species in Germany and a deciduous one at that (GALK, 2006).

BURKHARDT et al. (1995) demonstrated by electron microscope examination with a fluorescent marker that deposition was increased at certain cuticular areas of the leaf surface characterized by an especially complex three-dimensional structure. Increased micro-roughness has been discussed as a possible reason for higher deposition in these areas. Increased deposition can also be observed for comparable leaf appendages and structural features such as hairs and veins. For this reason, THÖNNESSEN (2002) distinguishes between plants with very rough leaf surfaces and higher deposition (accumulators) and plants with surfaces favouring the removal of dust deposits by precipitation (self-cleaners) of the type which has been observed for the lotus plant. However, it is not possible to make an assessment of long-term filtering performance on the basis of this distinction because no long-term studies have been performed on the leaves of accumulators. A "saturation effect", which would lead to reduced deposition in the case of large dust deposits, can therefore not be excluded.

In addition to their negative impact on near-surface exchange conditions (cf. previous section) plants may also be sources of particulate emissions under certain conditions. According to CHAMBERLAIN (1975), wind-borne pollen may reach concentrations of  $14 \mu\text{m}^{-3}$  under extreme conditions ( $1000 \text{ pollen m}^{-3}$ ), i.e. in the vicinity of plants in bloom. However, most pollen grains have an average diameter in excess of  $10 \mu\text{m}$ ; they therefore do not fall into the  $\text{PM}_{10}$  size category and are less problematical considering health effects as they can scarcely reach the human bronchi but are filtered out by the upper airways. An aspect that must be viewed more critically is the creation of particles by the emission and subsequent condensation of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) by vegetation. In studies in the Fichtelgebirge mountains in North-East Bavaria (Germany), HELD et al. (2004) registered an increase in particle concentrations through nucleation events in the case of wind flow from a large coniferous forest (Fig. 4). Other parameters favouring these effects were found to



**Figure 4:** Wind direction (grey dots) and particle number concentration at 22 m agl within a forest stand (black line) during nucleation event on 27 July 2002 in the “Fichtelgebirge”, a mountain range in NE Bavaria, Germany (modified after HELD et al., 2004).

be dry atmospheric conditions and high short-wave radiation density. Nucleation events were observed on 20 % of days in the measured period and must therefore be regarded as a relatively frequent phenomenon.

The size of the particles observed was between 0.8  $\mu\text{m}$  and 0.003  $\mu\text{m}$ , a size range that is subject to high deposition velocities. It can therefore be assumed that a large part of these particles were deposited again immediately following emission. However, as the mass of the particles measured increases in the course of a nucleation event as a result of condensation processes, it is difficult to draw up a mass balance. It cannot be clearly determined whether the forest is a net source or a net sink of particles with respect to their mass. Nevertheless, HELD et al. (2004) state that wooded areas are a clear sink with reference to the number of particles.

### 3.5 Resuspension

One of the main reasons for the variability of deposition velocities is the resuspension of particles following deposition. As resuspension decreases rapidly with time after deposition, it is normally already included in the deposition velocities measured and deposition velocities therefore do not need to be corrected for resuspension. In modelling and calculations, it is also normal practice to integrate resuspension into the deposition velocity. This also applies to the deposition velocities mentioned in previous sections. It is especially with reference to the factors of wind and surface structure that resuspension has a significant impact on the resulting deposition velocity.

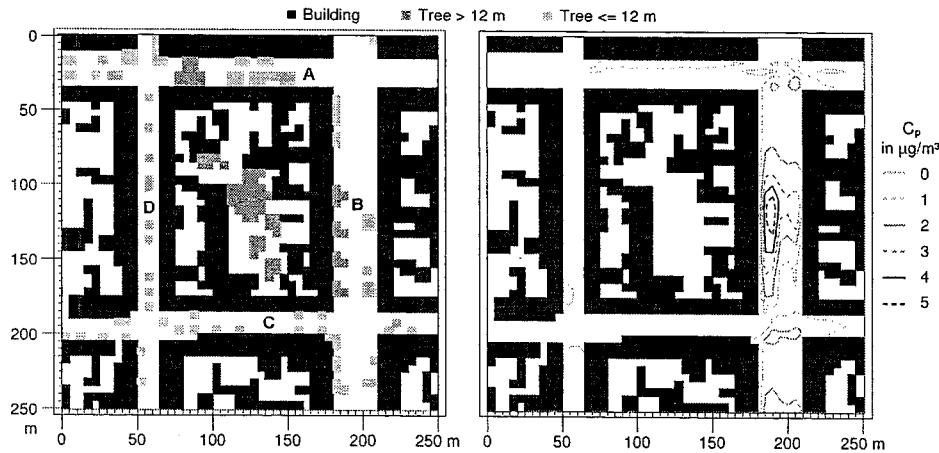
Using radioactive tracers, WITHERSPOON and TAYLOR (1969) were able to assess resuspension after one hour at 91 % in the case of an oak and at 10 % for a pine-tree. The higher deposition velocities for conifers are therefore probably due at least in part to the lower resuspension rate. Comprehensive overviews of resuspension in general are given by NICHOLSON (1988) and SEHMEL (1980).

