

# **UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA**

## **DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DEL CILINDRO CENTRAL DEFECTUOSO EN TROZAS PODADAS DE PINO RADIATA (*Pinus radiata* D.DON), MEDIANTE ATENUACIÓN DE RADIACIÓN GAMMA**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero Forestal

**ANDRÉS EDUARDO BARRIOS RODRÍGUEZ**

Profesores Guía: Profesora SRA. MARÍA INÉS DINATOR RAMÍREZ  
Magíster en Ciencias Físicas, Universidad de Chile

Profesor SR. JOSÉ TOMÁS KARSULOVIC CARRASCO  
Ingeniero Civil Mecánico, Universidad Técnica del Estado (UTE)  
Ingeniero de L' Ecole Supérieure du Bois (Francia)

**SANTIAGO – CHILE  
2004**

# UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA

## DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DEL CILINDRO CENTRAL DEFECTUOSO EN TROZAS PODADAS DE PINO RADIATA (*Pinus radiata* D.DON), MEDIANTE ATENUACIÓN DE RADIACIÓN GAMMA

Memoria para optar al Título

Profesional de Ingeniero Forestal

**ANDRÉS EDUARDO BARRIOS RODRÍGUEZ**

### Calificaciones:

Prof. Guía Sra. María Inés Dinator Ramírez	7.0	_____
Prof. Guía Sr. José Tomás Karsulovic Carrasco	6.8	_____
Prof. Consejero Sr. José Roberto Morales Peña	7.0	_____
Prof. Consejero Sr. Javier González Molina	6.7	_____

**SANTIAGO – CHILE**  
**2004**

## AGRADECIMIENTOS

A mis Padres: a Hugo H. Barrios Castro, de quien no tengo otro sentimiento que el orgullo de ser su Hijo y por lo cual doy gracias a Dios. Gracias por entregarme tus convicciones que guiarán mi vida siempre. A Ana L. Rodríguez, a quien le debo todas las energías necesarias para lograr este objetivo, en los momentos más difíciles del proceso. Tu fortaleza es un ejemplo que sin duda pavimentará mi camino hacia mi realidad futura. Gracias por tu calidez y tu humanidad.

A mis Profesores Guías y Consejeros: a Don Tomás Karsulovic, María Inés Dinator, José R. Morales y Javier González. Gracias por la confianza depositada en mí, por la paciencia y la voluntad de entregar conocimiento. Debo decir que la labor de ustedes, grafica realmente el concepto de Universidad. Por lo mismo, gracias a aquellas acciones, continúo con la convicción de que es posible hacer Ciencia, aún en las condiciones adversas de hoy.

A quien le debo parte fundamental de mi formación como ser humano y profesional: a mi profesora, amiga y madre adoptiva Matilde López M. Siempre estaré agradecido por su ayuda incondicional, por el refugio brindado en un medio escaso de apoyo, por enseñarme a amar la Ciencia y la Naturaleza que nos rodea, por moldear mi espíritu y por dejar una marca indeleble en mis convicciones como persona.

A una persona de cuya verdadera generosidad siempre estaré agradecido: a Don José Flores. Don Pepito siempre recordaré tu inestimable colaboración. Gracias por tu cordialidad, tu disposición y por sobre todo gracias por tu respeto y sentido común en aquellas instancias y espacios donde no lo habían.

Con quienes compartí codo a codo esta etapa: Ricardo Pavez, Ricardo Méndez y Marcelo Ramírez; finalmente estamos los cuatro ¡¡¡LISTOS!!! Deseo agradecer también a las valiosas personas que me brindaron acogida en el Laboratorio de Haces Iónicas del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias y por supuesto a quienes laboran en el Departamento de Ingeniería de la madera, en especial a Luis Espina, Patricio Vergara y Omar Gutiérrez (sin ustedes este trabajo no habría concluido).

Finalmente deseo expresar mis sinceros agradecimientos a Bosques Arauco S.A. en la persona de don Fernando Álvarez y a FONDECYT. Indudablemente sin este tipo de soporte, muchas memorias de título no podrían llevarse a cabo o no tendrían mayor proyección.

## DEDICATORIA

Durante el tiempo de realización de esta memoria de título, han quedado explícitas unas ideas fundamentales que hoy cobran significancia para mí: sentido común, trabajo en equipo y consecuencia. No pocos fueron los obstáculos que encontré en el principio de este proceso, que finaliza con esta concreción. Dichas dificultades encuentran hoy una explicación, en la falta de aquellas ideas expuestas.

Por ello me he dado cuenta que el sentido común, el trabajo en equipo y la consecuencia, son recursos valiosos y cardinales a los que tenemos que apelar para superar los escollos que se presentan a diario. Ello es obvio, aunque a veces no lo parece, basta sólo con observar a nuestro alrededor para darnos cuenta de que todos formamos parte de un conjunto armónico. Estudiamos el ecosistema, analizamos relaciones intrincadas entre los distintos seres vivos que acaparan nuestro interés, utilizamos una visión holística para entender la naturaleza que nos rodea... y sin embargo carecemos a menudo de la capacidad de integrarnos mutuamente, respetarnos y darnos cuenta que todos formamos parte importante de algo mucho mayor y de potencialidades insospechadas.

Sin embargo existe optimismo, aún perduran espacios donde se pueden desarrollar las ideas en conjunto y sin discriminación. Son instancias de crecimiento, donde a pesar de existir diversidad de conocimiento y especialización, aun es posible aportar y formar parte de un esfuerzo mancomunado. La dinámica de la vida nos indica que una visión individualista, esta condenada a la extinción. Es fácil observar aquello, sin embargo soy testigo de la visión contraria y ello es suficiente para tener esperanzas.

Deseo dedicar este trabajo a todas las personas que inspiran, practican y que hacen partícipes a sus alumnos de esta hermosa esperanza... ¡¡¡A USTEDES!!!

## INDICE

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Antecedentes Pino Radiata	3
3.1.1. Económicos	3
3.1.2. Comerciales	5
3.1.3. Madera de Pino Radiata	7
3.2. Densidad en Madera de Pino Radiata	8
3.2.1. Generalidades	8
3.2.2. Factores de Variabilidad	10
3.3. Defectos en Madera de Pino Radiata	15
3.3.1. Nudos	15
3.3.2. Madera de Reacción	16
3.4. Tratamientos Silvícolas – Poda	17
3.4.1. Definición	17
3.4.2. Objetivos Económicos	17
3.4.3. Objetivos Secundarios	17
3.4.4. Estrategia en la Poda	18
3.4.5. Metodología	18
3.4.6. Precauciones	21
3.5. Cilindro Central Defectuoso	21
3.5.1. Diámetro Sobre Muñón	22
3.5.2. Diámetro de Rama	24
3.5.3. Diámetro Sobre Oclusión	24
3.6. Radiación Gamma – Antecedentes	27
3.6.1. Radiación Electromagnética	27
3.6.2. Radioactividad	28
3.6.3. Radiación gamma	30
4. MATERIAL Y MÉTODO	37
4.1. Material	37
4.1.1. Material de Ensayo	37
4.1.2. Equipos de Aserrío y Corte	38
4.1.3. Equipos de Caracterización Física	39
4.1.4. Equipos Sistema Espectroscópico Gamma	39
4.2. Método Experimental	45
4.2.1. Acondicionamiento Material de Estudio	45
4.2.2. Caracterización Física del Material	45
4.2.3. Calibración Sistema Espectroscópico Gamma	48

4.2.4.	Determinación del Coeficiente de Atenuación Másico en Madera Verde de pino radiata $\mu\rho$ .	53
4.2.5.	Simulación de Irradiación de Trozas con Defecto	55
4.2.6.	Análisis de Factor de Build - Up	58
4.2.7.	Irradiación de Trozas.	60
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	61
5.1.	Caracterización Física	61
5.1.1.	Contenido de Humedad	61
5.1.2.	Densidades	65
5.2.	Calibración Sistema Espectroscópico Gamma	71
5.2.1.	Estabilidad Temporal	71
5.2.2.	Alineación Angular de la Fuente	77
5.2.3.	Verificación Relación: "Distancia Fuente – Detector" e Intensidad	78
5.2.4.	Análisis del Efecto de la Geometría de las Muestras (Atenuación)	79
5.2.5.	Determinación del Factor de Build – Up	83
5.3.	Determinación del Coeficiente de Atenuación Másico en Madera Verde de Pino Radiata.	85
5.4.	Simulación de Irradiación de Trozas con Defecto	87
5.5.	Resultados Irradiación Trozas	92
5.5.1.	Atenuación en Troza 1	92
5.5.2.	Atenuación en Troza 2	96
6.	CONCLUSIONES	100
7.	RECOMENDACIONES	101
8.	BIBLIOGRAFÍA	102
9.	ANEXOS	105
10.	APÉNDICES	107

## RESUMEN

El estudio tiene por finalidad analizar la factibilidad de la detección del Cilindro Central Defectuoso en trozas podadas de *Pinus radiata* (D.Don.), mediante atenuación de radiación gamma. Tema que se encuentra inserto en el proyecto de investigación FONDECYT 1990680. Para llevar a cabo este trabajo, se contó además con la colaboración de la empresa Bosques Arauco S.A., la cual facilitó el material de estudio consistente en dos trozas comerciales de una longitud aproximada de 5.2 metros, provenientes de un mismo individuo de una plantación de 24 años.

El material fue caracterizado en sus propiedades físicas (densidades) y controlado en los contenidos de humedad a lo largo de todo el estudio, ello con la finalidad de verificar las posibles pérdidas de humedad, hecho que influye en la capacidad atenuadora del material. Así, la caracterización física antes y después de la etapa de irradiación de las trozas, evidenció una pérdida moderada de humedad de un 22% y 12.1% para las Trozas 1 y 2 respectivamente.

Paralelamente se llevó a cabo la puesta a punto del nuevo sistema espectroscópico instalado en el Laboratorio de Haces Iónicos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. Dicho proceso fue finalizado satisfactoriamente determinando una geometría apropiada para la etapa de irradiación, lográndose un valor muy cercano a uno (valor ideal) para el factor de "Build – Up".

En la etapa de determinación del coeficiente de atenuación másico ( $\mu_p$ ) en madera de pino radiata, se comprobó que las pérdidas de humedad producidas durante el período de manipulación del material, fueron estadísticamente significativas para un valor de confianza del 95%.

Con el objetivo de disponer de antecedentes previos del efecto de las singularidades (nudos) en la atenuación, se procedió a simular la troza con recipientes plásticos. Ello permitió apoyar la etapa de comparación de las atenuaciones reales en las trozas.

Una vez completadas las etapas anteriores, se procedió a irradiar las trozas en planos paralelos a partir de su base a diferentes alturas del soporte de muestras en el banco de pruebas (Troza 1: 5 cm. – 8 cm. – 15 cm. y Troza 2: 8 cm. – 10 cm. – 12 cm.), empleando un tiempo de colección de 220 segundos por lectura. Esta información expresada en atenuación del material y singularidades se contrastó con las posiciones reales del defecto (nudo) mediante la disección transversal y progresiva de las trozas, encontrándose en general, subestimaciones del Cilindro Central Defectuoso en 0.5 cm. como mínimo y 2.9 cm. como máximo.

El hecho anterior permitió concluir la factibilidad del método para determinar el defecto nudo en trozas de tamaño comercial, aunque su menor grado de eficiencia no es la óptima producto de los tiempos empleados en la colección de los datos requeridos en cada irradiación. No obstante la disminución en los tiempos de análisis, puede lograrse al emplear trozas de menor diámetro o adoptando fuentes radioactivas más intensas.

## SUMMARY

The main objective of this study carried out, is the feasibility analysis of gamma ray attenuation method to detect the Defect Core Size on commercial *Pinus radiata* (D.Don) pruned logs. To make possible the beginning of this work, Bosques Arauco gave all material. It consists in two logs from the same 5.2 mt. length individual that was obtained from a 24 years old forest destined to Bosques Arauco's research programs.

The material was characterized in its physical properties (density and humidity contents) along all the study in order to verify the loss of humidity, because it has certain influences over attenuation capacity for several material, including wood. Results for this stage showed moderate humidity loss: 22% and 12.1% for log 1 and log 2 respectively.

In the meantime, calibration activities of the spectroscopy system were carried out at the Ionic Beams Laboratory, Physics Department, Faculty of Science, Universidad de Chile. This step was successfully completed, achieving a good geometry for irradiation phases. A Build Up factor value around 1, where 1 is an ideal situation, was achieved.

In the mass attenuation coefficient  $\mu_p$  determination stage for radiata pine green wood, analysis significant statistical differences between different humidity states were found, for 95% confidence level.

After that, simulations procedures were made, to prepare irradiations steps and to support it. Some plastic recipients (3) and other plastics devices were used to reproduce the logs with knots inside.

Following previous stages, the two logs were irradiated at different heights levels; log 1: 5 cm. – 8 cm. – 15 cm and log 2: 8 cm. – 10 cm. – 12 cm.

The collecting time set to each measurement was 220 seconds. This stage gives valuable information, to determine the estimated position of defect according to its real position on the log. The minimum sub-estimation for defect was 0.5 cm. and maximum was 2.5 cm.

This work showed that the method is feasible to determine the defect in commercial logs. Although its efficiency is less than desirable, the analysis can be done in shorter times using thinner material than this, or using more intense radioactive source.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el marco de un sector dinámico e importante en la generación de divisas para Chile como el forestal, la industria ligada al pino radiata ha mostrado una clara tendencia al aumento sostenido de la producción, en particular, de madera libre de nudo. Ello involucra necesariamente un aumento en la superficie de los bosques de la especie destinada a manejo intensivo, a fin de satisfacer mercados cada vez más exigentes por maderas de alta calidad.

Así, las principales empresas forestales del país han adoptado hace ya tiempo el desafío que significa la maximización en la obtención de madera libre de nudos, mediante la aplicación y el perfeccionamiento de tratamientos, tales como la poda.

Este tratamiento entendido como actividad previa y necesaria, que involucra la eliminación de ramas vivas o muertas del árbol, permitirá la producción de madera libre de nudos una vez que el crecimiento diametral del árbol cubre la zona de defectos producida (nudos, cara del muñón, cubierta callosa, profundidad de oclusión, etc.), la cual queda así confinada a un cilindro central respecto al volumen total del fuste. De este modo, una adecuada programación de las podas según las posibilidades del medio y de los recursos económicos permite controlar la dimensión de esta zona defectuosa conocida como Cilindro Central Defectuoso (CCD).

