

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE
VALPARAÍSO**

Facultad de Agronomía

Área de Hortalizas y Flores

**Utilización de Anillos de Crecimiento de Ciprés
(*Cupressus macrocarpa* Hartw.) Para Inferir el
Patrón Temporal de Contaminación en Ventanas, V
Región, (1960-2000)**

Tesis Para Optar al Grado de Licenciado en Agronomía y al Título de
Ingeniero Agrónomo

Profesor Guía: José Antonio Olaeta

Profesor Co – Referente: Marco Cisternas

Por :

Milissen Cantin Aranda

2003

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerle a Dios por enseñarme que siempre después de una tormenta sale el sol. Luego a mis padres que me han ayudado a lograr todas mi metas con su amor y compañía, finalmente a mi hermano que a pesar de todo lo quiero.

Entre las personas que me ayudaron con este arduo trabajo quiero destacar a Alexis quien con su amor y compañía me ayudó en las noches de desvelo, junto con su familia.

Agradezco también el apoyo de mi profesor guía Sr. José Antonio Olaeta y a mi profesor Co-guía Sr. Marco Cisternas, quienes me ayudaron a poder ir creciendo en mi última etapa en la universidad. Además quiero agradecer la colaboración de la Dra. Rosanna Ginocchio, Dr. Henry Grissino, Juan Carlos Aravena, Mario Ávila, Sergio Carstens (ENAMI), Jaime Chiang, Manuel Ruiz (ENAMI), Ximena Feito, Carlos de la Cuadra, Ambrosio Vidal, Maria Villarroel, Yasna Peña y el personal del Laboratorio de Suelo, Juan Torres y Julio Silva (ñeco), y todo el personal de la Facultad de Agronomía quienes me aportaron consejos, experiencia, conocimiento, y mucho cariño.

Sin poder olvidar a mis queridos amigos que me apoyaron en esta y en otras tantas metas. Francia Zarate, Fabricio Vergara, Jaime Díaz, Francisco González, Claudia Pino (gracias por el FFTIR), Rafael González, Paula González, Heidy Araya, todas las chicas que han pasado por el Pensionado Femenino el cual me han cobijado por 5 lindos años y finalmente al TAC por ayudarme a comprender que realmente el amor mueve montañas.

Dedicatoria

A Dios.

“En el desierto del Mojave, es frecuente encontrarnos con las famosas ciudades fantasma: construidas cerca de las minas de oro, que quedaban abandonadas cuando todo el producto de la tierra ya había sido extraído. Habían cumplido su papel, y no tenían más sentido.

Cuando paseamos por un bosque, también vemos árboles que –una vez que han cumplido su papel, terminaron por caer.

Pero, a diferencia de las ciudades-fantasma, ¿qué fué lo que pasó? Abrieron espacio para que la luz penetrase, fertilizando el suelo, y sus troncos aparecen cubiertos de vegetación nueva.

Nuestra vejez va a depender de la manera en que vivamos el momento presente. Podemos terminar como una ciudad-fantasma, simplemente abandonados. O por el contrario como un árbol generoso, que continúa siendo importante, aún después de haber caído”

P.Coelho

“Un árbol me susurro al oído, *si quieres saber que ha pasado durante mi vida solo tienes que preguntármelo!* Yo le

pregunte y el me respondió.....

RESUMEN

Desde hace 40 años, la comuna de Puchuncaví y sus alrededores han estado bajo la influencia de las emisiones contaminantes del CIV. El impacto ambiental, producido por las emisiones atmosféricas de SO₂, material particulado y ceniza residual, han generado preocupación pública durante las dos últimas décadas.

La reciente utilización de anillos de árboles como biomonitores de la contaminación, es una metodología especialmente aplicable en zonas de muy reciente historia ambiental. Esta técnica (dendroquímica) se basa en que los anillos de crecimiento pueden reflejar los cambios de la química ambiental producidos en el año de su formación. Considerando lo anterior, la presente investigación pretende inferir, desde el registro dendroquímico, el patrón temporal de contaminación generado durante los 40 años de funcionamiento del CIV (1960-2000).

Este estudio se realizó en la localidad de Ventanas, considerando como zona control a Quintay. En las dos zonas estudiadas se encontraron ejemplares de *Cupressus macrocarpa*, a los cuales se les evaluó el nivel de Cu, Fe, Pb, Cd, Cr y Al en grupos de cinco anillos (desde 1936 a 2000). Paralelamente, se midieron los metales a hojas, corteza y suelo en las dos áreas de estudio para determinar la efectiva presencia actual de contaminación atmosférica.

Los resultados reportaron que las concentraciones de Cu y Fe fueron constantes durante los 64 años analizados, aunque el Fe presentó mayor concentración en Ventanas. El comportamiento constante a través del tiempo de estos metales, a pesar de su gran depositación en el área, se debería a su condición de nutriente y a su baja biodisponibilidad en el suelo.

Por otra parte, se registró un aumento en las concentraciones de Pb, Cd y Cr en los anillos de ciprés formados después de la instalación del CIV. La presencia de estos metales no sólo en la madera de ciprés sino que en hojas, corteza y suelo en Ventanas se ha relacionado con la constante emisión de material particulado del CIV.

En conclusión, esta investigación logró utilizar una especie arbórea, *Cupressus macrocarpa*, para determinar la posible contaminación antes y después de la instalación del CIV, pudiendo así determinar la línea base de la contaminación. Lamentablemente los planes de descontaminación realizados por el CIV no se vieron reflejados en este estudio por ser de reciente ejecución.

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Durante las últimas décadas los estudios ambientales han incrementado el uso de indicadores, tanto físicos como biológicos, para reconocer el impacto de la actividad industrial sobre el medio ambiente (HALL y NEUMANN, 1984). Entre los indicadores biológicos, las hojas, raíces y corteza de las plantas han sido ampliamente utilizadas, junto con líquenes, musgos y hongos (MULGREW y WILLIAMS, 2002). El principal requisito para que este tipo de indicadores funcionen como tales, es que desarrollen parte de su ciclo vital bajo la influencia de la contaminación industrial (FORGET y ZAYED, 1995).

A pesar de los buenos resultados obtenidos con las plantas como bioindicadores, aún queda el problema de cómo determinar el comportamiento temporal (histórico) de la contaminación. Los patrones temporales son necesarios para establecer la línea de base del sistema natural (*i.e.* condiciones pre-industriales), o desarrollar modelos predictivos de contaminación. En este sentido, la vegetación arbórea, que presenta anillos de crecimiento, podría registrar los patrones temporales de la contaminación (FORGET y ZAYED, 1995).

Los árboles que viven en regiones templadas generan anillos de crecimiento anual. Estos anillos pueden ser diferenciados y fechados debido a que están compuestos por una madera temprana, de color más claro (crecimiento de primavera), y una madera tardía, de color más oscuro (crecimiento de verano y otoño)(GOMEZ, 1956). De este modo, la factibilidad de fechar cada anillo (*i.e.* dendrocronología) entrega la temporalidad de la contaminación, mientras que su análisis químico refleja las concentraciones de los contaminantes a los que el árbol estuvo expuesto (*i.e.* dendroquímica) (WATMOUGH, 1999)

A pesar de la importancia ambiental de la dendroquímica, la mayoría de los estudios se han realizado en países desarrollados, justamente donde existen registros históricos de contaminación de más larga data. Por el contrario, no se ha aplicado en países como el nuestro, donde la preocupación por cuestiones ambientales es relativamente reciente y, por lo tanto, no existe información ambiental de largo término.

De acuerdo a los antecedentes con que se cuenta, sólo dos intentos de aplicar la metodología se han realizado en Chile. A principios de los noventa, DELGADO (1996) cuantifica las concentraciones de Cu en anillos de *Cryptocarya alba*, en las localidades de Ventanas y Quintay, con el objetivo de determinar el efecto de la adición antropogénica de Cu en los componentes del bosque esclerófilo. Posteriormente, ROMO-KROGER *et al.* (1996) determinan la presencia de K, Ca, S, Cu, Zn, As, Br y Pb en diferentes especies de árboles urbanos de Santiago con el fin de cuantificar los efectos ambientales de la industria y del parque automotriz. Lamentablemente, ambos trabajos no se centran en la evolución temporal a escala anual. El primero totaliza los 35 anillos más recientes y los compara con un promedio de los más antiguos (DELGADO, 1996), mientras que el segundo estudio focaliza su atención en los aspectos analíticos de la metodología (ROMO-KROGER *et al.*, 1996).

La comuna de Puchuncaví y sus alrededores, desde hace 40 años, han estado bajo la influencia de las emisiones contaminantes del complejo industrial de Ventanas (GONZALEZ e ITE, 1992). Las principales fuentes emisoras han sido ENAMI y GENER (CHIANG *et al.*, 1985). La primera corresponde a una fundición de cobre y la segunda a una termoeléctrica. El impacto ambiental producido por las emisiones atmosféricas de SO₂, material particulado y ceniza residual han generado preocupación pública durante las dos últimas décadas (CHIANG *et al.*, 1985; GONZALEZ e ITE., 1992; DIAZ, 1998).

A partir de los años ochenta, se han realizado diversas investigaciones sobre el comportamiento de los metales pesados en Puchuncaví. Específicamente, se ha estudiado su acumulación en el suelo (GONZALEZ e ITE, 1992; DÍAZ *et al.*, 1998), su depositación atmosférica (CHIANG *et al.*, 1985), y su dispersión (BRUNO, 1992). A pesar de lo anterior, se reconoce un desconocimiento de cómo ha evolucionado la contaminación durante todo el funcionamiento del complejo industrial y cómo esto ha afectado al ecosistema. Del mismo modo, no se han cuantificado los efectos de las medidas de mitigación realizadas por las empresas.

Considerando lo anterior, la presente investigación postula que es posible inferir, desde el registro dendroquímico, el patrón temporal de contaminación generado durante los 40 años de funcionamiento del complejo industrial Ventanas (1960-2000).

El objetivo general de esta investigación es inferir la evolución temporal de la contaminación industrial de Ventanas mediante la utilización de anillos de crecimiento anual de *Cupressus macrocarpa* presentes en la zona, comparándola con una localidad control (Quintay).

1.1. Objetivos específicos:

Construcción de la línea temporal, sobre la base de análisis dendrocronológicos, para los individuos escogidos de la especie seleccionada en ambas áreas.

Determinar las concentraciones de Cu, Fe, Pb, Cd, Cr y Al en los anillos de crecimiento anual y su relación con la información existente de la contaminación en Ventanas.