## 4 Mesoscale calculations and modelling

In the preceding section, the parameters affecting the deposition of particles were treated separately. However, in order to assess the possible filtration performance of vegetation, it is necessary to consider interaction between all these factors. In addition, particulate emissions by plants and increased pollutant concentrations as a result of reduced near-surface air exchange also need to be taken into consideration.

A microscale urban climate model considering air flow in and around vegetation and the deposition of particles is suitable for obtaining a view of the individual parameters taken together. For example, BRUSE and FLEER (1999) introduced the three-dimensional non-hydrostatic model ENVI-met to investigate surface-plant-air interactions in urban environments. For the purpose of this review ENVI-met has been used to model the concentration of particles above a busy road in the central business district of Duesseldorf (North Rhine-Westphalia, Fig. 5). Only local traffic on the four-streets in Fig. 5 was taken into consideration as line emission sources. In order to assess the filtration performance of vegetation, the vegetation situations modelled were compared with a situation without vegetation. The vegetation scenario is based on the actual situation encountered in Duesseldorf. In the scenario with vegetation the modelled particle concentration on the road with the heaviest traffic (B in Fig. 5) was up to 5  $\mu\text{g m}^{-3}$  higher than without vegetation. The results of this modelling suggest that the filtration effect of all types of vegetation is negligible in comparison with the effect of reduced air exchange, although the model includes gravitational settling of the particles and removal from air on impact with obstacles (no resuspension). However, the results are of limited applicability as the technical possibilities of the model only allowed a spatial resolution of 5 m. The difference between deposition velocities determined by modelling and measurement, which are very significant in some cases, was already mentioned in Section 3.1.





**Figure 5:** The left side shows the model setup of buildings and vegetation (base size of the grid 5x5 m), average building height is 17 m agl. Wind setting was  $3 \text{ m s}^{-1}$  in 10 m agl coming from the left. The particle emission ( $\text{PM}_{10}$ ) of the line sources was set to 19.4 (A), 97.0 (B), 38.8 (C) and  $5.9 \mu\text{g m}^{-1} \text{s}^{-1}$  (D) respectively. The right side displays isolines of the difference in particle concentration ( $\Delta C_p$ ) with and without vegetation ( $\Delta C_p = C_{\text{Vegetation}} - C_{\text{No Vegetation}}$ ) in 2 m agl.

Despite the negative impact on local particle concentration, particles were nevertheless deposited on the vegetation surfaces and therefore contributed slightly to the improvement of general air quality. However, the specific air quality near to a road is dominated by powerful sources of emissions, which provide a continuous supply of particles and can therefore scarcely be improved by vegetation.

In order to assess the role of vegetation in improving general air quality, filtration performance has been extrapolated for a number of cities. For example, NOWAK (1994) calculated total annual deposition of 212 t  $\text{PM}_{10}$  for Chicago, IL (90 % deciduous trees, vegetated area: 11 % of city area). In the vegetation period, this would correspond to an average reduction of 0.4 % in particle concentration in the mixing layer above the city; for some densely vegetated areas of the city, even a reduction in particle concentration as high as 2.1 % was calculated. Nowak used the vegetation records of the city to calculate vegetation surfaces in 117 city districts on the basis of the leaf area index. For particle concentrations in the districts, values from the nearest of the 14 measurement stations installed were used. Deposition velocities were calculated from published values of canopy-resistance ( $R_c$ ) and weather-dependant aerodynamic ( $R_a$ ) and quasi-laminar boundary layer resistance ( $R_b$ ) using Eq. (4.1).

$$v_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (4.1)$$

Deposition flux densities were calculated for the city districts from particle concentrations and deposition velocities using Eq. (3.1). These were then multiplied by plant surfaces ( $A$ ) to give deposition mass flow rates ( $m_d$  in  $\mu\text{g s}^{-1}$ ) (Eq. 4.2).

$$m_d = v_d \cdot C_p \cdot A \quad (4.2)$$

To obtain an indication of the improvement in particle concentrations, this deposition was totalized for one hour and related to the total mass of particles in the mixing layer height ( $h$ ) of the city (estimated from the values of the nearest measurement station, located in Peoria, IL). For this purpose, the total mass of particles ( $m_{\text{total}}$ ) was estimated by taking the product of the mixing height ( $h$ ), city area ( $A_{\text{City}}$ ) and particle concentration ( $C_p$ ) (Eq. 4.3).