En cuanto a la ubicación y mensura del CCD, la atenuación de radiación gamma es una alternativa real para identificar y posicionar el defecto, sin la necesidad de realizar ensayos destructivos. Al respecto, particularmente positivas son las experiencias que se tienen en relación a las investigaciones sobre el empleo de técnicas basadas en radiaciones ionizantes, acerca de su capacidad para detectar defectos internos en trozas. Destacan en este ámbito los avances realizados por instituciones extranjeras y nacionales sobre el tema; como por ejemplo lo realizado por el Laboratorio de Productos Forestales del Servicio Forestal de Estados Unidos, el Instituto de Investigación Forestal del Servicio Forestal de Nueva Zelanda, y en particular el Departamento de Ingeniería de la Madera en conjunto con el Laboratorio de Haces Iónicas de la Facultad de Ciencias, ambos de la Universidad de Chile.

Así, la presente memoria de título se inserta en la línea de investigación abierta por el Departamento de Ingeniería de la Madera, en el proyecto de investigación financiado por **FONDECYT N ° 1990680**, el que tiene como uno de sus objetivos principales el análisis de factibilidad en la determinación del Diámetro de Cilindro Central Defectuoso en trozas de pino radiata mediante pruebas no destructivas, en particular atenuación de radiación gamma.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar la factibilidad de aplicación de la atenuación de radiación gamma en la determinación del Diámetro de Cilindro Central Defectuoso en *Pinus radiata* D. Don.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los valores de los parámetros experimentales atinentes a la técnica de radiación gamma, en relación con las características del material en estudio.
- Estudio del grado de eficiencia de la técnica aplicada para detectar el CCD.

### 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. ANTECEDENTES SOBRE PINO RADIATA (D.Don)

##### 3.1.1. ECONÓMICOS

Durante el año 2002 las exportaciones forestales llegaron a US\$ 2.301 millones, lo que refleja un aumento respecto al año 2001 cercano al 4.3%. Este hecho puede considerarse como un éxito, debido a la difícil coyuntura mundial en materia económica. Este escenario puede compararse con otros, al analizar una evolución de los montos exportados, en la Figura 3 – 1.

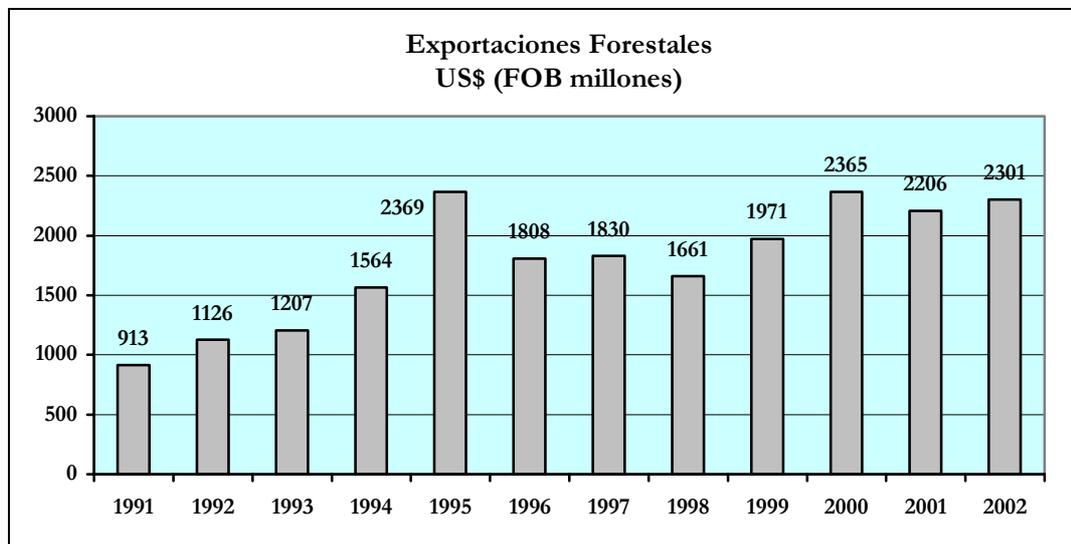


Figura 3 – 1: Montos de las exportaciones Forestales Chilenas. (Fuente: INFOR, 2003)

Dichas exportaciones estuvieron influenciadas por el precio de la pulpa blanqueada, principal producto de exportación del sector. De hecho, si se considera el promedio anual, el precio de la tonelada de pulpa blanqueada de pino radiata sufrió una baja de 7.8% respecto del año 2001. Igual situación experimentó el precio para la pulpa blanqueada de eucalipto, la que bajó en un 2.7%. El resultado general, fue una baja en el monto exportado de un 10.2% para pino radiata y un aumento de un 13.5% para eucalipto (INFOR, 2003)

Excluyendo a la pulpa, los precios de los otros productos forestales exportados mostraron incrementos moderados, lo que sumado a un aumento importante en los volúmenes exportados, permitieron el aumento global en las exportaciones para el 2002.

En este ámbito, destacan las exportaciones de molduras de pino radiata con un aumento de 30.3% en el valor exportado, la madera cepillada de pino con 24.6% y la madera aserrada de pino con 18.5% (ver Figura 3 – 2; INFOR, 2003).

Con respecto a las plantaciones comerciales de pino radiata en Chile, su crecimiento ha sido sin interrupciones hasta hoy. Ello se refleja en una relación “plantación / cosecha” superior a 3 (Figura 3 – 3), lo que su vez ha implicado la recuperación de terrenos degradados, al situarse allí más del 90% de las plantaciones.

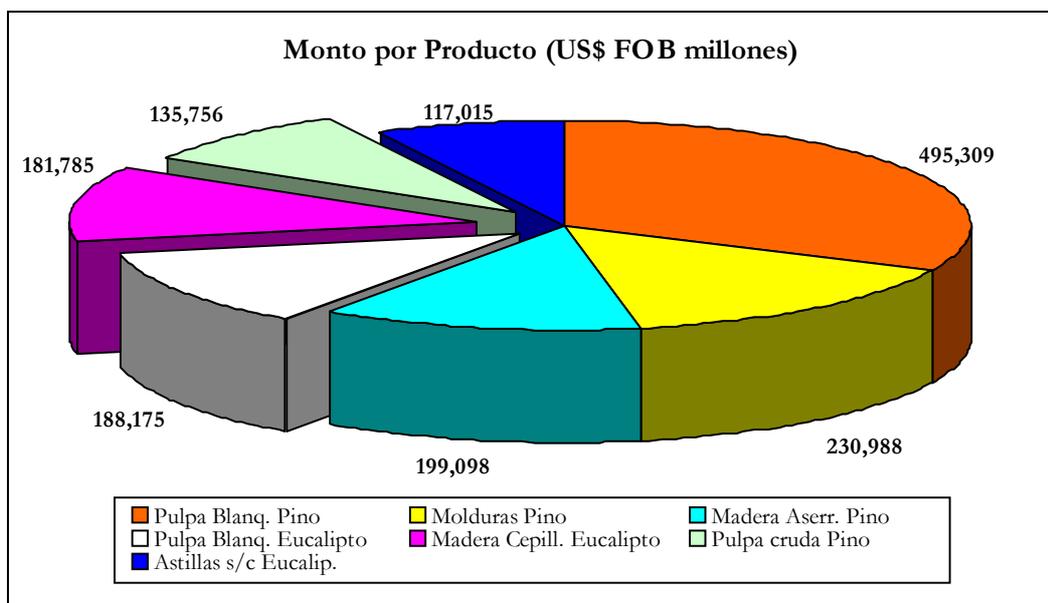


Figura 3 – 2: Montos de los principales productos exportados. (Fuente: INFOR 2003)



Figura 3 - 3: Tasas promedio de plantación y cosecha de plantaciones en la década del 90

La evolución de la superficie plantada puede verificarse en la Figura 3 – 4, donde se muestra una proyección de dicha superficie en el país hasta el año 2010.

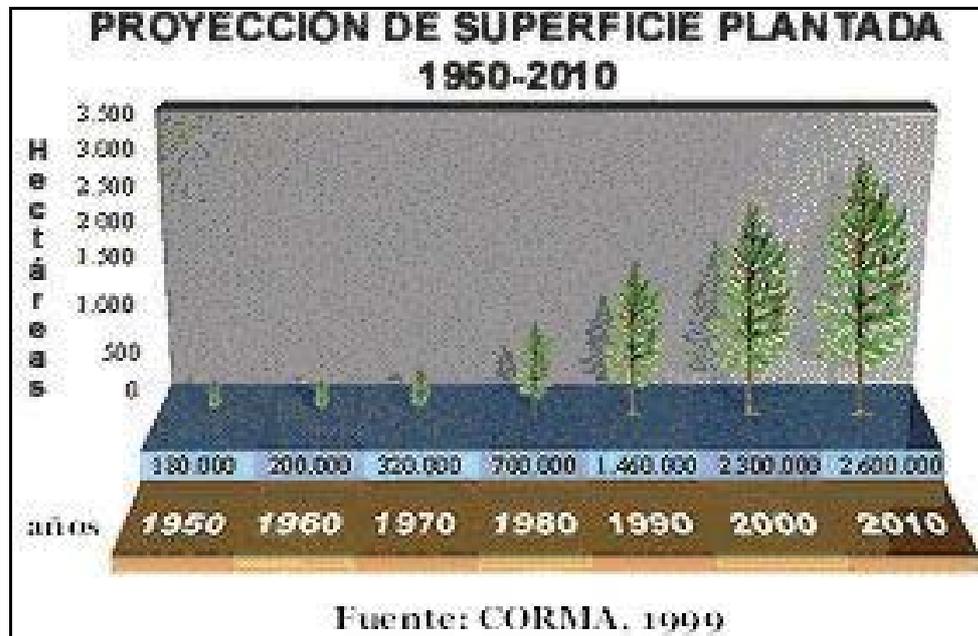


Figura 3 - 4: Evolución y proyección de las plantaciones forestales (1950-2010)

Un segundo aspecto notable de las plantaciones comerciales, es la relación entre su superficie y la superficie total de bosques existentes, considerando al mismo tiempo el impacto en la generación de los ingresos. Si se considera que Chile posee cerca de 16 millones de hectáreas de bosques, de las cuales sólo un 13.5% corresponden a plantaciones artificiales, queda de manifiesto la importancia económica y sustentable de estas últimas, puesto que más del 85% de la economía forestal chilena se construye a partir de ellas. (Corma 2000).

### 3.1.2. ANTECEDENTES COMERCIALES

En relación a los principales productos forestales de exportación se destaca el volumen de trozas, principalmente en lo referido a producción de pulpa y particularmente madera aserrada, que a pesar de las oscilaciones en el mercado no deja de ser significativa en ningún momento la dominancia que en general le cabe al pino radiata (Tabla 3 – 1).

Los niveles de exportación de trozas pulpables de pino radiata, muestra una tendencia hacia la sustitución de la especie por otras (Eucalipto). Por el contrario, en las exportaciones de trozas para aserrío la situación es opuesta: en el período 1995 – 2000<sup>1</sup>, la participación del pino radiata se mantiene casi constante en torno a un 97% del total. Es así como se registra un nivel marginal para el ítem “otras especies”, cuya participación de mayor importancia en el mismo período alcanza el 2,9% (sin considerar el año 2000).

<sup>1</sup> Información disponible sólo para el período Enero – Julio.

TROZAS DE PINO RADIATA	1995	1996	1997	1998	1999	2000
para pulpa	274.4	131.7	105.0	115.5	76.8	54.1
para aserrar	1664.5	1391.2	1436.1	221.3	395.2	54.2
TROZAS ECUCALIPTO						
para pulpa	224.0	73.1	146.7	70.1	382.2	248.4
para aserrar	---	---	---	---	---	---
TROZAS OTRAS ESPECIES						
para pulpa	34.1	1.2	0.0	---	---	---
para aserrar	29.3	18.6	41.2	7.9	11.6	54.5
Total madera en trozas	2226.3	1615.8	1729.0	414.7	865.8	411.3

Tabla 3 – 1: Volumen exportaciones de madera en trozas, en miles de m<sup>3</sup>.  
Los valores para el año 2000 sólo considera el período Enero – Julio. (INFOR 2000)

En un marco general e intentando dar claridad a un escenario futuro de la industria y del mercado de trozas, se puede establecer que al ritmo actual de plantación y cosecha, sería factible un aumento en la disponibilidad de madera en pie para fines aserrables en torno al 60%, mostrando un estancamiento en la madera con fines pulpables (ver Figura 3 – 5).

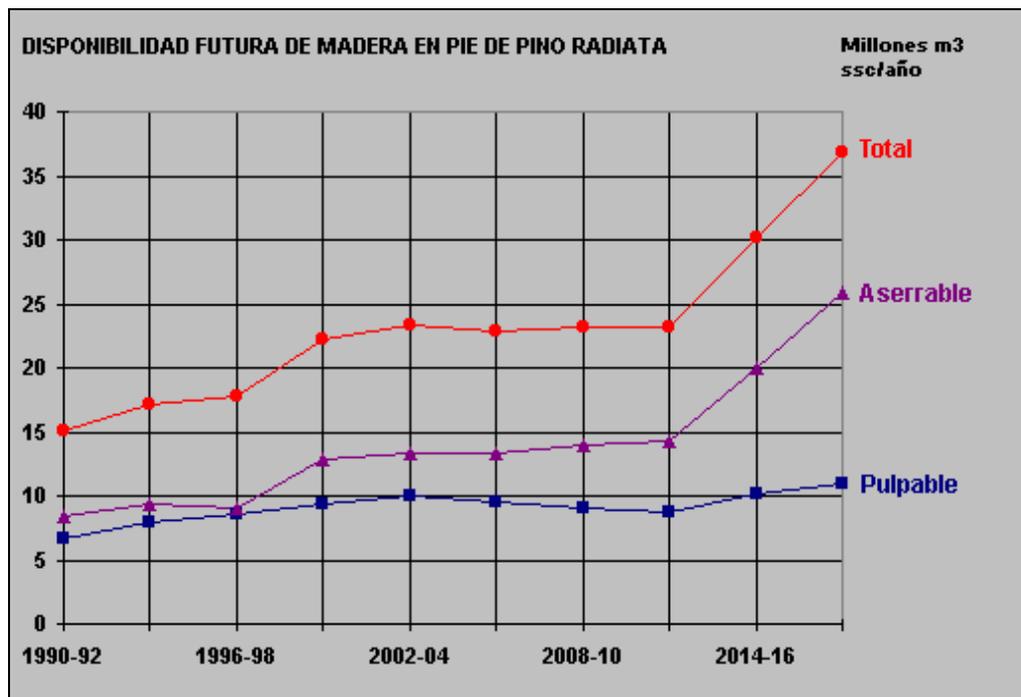


Figura 3 – 5: Evolución presente y futura en la disponibilidad de Madera Aserrable y Pulpable (www.infor.cl, 2003).