Determinar relaciones entre las concentraciones de metales pesados en los anillos y la absorción radicular actual, inferida de las concentraciones presentes en el suelo.

Determinar relaciones entre las concentraciones de metales pesados en los anillos y la depositación atmosférica actual, inferida de las concentraciones en las hojas y cortezas de los individuos estudiados.

CAPITULO 2 REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1. Dendroquímica:

Las características físicas, químicas y biológicas de los anillos tienen relación directa con las condiciones del medio ambiente. Por ejemplo, el estudio de las influencias del clima sobre los anillos se denomina Dendroclimatología, el efecto de los procesos ecológicos lo estudia la Dendroecología y las variables químicas son analizadas por la Dendroquímica. Esta disciplina, al considerar las concentraciones de los elementos químicos en los anillos de crecimiento, puede ser utilizada para reconstruir la evolución temporal de la contaminación química ambiental (TOUT, GILBOY y SPYROU, 1977; GUYETTE, CUTTER y HENDERSON, 1991).

Los elementos químicos asociados a esta disciplina son los inorgánicos, considerando a los nutrientes inorgánicos esenciales (N, P, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Zn, B, Cu, Co y Mo) y elementos no esenciales (Al, As, Cd, Cr, Pb, Ni, Si, Sr y Ba)(VIMMERSTEDT y McCLENAHEN, 1995).

La mayoría de los nutrientes esenciales que la planta necesita en bajas concentraciones (micronutrientes) pueden llegar a ser tóxicos en niveles mayores a las normales en los suelos (VIMMERSTEDT y McCLENAHEN, 1995). Es así como se producen toxicidades de algunos metales que además son nutrientes (e.g. Cu, Zn y Mn) (RUIZ, 2001). La contaminación del suelo con elementos no esenciales, en general, es de origen antropogénico, son raras las altas concentraciones de metales que se presenten en forma natural, excepto el Al fitotóxico, ampliamente distribuido en los suelos ácidos. Entre los elementos no esenciales contaminantes predominantes se encuentran Be, F, Cr, Ni, Zn, As, Cd, Hg y Pb (BOHN, McNEAL, O'CONNOR, 1993).

La principal vía de entrada de elementos a los anillos (xilema) es a través de las raíces. Aunque también hay absorción a través de las hojas y corteza pero es indirecta, pues usa el floema como vía de ingreso para luego traslocarse a los anillos del xilema (FORGET y ZAYED, 1995)

La biodisponibilidad del metal es el factor más importante que limita la absorción de elementos inorgánicos por las raíces. La biodisponibilidad de metales en el suelo dependerá de muchos factores físicos y químicos. Un Ph más ácido en el suelo favorece la biodisponibilidad así como la textura del suelo, su compactación, su capacidad de intercambio catiónico, su temperatura y otros factores. En el caso del Cu, la fuerte unión que tiene este metal con la materia orgánica localizada especialmente en la superficie del suelo, deja una fracción muy pequeña de cobre biodisponible para las plantas (FERNÁNDES y HENRIQUES, 1991). De este modo, considerando la profundidad de las raíces de los árboles se podría esperar una baja absorción de este elemento.

2.2. Aplicaciones de la dendroquímica:

A fines de los setenta comienzan a desarrollarse los primeros estudios dendroquímicos (TOUT, GILBOY y SPIROU *et al.*, 1977; FORGET y ZAYED, 1995). Desde ese tiempo hasta la fecha, se han analizado árboles afectados por emisiones de la minería, de termoeléctricas, del parque automotriz urbano y de refinerías de petróleo.

Respecto a la contaminación minera, SCHAUMLOFFEL, FILBY y MOORE, (1996) estudiaron en Washington especímenes de *Pinus ponderosa* que crecían en los alrededores de un lago fuertemente afectado por descargas mineras (Roosevelt Lake). Los resultados mostraron una relación entre las concentraciones de Cd y Zn presentes en los anillos con las descargas de contaminantes al lago. Posteriormente, los mismos autores (SCHAUMLOFFEL, FILBY y MOORE, 1998), utilizando la misma especie, pero en otro sector, reconocieron una disminución de las concentraciones de Cd y Zn en los anillos más recientes de los árboles. Los autores infieren que la disminución responde a la implementación de tecnologías limpias por parte de la industria minera.

Así mismo, ANDERSON y CHAPPELKA, (2000) determinaron altos niveles de Pb en las hojas, suelo y anillos de algunos ejemplares de *Quercus sp.*, cercanos a una fundición de plomo en Alabama. Paralelamente, estudiaron los árboles de un sitio con una fundición clausurada. Aquí, los anillos interiores mostraban altas concentraciones que disminuían paulatinamente hacia el exterior. De este modo, los autores dedujeron la capacidad de *Quercus sp.* como biomonitor de las emisiones de contaminantes.

A pesar de las buenas correlaciones entre emisiones de metales pesados y las concentraciones detectadas en anillos, no siempre resultan ser éstas últimas un fiel

reflejo de las primeras. Por ejemplo, el sulfuro, un contaminante usualmente emitido por las actividades mineras, acidifica el suelo, promoviendo la disponibilidad de algunos metales pesados. De este modo, el incremento de los metales contenidos en los anillos podría ser, en realidad, el resultado indirecto de un aumento de sulfuro en el ambiente (GUYETTE, CUTTER y HENDERSON, 1991).

En este sentido, BAES y MCLAUGHLIN (1984) reconocieron altas correlaciones entre las emisiones de sulfuro, generadas por la actividad minera en Copperhill, Tennessee (*i.e.* 1863 y 1912), y las concentraciones de Fe en los anillos de *Pinus echinata*. Los autores concluyen que el incremento del metal habría respondido a un aumento en su biodisponibilidad.

Del mismo modo, e independientemente de las emisiones sulfurosas, la acidez del suelo *per se* también podría generar el mismo efecto de biodisponibilidad de los metales. GUYETTE, CUTTER y HENDERSON, (1991) estudiaron la acumulación de metales pesados en anillos de *Juniperus virginiana*, que crecían en suelos con diferente grado de acidez, pero sometidos a las mismas emisiones contaminantes de una mina de plomo. En los anillos de los árboles que crecían en suelos ácidos (pH<4.6), se detectaron altas concentraciones de Pb y Cd, mientras que en los suelos básicos (pH=6.8) fueron bajas.

El efecto de la acidez sobre la biodisponibilidad del Al ha sido ampliamente descrito (BOHN, McNEAL, O'CONNOR, 1993). En Canadá, se determinó que el aumento de Al encontrado en los anillos de formación recientes de *Picea rubens*, no se debía a las emisiones de una refinería de Al, si no a la disminución del pH del suelo. Que se comprobó al determinar que las emisiones en los últimos años habían disminuido (FORGET y ZAYED, 1995).

Al igual que en la minería, el sulfuro es uno de los principales contaminantes generado por las termoeléctricas. En Yugoslavia, NAGJ, INJUK y VALKOVIC *et al.* (1987) infieren que el aumento, a partir de los años setenta, en las concentraciones de S, V, Cr, Cu y Pb en anillos de *Pinus*, son resultado de las emisiones SO₂ de una central termoeléctrica. Este incremento coincide con la puesta en marcha de la usina en el año 1970.

Del mismo modo, ARP y MANASC (1987) reconocieron el efecto de las emisiones sulfurosas producidas por una generadora eléctrica a carbón, sobre *Picea rubens*. Los

autores detectaron aumentos en P, K, Fe, Cu, Cr, Al y Ni en anillos formados después de 1963, coincidiendo con la triplicación de las emisiones de SO₂ debido al aumento de la generación de energía. Sin embargo, las concentraciones de Ca, Mn, Mg y Zn se mantuvieron constantes.

Ambas tendencias son explicadas como el resultado de la acidificación del suelo generada por el incremento de sulfuro en el ambiente.

El procesamiento de gas natural también es un importante emisor de SO₂ al ambiente. En Canadá, LEGGE, KAUFFMANN, WINCHESTER, (1984) muestrearon árboles de *Pinus* a intervalos entre 1.2 y 9.6 km. de distancia desde una planta procesadora de gas. Las concentraciones de Si, Cl, As, Cu, Zn, S, Fe y Ni sugieren que los anillos preservaron un registro de los cambios en la química del suelo. Dichos cambios habrían sido producidos tanto por variables naturales como por las emisiones de gas sulfuroso de la industria. Del mismo modo, los autores observaron una relación inversa entre la acentuación del patrón de contaminación, registrado por los árboles, y la distancia desde la planta de gas. Esta industria, instalada en 1960, sufrió modificaciones en su operación durante los últimos 20 años, disminuyendo sus emisiones contaminantes; patrón que también fue registrado por los árboles.

Al igual que en el caso de los procesos industriales mencionados anteriormente, la ignición de combustibles fósiles por parte de motores de combustión interna, también es fuente de sulfuro y metales pesados. Como resultado, tanto en América del Norte como en Europa, los árboles urbanos han disminuido su crecimiento y aumentado su mortalidad (HALL y NEUMANN, 1984). En Chile, ROMO-KROGER *et al.* (1996) analizaron el contenido elemental e inorgánico de los anillos de árboles de Santiago, detectando altas concentraciones de As, Cu, Pb y Zn. Los autores concluyen que los dos primeros elementos son producto de la actividad minera que rodea a la ciudad, mientras que los dos últimos son resultado del fuerte incremento de su parque automotriz.

WATMOUGHT, (1999) describe la utilización de isótopos estables para diferenciar el origen de la contaminación por Pb que fue registrada por los anillos de los árboles en Inglaterra. Mediante el uso de la razón isotópica ²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb, los autores fueron capaces de diferenciar entre la contaminación generada por las bencinas con plomo y la producida por las fuentes urbanas e industriales (combustión de carbón y petróleo).

2.3. Problemas en la aplicación de la metodología:

Un grave problema en la utilización de los anillos de crecimiento como monitores temporales de la contaminación es la potencial traslocación de los elementos en el xilema, es decir, el transporte horizontal de los contaminantes entre anillos (FORGET y ZAYED, 1995).

Desde los comienzos de la dendroquímica se ha postulado la traslocación de elementos desde la médula del árbol hacia los anillos exteriores, así como también, desde la corteza hacia los anillos (FORGET y ZAYED, 1995). Este fenómeno depende de diversas variables; sin embargo, es posible resumirlas en dos grandes grupos: i) las características del xilema y de los anillos, y ii) los comportamientos propios de los elementos o contaminantes.