$$m_{\text{total}} = C_p \cdot h \cdot A_{\text{City}} \quad (4.3)$$

NOWAK and CRANE (2000) adopted a similar approach for New York City (tree cover: 16.6 %). In this case, total annual deposition was 470 t  $\text{PM}_{10}$  and the reduction in particle concentration during the vegetation period 0.5 %. The data of urban vegetation (cover, species, leaf area index etc.) were determined by field investigations and to a certain extent by evaluating aerial photographs. Deposition was calculated using a method based on NOWAK (1994), and a constant deposition velocity of  $0.64 \text{ cm s}^{-1}$  was assumed for the vegetation period ( $0.14 \text{ cm s}^{-1}$  outside the vegetation period).

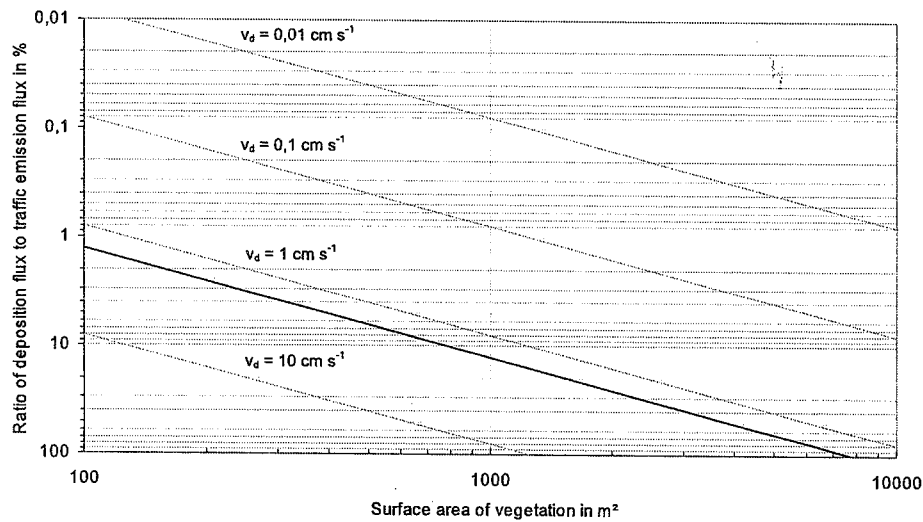
The improvement in air quality as a result of the deposition of dust on plants, calculated using the deposition rates assumed by NOWAK (1994) and NOWAK and CRANE (2000), is therefore very slight and could scarcely be confirmed by concentration measurements.

## 5 Estimate for an arterial road with heavy traffic

The calculations made in the preceding section show that effective filtration is largely dependant on the deposition velocity used.

**Table 2:** Published deposition velocities ( $v_d$ ), depending on plant species, particle size ( $d_p$ ) und wind speed ( $u$ ) (from FREER-SMITH et al., 2005; SEHMEL, 1980).

Author	Year	Species	$d_p$ in $\mu\text{m}$	$u$ in $\text{m s}^{-1}$	$v_d$ in $\text{cm s}^{-1}$
BUNZL et al.	1989	<i>Picea abies</i>			
WHITE a. TURNER	1970	<i>Fraxinus excelsior</i>	0,1-20	2	
		<i>Quercus petraea</i>	0,1-20	2	
		<i>Betula pubescens</i>	0,1-20	2	
		<i>Corylus avellana</i>	0,1-20	2	
HORI	1953	<i>Picea glehnii</i>	20	1,4	
PETERS a. EIDEN	1992	<i>Picea abies</i>	1	0,5	
BECKETT et al.	2000	<i>Pinus nigra</i>	1,28	1-3	
		<i>Cupressocyparis leylandii</i>	1,28	1-3	
		<i>Acer campestre</i>	1,28	1-3	
		<i>Populus deltoides</i>	1,28	1-3	
		<i>Sorbus intermedia</i>	1,28	1-3	
FREER-SMITH et al.	2004	<i>Quercus petraea</i>	0,8	3	
		<i>Alnus glutinos</i>	0,8	3	
		<i>Fraxinus excelsior</i>	0,8	3	
		<i>Acer pseudo-platanus</i>	0,8	3	
		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,8	3	
		<i>Ficus nitida</i>	0,8	3	
		<i>Eucalyptus globulus</i>	0,8	3	
		QUARG	1996	Grass	0,1-12
GALLAGHER et al.	1997	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,01-10		
CHAMBERLAIN	1966	Grass	32	1-7,4	
BELOT a. GAULTHER	1975	Pinus and Quercus shoots	2	1-10	
NICKOLA a. CLARK	1976	<i>Artemisia tridentata</i>	5		
HORBERT et al.	1976	Grass	1-3		
SIMPSON	1961	<i>Artemisia tridentata</i>	2,5		
CLOUGH	1973	Grass	1-10	6	