### 3.1.3. MADERA DE PINO RADIATA

#### 3.1.3.1. GENERALIDADES Y CARACTERÍSTICAS

Pino radiata es una de las coníferas más difundidas en la actividad forestal mundial desde hace ya tiempo. Aproximadamente hace 170 años fue introducida a Nueva Zelanda, presentando excelentes resultados de adaptación y desarrollo. En Chile su introducción data desde el período 1880 – 1890, siendo utilizado principalmente para fines ornamentales hasta 1906. Luego se le utilizó en las minas de carbón de Lota. Sin embargo, la presencia fue aumentando en la zona de Arauco durante los años 1930 – 1935, para llegar a constituirse en una importante fuente de madera aserrada: un 6,3% del total en ese momento, durante 1940 (INFOR, 1982). La importancia de la especie fue aumentando cada vez más en vista de los nuevos estudios llevados a cabo, fundamentalmente relacionados con su manejo y con de las propiedades de su madera. Éstas se constituyeron finalmente en los principales motivos de su notable crecimiento.

#### 3.1.3.2. ANATOMÍA

En cuanto a los aspectos anatómicos de pino radiata y estableciendo el sentido axial del individuo como referencia, cabe mencionar que su madera está compuesta principalmente por dos tipos de traqueidas longitudinales, las cuales comprenden más del 90% del total su volumen. El primer tipo de traqueidas que conforma la madera de primavera, se forma durante la estación de crecimiento luego del receso vegetativo y posee una función de conducción de las raíces a las estructuras superiores. El segundo tipo de traqueidas conforma la madera de verano y se genera en la etapa final de la estación de crecimiento, desempeñan esencialmente labor estructural. Bajo una detallada observación, es factible comprobar una transición gradual entre ambos tipos de traqueidas entre madera de primavera y verano. Además es factible diferenciarlas según su longitud, siendo las de primavera usualmente mas cortas pero de mayor diámetro.

Tomando en consideración la dirección radial, existen dos tipos diferentes de elementos; radios uniseriados y fusiformes. Estos constituyentes de la madera, como en otras coníferas, corresponde a un pequeño porcentaje del volumen de la madera, probablemente menos de un 5% lo cual no refleja en nada la importante función fisiológica que desempeña, ya que actúa en el control de la formación de duramen, secreción de resinas y facilita vía radial al flujo de savia y otros productos. Los radios uniseriados están constituidos por células parenquimáticas y traqueidas, en cambio los radios fusiformes contienen a los canales resiníferos, los cuales se ubican en el centro del radio.

Otras estructuras de interés en la anatomía de la madera de la especie, dicen relación con la albura y duramen: la albura está compuesta de células vivas y desempeña un papel de tejido conductor. Suele contener azúcares, sustancias proteicas y minerales, las que provocan la llegada de organismos degradadores de la madera en el caso de caída o muerte del árbol. Además y según Fielding (1952), citado por Bamber y Burley (1983), es muy común encontrar en este material rangos de humedad que van desde 100% a 160%.

En cuanto al duramen, en pino radiata comienza a formarse entre los 12 y 15 años (contando los anillos desde la médula). Por lo común se observa un decremento en el ritmo de formación con el aumento de la edad (Bamber y Burley; 1983).

Una utilidad práctica desde el punto de vista industrial, dice relación con la cantidad de duramen presente en la madera, puesto que ello favorecería la preservación de la madera destinada a aserrío y la producción de papel. Además un hecho relevante en la anatomía de la madera es la variabilidad que caracteriza a la cantidad relativa de duramen al interior del árbol, expresado en porcentaje. Esta variación obedece principalmente a la ubicación con respecto a la altura y a la edad de cada individuo. Ello puede verse claramente en Figura 3 – 6.

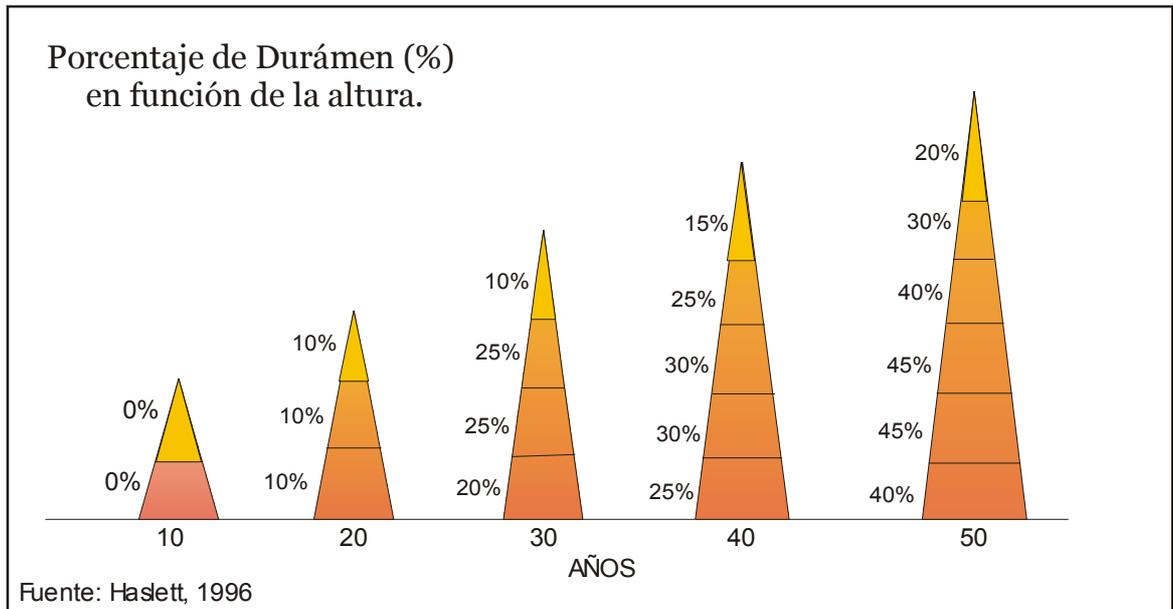


Figura 3 - 6: Variación de los porcentajes de duramen (%) en función de la edad y altura.

## 3.2. DENSIDAD EN MADERA DE PINO RADIATA

### 3.2.1. GENERALIDADES

La densidad de la madera, está determinada en primer lugar por la cantidad del material en las paredes celulares en relación con los espacios vacíos existentes. Ello se fundamenta en el hecho de que el material que constituye la pared celular posee una densidad aproximadamente constante. En este sentido si se considera que la densidad de los materiales constituyentes de la pared celular es aproximadamente constante e igual a  $1.53 \text{ g/cm}^3$ , la densidad definitiva de la madera se conformará principalmente por su anatomía, principalmente producto de los efectos provocados por los depósitos celulares tales como resinas, polifenoles, gomas, y otros, y finalmente por las características arquitecturales del individuo e incluso por el efecto de las aplicaciones de los tratamientos silvícolas. (Bamber y Burley, 1983)

Tal como ocurre con otros tipos de madera, la densidad es el principal antecedente a considerar en la determinación de su uso final. La especial significación que posee esta característica física, se manifiesta fundamentalmente en una influencia decisiva sobre cualidades tales como resistencia, trabajabilidad, grado de transformación o conversión,

propiedades acústicas, capacidad de usos finales y en aptitud para producir distintos tipos de papel.

Respecto a la determinación de la densidad, los métodos disponibles suelen presentar la falencia de no reconocer la naturaleza diferente de los factores de variabilidad y por ende son incapaces de aislarlos. Además de este inconveniente, se presentan dificultades operativas al momento de trabajar con volúmenes irregulares, problema muy común para los métodos gravimétricos.

Como respuesta, otros métodos se han conformado en una respuesta válida al no considerar el volumen como dato necesario. Por ejemplo y según Smith citado por Bamber y Burley (1983), una forma viable de determinar la densidad de un bloque irregular es ocupando un método llamado "contenido máximo de humedad", el cual es útil para conocer la densidad básica y se sustenta en el conocimiento de la densidad de la pared celular y en el cálculo de los pesos húmedo y seco de una muestra, según la siguiente relación:

$$Db = \frac{1}{\frac{Ws - Wod}{Wod} + \frac{1}{1.53}} \quad \text{Ec. 1}$$

donde Db = Densidad básica; Ws = Peso saturado; Wod = Peso seco

Relacionado con los usos finales del material madera y la necesidad de evaluar a los diferentes factores de variabilidad en su densidad, se suele presentar a esta característica física bajo las formas de Densidad verde y Densidad básica.

- **Densidad verde**

La densidad verde se puede analizar en fustes recién cosechados, puesto que implica comparar la masa en estado verde del material con su volumen en similar estado. En particular, el Pino radiata contiene una albura saturada de agua y una proporción variable de duramen en condiciones anhidra. Según estudios realizados en albura, duramen y corteza, esta densidad es virtualmente constante a 1.1 gr/cm<sup>3</sup>, 0.6 gr/cm<sup>3</sup> y 0.65 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Sin embargo, la densidad verde de una troza esta ampliamente determinada por la proporción de duramen (Bamber y Burley, 1983).

- **Densidad básica**

La densidad básica es ampliamente utilizada como una característica de uso de la madera (resistencia, trabajabilidad, propiedades de secado, rendimiento en el pulpaje y características del papel, etc.) para una especie en particular. Al respecto el pino radiata posee madera de densidad media (de ensayo) cuyo valor promedio va de 0.4 gr/cm<sup>3</sup> (producción de madera aserrada) a 0.42 gr/cm<sup>3</sup>. Esta densidad como se verá, es afectada por múltiples factores, que obedecen a caracteres naturales y propios del individuo, como a características externas.

La densidad básica ha sido profusamente estudiada en Nueva Zelanda. En este caso la variación que se experimenta pasa a ser una característica propia de la especie y

fuertemente dependiente de su edad y altura. En general se reporta un incremento importante alrededor de los 10-15 anillos a partir de la médula de  $0.32$  a  $0.4 \text{ gr/cm}^3$  y un incremento de  $0.45$  a  $0.54 \text{ gr/cm}^3$  en función de la edad de rotación y el sitio. La variación en la dirección radial suele decrecer al aumentar la altura de referencia en el fuste. Estos patrones suelen ser regulares por lo tanto factibles de predecir con una gran aproximación, ello ha permitido elaborar ensayos no destructivos que permiten definir completamente la densidad de una troza e incluso el árbol completo (Bamber y Burley, 1983).

Considerando ahora la variabilidad entre árboles, la densidad básica cambia significativamente inclusive si se considera un mismo sitio, no importando la semejanza que pudieran presentar un grupo de individuos. Estos cambios en densidad se explican por la variación genética existente debido al alto porcentaje de heredabilidad atribuida a esta característica de la madera. Esto es corroborado por estudios estadísticos llevados a cabo en Nueva Zelanda en donde se han verificado coeficientes de variación cercanos al 7%, lo que implica diferencias entre individuos de  $0.4$  a  $0.55 \text{ gr/cm}^3$ . (Haslett, T. 1996)

### 3.2.2. FACTORES DE VARIABILIDAD

Entre las fuentes más importantes de variación y las que se relacionan con características del individuo son: el contenido de humedad, la anatomía de la madera, la edad del árbol, su altura, la tasa de crecimiento, la arquitectura y los factores genéticos propios del individuo. En cuanto a las fuentes de variación ajenas al árbol, se destacan: los tratamientos silvícolas como la poda, los raleos, la fertilización y las características del sitio (Bamber y Burley, 1983).

- **Contenido de Humedad**

Es un factor necesario de considerar en árboles en pié, ello porque la humedad está sometida a una notable variabilidad en función de la altura y la edad. De este modo su importancia cobra un sentido práctico en los objetivos de cualquier análisis relacionado con la densidad de la madera (ver Figura 3 – 7). Por ejemplo, existe la dificultad de detectar zonas de alta densidad como nudos, cuando estos están incluidos en zonas de alta densidad como lo son las áreas de alto contenido de humedad. Como resultado, se hace difícil determinar donde termina un área de alto contenido de humedad y donde empieza un área nudosa (Schad et al, 1996).

El contenido de humedad en la madera depende de las cavidades celulares e intercelulares, ello provoca una relación teóricamente inversa entre éste parámetro y la densidad básica (ver Figura 3 – 8). En la práctica los contenidos de humedad (calculados en base al peso seco) para pino radiata raramente exceden el 200% siendo más usuales los valores entre 100% y 160%. Con relación a lo anterior la densidad básica para pino radiata varía de  $0,35$  a  $1,43 \text{ gr/cm}^3$ , lo cual da un contenido saturado de humedad teórico entre 220 y 160% (Bamber y Burley, 1983).

Con relación a la anatomía de la madera, la albura está altamente saturada de agua alcanzando un contenido de humedad promedio de 150%, sin embargo este valor puede elevarse hasta un 220% en fustes jóvenes de baja densidad. Estos valores naturalmente dependerán de la densidad básica que presente la madera. En cambio el duramen presenta un contenido de humedad cercano al 45%. Finalmente, la humedad es un factor significativo en la economía de los procesos de secado (consumo de energía).