Respecto a las características de xilema, FORGET y ZAYED (1995) afirman que las coníferas (gimnospermas) presentan menor traslocación entre los anillos en comparación con las angiospermas. Esto se debería a la naturaleza más primitiva de la madera de las coníferas, la que contiene sólo unas pocas y cortas células radiales, reduciéndose el transporte lateral desde la albura al durámen.

En este mismo sentido, otro factor a considerar es el número de anillos, fisiológicamente activos, que conforman la albura (anillos más externos). Diversos estudios han probado una continua transferencia lateral de elementos en este segmento (HAGEMEYER y WEINAND, 1995; HAGEMEYER y HÜBNER, 1999; LATIMER *et al.*, 1996; WATMOUGHT, 1999). De este modo, en general, la cantidad de anillos presentes en la albura determinará la precisión y certeza del estudio dendroquímico del durámen (CUTTER y GUYETTE, 1993).

Considerando las características de los propios elementos respecto a su movilidad, LATIMER *et al.*, (1996), analizaron Zn y Pb en especímenes de *Taxodium distichum* en las proximidades de una refinería de petróleo de Louisiana. De los dos metales, el Pb resultó ser un muy buen indicador de la contaminación generada por la industria (comprobado por el acuerdo entre las fuentes documentales y los niveles detectados). Sin embargo, el Zn no presentó un patrón definido de distribución. Esta diferencia entre el Pb y el Zn es explicada por los autores como el resultado de los diferentes

requerimientos de acidez para la solubilización de ambos metales. El ion Zn es más soluble que el ion Pb a pH ácido, lo que lo hace más móvil y, por lo tanto, es esperable que presente una distribución uniforme a través del xilema (LATIMER *et al.*, 1996).

A pesar de la baja solubilidad del Pb, se han reportado procesos de traslocación del metal en árboles jóvenes. HAGEMEYER y WEINAND (1995) realizaron un ensayo con *Picea abies* de 5 años de edad. Durante el último año del experimento, se aplicaron diferentes dosis de Pb(NO₃)₂ al sustrato de los árboles. Sin embargo, contrariamente a lo esperado, el contaminante se detectó en todos los anillos de crecimiento y no sólo en el último formado. Se concluye que el patrón de distribución radial de Pb no reflejó directamente los cambios químicos del suelo, debido a la traslocación del elemento.

Algunos trabajos realizados recientemente (GARBE-SCHÖNBERG, REIMANN y PAVLOV, 1997; MULGREW y WILLIAMS, 2002) han cuestionado la capacidad de los anillos de registrar el cambio ambiental. GARBESCHÖNBERG, REIMANN y PAVLOV, (1997) muestrearon *Pinus* y *Betula* desde un lugar fuertemente contaminado en el noroeste de Rusia. Paralelamente, fue muestreada un área control, levemente contaminada, en la frontera de Noruega y Rusia. Los resultados mostraron nula correlación entre el contenido de metales en los anillos y la historia de la contaminación. De acuerdo a los autores, los árboles presentaron comportamientos individuales.

2.4. Reseña ambiental del Complejo Industrial Ventanas (CIV):

A principios de la década del 60, el Ministerio de Agricultura determinó que la comuna de Puchuncaví poseía capacidad de uso del suelo principalmente agrícola y turístico (LÓPEZ, 1963). A pesar de lo anterior, en 1964 se instalan la Fundición y Refinería Ventanas (Enami) y la Termoeléctrica a carbón Gener (Chilgener). Posteriormente, gracias a la construcción de un muelle, se suman otras industrias pesadas, consolidándose finalmente el Complejo Industrial Ventanas (CIV).

Debido a las emisiones contaminantes que afectaron a la población aledaña durante catorce años, en 1978 se prolonga la chimenea de la refinería en 70 m, constituyéndose

en una de las más altas de Latinoamérica. Esta modificación produjo un cambio en la dispersión de los contaminantes, disminuyendo en Los Maitenes y aumentado en Campiche y Puchuncaví (DIAZ, 1998). Por su parte, la termoeléctrica cuenta con dos chimeneas de 60 m de altura (MENA, 1996).

En 1990, Enami, Chilgener y el Ministerio de Minería implementaron un Plan de Descontaminación para el CIV. Las medidas ambientales de este plan consideraron la instalación de una red de monitoreo de calidad del aire, la medición de parámetros meteorológicos y la puesta en marcha de una planta de ácido sulfúrico. Esta planta, que recupera el 30% del SO₂ y 50% del material particulado generado por la fundición Ventanas, produce ácido sulfúrico comercial (MENA, 1996).

En 1992, se publica el DS N°185 (Ministerio de Minería), que reglamenta en Chile las emisiones de SO₂, material particulado y arsénico, estableciéndose su fiscalización. Respecto al CIV, en junio de 1992 se definen las empresas que deben presentar un plan de descontaminación (MENA, 1996). En marzo de 1993 se publica el DS N° 252, que aprueba los planes de descontaminación de cada empresa, entregando sus emisiones máximas permisibles anuales (MENA, 1996).

En el caso de Chilgener, principal emisor de PM₁₀ (material particulado menor a 10 μ m), entre las medidas tomadas fueron incorporación de filtros de polvo. A pesar de los anteriores esfuerzos, en febrero de 1994 se declara, mediante DS N° 43, “Zona Saturada” por óxido sulfuroso y material particulado el área circundante al CIV (MENA, 1996).

Dos años después de la promulgación del decreto que aprobaba los planes de descontaminación de Ventanas (DS N° 252), la empresa comienza la implementación de su estrategia. El proyecto consistió principalmente en modernizar la tecnología del proceso productivo, duplicar la capacidad de la planta de ácido y la instalación de precipitadores electrostáticos.

Finalmente, en abril de 1999, el proceso productivo del CIV se ajusta a la norma de emisiones exigida por el DS N°252, y en julio de ese mismo año se cumple con los índices de calidad de aire del DS N°185.

2.5. Estudios de la contaminación generada por el CIV:

Junto con el incremento del interés por las cuestiones medioambientales en Chile, en la década del ochenta comienzan los primeros estudios de la contaminación generada por el CIV. Después de más de 20 años de operación continua y presionados por la opinión pública, los científicos comienzan a preocuparse del caso Ventanas.

De este modo, CHIANG *et al.* (1985) proponen, sobre la base de data empírica, un modelo que relaciona la deposición atmosférica de Cd, Cu, Mn, Pb, Fe, Zn y As con la distancia desde la chimenea de la refinería Ventanas. El algoritmo indica que con la distancia disminuye la depositación de los elementos, por lo que se prueba que la fuente contaminante es la refinería. Los autores concluyen que las características topográficas y las condiciones meteorológicas del sector influyen la distribución de los contaminantes.

Utilizando fotografías aéreas de 1961 y de 1980, ALFARO (1988) reconoció un notorio cambio de uso del suelo ocurrido con posterioridad a la instalación del CIV. El autor informa que el paisaje agrícola de 1980 se presenta extremadamente disminuido en comparación con el de 1961. Dichos cambios son atribuidos a la contaminación generada por el complejo industrial.

Varios investigadores realizaron tres importantes estudios relativos al comportamiento de los metales pesados en el suelo de la V Región (GONZÁLEZ, 1986; GONZÁLEZ y BERGQVIST, 1986; GONZÁLEZ e ITE, 1992). El primer trabajo se realizó en suelo aluvial del valle del Aconcagua, determinando sus niveles de Cu, Cd, Pb y Zn. Sobre la base de 19 muestras, los autores no reconocen relaciones entre la localización geográfica y las concentraciones detectadas, como tampoco relaciones con descargas mineras (GONZÁLEZ, 1986). En el segundo estudio, GONZÁLEZ y BERGQUIST, (1986) midieron los niveles y distribución de los mismos metales en los suelos y hojas de árboles de las comunas de Quintero y Puchuncaví. Se reconocen relaciones entre las concentraciones de metales del suelo y las detectadas en las hojas, y en sus respectivos patrones de distribución geográfica. Ocho años después, GONZALEZ e ITE (1992) con el objetivo de determinar la variación temporal de las concentraciones, los autores realizaron nuevas determinaciones en los mismos lugares del segundo estudio, reconociéndose un enriquecimiento significativo de metales entre ambos periodos.

ACHIARDI (1991) también determinó la presencia de metales en los suelos de Puchuncaví. Sus resultados indican una alta concentración de Fe y Cu, seguidos por Mn, Zn, Pb y As. El autor detecta las mayores concentraciones en dirección noreste desde la zona industrial. Posteriormente, y sobre la base de los mismos puntos de muestreo, HERNÁNDEZ (1994) evalúa la evolución temporal y vertical de los mismos metales, detectando mayores concentraciones en superficie y flujos verticales en profundidad.

Además del estudio de las emisiones por sí mismas, se han realizado investigaciones que han tratado de determinar el efecto de variables naturales sobre la dispersión de las emisiones. Así, BRUNO (1992), mediante fotografías aéreas e información meteorológica, evalúa las variables eólicas y topográficas como controladores de los patrones de contaminación. El autor concluye que las zonas potencialmente más afectadas son Los Maitenes, La Canela, y el área ubicada al noroeste de Puchuncaví. Del mismo modo, e ingresando a un SIG datos de erosión, pendiente, exposición, contaminación, cobertura vegetal y uso del suelo, POZO (1993) determinó las zonas con deterioro ambiental.

Coincidiendo con BRUNO (1992), el autor determina que la localidad de Los Maitenes presenta el mayor grado de deterioro, al igual que Campiche, La Greda y Ventanas. Mediante un análisis comparativo entre dos ecosistemas mediterráneos (Ventanas y Quintay), DELGADO (1996) cuantifica las concentraciones de Cu en hojas, ramas, madera y hojarasca de peumo (*Cryptocarya alba*). Paralelamente, realiza mediciones en el suelo adyacente a las plantas muestreadas. El autor reconoce que en la hojarasca y suelo de Ventanas se presentan las mayores concentraciones del metal, mientras que las menores se detectaron en la madera de ambas localidades. Aun cuando bajos en la madera, los niveles proporcionalmente más altos se observaron en los anillos internos del xilema. Fisiológicamente, las plantas jóvenes absorben una mayor cantidad de nutrientes; este hecho explicaría la mayor presencia de Cu en los anillos interiores (primeros anillos formados durante la juventud de la planta). GINOCCHIO (1997) estudia la utilidad de los modelos de distribución espaciotemporal de la vegetación en el ambiente contaminado de Ventanas. Los resultados de la investigación indican que la contaminación por metales pesados ha afectado a los ecosistemas de modo temporalmente corto, pero espacialmente amplio. Esta situación estaría determinada por el exceso de recursos minerales para la planta. Del mismo modo, se reconoce una

disminución gradual de la riqueza específica y cambios en las coberturas relativas en las áreas más contaminadas. De acuerdo al autor, un proceso de selección de las especies tolerantes explicaría este último fenómeno.