**Figure 6:** Ratio of deposition flux to traffic emission flux depending on surface area of vegetation and deposition velocity ( $v_d$ ) in a street section of 100 m length. The black line shows the deposition velocity for 8.000  $\text{m}^2$  of vegetation surface area and a ratio of deposition flux to traffic emission flux ratio of 100 % ( $\sim 1.6 \text{ cm s}^{-1}$ , see text for explanations).

Deposition velocities previously published cover a range of more than four orders of magnitude (Tab. 2). The question therefore arises as to how high the deposition velocity must be in order to result in a measurable improvement in the particle concentration situation and whether previously published deposition velocities can reach this order of magnitude at all.

In a sample calculation, the filtration (deposition effect) of targeted planting on an arterial road with heavy traffic was therefore considered as a function of deposition velocity and the plant surface added to the system. In order to make filtration performance clearer, deposition mass flow to vegetation surfaces is plotted against vehicle particulate ( $\text{PM}_{10}$ ) emissions in % in Fig. 6. A

**Table 3:** Deposition velocities of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2</sub> und PM<sub>1</sub> on the foliage of *Pinus sylvestris*, *X Cupressoparis leylandii*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* *X trichocarpa* 'Beaupré' and *Sorbus aria* (modified after FREER-SMITH et al., 2005).

Particle size fraction	Deposition velocity in cm s <sup>-1</sup>				
	Pine	Cypress	Maple	Poplar	Whitebeam
Sussex field site					
PM <sub>10</sub>	2,8	3,4	3,6	0,6	5,4
PM <sub>2</sub>	1,8	4,6	9,2	0,8	11,0
PM <sub>1</sub>	36,2	33,7	31,7	25,4	27,2
Withdean Park					
PM <sub>10</sub>	4,7	6,2	1,8	0,4	3,3
PM <sub>2</sub>	6,1	3,7	2,5	0,8	4,5
PM <sub>1</sub>	29,9	19,5	11,6	12,3	16,9

value of 100 % would mean that the filtration performance of the plants fully compensated for the additional pollutant load caused by road vehicles.

For a road section with a length of 100 m, average daily traffic of 40,000 vehicles and an assumed emission factor of 100 mg km<sup>-1</sup> vehicle<sup>-1</sup> PM<sub>10</sub> (rounded value, e.g. DÜRING et al., 2004) the average emission mass flow is 4.63 mg s<sup>-1</sup>.

At 37 µg m<sup>-3</sup>, the average annual PM<sub>10</sub> concentration ( $C_p$ ) corresponds to that of an arterial road with heavy traffic. If 40 deciduous trees were planted on both sides of the road (5 m crown diameter, leaf area per unit ground surface covered LAI 5), a vegetation surface of about 3,000 m<sup>2</sup> would be created; with a façade height of 12 m and a section length of 100 m, façade vegetation on both sides of the road could provide a maximum vegetation surface of 2,400 m<sup>2</sup> (4,800 m<sup>2</sup> with an LAI of 2). As a result, the maximum possible vegetation surface area ( $A_{total}$ ) for the road section would be about 8,000 m<sup>2</sup>. The deposition mass flow can be calculated from these values using Eq. (4.2) as a function of the vegetation surface and the assumed deposition rate.

For the maximum possible vegetation area (8,000 m<sup>2</sup>) 100 % compensation for road vehicle emissions is only reached at a deposition velocity in excess of 1.6 cm s<sup>-1</sup>. Tab. 2 shows that deposition velocities of this order of magnitude have already been measured. However, it should be noted that some of these measurements were based on particles with a diameter of up to 20 µm which reach high deposition velocities by sedimentation (cf. Tab. 2). In other studies, high filtration performance was only reached at high wind speeds which are not representative of urban conditions. The figures given by GALLAGHER et al. (1997) were measured by the eddy covariance method in a Douglas fir forest with an area of 3000 ha and are therefore only of limited relevance to small areas of urban vegetation. It can therefore be stated that it would be just within the bounds of possibility to compensate for local road vehicle emissions using vegetation with the (optimistic) estimate of 8,000 m<sup>2</sup> of vegetation

surface and the published values for deposition velocity. The negative effect of vegetation on near-surface air exchange has not been taken into consideration here as a result of the complex interactions involved. However, in order to compensate for local road vehicle emissions, very extensive vegetation would be needed and it would be necessary to consider the possibility of planting conifers by roadsides.