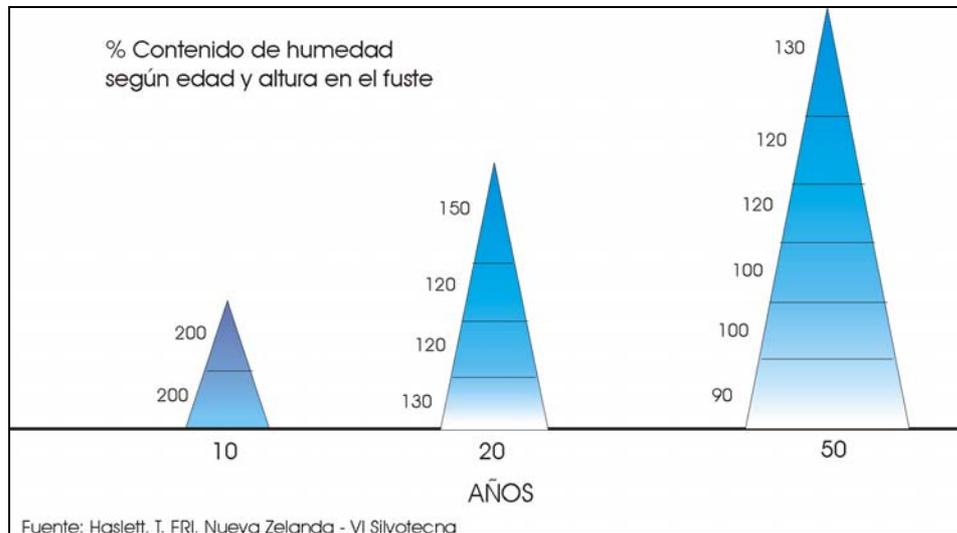


Figura 3 – 7: Humedad en el individuo y su relación con la edad y altura en el fuste  
Fuente: Bamber y Burley (1983)

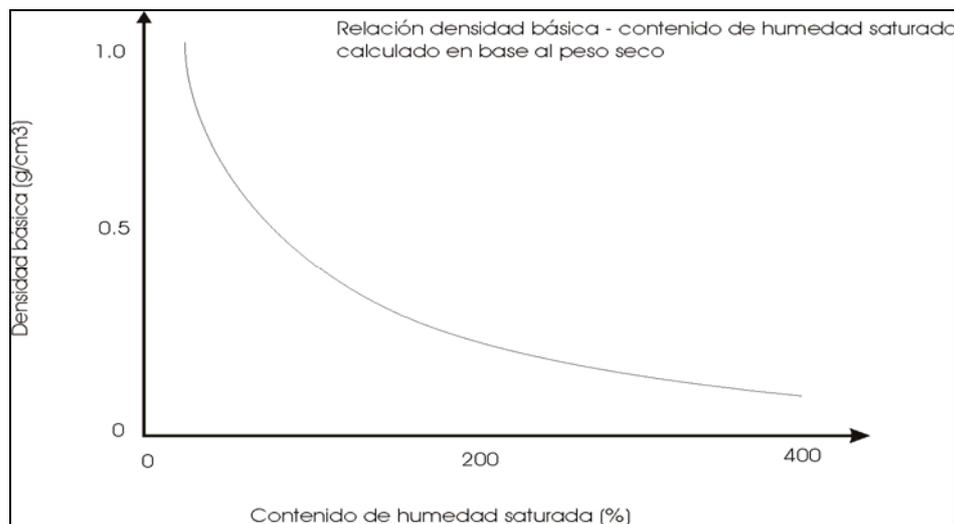


Figura 3 – 8: Contenido de humedad versus densidad básica.  
Fuente: Bamber y Burley (1983)

- **Anatomía:**

Su efecto sobre la densidad se basa fundamentalmente en las características del material constituyente de las paredes celulares, modificadas por los efectos de los depósitos celulares. Sin embargo el factor principal, es la proporción natural de albura, duramen, madera de verano y primavera. Ello debido a que en todos estos tejidos la cantidad de los depósitos celulares varía. Por ejemplo y según Lloyd (1978) citado por Bamber y Burley (1983), en ejemplares de pino radiata de 45 años de edad encontró que en madera de

verano, un 17% de su volumen correspondía a extraíbles, mientras que en madera de primavera se baja a un 7%.

- **Edad:**

En pino radiata, como en otras coníferas, la tendencia con la edad es hacia un aumento en la densidad. En los primeros 15 años de crecimiento, es común encontrar aumentos de 0.36 a 0.45 g/cm<sup>3</sup>, para luego alcanzar una estabilización en forma gradual. El incremento descrito tiene su origen principal en el aumento en la proporción de madera de verano. En particular, investigaciones al respecto han indicado que la densidad aumenta en función a la distancia radial a partir la médula, más que con la edad (Bamber y Burley, 1983). Es decir, la edad se relaciona en forma más estrecha con el número de anillos.

Si se considera esta fuente de variación estudiando solo casos individuales, la edad mostrará un efecto menor sobre la densidad. Al respecto se han logrado construir gráficos que logran relacionar la densidad de la madera en función de la edad, considerando para ello el número de anillos existentes a partir de la médula. En dichos casos la información utilizada en los gráficos, no corresponde a un individuo sino que a medias de un grupo de ejemplares de diversos distritos, ello se ejemplifica en la Figura 3 – 9.

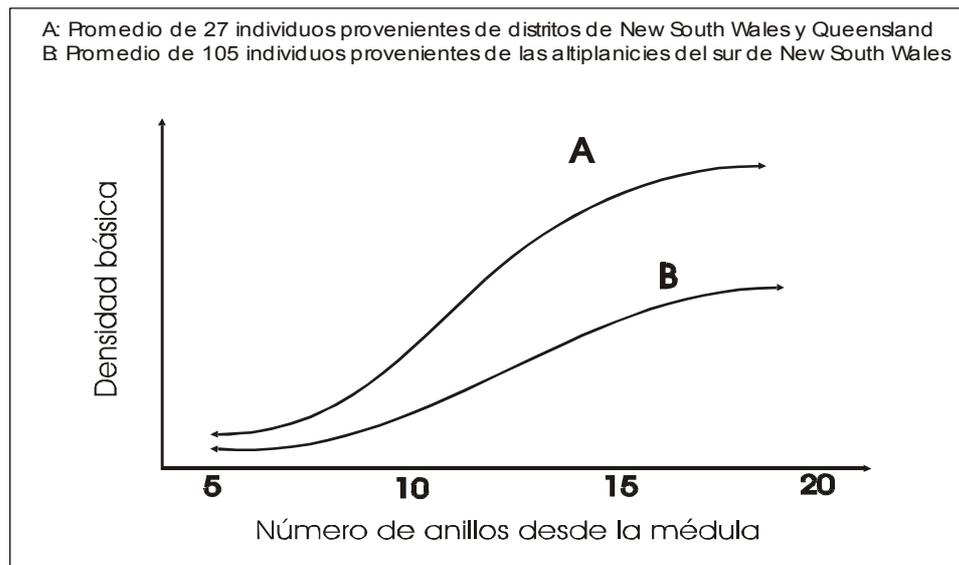


Figura 3 – 9: Efecto de la edad en la densidad, en Australia (Bamber, 1983).

- **Altura del Árbol:**

Se ha encontrado que la densidad disminuye con la altura (Bamber y Burley, 1983). Ello es esperable, puesto que a mayor altura existe menor número de anillos, es decir madera más joven. Esto trae una implicancia importante al realizar comparaciones y comprobaciones de este efecto al analizar muestras provenientes de diferente altura, ya que se aconseja obtener muestras que consideren los anillos a una distancia constante desde la médula (madera de similar cronología), eliminando así la influencia del factor edad.

- **Tasa de Crecimiento:**

Este factor ha sido materia de controversia, debido a la publicación de investigaciones con hipótesis contradictorias acerca del efecto de este factor. No obstante existe pleno acuerdo de que el principal efecto se relaciona con el ancho de los anillos y por lo tanto sobre la cualidad de la madera para usos estructurales. Ello puede comprenderse, ya que para aquellos usos es necesario madera de gran resistencia mecánica y esta característica no se logra en maderas de anillos amplios, lo que reflejaría un rápido crecimiento y por ende sería una razonable una baja en la densidad. No obstante lo anterior, la principal explicación de porque se relaciona la presencia de anillos anchos con baja densidad, es que esa característica se ubica precisamente en la madera juvenil, la cual se caracteriza por tener menor densidad (Bamber y Burley1983).

Otros estudios, señalan que por efectos de tratamientos silvícolas fuertes (podas, raleos), se gatillan alzas notables en las tasas de crecimiento, provocando la generación de anillos amplios y por lo tanto madera de menor densidad.

- **Morfología del Individuo (Arquitectura):**

Este factor no ha sido objeto de mucha atención, excepto en el caso de individuos que presentan curvaturas excesivas en el fuste. Ello porque en casos extremos suele producirse madera de compresión y formación de fustes excéntricos. Al respecto Pawsey y Brown (1970), citados por Bamber y Burley (1983), encontraron que en este tipo de fustes existe una diferencia en la densidad de un 5%, entre la madera correspondiente a los anillos estrechos y la madera donde se ubican los anillos más anchos.

- **Raleos:**

Al respecto, las experiencias realizadas por Sutton y Harris (1973) y Cown (1973), ambos citados por Bamber y Burley (1983), mostraron que el efecto sobre la densidad en términos prácticos es pequeño. Luego Siemon (1973) y Cown (1974) citados por Bamber y Burley (1983), encontraron una reducción significativa de la densidad a partir de los raleos. Ello se debería fundamentalmente a la liberación que experimentan los individuos, experimentando tasas de crecimiento mayores. Además, la densidad tiende a recuperarse hacia valores originales luego de un tiempo, sin verse afectados los valores medios.

Finalmente se concluye que mientras los raleos excesivos provoca un efecto importante, los tratamientos de normal intensidad, no tiene un efecto importante.

- **Podas:**

De acuerdo a los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por Cown (1973) citado por Bamber y Burley (1983), en donde se aplicaron dos intensidades de poda sobre ejemplares de pino radiata, se producen variaciones en la densidad. El efecto producido una primera poda (35% de remoción de copa) no fue significativo en comparación con la segunda poda (60% de remoción de copa), la que logró un aumento de un 10% en la densidad después de un año de la aplicación. Luego se verificó una recuperación de la densidad hacia los valores previos, después de algunos años.

- **Características de Sitio:**

La referencia se hace sobre las diferencias entre sitios debidas a los niveles de fertilidad, aspecto que se analiza por separado. En este caso la principal influencia se refiere a la modificación natural o inducida sobre las tasas de crecimiento, y por ende sobre los anchos de los anillos producidos (madera de baja densidad). No obstante existen muchas variables ligadas que pueden afectar la tasa de crecimiento y de esta manera afectar a la densidad. Sin embargo y como ocurre con otras características, existen informes donde se señala que el sitio puede tener un efecto marginal. Al respecto Moulds (1952) citado por Bamber y Burley (1983), encontró variación de sólo un 10% en densidad entre individuos pertenecientes a sitios tan diferentes como California y Australia meridional. Sin embargo en este caso, las edades de los individuos eran muy diferentes (California: 45 – 60 años, Australia: 20 – 52 años) lo cual sugiere un efecto combinado (edad y calidad de sitio). De igual modo existen otros estudios que proporcionan información contradictoria, ya que si bien existen antecedentes que confirman la hipótesis de efectos leves<sup>2</sup>, hay otros que señalan efectos despreciables. En este caso es necesario tomar en consideración, que el sitio incluye muchos factores que eventualmente podrían ejercer efectos: contenido de humedad del suelo, temperatura, altitud, latitudes, disponibilidad de nutrientes, etc.

En un sentido más amplio, el ambiente tiene un efecto considerable. Por ejemplo, según estudios realizados en Nueva Zelanda, las temperaturas tienen un efecto significativo. También se ha informado que en individuos maduros, la densidad decrece en aproximadamente 0.07 gr/cm<sup>3</sup> por cada grado de incremento en latitud y por cada 100 metros de incremento en altitud. Además se ha demostrado que un aumento en la precipitación genera un aumento en la densidad, mientras que la fertilidad de sitio provoca una baja en la densidad promedio.

Finalmente, los diferentes sitios han permitido establecer geográficamente zonas clasificadas de alta, media y baja densidad dentro de las cuales incluso es posible encontrar variaciones considerables. Ello ha permitido clasificar cada zona en función del uso final que se le dará a los bosques, según la densidad correspondiente.

- **Uso de Fertilizantes:**

Los efectos de la fertilización en las propiedades de la madera han sido estudiados especialmente sobre coníferas. La mayoría de los estudios abordados demuestran una tendencia hacia la disminución de la densidad. En la práctica esto significa que en suelos menos fértiles la tendencia es hacia el desarrollo de árboles con una densidad promedio mayor, lo cual se explica por tasas de crecimiento menor y por ende debido a una declinación en la proporción de madera de verano en el anillo. Como contraparte se han realizado ensayos en sitios fertilizados, en donde como respuesta se registró aumentos en los promedios de crecimiento consiguiendo así un efecto de disminución de la densidad. Tal disminución alcanzó un 15%, pero en promedio se mantuvo cercano al 10%. Estos estudios se realizaron sobre individuos que mostraron una marcada respuesta ante fertilizantes basados en fosfatos.

La comparación que arrojó tales resultados, se realizó entre individuos que crecían en sitios nutricionalmente deficitarios. Éste sería el motivo que explicaría los notorios efectos en la densidad (Bamber y Burley, 1983).

---

<sup>2</sup> En New South Wales (Australia), se encontró que individuos de sitios septentrionales poseen madera más densa que los de sitios meridionales.

### 3.3 DEFECTOS EN MADERA DE PINO RADIATA (D.Don)

En el momento de establecer las diversas opciones de uso industrial para cualquier especie maderable, se hace esencial un análisis físico-morfológico de su madera, con el objeto de definir claramente su calidad en función del uso final. Muchos defectos suelen tener un carácter natural, es decir, obedecen a características intrínsecas de una especie o bien se relacionan con alguna condición especial del entorno.

Otros por el contrario son producidos artificialmente por el hombre a través de los tratamientos silvícolas, que en definitiva conforman aspectos negativos que deben tenerse en cuenta al momento afrontar las posibilidades de conversión para la madera (Bamber y Burley, 1983).

#### 3.3.1. NUDOS

##### 3.3.1.1. FORMACIÓN Y TIPOS

La existencia de ramas y su eliminación mediante el proceso de poda generan los nudos, los cuales desde el punto de vista fisiológico no responden al concepto de defecto. No obstante desde el punto de vista del usuario de la madera si corresponden a defectos, y muy importantes, a tal punto de ser los elementos más utilizados para la clasificación de la madera en distintas calidades. La importancia de los nudos sobre la calidad de la madera, es tal que, por ejemplo un árbol podado puede ver aumentado su valor entre un 170% y 200%.

En cuanto a su origen, los nudos se originan en la inclusión de la porción basal de una rama dentro del fuste del árbol; la consideración como defecto dependerá del proceso de transformación industrial que siga el árbol. En este sentido, se han adoptado en particular normas de clasificación estructural visual de la madera de Pino insigne, según el criterio de la Razón de Área Nudosa "Nch. 1207.Of 78" (Ramírez, 1995).

En cuanto a la determinación de un valor promedio para el número de ramas por verticilo en Pino radiata, resulta una tarea difícil. No obstante, para grupos de clones existen rangos de valores para la frecuencia de ramas<sup>3</sup>. Esto es un tema importante, pues el número de ramas determinará luego de la poda, la cantidad de nudos que irá conformando el Cilindro Central Defectuoso.

Este defecto debido a sus múltiples formas y orígenes, posee una clasificación bastante amplia:

- Por el estado del nudo se tienen: nudo vivo, nudo suelto y nudo muerto.
- Por la forma: nudo redondo, nudo elíptico y nudo en espiga.

---

<sup>3</sup> Ing. Forestal Sra. Paulina Fernández - Comunicación personal

### 3.3.1.2. EFECTOS SOBRE LA MADERA

Los inconvenientes que presentan los nudos pueden clasificarse de las siguientes maneras:

- a) De orden físico: causan deformaciones en las piezas, debido a la menor resistencia en las secciones donde aparece; además dificulta en gran medida la trabajabilidad de la madera en distintas operaciones tales como corte, ensamblado, barnizado, etc. Lo anterior puede explicarse por una alteración en la dirección de la fibra, ya que la madera es mucho más resistente en la dirección ésta (Bamber y Burley, 1983). Además en el nudo, la densidad promedio de la madera es el doble que en condiciones normales
- b) De orden mecánico: principalmente el efecto negativo de un nudo se produce en torno a él, ya que la madera que lo conforma es cuatro veces más débil que la madera circundante a esfuerzos de tracción y flexión. En general existe una relación directa entre el tamaño del nudo y la pérdida de resistencia (Bamber y Burley, 1983 y Vignote, 1996).
- c) De orden estético: los nudos suelen generar efectos positivos y negativos. En general en la fabricación de muebles, los nudos dan una apariencia muchas veces deseable (diseño). En otras ocasiones cuando se requiere un diseño uniforme, los nudos implican una característica indeseable.