Recientemente, GINOCCHIO (2000) determinó relaciones entre algunos parámetros del suelo y cambios ecológicos sufridos por las praderas en los alrededores de Ventanas. Los parámetros edáficos de mayor significancia, en las modificaciones ecológicas, resultaron ser el N, pH, y el Cu. Paralelamente, el autor reconoció que la contaminación había afectado al banco de semillas disponible en el suelo, disminuyendo la capacidad regenerativa de las plantas de la pradera.

2.6. Características de la comuna de Puchuncaví y Quintay:

2.6.1. Variables meteorológicas.

Los sectores de Ventanas y Quintay poseen una marcada estacionalidad, tanto en la distribución de las temperaturas medias como en las precipitaciones. En primavera y verano se presentan las temperaturas medias más altas (Ventanas: 23,5 °C y Quintay: 22,9°C). Por el contrario, en los meses de otoño e invierno se observan las temperaturas medias más bajas del año (Ventanas: 7,9 °C y Quintay: 6,9°C). A pesar de la marcada estacionalidad, el efecto oceánico genera una baja amplitud térmica con inviernos relativamente benignos (SANTIBAÑEZ y URIBE, 1990). Respecto a las precipitaciones, se concentran principalmente en los meses de otoño e invierno, con un periodo seco de ocho meses para Ventanas y siete meses para Quintay. El promedio anual de precipitaciones en Ventanas es de 354 mm, mientras que Quintay exhibe un promedio de 455 mm (SANTIBAÑEZ y URIBE, 1990).

Respecto al viento en Ventanas, datos del periodo 1952-1990 indican una velocidad promedio anual de 8,2 nudos. El viento SW se presenta en el 84% de los meses analizados, predominando durante todo el año. Sin embargo, tiene su mayor expresión entre los meses de octubre y diciembre (90%), mientras que la menor es en julio (47%). Los restantes meses, el viento S posee una frecuencia del 65%. A pesar de la tendencia unidireccional del viento en Ventanas, es necesario destacar su alta variabilidad diaria (GINOCCHIO, 1997). En el caso de Quintay, se consideraron los datos del periodo 1912-1980. La velocidad promedio anual del viento SW, también predominante en la zona, es de 3,9 nudos. El viento SW se presenta durante todo el año; sin embargo, tiene

su mayor expresión entre los meses de octubre y febrero (con una frecuencia del 60%), mientras que la menor es en junio (30%)(SANTIBAÑEZ y URIBE, 1990).

2.6.2. Características edáficas

El suelo del sector de Ventanas corresponde a la serie Chilicauquén, es franco arenoso fino, rudimentario y moderadamente profundo (entre 45 a 70 cm de profundidad efectiva). Este suelo se encuentra sobre un sustrato constituido por arenisca parcialmente cementada con arcilla proveniente de los horizontes superiores (CIREN, 1997). Presenta una permeabilidad lenta a muy lenta, bien drenado, erosión moderada y con ligera pedregosidad superficial. Esta serie incluye variaciones de suelos de clase VIe1, IIIs8, IVs8 y VIIe1, los cuales son principalmente de uso forestal o con restricciones para algunos cultivos (CIREN, 1997). En la franja costera al sur de Valparaíso se encuentra la formación Quintay y hacia el interior predominan las rocas graníticas paleozoicas (CORVALAN, HERVO y GODOY, 1976) interrumpidas por sedimentos aluviales y terrazas de abrasión (GANA, WALL y GUTIERREZ, 1996). Las dos localidades presentaban origen del suelo similar, siendo constituido por dos tipos de formaciones: sedimento marino y cordillera de la costa con una edad cronológica de aproximadamente 11 mil años (DELGADO, 1996).

2.6.3. Vegetación de las áreas de estudio.

La vegetación original de Ventanas y Quintay estuvo conformada por arbustos esclerófilos mesofílicos con componentes progresivamente más esclerófilos hacia el norte. Durante el siglo XIX estas praderas se cultivaron intensamente con trigo, avena y legumbres, lo que derivó en muy fuertes grados de erosión. Gran parte de esas superficies erosionadas han sido cubiertas en los últimos 20 años con plantaciones de *Pinus radiata* (DONOSO, 1993).

La vegetación presente en la costa entre Maitencillo y Quintay (Figura 1), donde se encuentra el área de estudio, fue predominantemente esclerófila nativa. Este tipo de vegetación ha sido intensamente alterada, principalmente por incendios, lo cual ha dado paso a otro tipo de vegetación. Por ejemplo, el coligual (*Chusquea cumingii*) el cual ha ido invadiendo las áreas más húmedas donde particularmente predominaba el bosque de peumo y boldo (*Cryptocaria alba* y *Peumus boldus*). En sectores más soleados y en algunas quebradas se ha desarrollado vigorosamente el matorral con predominio de

zarzamora y tevo (*Rubus ulmifolius* y *Trevoa trinervis*). El matorral de Corontilla y Chilca (*Eringium paniculatum* y *Baccharis linearis*), va extendiéndose en lugares de suelos degradados y en pendientes que se han quemado en varias ocasiones, donde antes se desarrollaba preferentemente el matorral de litre y boldo (*Lithrea caústica* y *Peumus boldus*) (QUINTANILLA, 2002).

La característica medioambiental de zona de Ventanas se caracteriza por una degradación intensa, particularmente en la zona alrededor de la industria. Hay zonas que están dañadas por erosión, descubiertas o con escasa vegetación. El suelo presenta altos índices de acidificación y de metales pesados (GINOCCHIO, 2000).

2.7. Características de *Cupressus macrocarpa*:

La especie seleccionada para el estudio dendrológico fue *Cupressus Macrocarpa* Hartw. (Ciprés de Monterrey), el cual pertenece a la familia *Cupressaceae*. Se encuentra naturalizado en Monterrey (E.E.U.U.) aunque ha sido plantado en Hawaii, Europa, América del Sur, Australia y Nueva Zelanda. Esta especie se encuentra asociada en bosques con *Pinus radiata* (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2003).

2.7.1. Descripción

El ciprés es un árbol de follaje perenne, llegando a vivir 300 años, alcanzando alturas 25 m. En el primer año forma numerosas ramas con madera de baja humedad y densidad, por lo cual fácilmente agrietable y quemable (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2003)

La plaga principal que presenta el ciprés es *Laspeyresia cupressana* (Lepidóptera) que forma galerías. Además, esta especie es muy sensible a *Coryneum cardinale* (cancro) siendo más resistentes los árboles que se encuentran en la costa, dado que la sal afectaría el establecimiento del hongo (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2003).

2.7.2. Requerimientos de la especie

El suelo debe poseer un drenaje de bueno a moderado, con textura arenosa a franco arcillo arenosa. Las temperaturas mínimas de crecimiento se encuentran entre 0-11 °C y las máximas entre 20-32 °C, la necesidad de precipitación está entre 700 -1.600 mm. El

pH no es limitante en su crecimiento (INFOR, 1979). Se encuentra entre los 500 a 3500 msnm, ubicándose de preferencia en la costa donde su estructura sufre deformidad por el viento (U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2003).

2.7.3. Utilización de la especie

El Instituto Forestal (INFOR) en el año 1979 recomendó para ensayos de plantación a *Cupressus macrocarpa* en Fray Jorge (30°34'S -71°38'O), Peralillo (31°43'S - 71°11'O), Ventanas (32°50'S -71°29'O), Santa Marta (33°25'S - 71°25'O) y Las Palmas (34°10'S - 71°40'O) por sus condiciones favorables de suelo y clima para la especie.

CAPITULO 3 MATERIALES Y METODOS

3.1. Determinación de las áreas de estudio:

Considerando la localización del CIV, se determinó como área de estudio un sector afectado por las emisiones del complejo industrial en la comuna de Puchuncaví (Figura 1). Para la definición de “sector afectado” se utilizó: i) información proveniente de modelos de dispersión de contaminantes (CHIANG *et al.*, 1985), ii) los factores naturales reguladores de la dispersión de contaminantes (BRUNO, 1992) y iii) la acumulación de metales pesados en suelos (GONZALEZ e ITE, 1992; DIAZ, 1998).

Paralelamente, teniendo en cuenta los bajos índices de contaminación y las similitudes físicas y biológicas con Ventanas (DELGADO, 1996), se determinó como área control el sector de Quintay, que se localiza a 60 km. al sur de Ventanas. De este modo, considerando que la dispersión de la contaminación del CIV es preferentemente NE (CHIANG *et al.*, 1985), Quintay queda menos expuesto a sus emisiones contaminantes (DELGADO, 1996).

En cada una de las zonas seleccionadas se determinó la ubicación de los árboles a muestrear mediante fotointerpretación (vuelo FONDEF, 1994)(Figura1).

FIGURA 1. Ubicación de áreas de estudio. Ventanas y Quintay, V Región, 2002.



3.2. Determinación de la especie arbórea a utilizar:

La especie a utilizar debió presentar características dendroquímicas como: i) presentar anillos de crecimiento claramente delimitados para su datación, ii) más de 50 años de edad (línea de base), iii) que el xilema haya registrado los niveles de contaminación a través de tiempo, y iv) que no exista traslocación de los contaminantes entre anillos (movimiento transversal).

Considerando lo anterior, se realizó una prospección buscando dichos requerimientos en especies presentes en la zona de Ventanas.

3.3. Muestreo:

3.3.1. Prospección de especies

Para determinar la especie adecuada se estudiaron cinco especies presentes en la localidad de Ventanas, recolectándose muestras de tarugos de árboles vivos y rodajas de *Acacia caven*, *Senna candolleana*, *Cryptocaria alba* y *Cupressus macrocarpa* y *Acacia* sp. recientemente cortados. Posteriormente se eligió la especie a utilizar.

3.3.2. Muestreo de madera y corteza de la especie seleccionada

Se aplicaron dos metodologías en la recolección de las muestras de madera y corteza: i) obtención de rodajas de árboles recientemente cortados (menos de un año) mediante motosierra (Figura 2), ii) perforación, mediante barreno de incremento, de tarugos en árboles vivos (Figura 3). Ambas metodologías se ajustaron al procedimiento propuesto por STOKES y SMILEY (1968).

FIGURA 2. Obtención de muestras mediante motosierra de un árbol recientemente cortado.



FIGURA 3. Obtención de muestras mediante barreno de un árbol vivo.