Not only as regarding the deposition velocity assumed but also as regarding the method used, the investigations of FREER-SMITH et al. (2005) are an exception. According to the information provided by the authors, the deposition rates used were measured in situ for the first time. For this purpose, atmospheric particle concentrations at two locations (urban area and surrounding countryside) were measured continuously by optical particle counters during a summer measurement period (7 days in August 1998). At the end of this measurement period, the particle mass deposited on the leaves of five different tree species was determined gravimetrically and a deposition mass flux density was calculated using the area of the leaf samples. In combination with the results of the concentration measurements, it was then possible to calculate deposition velocities using Eq. (2.1). The resulting deposition velocities are remarkable (Tab. 3). With the exception of the poplar, the deposition velocities determined for the two locations were significantly above 1 cm s<sup>-1</sup> for all particle size fractions. The deposition velocities for PM<sub>1</sub> (including the poplar) were in excess of 10 cm s<sup>-1</sup>, not only about two orders of magnitude above the valued determined by modelling but also higher than the deposition velocities measured by other methods (wind tunnel, eddy-covariance, cf. Fig. 1). Applying these values to the example of the arterial road with heavy traffic mentioned above, only a few trees would be adequate to compensate for road vehicle emissions in the size class PM<sub>1</sub> which is especially significant in view of health aspects. However, these results have not yet been confirmed by any other studies based on the same methods.

## 6 Conclusions

The decisive value for the assessment of dust filtration by plants is the deposition velocity. In previous publications, we find relatively large differences between deposition velocities determined by measurement and by modelling. Average deposition velocities for vegetation are normally of the order of  $v_d < 1 \text{ cm s}^{-1}$ . In the case of high wind speeds, particle sizes up to  $20 \mu\text{m}$  or measurements in extensive forests with an area of several thousand hectares, the values are higher. However, when considering targeted planning in urban areas with a view to reducing dust concentration, appropriate values are in the range of  $v_d < 1 \text{ cm s}^{-1}$ . At these deposition velocities, the improvement in air quality as a result of filtration by plants is about 1 % (Sec. 4); in order to compensate for local particulate emissions by road traffic, very large areas of vegetation would be needed (Sec. 5). However, the validity of the deposition velocities mentioned above is called into question by the new measurement method of FREER-SMITH et al. (2005). With filtration performance in some cases an order of magnitude higher than the values published to date, improvements in air quality could be achieved with considerably less effort. However, the *in-situ* measurements using the method proposed by FREER-SMITH et al. (2005) will still need to be confirmed by further measurements. If it is in fact confirmed that plants can reach these levels of filtration performance, it should be possible to measure differences between particle concentrations in comparisons between vegetated and non-vegetated situations. However, it will be necessary to carry out further research in this area.

The wide variety of human-biometeorological effects of plants in urban environments should also be mentioned at this point. Thermal stress is a key aspect of urban climatology (MAYER et al., 2008; KUTTNER, 2004). In this connection, BONGARDT (2006) was able to demonstrate the reduction in thermal stress for city-dwellers taking an urban park as an example. However, it must still be stated that urban parks and gardens may have an effect on the general particulate concentration situation ( $\text{PM}_{10}$ ) but that measurable improvements in air quality can only be achieved by planting large areas of trees with a high filtration effect (e.g. conifers). According to the studies of FREER-SMITH et al. (2005), filtration effectiveness with respect to smaller particles ( $\text{PM}_1$ ) could be about an order of magnitude higher. In that case, smaller, localized areas of vegetation could also be beneficial. Even if they did not bring about any improvement with respect to the statutory concentration standards for  $\text{PM}_{10}$ , targeted planting campaigns should still be considered in this case, especially in view of the greater significance of  $\text{PM}_1$  for human health.