### 3.3.2. MADERA DE REACCIÓN

Se produce por una reacción de la zona meristemática de la madera, en respuesta a la inclinación en el fuste producto de la acción de alguna fuerza externa, una vez que el crecimiento secundario ha comenzado. Fundamentalmente su produce una orientación trópica (geotropismo negativo) de las ramas, como respuesta a la incapacidad de elongación, por lo que este acomodo se produce entonces por algún mecanismo que incluye procesos de flexión. En un corte seccional de las ramas o fustes bajo este tipo de efecto, se observa un patrón excéntrico de crecimiento acompañado por la presencia de madera de compresión. Este tipo de madera se produce en el lado superior de la inclinación de las ramas o fustes en dicotiledóneas y en las gimnospermas, esto ocurre en el lado inferior. Esta diferencia de ubicación, trae dos denominaciones para este tipo de madera: Madera de tracción en angiospermas y madera de compresión en gimnospermas. (Zimmermann, 1972)

Anatómicamente, las características celulares varían según sea el caso. La madera de compresión en gimnospermas, resulta de un crecimiento diferencial en la zona del cambium, lo que origina traqueidas más cortas y redondeadas de lo normal. Lo anterior provoca la formación de espacios intercelulares circulares, originando paredes celulares secundarias muy delgadas y con una razón lignina/celulosa más alta de lo normal. Así, este tipo de madera resulta ser más densa, dura y resistente a la compresión, pero menos resistente a la tracción. La ocurrencia de madera de compresión, presumiblemente es favorecida por los raleos debido al aumento del efecto de los vientos (Bamber y Burley, 1983), pero además se menciona como factores importantes a la gravedad y los efectos de las hormonas de crecimiento IIA (Zimmermann, 1972).

## **3.4 TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS – PODA**

### **3.4.1. DEFINICIÓN**

La poda se entiende como un proceso en donde se eliminan las ramas en la parte inferior del fuste, con claros objetivos silvícolas y económicos. Se presentan dos variantes: una poda natural y una artificial. La primera de ellas, se lleva a cabo debido a la competencia mutua entre las ramas más bajas e interiores por luz, lo que resulta en la pérdida de las hojas y con ello en la muerte de la rama. La velocidad de la eliminación de la rama, depende principalmente de la densidad inicial del rodal y de la tolerancia de la especie. En este momento también actúan factores externos, como el viento, la nieve, y la acción de hongos. (Vita, 1996). En las coníferas, los depósitos de resina suelen impedir la acción de hongos, lo que retarda la caída de la rama.

### **3.4.2. OBJETIVOS ECONÓMICOS**

El principal motivo de esta práctica silvícola, radica en el interés de generación temprana de madera libre de nudos, lo que permite un incremento en la valorización de cada árbol, así como del sitio en general. De igual manera se posibilita la participación en mercados más exigentes.

Existen estudios recientes que demuestran un incremento en los precios para la madera de tales características, los cuales son capaces de cubrir e incluso superar los costos de su aplicación, a pesar del alto valor de éstos. Sin embargo, dichos aumentos en los precios dependen en gran medida de la disposición de cada mercado a pagar por mejor calidad.

Por ejemplo, en Australia y Tasmania, trozas podadas pueden lograr precios entre \$US 80 y 90 por metro cúbico; ello contrasta con los \$US 15 – 25 por metro cúbico que logran trozas no podadas. En Nueva Zelanda, la diferencia en el valor bordea a 250% (Beadle y May, 1999).

En cuanto a los retornos y como ocurre con toda inversión en el área forestal, la poda no puede estar exenta de riesgo económico, el cual suele originarse en un desconocimiento de los mercados y sus comportamientos a futuro.

### **3.4.3. OBJETIVOS SECUNDARIOS**

Estos objetivos corresponden a beneficios “adicionales” que se logran con la aplicación de una poda correcta. En primer lugar se logra la disminución en el crecimiento en diámetro del árbol, en efecto, existen evidencias que muestran una disminución mayor en las partes inferiores del fuste, lo que conduce a árboles más delgados y cilíndricos (menor ahusamiento), mejorando su destinación al aserrío. En segundo lugar, se promueve una menor propensión al fuego una vez que los desechos de la poda se descomponen. En tercer lugar, se mejora el acceso y la visibilidad en sitios muy densos, lo que permite una mejor circulación del personal; además se logra ingreso de luz solar, una mejor circulación de aire, lo que facilita la regeneración del sotobosque muy útiles en sistemas silvopastorales. Por último se incrementa la estabilidad de los árboles en áreas de vientos recurrentes (Montoya, 1988; Vita, 1996).

#### 3.4.4. ESTRATEGIA EN LA PODA

El alto interés que existe en asegurar buenos resultados económicos a mediano y largo plazo, unido al hecho que la madera libre de nudos comienza a generarse después producirse la oclusión de la rama podada (proceso que toma de uno a diez años), hace que una de las prioridades sea la evaluación cuidadosa del sitio. (Beadle y May, 1999)

En general, la elección debe dirigirse hacia los sitios más productivos, los individuos más vigorosos, priorizando además la accesibilidad a las labores propias de dicho tratamiento silvícola, y las mejores condiciones sanitarias existentes previamente. Por ejemplo, un sitio poco deseable podría ser uno sometido a fuertes vientos, bajo un régimen hídrico excesivamente pluvioso. Ello podría facilitar problemas de incidencia de hongos y otros, los que sin duda podrían poner en riesgo un desarrollo futuro del sitio.

En cuanto a las especies recomendables para aplicar la poda, destacan la mayoría de las coníferas, como pino radiata y pino oregón, y otras especies que posean anchos adecuados de rama. Sin embargo otras especies pueden presentar una situación más incierta, debido a la incertidumbre en el aumento en la calidad de la madera.

Desde un punto de vista del árbol individual, la elección debe orientarse a los de mejores características (dominantes y codominantes), es decir aquellos que sean aptos para permanecer hasta el final de la rotación: individuos que presenten copas sanas con un fuste único, recto (con una curvatura inferior a 5 centímetros) y sin defectos visibles, cuyo diámetro sea aceptable con tasas de crecimiento apropiadas, además se debe preferir aquellos individuos cuyas ramas tengan un ángulo con el fuste mayor a 30°. (Beadle y Hall, 1999)

La poda necesariamente forma parte integral de un programa de manejo intensivo, por lo que es necesaria la realización de una adecuada planificación:

- ▶ El primer paso consiste en definir claramente la definición de un tamaño máximo para la zona que debe concentrar los nudos producidos por las ramas suprimidas, y actuar cuando el árbol lo alcance.
- ▶ Luego el siguiente paso es decidir la longitud del fuste, como objeto final del manejo en función a una especificación comercial dada.
- ▶ Finalmente el tercer paso es efectuar una coordinación con otras actividades silvícolas, como los raleos. Ello debido a que la manipulación de la densidad en una plantación, es la principal herramienta para mantener un incremento diametral a una tasa definida. En general, el manejo de estos y otros factores siempre deben tenerse en cuenta en función del objetivo principal como meta.

#### 3.4.5. METODOLOGÍA

En la poda de árboles es habitual remover ramas vivas, lo cual implica mucha precaución en no afectar la capacidad fotosintética del individuo. Como regla general, se recomienda el mantenimiento de al menos un 50% de la copa viva. En el manejo intensivo, se utilizan dos tipos de podas: una destinada a obtener la mejor forma del árbol en sus primeros

años de desarrollo (poda formativa), y la destinada a la producción de madera libre de nudos.

#### ► Poda formativa

Ésta comienza en etapas tempranas del individuo (2 a 4 años posterior a la plantación). Se efectúa hasta que se alcancen las dimensiones requeridas, permitiendo a la vez, el logro de las características necesarias para que el individuo sea seleccionado para la poda con miras a la producción de madera libre de nudos. En el Pino radiata, las ramas comienzan a organizarse en torno al fuste asemejando un “abanico o espira”, estructura que provoca la mayor concentración de nudos en ausencia de poda. En cada “abanico” no deben haber más allá de 4 ramas y es allí por donde se debe comenzar a aplicar poda (ver Figura 3 – 10).

El método a seguir implica la remoción de toda rama que compita con el eje principal de la planta, analizando cuidadosamente la copa en su totalidad. Se eliminan además, aquellas ramas que mantengan un ángulo muy agudo respecto del fuste.

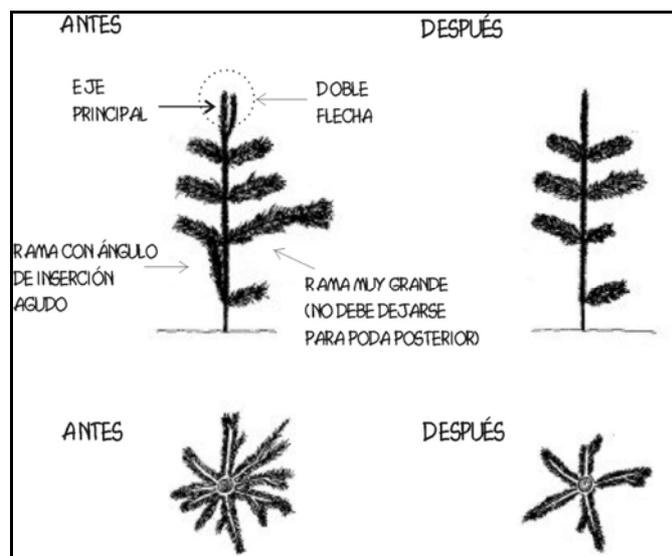


Figura 3 – 10: Metodología en la poda formativa  
Fuente: (Emmingham, W. 1995)

#### ► Poda para producción de madera libre de nudos

Opera a continuación de la poda formativa, mediante la remoción de ramas en una serie de planos o verticilos, logrando la concentración de madera nudosa en un cilindro central para así obtener madera libre de nudos en toda la longitud del fuste podado. De este modo, la poda realizada permite definir un tamaño para el cilindro nudoso, mediante la utilización del concepto “diámetro máximo sobre muñón” (sección 3.5.1). Dicho concepto involucra el diámetro del fuste mismo más inclusión de la zona de cicatrización de la rama extraída (Gosnell, T. 1987)

Así y debido a que el incremento en altura lleva consigo un aumento en el diámetro del fuste, para conseguir diámetros menores en el cilindro nudoso se hace imprescindible

efectuar mayor cantidad de podas (a distintas alturas). Por ejemplo, en el caso de Pino oregón a una altura de poda de 5,5 m. (11,2 m. en total) y teniendo como objetivo un diámetro sobre oclusión de 10 cm., al menos deben efectuarse dos podas. De acuerdo a la Figura 3 – 11, para Pino radiata se recomiendan los siguientes puntos generales:

Visita	1	2	3	4	5	6	7
Tipo de poda	Formativa		Formativa y productora de Madera "clear"			Madera "clear"	
Altura total (mt.)	1 - 2.5	2.5 - 3.5	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9
Altura podada (mt.)	--	--	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
9-							
8-							
7-							
6-							
5-							
4-							
3-							
2-							
1-							
La periodicidad de las podas sera de 6 a 18 meses según tasa de crecimiento y calidad de madera.	Poda: -ramas largas -ángulo rama agudo -doble flechas Se utilizan escaleras		Poda: -Ascendente, dejando 3 a 4 metros de copa -En cada visita no remover mas allá del 50% de la copa -En la copa remanente, continuar la poda formativa -Eliminar convenientemente cualquier brote epicórnico entre las visitas -Aplicar proceso hasta lograr el tamaño de troza requerido (3 - 6 visitas);				

Figura 3 – 11: Esquema metodológico de poda en Pino radiata (madera libre de nudos)

Fuente: (Emmingham, W. 1995)

- ▶ La poda destinada a la producción de madera libre de nudos, debe aplicarse cuando los individuos alcancen los 4 – 6 metros de altura.
- ▶ En primer lugar se deben podar la ramas inferiores y luego continuar en forma ascendente.
- ▶ Se debe mantener siempre una copa viva efectiva de 3 a 4 metros. Se recomienda efectuar tal determinación en función a un diámetro máximo de 10 cm. en individuos de lento crecimiento y 8 cm. cuando la tasa de crecimiento sea mayor.
- ▶ A la altura anterior (correspondiente a la copa viva), debe aplicarse poda formativa con el objetivo de asegurar un crecimiento recto, evitar doble flecha y facilitar la formación de ramas apropiadas (ramas delgadas, con mayor ángulo de inserción).
- ▶ La poda debe restringirse, a la longitud de fuste efectivamente destinada a aserrío.

- ▶ Se debe complementar esta actividad, con una cuidadosa remoción de brotes epicórnicos, sobre todos los individuos podados.
- ▶ Es muy importante llevar un registro, fundamentalmente el mayor “diámetro sobre muñón” que se produzca. Dicho diámetro, debe mantenerse invariable desde la primera a la última poda.

#### 3.4.6. PRECAUCIONES

La poda expone al árbol a múltiples riesgos, por ejemplo la muerte del cambium provocada por la acción de la luz solar directa en individuos jóvenes, lo que además facilita el ingreso de hongos e insectos. Además al remover las ramas es factible minimizar la herida mediante una apropiada técnica, de acuerdo a la Figura 3 –12.