3.3.3. Muestras de suelo

Se tomaron muestras de suelo (1 kg aproximadamente), en los lugares en que se encontraron los árboles seleccionados. Mediante una calicata, se recolectó el estrato de suelo sobre el cual las raíces superficiales realizan mayoritariamente su actividad (*i.e.* 30-35 cm)(CREPIN y JOHNSON, 1993). Posteriormente, las muestras fueron cuidadosamente envasadas y transportadas al laboratorio evitando su contaminación.

3.3.4. Muestra de hojas

Se recolectaron tres submuestras de 50 gr de hojas sanas (sin señales de parásitos, hongos ni herviboría), desde cada árbol (DELGADO, 1996). Posteriormente, las muestras fueron cuidadosamente envasadas y transportadas al laboratorio evitando su contaminación.

3.4. Análisis dendrocronológicos:

Para la correcta aplicación de la técnica, se realizó un perfeccionamiento, teórico y técnico en metodologías dendrocronológicas en el Laboratorio de Dendrología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.

Se obtuvieron tres secciones transversales (rodajas) de árboles, con más de 70 años de edad, recientemente cortados para su explotación. Esta información se obtuvo por comunicación personal del trabajador que realizó la tala.

Una vez pulidas las secciones, se determinaron los tres mejores transectos de medición evitando áreas con ramas, galerías de insectos, madera descompuesta, etc. Un requisito fundamental de cada transecto de medición fue la presencia de la corteza (STOKES y SMILEY, 1968).

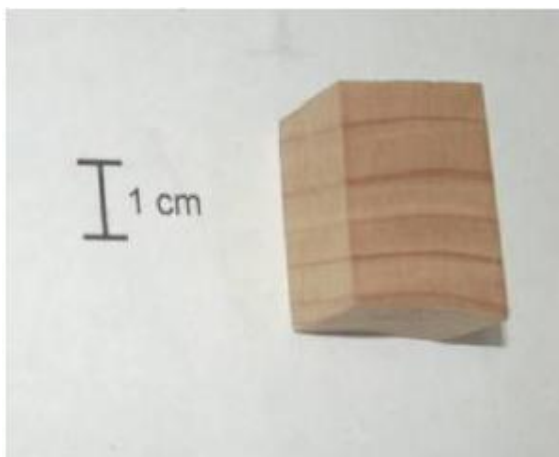
En el caso de las rodajas de madera, el análisis dendrológico fue mejorado siguiendo cada anillo a través de todo el círculo, reconociéndose los anillos falsos (GÓMEZ, 1956). Por cada transecto se realizó un diagrama de anillos en papel cuadriculado (*skeleton plot*) (STOKES y SMILEY, 1968). Luego, se fechó cada anillo, obteniéndose la desviación estándar desde la variación de los 3 transectos.

3.5. Análisis dendroquímicos:

Fechaos e identificados los anillos, se seleccionaron grupos de cinco para realizarles los análisis químicos. La cantidad de cinco anillos se determinó en base al número de anillos contenidos en la albura (entre cinco y ocho). De acuerdo a CUTTER y GUYETTE (1993), el ancho de la albura determina la precisión con la cual el elemento fue almacenado en la madera. Este principio se relaciona a la translocación de elementos que ocurre al interior de la sección fisiológicamente activa del xilema (CUTTER y GUYETTE, 1993).

Los grupos de cinco anillos se removieron desde cada rodaja mediante una sierra de sable, logrando cubos de madera (duplicados) de 2 cm de alto y cinco anillos de ancho (Figura 4). Luego, cada cara del cubo fue desgastada en 3 mm con una lija de arena, con el fin de eliminar cualquier residuo metálico dejado por la hoja de la sierra. Posteriormente, los cubos fueron lavados con tetracloruro de amonio (10%), acetona y agua destilada para eliminar una eventual contaminación superficial (BERISH y RAGSDALE, 1985).

FIGURA 4. Cubo de madera conteniendo cinco anillos de crecimiento de ciprés.



Finalmente, cada cubo fue incinerado a 400°C por 48 h para evitar pérdida de Pb (> 430°C). Las cenizas fueron digeridas en HNO₃ por 30 minutos a 80°C, enfriándolas posteriormente con agua desionizada y destilada (BERISH y RAGSDALE, 1985).

Las concentraciones de metales en los cubos de madera se obtuvieron mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (llama) en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía, Pontífice Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Dicho procedimiento analítico fue contrastado con análisis preliminares con horno de grafito (Laboratorio de Servicios Analíticos, Instituto de Química, PUCV). Considerando las concentraciones detectadas y que no existieron diferencias significativas entre los resultados, se continuó con el método de llama.

Considerando los resultados de anteriores investigaciones, respecto a los contaminantes detectados en el sector de Ventanas (GONZALEZ y BERGQUIST, 1985; CHIANG et al., 1985; ACHIARDI, 1991; HERNANDEZ, 1994), se analizaron las concentraciones de Cu, Fe, Cr, Pb, Al y Cd.

3.6. Análisis de suelo, foliar y corteza:

Se analizaron los contenidos de Cu, Fe, Pb, Cr, Al y Cd en hojas y corteza para determinar los niveles de depositación sobre estas estructuras y establecer la posible vía de entrada al xilema. También se analizó el suelo a los 30 cm de profundidad para determinar los niveles disponibles para las raíces.

3.6.1. Suelo

En las muestras de suelo se determinó las concentraciones de Cu, Fe, Pb, Cd, Cr, Al y el pH.

Para conocer la fracción disponible de Cu y Fe del suelo se aplicó el método de extracción DTPA al 0,05 M. La muestra fue secada y pulverizada para luego realizarle la extracción con DTPA por agitación mecánica durante dos horas (LIANG y KARAMANOS, 1993). Por otra parte, el Cd, Pb, Al y Cr fueron extraídos mediante digestión de ácido nítrico y ebullición con ácido clorhídrico (SOON y ABBOUD, 1993). Finalmente, la determinación cuantitativa de los elementos se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica de llama. El pH se determinó con pH-metro Orion en pasta saturada.

3.6.2. Análisis foliar

A las hojas, al igual que a la madera y el suelo, se les determinó las concentraciones de Cu, Fe, Pb, Cd, Al y Cr. El material foliar se lavó cuidadosamente con agua destilada para remover las partículas asociadas físicamente. Del mismo modo, se aplicó un segundo lavado con HCl 0.01 N, agua bidestilada y DTPA al 0,05 M. Posteriormente, las hojas fueron secadas (35°C por 48 horas), molidas mecánicamente y finalmente calcinadas (300°C por 48 horas)(GINOCCHIO, 1997).

Para la detección de Cu y Fe, el material calcinado fue digerido con HCl concentrado. Mientras que la extracción de Pb, Cr, Al y Cd se efectuó con HNO₃. La determinación cuantitativa de los elementos se realizó mediante espectrofotometría de absorción atómica de llama.

3.6.3. Análisis de corteza

Se obtuvieron dos cubos de corteza, uno de cada árbol. Estas muestras fueron lavadas con tetracloruro de amonio (10%), acetona y agua destilada para eliminar la contaminación superficial (BERISH y RAGSDALE, 1985). Luego, cada cubo fue incinerado a 400°C por 48 h para evitar pérdida de Pb (> 430°C). Las cenizas fueron digeridas en HNO₃ por 30 minutos a 80°C, enfriándolas posteriormente con agua desionizada y destilada (BERISH, 1985).

Las concentraciones de metales en los cubos de corteza se obtuvieron mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (llama) en el Laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía, UCV.

3.6.4. Análisis estadístico

Se analizaron, mediante estadística descriptiva, los promedios y su desviación estándar para inferir las diferencias de concentración de metales en madera, suelo y hojas entre las localidades de Quintay y Ventanas.

En el caso de la madera, se analizaron las diferencias, a través del tiempo, de la concentración de Cu, Fe, Pb, Cd, Cr y Al en los anillos (años) obtenidos de un ciprés en Ventanas en comparación a Quintay. Para ello se dividió en 13 grupos de anillos, representando cada uno de ellos un periodo de 5 años. Además, se sacó el promedio de las 13 de muestras de cada árbol y se comparó entre localidades. En el caso de las hojas y suelo se obtuvo el promedio y la desviación estándar con las tres muestras recolectadas.

CAPITULO 4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. Determinación de las especies aptas para estudios dendroquímicos:

El área de Ventanas presenta un empobrecimiento del número de especies (GINOCCHIO, 1997). Además, en terreno se observó que la mayoría de las especies tenían edades inferiores a 40 años. Entre las especies analizadas se encontraron *Acacia caven* (espino), *Senna candolleana* (quebracho) y acacia sp. (aromo) las cuales presentaron individuos de edades menores a los 15 años de edad. La primera especie fue difícil de muestrear con barreno debido a la dureza de su madera. Del mismo modo, ambas especies presentaron dificultad en el reconocimiento y definición de sus anillos. Los ejemplares de *Cryptocarya alba* analizados presentaban daño por polillas imposibilitando el reconocimiento de los anillos.

Una de las especies más longevas detectadas fue *Cupressus macrocarpa* (ciprés). Además de ser introducida, posee amplia distribución en el área, probablemente justificada por su uso ornamental y su requerimiento climático costero. A los árboles muestreados se les realizó un análisis dendrológico de detalle, detectándose algunos anillos poco definidos que podrían ser anillos falsos, dificultando la datación a escala anual. Además se realizó algunos análisis de metales para determinar la diferencia relativa existente entre la parte interna y la externa de las secciones transversales del tronco (aproximadamente con 60 años de diferencia). Los tarugos obtenidos con barreno no dieron buenos resultados en esta especie pues recurrentemente se fracturaban. El Cuadro 1 presenta los resultados de concentraciones promedio de metales pesados en la madera de las cuatro especies prospectadas.

CUADRO 1. Concentración promedio de metales pesados en las especies prospectadas de la zona de Ventanas.

Especie	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Zn (ppm)	Cd (ppb)	Pb (ppb)
Espino (<i>Acacia caven</i>)	1,70	7,93	1,00	<1	64,70
Quebracho (<i>Senna candolleana</i>)	1,81	9,02	2,09	<1	1296,56
Ciprés (<i>Cupressus macrocarpa</i>)	10,67	37,64	7,92	<1	725,00
Aromo (<i>Acacia sp.</i>)	2,02	15,66	0,96	<1	<1

Como es posible apreciar en el Cuadro 1, la madera del ciprés presentó las mayores concentraciones promedio de Cu, Fe, y Zn. Esta característica, junto al hecho que se encontraron individuos de más de 50 años fue lo que determinó su selección para el estudio, a pesar de no haberse encontrado estudios dendroquímicos en esta especie.