## References

- AULICIEMS, A., I. BURTON, 1972: Trends in smoke concentrations before and after the Clean Air Act of 1956. – Atmos. Environ. **7**, 1063–1070.
- BECKETT, K. P., P. H. FREER-SMITH, G. TAYLOR, 2000: Particulate pollution capture by urban trees: Effect of species and windspeed. – Global Change Biology **6**, 995–1103.
- BIMSCHG, 2007: Federal Immission Control Act (First issue 15.03.1974). Law on the prevention of harmful environmental effects attributable to air pollution, noise, vibrations and similar phenomena in the version published on 26 September 2002. – (BGBl. I p. 3830), last amended on 23 October 2007 (BGBl. I p. 2470)
- BIMSCHV, 2007: 22nd Ordinance on the Implementation of the Federal Immission Control Act. Ordinance on air quality standards in the version published on 4 June 2007. – BGBl. I S. 1006.
- BONGARDT, B. 2006: Stadtklimatologische Bedeutung kleiner Parkanlagen – dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. – Essener Ökologische Schriften **24**. Westarp Wissenschaften, Hohenwarsleben, 228 pp.
- BRUSE, M., H. FLEER, 1999: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. – Environ. Model. Software **13**, 373–384.
- BURKHARDT, J., K. PETERS, A. CROSSLEY, 1995: The presence of structural surface waxes on coniferous needles affects the pattern of dry deposition of fine particles. – J. Experimental Botany **46**, 823–831.
- CHAMBERLAIN, A. C., 1975: The movement of particles in plant communities. – In: MONTEITH, J. L. (Ed.): Vegetation and the Atmosphere. Academic Press, New York, 155–203.
- CLEAN AIR ACT, 1956: First issue. – U.K. Parliament. Her Majesty's Stationery Office (HMSO), London.
- , 1963: First issue enacted by U.S. Congress. – Title 42, Chapter 85 U.S.C. 7401–7626. Government Printing Office: Washington DC.
- DÜRING, I., A. MOLDENHAUER, E. NITZSCHE, M. STOCKHAUSE, A. LOHMEYER, 2004: Berechnung der Kfz-bedingten Feinstaubemissionen infolge Aufwirbelung und Abrieb für das Emissionskataster Sachsen, Arbeitspakete 1 und 2, Endbericht. Karlsruhe. – Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co. KG.
- EUROPEAN COUNCIL DIRECTIVE, 1999: 1999/30/EC. – Official Journal L 163(29/06/1999) 41–60.
- FARMER, A. M., 1993: The effects of dust on vegetation - a review. – Environ. Poll. **79**, 63–75.
- FOWLER, D., U. SKIBA, E. NEMITZ, F. CHOUBEDAR, D. BRANFORD, R. DONOVAN, P. ROWLAND, 2004: Measuring Aerosol and Heavy Metal Deposition on Urban Woodland and Grass Using Inventories of  $^{210}\text{Pb}$  and Metal Concentrations in Soil. – Water, Air, & Soil Pollution: Focus **4**, 483–499.
- FREER-SMITH, P. H., K. P. BECKETT, G. TAYLOR, 2005: Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* x *trichocarpa* 'Beaupré' *Pinus nigra* and x *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. – Environ. Poll. **133**, 157–167.