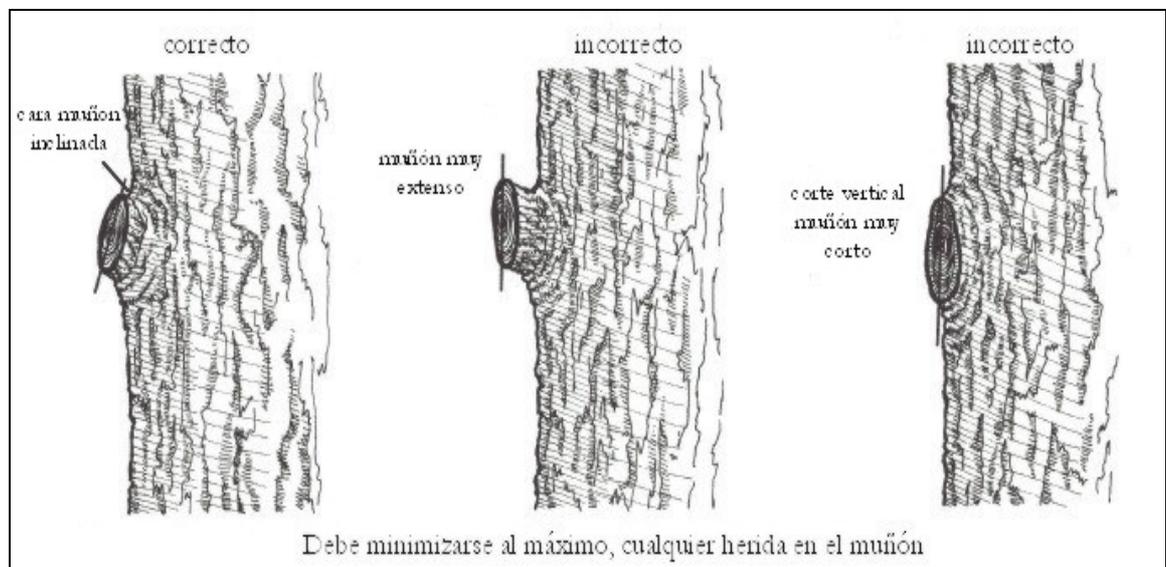


Figura 3 – 12: Técnica empleada en corte de la rama, durante la poda  
Fuente: Emmingham, W. 1995.

Con respecto a la época de poda, la mejor opción es durante la finalización del verano y el comienzo del invierno, cuando el cambium del árbol está inactivo. Esto ayuda a minimizar los efectos de las heridas en el flujo de los nutrientes al interior del fuste. A pesar de estas precauciones, la poda podría realizarse en otro momento tomando medidas extremas de cuidado, tanto en su ejecución como en el análisis de la posible presencia de ciertas plagas, en donde las coníferas, por lo general son más resistentes que las latifoliadas.

#### 3.5. CILINDRO CENTRAL DEFECTUOSO (CCD)

El cilindro central defectuoso se convierte en el principal elemento de juicio acerca del nivel de madera libre de nudos deseable a obtener. La dinámica formativa del cilindro central defectuoso como tal, comienza con la poda de una rama (definición del Diámetro Sobre Muñón o DSM), en donde se formará una capa pequeña de corteza, y eventualmente resina (en coníferas). Dicha irregularidad producida, denotará el corte al

exterior (Montoya 1988, citado por Vita 1996). Luego de producirse la oclusión de la herida (definición del Diámetro Sobre Oclusión – DSO), se adicionarán capas sucesivas de madera libre de nudos, que más tarde conformará el volumen de madera limpia disponible.

Este proceso se logra con las podas efectuadas a alturas determinadas, en estricta relación al diámetro del cilindro deseado y al largo comercial determinado. De este modo, las irregularidades quedarán confinadas en la zona de defectos, incluyendo cualquier ensanchamiento debido a la sinuosidad del fuste al momento de la poda (Figura 3 – 13).

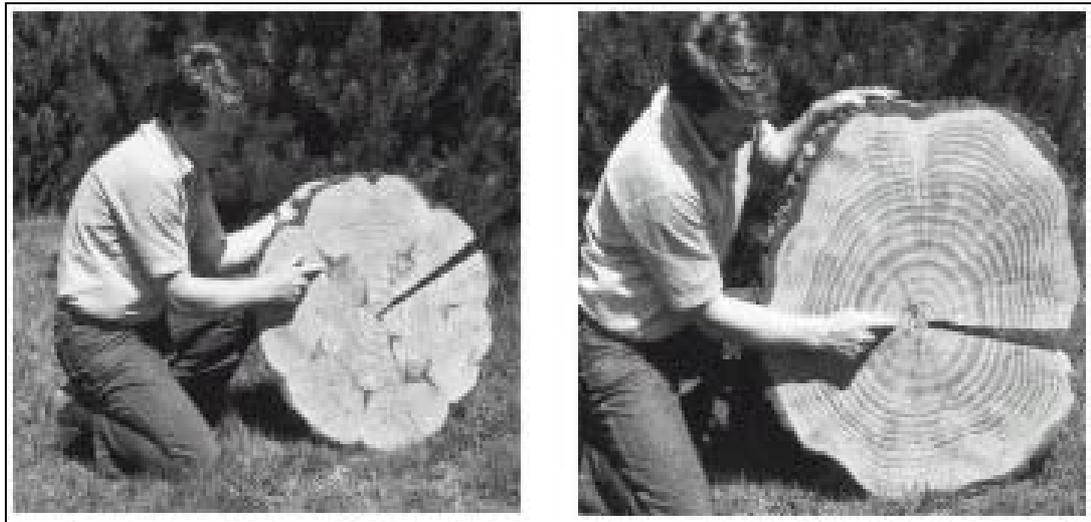


Figura 3 – 13: Comparación de dos trozas y dos tamaños para el diámetro del cilindro nudoso, para una poda tardía (izquierda) y con poda a tiempo (derecha)

Los elementos que forman parte del cilindro central defectuoso se describen a continuación en forma más detallada, indicando además los factores influyentes en cada caso.

### 3.5.1. DIÁMETRO SOBRE MUÑÓN (DSM)

Es el diámetro del fuste a la altura de un verticilo determinado que ha sido podado. Resulta de sumarle al diámetro propio del fuste, el engrosamiento provocado por la base de las ramas. No obstante, a nivel del árbol completo se debe considerar todos diámetros sobre muñón para cada verticilo podado; en consecuencia se establece un Diámetro Máximo Sobre Muñón (DMSM), el cual puede estar formado por radios de distintos verticilos.

En la conformación y estimación posterior del CCD es común que este no coincida con el DMSM, más la correspondiente profundidad de oclusión. Este hecho encuentra respuesta en la excentricidad de la médula y en la variabilidad de la oclusión en sentido radial. Estas variables provocan diámetros diferentes, a lo largo de la troza y en un mismo verticilo (Meneses, M. 1990). Por lo tanto es altamente probable que el CCD, se conforme con radios de diferentes verticilos (ver figura 3 – 14).

Diversos estudios concluyen que la primera poda resulta determinante en la obtención de un DSM aceptable, ello debido a que existe la tendencia a que el DMSM ocurra en las partes iniciales de la troza, justo donde el fuste tiene mayor diámetro. Por lo tanto se recomienda que la aplicación de la primera poda no se realice a baja altura, pues ello provocaría adelantar la ejecución de la segunda, lo que transformaría esta labor en una actividad anual, hasta lograr la altura deseada de poda (Meneses, M. 1992)

Posteriormente es necesario que cada poda genere sólo diámetros máximos sobre muñón menores o iguales a los obtenidos en podas anteriores. De otro modo, todo el trabajo previo pasaría a ser en vano, y por lo tanto, la posibilidad de obtener madera libre de nudos en las rotaciones utilizadas actualmente, pasarían a ser nulas.

El DSM es por lo tanto, una variable determinante para decidir la oportunidad de la primera poda, la frecuencia de las siguientes y por lo tanto la proporción de madera libre de nudos a obtener, para un diámetro de cosecha dado.

En el estudio de Park (1980, citado por Olivares, 1985) se deja de manifiesto la estrecha relación que existe entre el DSM y variables como: el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), altura total del individuo, diámetro de rama y altura de poda. También Park deja establecida la dependencia que tiene el tamaño del CCD con el DSM y la mejor jerarquía del DMSM en su determinación.

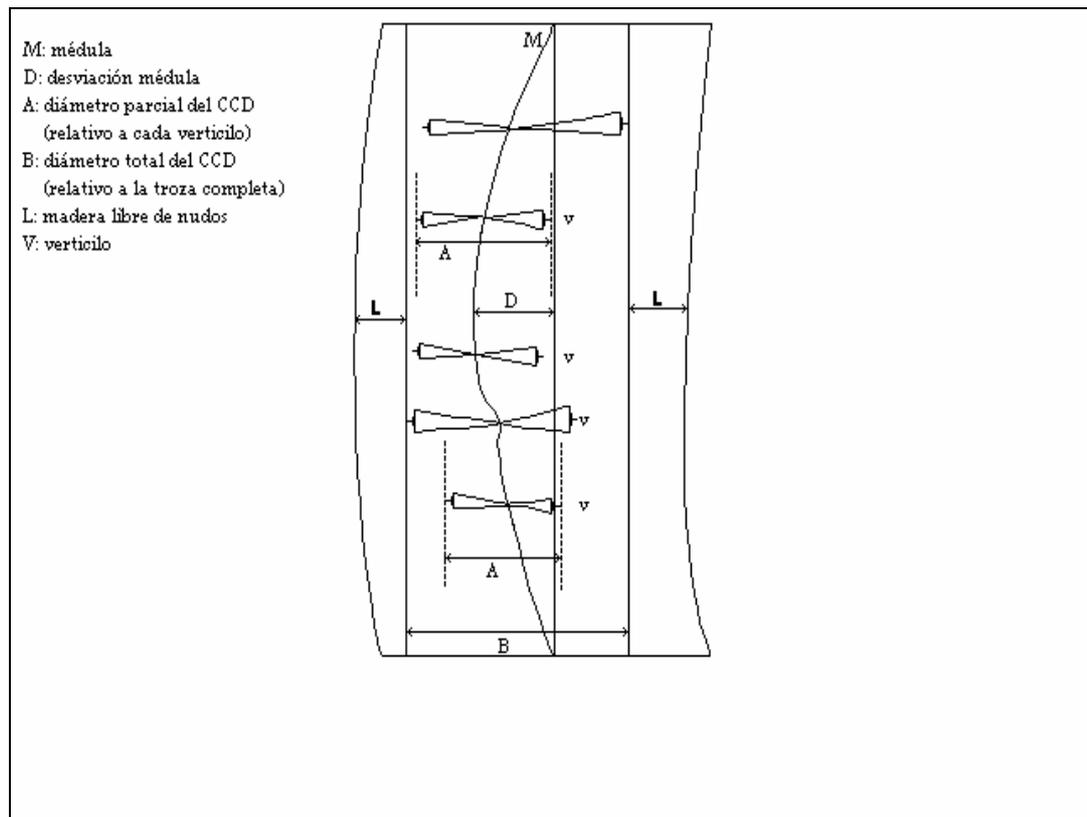


Figura 3 – 14: Esquema CCD relativo los verticilos y a la troza completa  
Fuente: Palazuelos, 1995.

### 3.5.2. DIÁMETRO DE RAMA (DR)

Esta característica de la rama en el momento de la poda, tiene una importancia fundamental en el diámetro que alcanza el CCD. Principalmente al determinar el tamaño del nudo y la posición a partir del cual empieza el proceso de oclusión, que posteriormente definirá al DSO.

Se ha comprobado que el DR puede llegar a determinar un aumento del valor máximo que logra el DSM, al podar en verde (Knowles, citado por Olivares. B; 1985). Ello debido a que se produce una reacción natural del árbol a engrosar ciertas ramas (principalmente las del próximo verticilo a podar), pudiendo provocar dos hechos negativos importantes: primero, la generación de un DSM mayor al obtenido con anterioridad, y en segundo lugar la pérdida del objetivo de la poda temprana. De lo anterior se establece la conveniencia de actuar sobre el rodal, cuando las ramas tengan dimensiones reducidas, si se desea obtener un cilindro defectuoso de diámetro igualmente reducido (Olivares, B. 1985)

### 3.5.3. DIÁMETRO SOBRE OCLUSIÓN (DSO)

Este diámetro se constituye a partir del DSM al cual se le agrega la profundidad de oclusión, que en realidad corresponde a la distancia entre la cara del muñón y la madera no deformada.

El proceso de oclusión – consistente en el cierre de la herida dejada por la eliminación de la rama – comienza con la formación del callo en el tejido cambial, en la periferia de la rama cortada, que crecerá en forma centripeta hasta cubrir totalmente la herida (Zimmermann, 1971).

La oclusión puede demorar hasta 4 años en formarse, si la poda se efectúa de manera correcta desde el punto de vista de su ejecución y del tipo de herramienta empleada (Palazuelos, R. 1995). En caso contrario si se cometen errores en la ejecución, el proceso puede demorar aún más, provocando un aumento en esta variable, más la formación de bolsas de resina, inclusión de corteza, y otros (Poblete et al. 1985, citado por Palazuelos, R. 1995). No obstante lo anterior, el tiempo de oclusión está determinado además por el crecimiento diametral, largo del muñón y diámetro de rama (Lewis y Ferguson, 1993)

Los tamaños de la oclusión en Pino radiata reportados por diversos trabajos, indican relaciones lineales con los diámetros de rama: 3 cm. para ramas de 1,5 cm. de diámetro a 5,5 y 7,5 cm. para ramas de 5 cm. de diámetro (Palazuelos, R. 1995). A pesar de ello, Meneses y Velasco (1992) proponen un comportamiento azaroso en la profundidad de oclusión, al mismo tiempo que en otro trabajo de Velasco (1992), señala que su valor es constante a 1,7 cm. cuando la poda se realiza correctamente desde un punto de vista técnico.

La profundidad de oclusión, también ha sido utilizada para predecir el CCD a través del establecimiento de una relación con los factores que la determinan, principalmente el diámetro de rama al momento de la poda (Brown y Pawsey, 1959). Sin embargo hay resultados opuestos, producto de la baja asociación que se verificó no sólo con dicho factor, sino que además con el largo de ramas, ángulo de inserción y altura en el fuste, según estudios conducidos por Olivares (1985). En el mismo trabajo, se desechó la utilización del DSO en los modelos estadísticos predictores del CCD en beneficio del DSM. Más tarde Olivares y Meneses (1992) encontraron una alta correlación ( $r^2=0,92$ ) entre el CCD y el DSO (ver relación descrita por Ec. 2).

En relación a los tamaños posibles del cilindro central defectuoso, se establecen diferentes valores en función de las técnicas aplicadas en las podas y la ejecución de otros tratamientos silvícolas. Por ejemplo en Nueva Zelanda, Emmingham y Fitzgerald (1995) reportan tamaños cercanos a 10.16 cm. Lewis y Ferguson (1993), citado por Palazuelos (1995), señalan que un valor apropiado es 15 cm. No obstante, para la realidad silvícola de Chile un valor realista puede estar entre 18 cm. y 20 cm. con podas realizadas a tiempo y con pocos problemas técnicos (Meneses y Velasco, 1992; citado por Palazuelos, 1995). El alcance de tales tamaños se logran con técnicas que incluyen la poda a múltiples alturas, dependiendo del objetivo a futuro sin dejar de tener en consideración la incertidumbre normal de una fuerte inversión.

Finalmente se muestra gráficamente la relación existente entre los elementos principales que se relacionan con el CCD, a nivel de un verticilo (Figura 3 – 15).