4.2. Construcción de la línea temporal dendrocronológica:

La cronología realizada para los individuos de la especie *Cupressus macrocarpa* entregó un promedio de edad de 69 años para la zona de Ventanas y de 66 años para la zona de Quintay. Se detectaron cinco y cuatro anillos poco definidos y sin continuidad a través de las secciones, respectivamente. Los árboles fueron cortados en el invierno de 2001, por lo tanto, el anillo más externo corresponderá al año 2000. Este sistema de datación fue propuesto para Sudamérica por SCHULMAN (1956).

4.3. Niveles de metales pesados en madera, hojas, corteza y el suelo:

Los promedios obtenidos de Cu, Fe, Pb, Cd, Cr y Al desde 13 grupos de anillos (cada uno representando 5 años) fueron mayores en Ventanas respecto a la zona control. Es importante destacar que del periodo 65 años, solamente 40 corresponden al periodo industrial. Los años previos al año 1960 podría considerarse como línea base (Cuadro 2).

CUADRO 2. Concentraciones de metales pesados en madera de *Cupressus macrocarpa* de las dos localidades de estudio.

Localidad	Cu (n:13) (ppm)		Fe (n:13) (ppm)		Cd (n:13) (ppm)		Pb (n:13) (ppm)		Cr (n:13) (ppm)		Al (n:13) (ppm)	
	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst
Ventanas	1,8	0,58	3,56	1,22	0,22	0,12	1,85	0,61	0,57	0,41	4,63	4,48
Quintay	1,6	0,33	1,77	0,66	0,13	0,06	0,73	0,62	0,11	0,06	1,76	1,36

A diferencia de lo observado en la madera, en las hojas de ciprés se encontró un aumento de cincuenta veces de concentración Cu, evidenciando una falta de absorción por parte de la madera. Las concentraciones de Fe y Cd aumentaron tres, Pb quince y Cr seis veces en las hojas del ciprés respecto a la zona control (Cuadro 3). En las concentraciones de Al no se encontraron claras diferencias.

CUADRO 3. Concentraciones de metales pesados en hojas de *Cupressus macrocarpa* de las dos localidades de estudio.

Localidad	Cu (n:3) (ppm)		Fe (n:3) (ppm)		Cd (n:3) (ppm)		Pb (n:3) (ppm)		Cr (n:3) (ppm)		Al (n:3) (ppm)	
	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst
Ventanas	543,3	204,0	627,5	95,0	0,31	0,10	65,67	21,6	0,6	0,10	405,0	95,8
Quintay	10,8	1,5	195	145,7	0,12	0,02	4,67	2,6	0,1	0,05	561,7	126,0

En la corteza de ciprés todas las concentraciones de metales pesados aumentaron entre 1 a 60 veces, dependiendo del elemento, en Ventanas respecto a Quintay (Cuadro 4).

CUADRO 4. Concentraciones de metales pesados en la corteza de *Cupressus macrocarpa* de las dos localidades de estudio.

Localidad	Cu (n:1) (ppm)	Fe (n:1) (ppm)	Cd (n:1) (ppm)	Pb (n:1) (ppm)	Cr (n:1) (ppm)	Al (n:1) (ppm)
Ventanas	78,70	87,375	0,425	16,405	1,065	74,950
Quintay	3,20	35,025	0,310	3,160	0,240	22,270

Respecto al suelo, Cd, Pb y Cr presentaron mayores concentraciones en Ventanas. En cambio, los niveles de Al, Fe y Cu fueron semejantes entre las dos zonas evaluadas. El pH en Ventanas fue en promedio de 5,3 (0,9 Std. dev) y en Quintay de 6.85 (1,2 Std. dev). La mayor acidez en Ventanas involucra una mayor biodisponibilidad de los metales (GUYETTE, CUTTER y HENDERSON, 1991) (Cuadro 5).

CUADRO 5: Concentraciones de metales pesados en suelo de *Cupressus macrocarpa* de las dos localidades de estudio.

Localidad	Cu (n:3) (ppm)		Fe (n:3) (ppm)		Cd (n:3) (ppm)		Pb (n:3) (ppm)		Cr (n:3) (ppm)		Al (n:3) (ppm)	
	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst	Prom	Dst
Ventanas	75,8	107,7	92,4	45,2	1,38	0,05	29,5	8,3	18,8	1,8	33,1	23,4
Quintay	6,1	0,8	452,8	443,1	0,22	0,05	13,4	0,9	6,8	3,3	1,7	1,8

4.4. Relación entre los análisis dendroquímicos y la información existente de la zona en estudio:

4.4.1. Cobre

A pesar de la alta acumulación de cobre que presentan las plantas y suelos de los alrededores del C.I.V. (CHIANG, 1985; GONZÁLEZ y BERGQVIST, 1986; ACHIARDI, 1991; GONZÁLEZ y REGINA, 1992; HERNÁNDEZ, 1994; DELGADO, 1996; DÍAZ, 1998), no se observaron diferencias claras entre los niveles de Cu presentes en Ventanas respecto a Quintay. Durante los 65 años analizados existieron diferencias aunque no se observaron tendencias a aumentar o a disminuir, oscilando entre 1 a 2,5 ppm (Figura 4A). Este comportamiento también se reportó en *Cryptocaria alba* (DELGADO, 1996), con lo cual se puede inferir que este metal, a pesar del exceso en el ambiente, no se acumula en el xilema.

Lo anterior podría responder a la fuerte unión que tiene este metal con la materia orgánica, localizada especialmente en la superficie del suelo. Esta unión normalmente deja una fracción muy pequeña de cobre biodisponible para las plantas (FERNÁNDES y HENRIQUES, 1991). De este modo, considerando la profundidad de las raíces de los árboles se podría esperar una baja absorción de este elemento.

Este efecto se ha visto reflejado en estudios anteriores realizados en Ventanas. Investigaciones han evidenciado altas concentraciones a los 10 cm (ACHIARDI, 1991), disminuyendo hacia los 20 cm (GONZALEZ e ITE, 1992; GONZALEZ y BERGQVIST, 1986) y a los 30 cm se han reportado los valores más bajos (HERNANDEZ, 1994), coincidiendo con los resultados del presente estudio (Figura 5).

FIGURA 5. Concentraciones de A) Cobre, B) Fierro y C) Plomo en anillos de crecimiento, hojas, corteza y suelo de Cupressus macrocarpa en la localidad de Ventanas y Quintay. 2002 (Ventanas , Quintay ,5 años y desviación estándar).

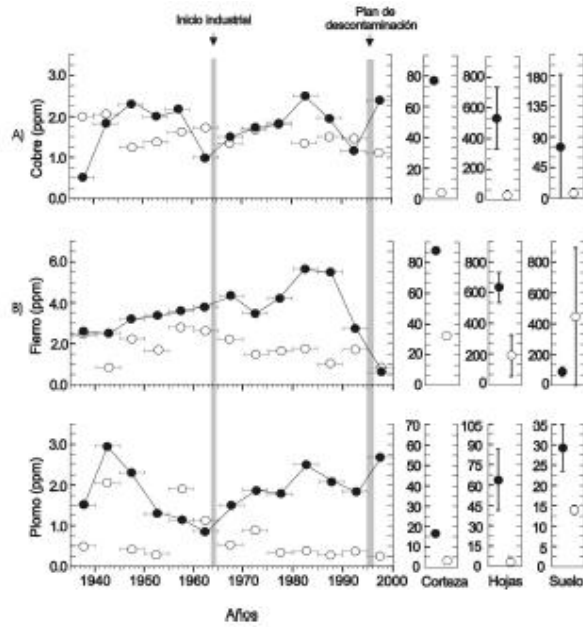
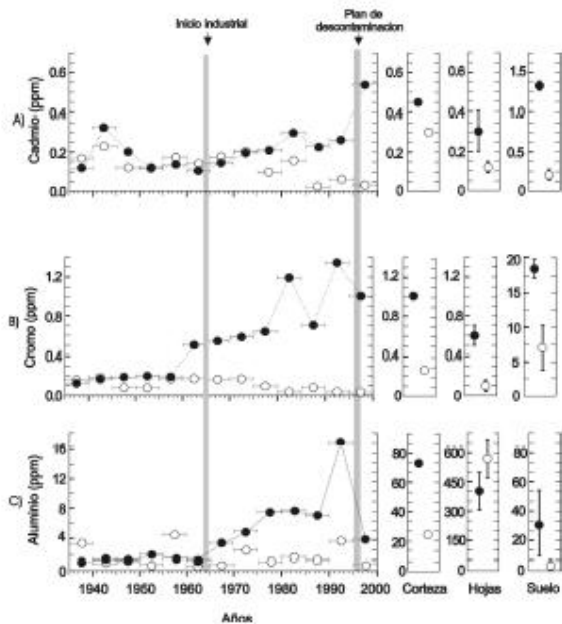


FIGURA 6. Concentraciones de A) Cadmio, B) Cromo y C) Aluminio en anillos de crecimiento, hojas, corteza y suelo de Cupressus macrocarpa en la localidad de Ventanas y Quintay, 2002. (Ventanas , Quintay ,5 años y desviación estándar).



Se detectaron altas concentraciones de Cu en las hojas respecto al área control (Figura 5A). Estos niveles han sido asociados no sólo a lo absorbido por la planta y acumulado en las hojas, sino también a la depositación atmosférica de metales. A pesar del lavado preanalítico realizado a las hojas algunos estudios indican que persisten concreciones cúpricas en la superficie foliar (GONZALEZ y BERGQVIST, 1986; DELGADO, 1996; GINOCCHIO, 1997). También se encontraron fuertes concentraciones en la corteza reafirmando la clara depositación atmosférica ocurrida en la zona de Ventanas.

Las diferencias en el comportamientos de absorción entre las especies podría ser la causa de que el Cu no haya presentado un patrón claro de acumulación en los anillos de ciprés (WATMOUGH, 1999). Algunas especies, como *Pinus* (NAGJ, INJUK y VALKOVIC, 1987), *Picea rubens* (ARP y MANASC, 1987) *Jackpole pine* (LEGGE, KAUFFMANN y WINCHESTER, 1984) y árboles del Parque Metropolitano sí han biomonitorado los aumentos de Cu en sus anillos y estos incrementos fueron asociados a empresas mineras. En cambio especies como *Ulmus hollandica* y *Cedrus atlantica* (TOUT *et al.*, 1977) no presentaron este patrón.