- FRICKE, W., U. DAUERT, K. UHSE, 2001: Air knows no borders, 6. Edition. – Berlin, Umweltbundesamt, 40 pp.
- GALLAGHER, M., J. FONTAN, P. WYERS, W. RUJIGROK, J. DUYZER, P. HUMMELSHØJ, D. FOWLER, 1997: Atmospheric particles and their interaction with natural surfaces. – In: SLANINA, S. (Ed.): Biosphere-Atmosphere Exchange of Pollutants and Trace Substances, Springer, Berlin, 45–92.
- GARTENAMTSLEITERKONFERENZ BEIM DEUTSCHEN STÄDTETAG (GALK) 2006: Straßenbaumliste Juni 2006. – Stadt + Grün: Das Gartenamt, Juli 2006, 56–63.
- GRANTZ, D.A., J. H. GARNER, D.W. JOHNSON, 2003: Ecological effects of particulate matter. – Environ. Int. **29**, 213–239.
- GROMKE, C., B. RUCK, 2007: Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon – Experimental investigation of the flow and concentration field. – Atmos. Environ. **41**, 3287–3302.
- GUDERIAN, R., 1975: Immissionschutz-Kriterien für den Maximalumfang von Verdichtungsgebieten (einschließlich Wechselbeziehungen von Verdichtungsgebieten und Freiräumen). – Essen, Schriftenreihe der Landesanstalt für Immissions- und Bodennutzungsschutz des Landes NRW **34**, 20–27.
- HÄNEL, G., 1982: Influence of relative humidity on aerosol deposition by sedimentation. – Atmos. Environ. **16**, 2703–2706.
- HELD, A., A. NOWAK, W. BIRMILI, A. WIEDENSOHLER, R. FORKEL, O. KLEMM, 2004: Observations of particle formation and growth in a mountainous forest region in central Europe. – J. Geophys. Res. **109**, D23204.
- HENNEBO, D., 1955: Staubfilterung durch Grünanlagen. – VEB Verlag Technik, Berlin, 79 pp.
- KRATZER A., 1956: The climate of cities. – Vieweg, Braunschweig, 184 pp.
- KUTTNER, W., 2004: Stadtklima, Teil 2: Phänomene und Wirkungen. – In: UWSF – Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie **16**, 263–274.
- LEE, K. W., M. RAMAMURTHI, 1993: Filter Collection. – In: WILLEKE, K., P. A. BARON (Eds.): Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications. New York, Van Nostrand Reinhold, 179–205.
- LENSCHOW, P., H.-J. ABRAHAM, K. KUTZNER, M. LUTZ, J.-D. PREUSS, W. REICHENBÄCHER, 2001: Some ideas about the sources of PM<sub>10</sub>. – Atmos. Environ. **35** (Supplement 1), 23–33.
- LOEBNER, A., 1935: Horizontale und vertikale Staubverteilung in einer Großstadt. – PhD Thesis, University of Leipzig, 99 pp.
- MAYER, H., J. HOLST, P. DOSTAL, F. IMBERY, D. SCHINDLER, 2008: Human thermal comfort in summer within an urban street canyon in Central Europe. – Meteorol. Z. **17**, 241–250.
- MCPHERSON, R. A., 2007: A review of vegetation-atmosphere interactions and their influences on mesoscale phenomena. – Progress in Physical Geography **31**, 261–285.
- NICHOLSON, K. W., 1988: A review of particle Resuspension. – Atmos. Environ. **22**, 2639–2651.
- NOWAK, D. J., 1994: Air pollution removal by Chicago's forest. – In: MCPHERSON, E. G., D. J. NOWAK, R. E. ROWNTREE (Eds.): Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. Radnor PA, US Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report NE-186.
- NOWAK, D. J., D. E. CRANE, 2000: The urban forest effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions. – In: Proceedings: Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21<sup>st</sup> Century. IUFRO Conference, Boise, ID., US Department of Agriculture, Forest Service.
- PRYOR, S. C., M. GALLAGHER, H. SIEVERING, S. E. LARSEN, R. J. BARTHELMIE, F. BIRSAN, E. NEMITZ, J. RINNE, M. KULMALA, T. GRÖNHOLM, R. TAIPALE, T. VESALA, 2008: A review of measurement and modelling results of particle atmosphere-surface exchange. – Tellus **60B**, 42–75.
- RIES, K., J. EICHHORN, 2001: Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons. – Meteorol. Z. **10**, 229–233.
- SEHMEL, G. A., 1980: Particle resuspension: A review. – Environ. Int. **4**, 107–127.
- SLINN, W. G. N., 1982: Predictions for particle deposition to vegetative canopies. – Atmos. Environ. **16**, 1785–1794.
- SPITSYNA, N. T., L. N. SKRIPAL'SHCHIKOVA, 1992: Phytomass and dust accumulation of birch forests near open-pit mines. – Soviet J. Ecology **22**, 354–359.
- THOENNESSEN, M., 2002: Elementdynamik in fassadenbegrünendem Wilden Wein (*Parthenocissus tricuspidata*). Nährelemente, Anorganische Schadstoffe, Platin-Gruppen-Elemente, Filterleistung, Immissionshistorische Aspekte, Methodische Neu- und Weiterentwicklungen. – Kölner Geographische Arbeiten, Heft **78**, Geographisches Institut, Universität Köln, 103 pp.
- WIELER, A., 1911: Ueber die ursächlichen Beziehungen zwischen den Vegetationsschäden und den Verbrennungsprodukten der Kohlen. – Rauch und Staub **1**, 248–255.
- WINKLER, P. 1988: The Growth of Atmospheric Aerosol Particles with Relative Humidity. – Physica Scripta **37**, 223–230.
- WISLICENUS, H., O. SCHWARZ, H. SERTZ, F. SCHRÖDER, F. MÜLLER, F. BENDER, 1916: Experimentelle Rauchschäden: Versuche über die äußeren und inneren Vorgänge der Einwirkungen von Ruß, sauren Nebeln und stark verdünnten sauren Gasen auf die Pflanze. – In: WISLICENUS, H. (Ed.): Sammlung von Abhandlungen über Abgase und Rauchschäden Heft 10. Parey, Berlin.
- WITHERSPOON, J. P., F. G. TAYLOR JR., 1969: Retention of a Fallout Simulant Containing 134Cs by Pine and Oak Trees. – Health Physics **17**, 825–829.

# ANEXO N° 4

## **Ejemplos de aplicación de propuesta para contabilización interanual de compensación de emisiones de MP de Central Santa María de Coronel**

A continuación se presentan 3 escenarios de compensación de emisiones de material particulado (MP) que podrían ocurrir para el período 2011-2018. Cabe señalar que son ejemplos y no necesariamente corresponderán a lo que efectivamente suceda. Los supuestos aplicados para los 3 escenarios se mencionan a continuación:

- Unidad 1 entra en operación en el mes de octubre de 2011, por lo que sólo emite MP los últimos 3 meses del año.
- Unidad 2 entra en operación en el mes de noviembre de 2014, por lo que sólo emite MP los últimos 2 meses del año.
- Construcción del Parque Botánico se inicia a mediados del 2011, por lo que la reducción de emisiones se va incrementando conforme al desarrollo de la vegetación a través de los años.
- Se recambian 500, 500 y 1000 estufas a leña durante el 2011, 2012 y 2013 respectivamente en la temporada de verano.
- Se venden a terceros parte de los excedentes de reducción de emisiones no utilizados después de tres años.