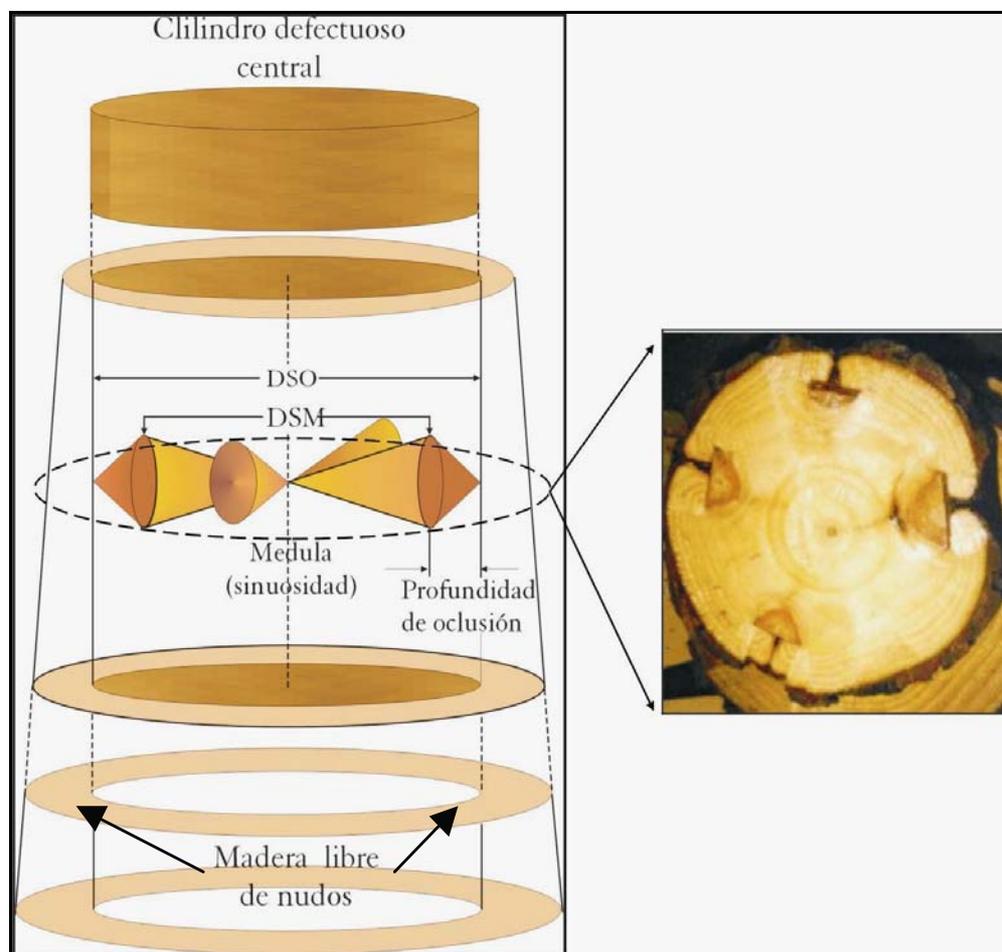


Figura 3 – 15: Esquema simplificado cilindro central defectuoso.  
Se indican los principales parámetros descriptores del CCD.

Los modelos de regresión para estimar el CCD, según diferentes autores, más su correspondiente coeficiente de determinación son:

Olivares y Meneses (1992).

- $CCD(\text{cm}) = 0,93655 + 1,01877 * DSO(\text{cm})$ ;  $r^2 = 0,92$  Ec.2
- $CCD(\text{cm}) = 6,23111 + 0,96166 * DSM(\text{cm})$ ;  $r^2 = 0,79$  Ec.3

De igual modo Gosnell propone (1987).

$$CCD(\text{cm.}) = 46,06 + (0,95 * DSO) + (0,003 * \text{curvatura fuste}^2); r^2 = 0,74 \text{ Ec.4}$$

Luego de la determinación del CCD, la información a obtener es el volumen bruto libre de nudos (diferencia entre volúmenes bruto y del CCD). Según Olivares (1992), es común en la práctica que el volumen teórico potencial libre de nudos sea superior al realmente obtenido.

La explicación a este problema radicaría en el sistema de aserrío empleado, en el cual puede haber pérdidas importantes de madera tanto por la cuadratura de los trozos como por la rigidez del programa adoptado en cada caso particular. Así, la solución pasa necesariamente por utilizar maquinaria que permita en forma sistemática y ágil procesar mas eficientemente la madera exterior libre de nudos (Olivares, B. 1992). A modo de ejemplo, la Figura 3 – 16 muestra un esquema propuesto para maximizar la obtención de madera libre de nudos antes de entrar al la línea de aserrío, para dos escenarios posibles; poda a tiempo y poda tardía.

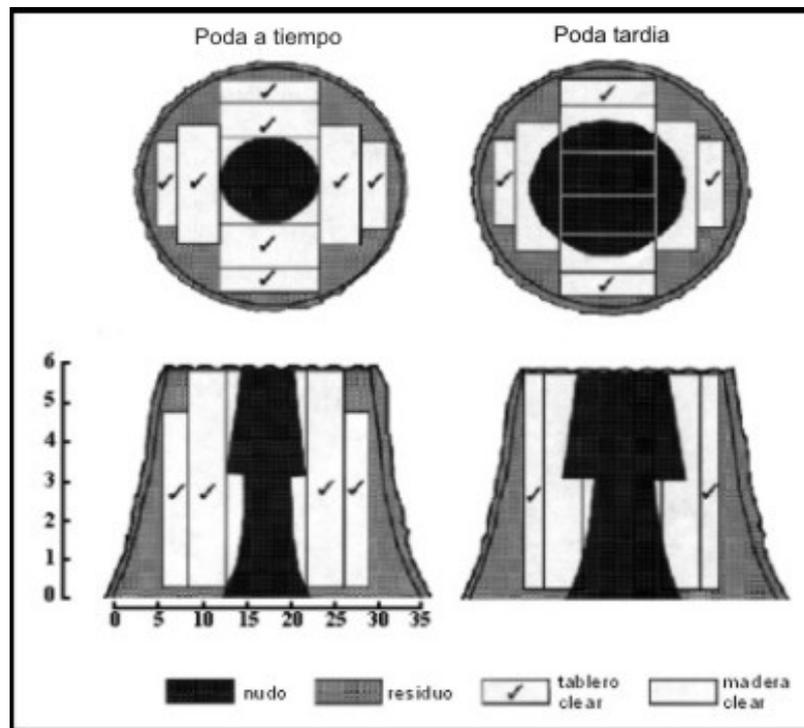


Figura 3 – 16: Esquema de aserrío y obtención de madera libre de nudos (Eje x en cm. Eje y en mt.)

### 3.6. RADIACIÓN GAMMA – ANTECEDENTES

#### 3.6.1. LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La radiación electromagnética es catalogada de una manera muy especial, puesto que presenta características empíricas concordantes con el comportamiento de una partícula y de una onda, es decir una naturaleza dual. Esta imagen dual es necesaria para dar una descripción completa de los fenómenos físicos. Ambas perspectivas son complementarias entre sí (Resnick, R. 1978).

La radiación electromagnética tiene distinta capacidad de ionización. La radiación no ionizante corresponde a la parte del espectro electromagnético que incluye a las ondas de radio, microondas y la luz visible. En cambio la radiación ionizante, que corresponde al resto del espectro electromagnético, incluye a los rayos X y la radiación gamma. Las características generales de la radiación electromagnética son:

- Se propaga en el vacío a la velocidad de la luz “c”, de acuerdo con la relación:

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{Ec. 5}$$

En donde c es la velocidad de la luz,  $\lambda$  la longitud de la onda y f su frecuencia.

- Esta radiación genera en su camino un campo eléctrico y uno magnético ortogonales entre sí, y al vector velocidad de propagación de la onda.
- Está compuesta por fotones, de acuerdo con la teoría corpuscular de la radiación, los cuales tienen masa en reposo igual a cero.
- Los fotones tienen una energía (E) y momento lineal (p), lo que genera una presión sobre la superficie que inciden. La energía y el momento lineal vienen dados por:

$$E = h \cdot f \quad \text{Ec. 6}$$

$$p = \frac{E}{c} \quad \text{Ec. 7}$$

En donde h es la constante de Planck<sup>4</sup> y f la frecuencia.

- La energía de los fotones, puede transmitirse a diferentes objetos que estén en su trayecto.
- Los fotones pueden ser creados o destruidos cuando la radiación es emitida o absorbida.
- Pueden interactuar mediante colisiones con otras partículas, por ejemplo con electrones.

---

<sup>4</sup> La constante de Planck es:  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4.135 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$

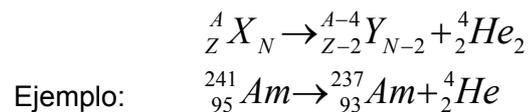
### 3.6.2. RADIATIVIDAD

Diversos estudios llevados a cabo, han permitido establecer el origen de la radioactividad en el decaimiento o desintegración de núcleos inestables. Así se han establecido tres tipos de decaimiento de los núcleos inestables: el decaimiento alfa, decaimiento beta y decaimiento gamma; cada uno de los cuales se caracteriza por un comportamiento particular al someterse a un campo magnético y por presentar distinto poder penetrante.

- Decaimiento alfa

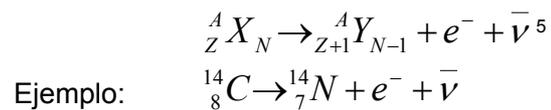
En una escala de referencia subatómica, las partículas alfa son consideradas como masivas, puesto que constan de dos protones y dos neutrones. Raramente los decaimientos alfa tienen lugar en elementos de bajo peso atómico. En cuanto al espectro de energía, la emisión suele ser monoenergética o bien distribuida en forma discreta en distintas energías y definida por el proceso nuclear.

Las partículas alfa pueden ser detenidas por una lámina de papel. El poder penetrante de estas partículas disminuye a medida que pierden energía como resultado de colisiones en un medio. En forma esquemática el decaimiento alfa se muestra de la siguiente forma, empleando la nomenclatura correspondiente:



- Decaimiento beta negativo:

En este decaimiento las partículas emitidas corresponden a electrones además de una segunda partícula descubierta con posterioridad, llamada neutrino  $\nu$ . Este proceso, puede esquematizarse de la siguiente forma (Krane, K. 1996):



Además hay otros tipos de decaimiento: la captura de electrones y la emisión de positrones (Beiser, A. 1995).

- Decaimiento Gamma

Presenta un alto poder penetrante y no se ve afectado por la acción de un campo magnético (ver Figuras 3 – 17a y 3 – 17b). En este decaimiento, el átomo emisor no experimenta cambios en el número de sus constituyentes. Se produce la emisión de uno o más fotones desde un núcleo en estado excitado o con exceso de energía, para luego alcanzar un nivel energético estable.

El estado excitado de un núcleo puede generarse en átomos que previamente han experimentado alguno de los decaimientos anteriores (Krane, K. 1996). La energía de los

---

<sup>5</sup> El símbolo  $\bar{\nu}$ , corresponde al antineutrino.

fotones emitidos corresponde a la diferencia de energía entre los estados iniciales y finales del núcleo, y suele alcanzar el rango de los megaelectronvolt (MeV). Como ejemplo se tienen dos casos:  ${}^{27}_{12}\text{Mn}$  y  ${}^{12}_5\text{B}$ . El primero experimenta un decaimiento beta negativo, transformándose en  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  excitado. El estado final del núcleo se logra gracias a uno o dos decaimientos gamma (figura 3 – 18a). En el segundo caso, el núcleo original puede alcanzar el estado estable por dos vías: mediante un único decaimiento beta hasta el estado estable, o por un decaimiento beta negativo hasta un estado intermedio que corresponde al núcleo final excitado (indicado por \*), el cual experimentará finalmente un decaimiento gamma logrando así el estado estable (figura 3 – 18b).

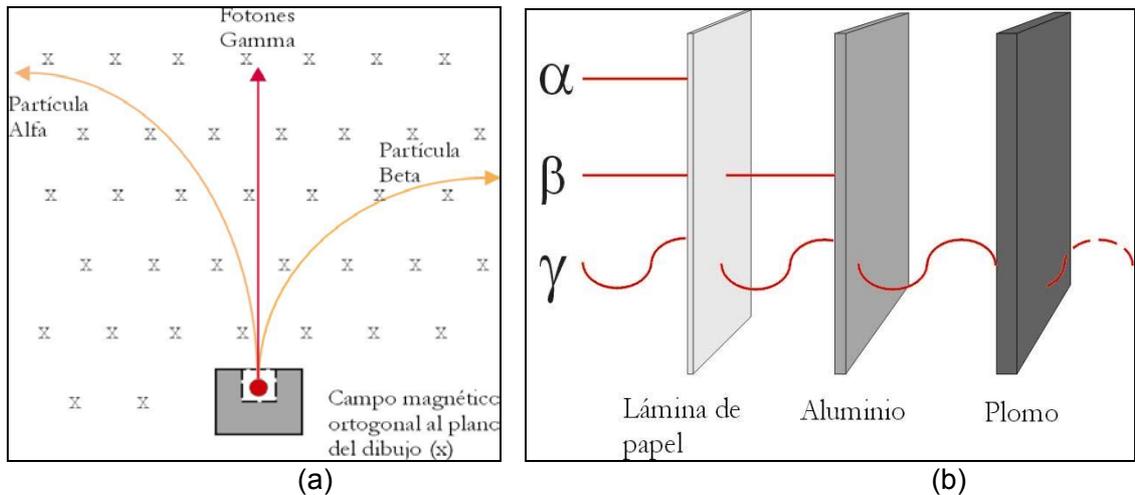


Figura 3 – 17: (a) Comportamiento en un campo magnético para rayos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .  
 (b) Poder penetrante (plomo de sólo algunos centímetros de espesor)  
 Fuente: Besier, A. (1995)

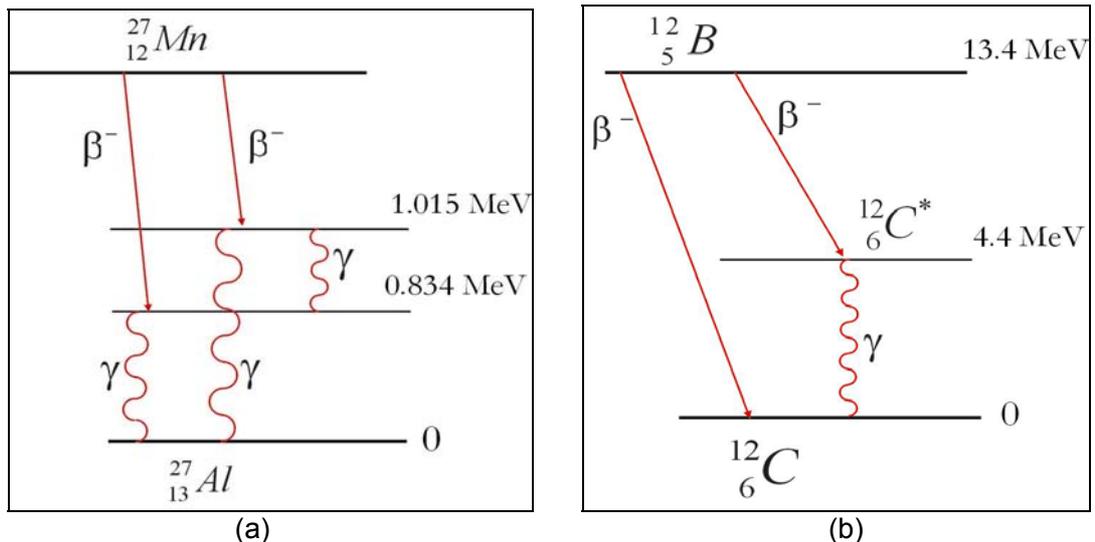


Figura 3 – 18: Decaimientos beta y gamma hasta el estado estable del núcleo.  
 Fuente: (a) Beiser, A. – 1995; (b) Fuente: Serway, R. (1996)

### 3.6.3. RADIACIÓN GAMMA

Corresponde a ondas electromagnéticas y por lo tanto presenta sus características. Son similares a los rayos X, sin embargo la diferencia con estos, está en el origen. Como se mencionó, los fotones gamma se originan en el núcleo de un átomo en estado excitado, el cual mediante su emisión regresa al estado estable (Beiser, A. 1995).