4.4.2. Fierro

Los niveles promedios de Fe en los anillos de ciprés ubicados en Ventanas (3,56 ppm) fueron mas altos que en Quintay (2 ppm) (Figura 5B) y además fueron relativamente

constantes a través de los 60 años biomonitoreados. Solo en los últimos años se vio un leve aumento en las concentraciones de Ventanas.

Las concentraciones de Fe en los anillos no registraron un aumento después del inicio del CIV (1964), a pesar de la alta predominancia de depositación de Fe que determinaron CHIANG *et al.*, (1985)(44,3%) y altos niveles de Fe en suelo reportado por estudios anteriores del CIV.

En cambio, en América del Norte, en estudios realizados en *Pinus echinata*, *Picea rubens* y *Pinus* se encontró aumento de Fe en anillos formados después de la instalación de la fuente contaminadora (ARP y MANASC, 1988; LEGGE, KAUFFMANN y WINCHESTER, 1984; BAES y MC LAUGHLIN, 1984). En estos casos, los motivos de la mayor absorción se atribuyen a los efectos de bajos pH en los suelos.

Las concentraciones de Fe en las hojas fueron mayores en Ventanas que en Quintay (Figura 5B). Así mismo, se encontraron altas concentraciones en la corteza. Estos altos niveles evidencian un alto nivel de depositación atmosférica (CHIANG *et al.*, 1985). Lamentablemente, no se cuenta con registros de concentraciones de Fe en madera ni en hojas de árboles en la zona de estudio.

En el caso del suelo, estudios anteriores, han determinado niveles que fluctúan entre las 20 a 30 ppm, encontrándose menores cantidades en profundidad. (ACHIARDI, 1991; DIAZ, 1998). En este estudio no se encontraron diferencias significativas con la zona control y los valores fluctuaron entre 90 a 400 ppm (Figura 5 B).

4.4.3. Cadmio, Plomo y Cromo

Los niveles de Pb y Cr aumentaron en forma constante en anillos de ciprés formados después de la instalación del CIV (Figura 5C y 6B), los niveles de Cd se incrementaron sólo después de 1975. En el caso del Pb se observaron altas concentraciones antes de 1964 (Figura 5A), este comportamiento se ha reportado en árboles con alto grado de traslocación radial (HAGEMEYER y WEINAND, 1995; HAGEMEYER y HÜBNER, 1999; LATIMER *et al.*, 1996; WATMOUGHT, 1999).

En Quintay, en cambio, los niveles de estos metales se mantuvieron constantes los 65 años analizados y en niveles bajos en suelo, hojas y corteza (Figura 5C, 6A y 6B).

Estos tres metales son considerados elementos no esenciales y contaminantes de origen antropogénico (VIMMERSTEDT y McCLENAHEN, 1995; BOHN, McNEAL, O'CONNOR, 1993) lo que implica que los cambios registrados en Ventanas serían consecuencia de las emisiones de metales pesados y sulfuro del CIV.

Estos cambios se pueden atribuir al bajo pH que presenta el suelo de Ventanas sobre la biodisponibilidad de estos metales, producto de la alta depositación de sulfuro en los alrededores del CIV (GUYETTE, CUTTER y HENDERSON, 1991).

Por otro lado, CHIANG *et al.*, (1985) determinaron que Cd presenta sólo una predominancia de 0.29 % y Pb de 4,32 % de los metales depositados. Este valor indica una baja depositación de estos metales, a pesar de lo cual, el árbol pudo detectar los aumentos de concentración después de 1964. Además, esta depositación se vio reflejada en los altos niveles encontrados de Pd y Cd en las hojas, suelo y corteza en Ventanas.

En el caso del Cd, a pesar que las concentraciones en los anillos fueron relativamente mayores en Ventanas, estuvieron cerca de lo no detectable. GUYETTE, CUTTER y HENDERSON (1991) y WATMOUGHT, HUTCHINSON y EVANS (1997) también encontraron valores bajos en anillos de *Juniperus virginiana* y *Acer pseudoplatanus*, siendo indetectables al alejarse de la fuente contaminadora. En el caso de Ventanas, al detectarse niveles de Cd indica que el lugar de muestreo se encontraba en una zona de alta contaminación. SCHAUMLOFFEL, FILBY y MOORE (1998 y 1996), también pudieron usar los anillos de los árboles como biomonitores de los cambios en la acidificación y niveles de Cd ocurridos en el lago Roosevelt, Estados Unidos.

Al determinar las concentraciones de Pb en los anillos de *Quercus* también se ha podido determinar el inicio y el cierre de una refinería plomo en Alabama (ANDERSON y CHAPPELKA, 2000),

En el caso del Cr, hay estudios similares como el de *Pinus* (NAGJ, INJUK y VALKOVIC, 1987) y en *Picea rubens* (ARP y MANASC, 1988) que reportaron altos índices de este metal por las emisiones, tanto de Cr como SO₂, de una termoeléctrica. El SO₂ al caer al suelo lo acidifica y los metales aumentan su disponibilidad para ser absorbidos por las plantas (FORGET y ZAYED, 1995).

Los niveles de Pb, Cd y Cr encontrados antes de 1964 representarían la línea base de contaminación en Ventanas (Figura 5).

4.4.4. Aluminio

En las dos localidades, los anillos anteriores a 1964 presentaron niveles similares (Figura 6C). Luego, en Ventanas los anillos formados durante el funcionamiento de la industria presentaron aumentos en las concentraciones de Al, llegando a 17 ppm entre 1990 y 1995. En cambio, los niveles en Quintay se mantuvieron constantes (alrededor de 4 ppm) los 64 años analizados.

El Al no ha sido reportado como un metal emitido por el CIV y tampoco se encontró acumulación en las hojas, por lo cual se postula que el Al pesquisado en los anillos no proviene de la depositación atmosférica, sino más bien de un aumento de la biodisponibilidad del Al en el suelo. Este aumento podría deberse por un aumento de la acidez (GUYETTE, CUTTER Y HENDERSON, 1991) producto de la precipitación de sulfuro en el suelo (BOHN, McNEAL, O'CONNOR, 1993). El sulfuro ha sido reportado como un compuesto producido y emitido por el CIV siendo disminuido en los últimos años (MENA, 1996).

En otros estudios también se ha determinado que los incrementos de Al en los anillos fueron producto de aumentos de la acidez del suelo y no de las emisiones de Al a la atmósfera (FORGET y ZAYED, 1995).

En todos los metales analizados no se pudo evaluar los cambios en la tecnología del CIV para la disminución de las emisiones de MP y sulfuro, ya que se han realizado principalmente desde 1997, por lo cual sólo fueron tres anillos los formados con bajos niveles de metales pesados.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Mediante *Cupressus macrocarpa*, fue posible construir cronologías que alcancen temporalmente hasta el periodo de línea de base del CIV, pudiendo, de este modo, servir de biomonitoreadores del impacto ambiental generado durante sus 40 años de funcionamiento.

Considerando que los niveles más altos de Cd y Cr fueron registrados por los anillos que crecieron con posterioridad a la puesta en marcha del CIV, es posible concluir que la metodología propuesta puede ser aplicada en el monitoreo de estos elementos, que, por no ser nutrientes esenciales de la planta, son acumulados y preservados en el xilema.

Contrariamente, el Cu y Fe, al ser elementos primordiales para el desarrollo de la planta, no respondieron a la contaminación ambiental, manteniéndose relativamente constantes antes y después de la instalación del CIV. Esto último, a pesar de que las altas concentraciones detectadas en hojas, corteza y suelo demuestran una elevada presencia de estos metales en el ambiente.

Aun cuando el Al no ha sido reportado en las emisiones CIV, su incremento en los anillos después de la instalación de la usina, respondería al proceso de acidificación del suelo debido a sus emisiones sulfurosas.

En resumen, se concluye que la metodología dendroquímica propuesta en esta investigación para biomonitorear temporalmente la contaminación del CIV, sólo es factible realizarla sobre metales que no constituyan elementos esenciales para la planta.

BIBLIOGRAFIA

ACHIARDI, M. 1991. Niveles de concentración de metales pesados en suelos de la comuna de Puchuncaví. Viña del mar. Tesis Téc. Quim. Anal. UTFSM. Sede José Miguel Carrera. 118p.

ALFARO, L. 1988. Cambio en el uso de suelo agrícola por efecto de la contaminación ambiental. Caso de estudio: Comuna de Puchuncav. Tesis de grado en geografía. Santiago. Universidad Católica de Chile. 135p.

- ANDERSON, S. and CHAPPELKA, A. 2000. Lead accumulation in *Quercus nigra* and *Quercus velutina* near smelting facilities in Alabama, U.S.A. *Water, Air and Soil pollution* 118(1): 1-11.
- ARP, P. and MANASC, J. 1987. Red spruce stands downwind from a coalburning power generator: Tree-ring analysis. *Canadian Journal Forest Research* 18: 251-264.
- BAES, C. and MCLAUGHLIN, S. 1984. Trace elements in tree rings: Evidence of recent and historical air pollution. *Science* 224: 494-497.
- BERISH, C. and RAGSDALE, H. 1985. Chronological sequence of concentrations in wood of *Carya* spp. in the Southern Appalachian Mountains. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 477-483.
- BOHN, H., McNEAL, B., O'CONNOR, G. 1993. *Química del suelo*. Mexico, D.F. Limusa. 358p.
- BRUNO, C. 1992. El viento y el relieve como factores geográficos determinantes en la dispersión de contaminantes derivados de los procesos productivos de cobre (comuna de Puchuncaví, V región.) Tesis Magíster en Asentamientos Humanos y Medio Ambiente. Santiago, Universidad Católica de Chile. 103 p.
- CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS NATURALES. 1997. Estudio agrológico. V Región. Santiago, CIREN. 357p. (Vol 2) (Publicación N° 116).
- CHIANG, J., CORNEJO P., LÓPEZ J., ROMANO S., PASCUAL J. y CEA M. 1985. Determinación de cadmio, cobre, manganeso, plomo, hierro, cinc y arsénico en sedimento atmosférico, en la zona de Quintero, V región, Valparaíso, Chile. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química* 30: 139-158.
- CORVALAN, J., HERVO, F. and GODOY, E. 1976. Estudio geológico del área de Quintay Punta Gallo, Provincia de Valparaíso, V Región. Santiago, U. de Chile. Departamento de Geología. 23 p.
- CREPIN, J. and JOHNSON, R. 1993. Soil sampling for environmental assessment. In: Carter, M. *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, Florida, USA. CRC Press. pp 5-18.
- CUTTER, B. E. and GUYETTE R. P. 1993. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting species choice in dendrochemistry studies. *Journal Environmental Quality* 22: 611-619.
- DELGADO, L. 1996. Estudio comparativo de contenido de cobre en bosques de clima mediterráneo de Chile central Tesis Magíster. Santiago, Universidad Católica de Chile, Facultad de Ciencias. 80 p.