Escenario 1:

*Supuesto:* Se presenta una alta variabilidad interanual en la generación de energía debido a las diferencias de pluviosidad entre los años considerados.

	<b>EMISIONES de MP (ton/año)</b>							
	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
<b><i>Emisiones MP CT Santa María</i></b>	118	158	473	552	158	946	946	158
<b><i>Fuentes de compensación de emisiones</i></b>								
Fuentes Fijas	80	102	150	150	250	350	350	350
Recambio estufas a leña	1	60	120	120	120	120	120	120
Remodelación cancha de fútbol	0	12	12	12	12	12	12	12
Construcción parque educativo	65	151	165	179	193	200	200	200
<b><i>TOTAL anual compensación de emisiones</i></b>	146	325	447	461	575	682	682	682
<b><i>Saldo anual compensación de emisiones</i></b>	28	167	-26	-91	417	-264	-264	524
<b><i>Venta(-)/compra (+) de excedentes a terceros</i></b>	0	0	0	0	-100	0	0	-100
<b><i>Excedente (+)/déficit (-) acumulado de compensación de emisiones interanual</i></b>	28	195	169	78	395	131	-133	291

En el escenario mostrado en la tabla anterior se observa una gran variabilidad en cuanto a la generación de emisiones.

Los saldos anuales de compensación de emisiones muestran un déficit en los años 2013, 2016 y 2017. A su vez, al observar la fila donde se indica el excedente o déficit interanual, se ve que del total del período simulado, Colbún no quedaría con déficit en todo el período analizado. Además, Colbún podría transar parte de los excedentes de compensación de emisiones con terceros (en el ejemplo en los años 2015 y 2018).



Escenario 2:

Supuesto: Predominancia de periodos secos

	EMISIONES de MP (ton/año)							
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Emisiones MP CT Santa María</b>	118	473	473	350	946	946	700	946
<b>Fuentes de compensación de emisiones</b>								
Fuentes Fijas	80	102	150	150	250	350	350	350
Recambio estufas a leña	1	60	120	120	120	120	120	120
Remodelación cancha de fútbol	0	12	12	12	12	12	12	12
Construcción parque educativo	65	151	165	179	193	200	200	200
<b>TOTAL anual compensación de emisiones</b>	146	325	447	461	575	682	682	682
<b>Saldo anual compensación de emisiones</b>	28	-148	-26	111	-371	-264	-18	-264
<b>Venta(-)/compra (+) de excedentes a terceros</b>	0	0	0	300	0	400	0	250
<b>Excedente (+)/déficit (-) acumulado de compensación de emisiones interanual</b>	28	-120	-146	265	-106	30	12	-2

En el escenario mostrado presenta una alta demanda energética para la Central dada por la escasa pluviosidad. Durante los años 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 y 2018 Colbún tendría un saldo anual negativo de compensación de emisiones. Este déficit se compensaría, por una parte, con los excedentes de otros años (2011 y 2014), y mediante la compra de reducción de emisiones de MP a terceros (950 ton en el ejemplo).

Escenario 3:

*Supuesto:* Predominancia de años húmedos

	EMISIONES de MP (ton/año)							
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
<b>Emisiones MP CT Santa María</b>	39	158	158	237	550	237	315	631
<b>Fuentes de compensación de emisiones</b>								
Fuentes Fijas	80	102	150	150	250	350	350	350
Recambio estufas a leña	1	60	120	120	120	120	120	120
Remodelación cancha de fútbol	0	12	12	12	12	12	12	12
Construcción parque educativo	65	151	165	179	193	200	200	200
<b>TOTAL anual compensación de emisiones</b>	146	325	447	461	575	682	682	682
<b>Saldo anual compensación de emisiones</b>	107	167	289	224	25	445	367	51
<b>Venta(-)/compra (+) de excedentes a terceros</b>	0	0	0	-100	-150	-300	-200	0
<b>Excedente (+)/déficit (-) acumulado de compensación de emisiones interanual</b>	107	274	563	687	562	707	874	925

El escenario mostrado en la tabla anterior, la mayor parte del período Colbún contará con un saldo anual positivo de compensación de emisiones, el cual podrá ser transferido a terceros que requieran compensar emisiones de MP en Concepción Metropolitano.