- DEWALLE D., TEPP J., SWISTOCK B., SHARPE W. and EDWARDS P. 1999. Tree-ring cation response to experimental watershed acidification in west virginia and maine. *Journal Environmental Quality* 28: 299-309.
- DÍAZ, J. 1998. Contenido metálico en suelos de la comuna de Puchuncaví. Tesis Tec. Quím. Anal. Viña del Mar, Universidad Técnica Federico Santa María, Sede José Miguel Carrera. 80 p.
- DONOSO, C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Variación, estructura y dinámica. Santiago, Universitaria. 403 p.
- ESPINOSA, V. y RIQUELMI, D. 1983. Evaluación socioeconómica de una alternativa de solución al problema de contaminación de la comuna de Puchuncaví. Tesis de grado en Ciencias Económicas. Valparaíso, Universidad Católica de Valparaíso.
- FERNANDES, J. y HENRIQUES, F. 1991. Biochemical, physiological and structural effects of excess copper in plants. *The Botanical Review* 57: 246-273.
- FORGET, E. and ZAYED, J. 1995. Tree-ring analysis for monitoring pollution by metals. In: Lewis, T. *Tree rings as indicators of ecosystem health*. Boca Raton, Florida, USA. CRC Press. pp. 157-175.
- FUENZALIDA, H. 1956. Campos de dunas en la costa de Chile central. XVIII Congreso Internacional de Geografía. Rio de Janeiro. pp 233-240.
- GANA, P., WALL, R. y GUTIERREZ, A. 1996. Mapa geológico del área de Valparaíso-Curacaví, Región de Valparaíso y Metropolitana. Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería (Chile), Mapas Geológicos, N°1, Escala 1:100.000.
- GARBE-SCHONBERG, C., REIMANN, C. and PAVLOV, V. 1997. Laser ablation ICP-MS analysis of tree-ring profiles in pine and birch from N Norway and NW Russia – a reliable record of the pollution history of the area. *Environmental Geology* 32(1):9-16.
- GINOCCHIO, R. 2000. Effect of a copper smelter on a grassland community in the Puchuncaví valley Chile. *Chemosphere* 41: 15-23.
- _____.1997. Aplicabilidad de los modelos de distribución espacio temporales de la vegetación en ecosistemas terrestres sujetos a procesos de contaminación. Tesis Doctoral en Ciencias biológicas, mención ecología. Santiago, Universidad Católica de Chile. 208 p.
- GOMEZ, J. 1956. *Geocronología*. 2ª Ed. Barcelona, Ediciones Omega. 523p.
- GONZÁLEZ, S e ITE, R. 1992. Acumulación metálica en suelos del área bajo

influencia de las chimeneas industriales de ventanas (provincia de Valparaíso, V Región). Agricultura Técnica 50: 214-219.

_____.y BERGQVIST E. 1986. Evidencias de contaminación con metales pesados en un sector del secano costero de la V región. Agricultura técnica 46: 299-306.

GUYETTE, R. P., CUTTER B. and HENDERSON G. S. 1991. Long-term correlations between mining activity and levels of lead and cadmium in tree-rings of red cedar. Journal Environmental Quality 20: 146- 150.

HAGEMEYER, J. and WEINAND, T. 1996. Radial distributions of Pb in stems of young sprucetrees (*Picea abies* [L.] Karst.) grown in contaminated soil. Tree Physiology 16: 591-594.

_____. y HÜBNER, C. 1999. Radial distributions of pH in stems of 6-yearold spruce trees (*Picea abies* (l.) karst.) grown for 2 years in pH contaminated soil. Water, Air, and Soil Pollution 111: 215-224.

HALL, G. S. and NEUMANN M. 1984. Element analysis of *Pinus rigida* intraannual growth rings by photon-induced x-ray emission. Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry 87: 317-330.

HERNÁNDEZ, P. 1994. Distribución de Cd, Pb, Zn, Cu, Mn y As en suelos de la zona de Puchuncaví V región. Tesis Tec. Quim. Anal. Viña del Mar, Universidad Técnica Federico Santa Maria, Sede José Miguel Carrera. 134 p.

INSTITUTO NACIONAL FORESTAL (INFOR), (4 de Febrero de 2003). Tecnología y gestión forestal para pequeños y medianos propietarios, (Online) http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/map/6-m.htm.

LAGOS, G. e IBAÑEZ R. 1993. Recopilación y análisis de estudios sobre contaminación e impacto ambiental en la comuna de Puchuncaví. Estudio línea base. Proyecto Ambiental Ventanas. Santiago, Ministerio de Minería. 215 p.

LATIMER, S., DEWALL, M., THOMAS, CH., ELLGAARD, E., KUMAR, S. and THIEN, L. 1996. Dendrochromology and heavy metal deposition in tree rings of balcypres. Journal of Environmental Quality 25: 1411- 1419.

LEGGE, A., KAUFFMANN, H. and WINCHESTER, J. 1984. Tree rings analysis by pixe for a historical record of soil chemistry response to acidic air pollution. Nuclear Instrumental and Methods in Physics Research B3: 507-510.

LIANG, J. and KARAMANOS, R. 1993. DTPA-Extractable Fe, Mn, Cu, and Zn. In: Carter, M.. Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton, Florida, USA. CRC Press. pp 5-18.

- LÓPEZ, R. 1963. Reconocimiento y capacidad de uso de suelos comuna de Puchuncaví, provincia de Valparaíso. Chillan, Ministerio de Agricultura. Dirección de Agricultura y Pesca. 29 p.
- MATUSSIEWICZ, H. and BARNES R. M. 1985. Tree ring wood analysis after hydrogen peroxide pressure decomposition with inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and electrothermal vaporization. *Analytical chemistry* 57: 406-411.
- MENA, C. 1996. Análisis de la situación ambiental en la zona de Puchuncaví producida por la minería y sus perspectivas. Tesis Ingeniería Civil Industrial, mención Química. Valparaíso, Universidad Técnica Federico Santa Maria. 82 p.
- MORALES, M., RICARDO V., GRAU H., VILLAGRA P., BONINSEGNA J., RIPALTA A. y PAOLINI L. 2001. Potencialidad de *Prosopis ferox griseb* (*leguminosae*, subfamilia: *Mimosoideae*) para estudios dendrocronológicos en desierto de alta montaña. *Revista chilena de historia natural* 74 p.
- MULGREW, A. and WILLIAMS, P. 2 de Noviembre del 2002. Biomonitoring of air quality using plants, (on line). <http://www.umweltbundesamt.de/hocc/titel/titel21.htm>.
- NAGJ, M., INJUK J. and VALKOVIC V. 1987. Trace element concentration variations in the tree rings. *Nuclear Instrumental and Methods in Physics Research*. B22: 465-472.
- POZO, V. 1993. Determinación de unidades con deterioro ambiental. Caso de estudio bahía Quintero. Tesis Lic. en Geografía Santiago, Universidad Católica de Chile. 95 p.
- QUINTANILLA, V. 5 de Noviembre del 2002. Aplicación de la cartografía diacrónica para el análisis de los efectos de los incendios en formaciones vegetales, (online) <http://www.ucv.cl/web/geografía/comis1.htm>.
- RAUNEMAA, T., HANNIKAINEN M., KULMALA M. and HARI P. 1987. Pine bark PIXE analysis. *Nuclear Instrumental and Methods in Physics Research* B22: 473-475.
- ROMO-KROGER, C. M., AVILA M. J., EATON L. C. and LOPEZ I. A. 1996. Analysis of contaminating elements in tree rings in Santiago. *International Journal of PIXE* 6: 331-337.
- RIVANO, S. SEPÚLVEDA, P. BORIS R. y ESPÍÑEIRA, D. 1993. Hojas quillota y portillo. V Región. Santiago, Servicio nacional de geología y minería Carta geológica de Chile, N° 73.
- RUIZ, R. 2001 Nutrición vegetal, fertilizantes y fertilización. In: SOQUIMICH ed. *Agenda del salitre*. Santiago. SOQUIMICH. 1515 p.

- SANTIBAÑEZ, A. y URIBE, J. 1990. Atlas agroclimático de Chile. Región V y Metropolitana. Santiago, Universidad de Chile. 65 p.
- SCHAUMLOFFEL, J. C., FILB R. H. and MOORE B. C. 1998. Ponderosa pine trees as historical monitors of zinc and cadmium pollution. *Environmental Quality* 27: 851-859.
- _____. 1996. INAA of tree rings for dendrochemical studies. *Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry* 207: 425-435.
- SCHULMAN, E. 1956. Dendroclimatic change in semiarid America. University of Arizona. Press, Arizona.
- SHEPPARD P. and THOMPSON T. 2000. Effect of extraction pretreatment on radial variation of nitrogen concentration in tree rings. *Journal of Environmental Quality* 29: 2037-2042.
- SOON, Y. and ABBOUD, S. 1993. Cadmium, Chromium, Lead, and Niquel. In: Carter, M. Soil sampling and methods of analysis. Boca Raton, Florida, USA. CRC Press. pp 5-18.
- STOKES M.A. and T.L. SMILEY. 1968. An introduction to tree ring dating. The University of Chicago Press, Chicago 73 p.
- TOUT, R. E., GILBOY W. B. and SPYROU N. M. 1977. Neutron activation studies of trace elements in tree ring. *Journal of Radioanalytical Chemistry* 37: 705-715.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (4 de Febrero de 2003). Fire Effects Information System, (Online) <http://www.fs.fed.us/database/feis/>.
- WATMOUGH, S. 1999. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis. *Environmental pollution*. 106: 391-403.
- _____. HUTCHINSON, T. and EVANS, R. 1997. Application of laser ablation inductively coupled plasma - mass spectrometry in dendrochemical analysis. *Environmental Science Technology* 31: 114-118.
- VIMMERSTEDT, J.P. and McCLENAHEN J.R. 1995. Dendrochemistry of tuliptree. In: Timothy E. Lewis, Ed. CRC press. Tree rings as indicators of ecosystem health. Boca Raton, Florida, USA. CRC Press. pp157-175.
- ZOLLNER, O., MEINS M. and OLIVARES M. 1994. Plantas hiperacumuladoras de metales pesados Proyecto Ambiental Ventanas (P.A.V.). Valparaíso, Universidad Católica de Valparaíso, Instituto de Biología. 23 p.