Otra característica de la radiación gamma es su ubicación en la zona de mayor energía del espectro electromagnético, lo que implica frecuencias del orden de los  $10^{19}$  Hertz. Esta característica marca una clara diferencia práctica en laboratorio, puesto que para producir semejantes valores de frecuencia, un tubo de rayos X debería operar con una diferencia de potencial muy cercana a 770000 volts (Semat, H. 1971).

#### 3.6.3.1. INTERACCIÓN CON LA MATERIA

La radiación gamma interactúa con la materia mediante tres procesos, estos son: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la producción de pares.

- Efecto Fotoeléctrico

Es la interacción entre un fotón de energía  $h \cdot f$  y la nube electrónica del átomo. El resultado, es la desaparición del fotón y la eyección de un electrón desde la nube, el cual recibe el nombre de fotoelectrón (ver Figura 3 – 19). Con la energía del fotón, el átomo se transforma en un ión positivo (Tsoufanidis, N. 1983). Así, la energía cinética máxima de un electrón liberado es:

$$K_{\max} = h \cdot f - \phi \quad \text{Ec. 8}$$

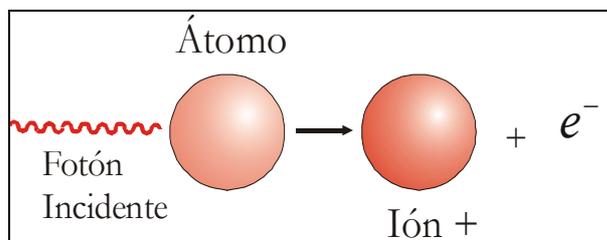


Figura 3 – 19: Esquema para el Efecto Fotoeléctrico

Con respecto las características de la radiación aplicada,  $K_{\max}$  es independiente de la intensidad de fuente luminosa, no así de la frecuencia. Ello debido a que el aumento en la intensidad sólo implica un aumento de fotones, pero no de la energía de cada uno de ellos, la cual es siempre  $h \cdot f$ . Otro aspecto característico, es que si la frecuencia de la luz es adecuada, la emisión de fotoelectrones es casi instantánea. Además de la existencia de una frecuencia crítica, bajo la cual no se produce dicha emisión (Resnick, R. 1978).

- Efecto Compton

En esta interacción, el fotón no desaparece luego de colisionar al electrón, sólo sufre un cambio de dirección y de energía (ver Figura 3 – 20).

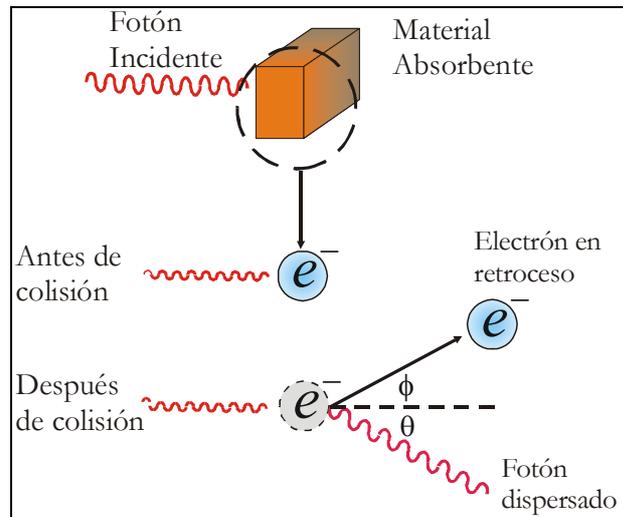


Figura 3 –20: Efecto Compton.  
Fuente: Knoll (1989).

El valor del ángulo de dispersión del fotón, no está restringido. Ello permite que la energía transferida al electrón, pueda variar desde cero hasta un porcentaje importante de la energía inicial del fotón, en función de dicho ángulo (Tsoulfanidis, 1983).

- Producción de pares

Es el resultado de la interacción entre un fotón y el núcleo de un átomo o también con un electrón. En ella el fotón desaparece y en su lugar aparece un par electrón – positrón (Figura 3 – 21). Luego de llevado a cabo la interacción, el núcleo no presenta modificación en su carga (Tsoulfanidis, 1983). Para que la producción de pares se verifique, el fotón incidente debe poseer una energía no inferior a 1,022 MeV. Tales fotones corresponden a radiación gamma de alta energía.

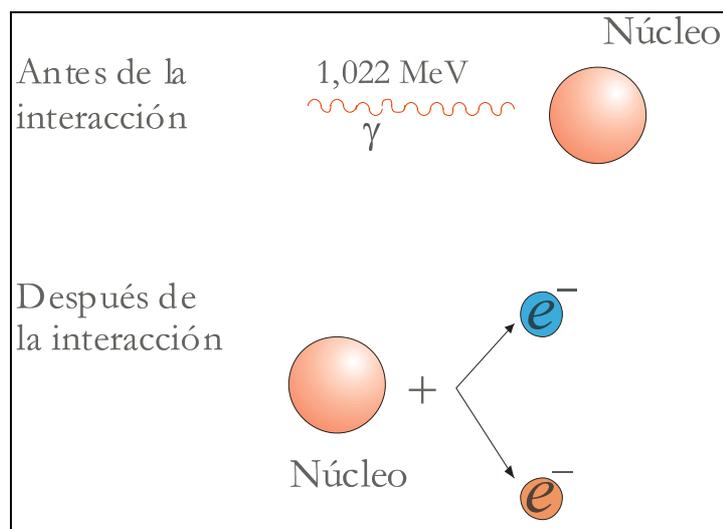


Figura 3 – 21: Producción de pares. Fuente: Knoll (1989).

### 3.6.3.2. ATENUACIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA

Se refiere a la disminución en la intensidad ( $I_0$ ) de un haz de fotones que penetra en un medio. Dicha atenuación, se efectúa mediante algunos de los procesos ya descritos. Este hecho tiene implicancias prácticas muy importantes en todo estudio que emplee un haz de radiación gamma como herramienta de análisis.

La ocurrencia de los tres tipos de interacción de los fotones con la materia, obedece a una probabilidad conjunta. Dicha probabilidad llamada coeficiente de atenuación lineal ( $\mu_L$ ), que depende de la energía de los fotones incidentes y la composición del material, está formada por la suma de las probabilidades asociadas a las tres interacciones (Tsoufanidis, 1983):

$$\mu_L = \tau(E.Fotoeléctrico) + \sigma(E.Compton) + \kappa(P.Pares) \quad \text{Ec. 9}$$

Ello permite establecer una gráfica (Figura 3 – 22) en donde se muestra la importancia relativa de las tres interacciones, como función del número atómico y de la energía del fotón ( $h \cdot \nu$ ). Las líneas en dicha figura, muestran los valores de  $h \cdot \nu$  y  $Z$  para los cuales los efectos vecinos son igualmente probables.

La cantidad de fotones incidentes ( $I_0$ ), emergentes ( $I$ ) y el espesor del material en cuestión ( $t$ ), se relacionan con el coeficiente de atenuación lineal  $\mu_L$  de acuerdo a una relación exponencial, llamada ecuación de Lambert - Beer:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_L \cdot t} \quad \text{Ec. 10}$$

Debido a que en el interior de un material es posible encontrar variaciones de densidad, suele usarse el coeficiente de atenuación másico  $\mu_p$  (ver relación dada por Ec. 11), donde  $\rho$  es la densidad del medio absorbedor. El valor del coeficiente de atenuación másico, es independiente del estado físico del material atenuador (sólido, líquido o gaseoso).

$$\mu_p = \frac{\mu_L}{\rho} \quad \text{Ec. 11}$$

Si un material está formado por más de un solo tipo de átomo, el coeficiente de atenuación másico se calcula de acuerdo a la siguiente relación:

$$\mu_p (m^2 / kg) = \sum_1^n w_i (\mu_p)_i (m^2 / kg) \quad \text{Ec. 12}$$

donde:

$w_i$ : peso ponderado del elemento  $i$ -ésimo

$(\mu_p)_i$ : coeficiente de atenuación másico del elemento  $i$  – ésimo

Cuando el haz emerge del material los fotones llegan al detector, donde son contabilizados aquellos que no interactuaron con el material. De cumplirse la relación dada por la Ec. 10, se dice que el montaje experimental posee una buena geometría (Knoll, 1989). No obstante y en la práctica ello no suele ocurrir, pues de la totalidad de

fotones que llegan al detector, existe un segundo tipo de fotones también contabilizados. Ellos corresponden a productos de interacciones (fundamentalmente efecto Compton y producción de pares) con el material absorbedor o con el mismo blindaje (Tsoufanidis, 1983). Ello implica necesariamente, la introducción de una corrección en la relación de atenuación gamma, llamada "Build – Up Factor" (B), cuyo valor depende de la energía del fotón, del espesor del material atenuador y de la geometría del sistema. Así la relación dada por Ec. 10, adopta la siguiente forma:

$$\frac{I}{I_0} = B(t, E_\gamma) \cdot e^{-\mu_L \cdot t} \quad \text{Ec. 13}$$

donde:

t = espesor material atenuador  
 $E_\gamma$  = energía de los fotones incidentes

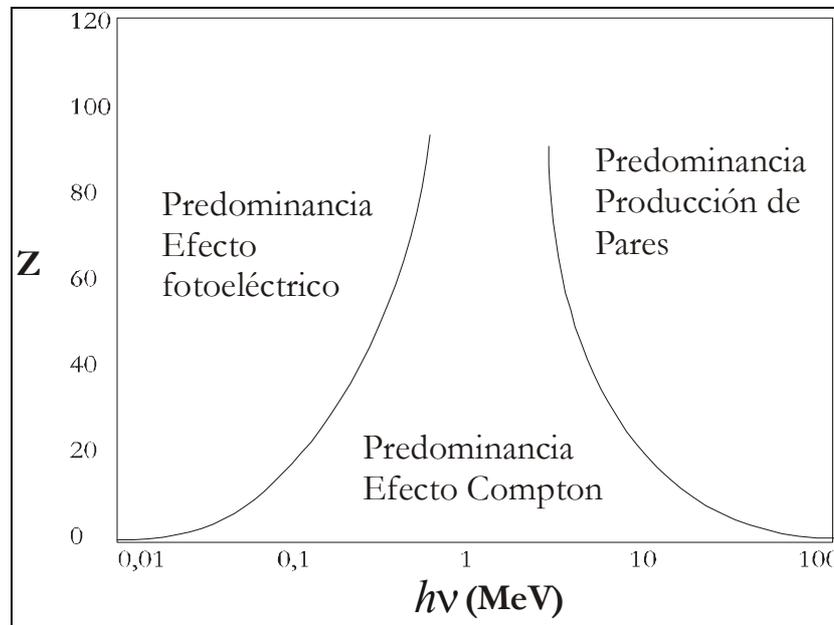


Figura 3 – 22: Importancia relativa de las tres mayores interacciones de radiación gamma como función de la energía del fotón y  $Z$ .  
 Fuente: Knoll (1989)

En casos de buena geometría, el valor de  $B(t, E_\gamma)$  es uno (Knoll, 1989). Además cuando "t" es muy pequeño, el valor del factor  $B(t, E_\gamma)$  tiende a la unidad, mostrando un aumento cuanto "t" se incrementa.

### 3.6.3.3. RADIACIÓN GAMMA (USOS GENERALES)

Se encuentran amplias aplicaciones en áreas tales como la industria alimentaria (procesadoras, alimentación, medioambiente, etc.), además de otros servicios como su utilización en la industria química (por ejemplo, la aplicación en el mejoramiento de las propiedades de polímeros plásticos).

#### 3.6.3.4. RADIACIÓN GAMMA (APLICACIÓN EN EL ÁREA FORESTAL)

En el área silvícola como en la industrial tanto en el extranjero como en Chile, existen ejemplos muy variados sobre su aplicación y potencialidad asociada. En ellos se verifican además, las ventajas sobre otros métodos similares poco prácticos y de tipo destructivo.

Hearmon (1960) hizo una revisión de las numerosas técnicas para examinar la madera, así como la presentación de nuevas técnicas basada en el uso de rayos X y gamma. Así mismo indicó las principales ventajas de los métodos no destructivos sobre los tradicionales.

Una muestra puede ser examinada en forma repetitiva, ello permite manejar las variables de control, de modo realista y práctico. Además se minimiza la variabilidad en las propiedades de la muestra, como el contenido de humedad. Finalmente está la factibilidad de examinar piezas en servicio y árboles en pie.

En un análisis comparativo de las técnicas de radiación ionizante, se indicó la desventaja que presenta la aplicación de rayos X en terreno, debido a que los equipos generadores están lejos del concepto portátil, incluso hasta hoy.

Winistorfer, et al. (1986) contrastaron perfiles de densidad obtenidos mediante atenuación de radiación gamma y utilizando gravimetría convencional en tableros de madera de cuatro tipos: tablero de partícula, wafer board, tablero de fibras y MDF. Se empleó como fuente radiactiva  $^{241}\text{Am}$ . Al efectuar comparaciones en la obtención de perfiles de densidad por gravimetría y por el método gamma, el primer método presentó las siguientes dificultades: se verificó lentitud y poca practicidad en la manipulación de tableros delgados. Específicamente los errores se concentraron en las repetitivas mediciones de volúmenes y en la obtención de perfiles de densidad, en donde la resolución obtenida fue muy baja. Las dificultades anteriores no se presentaron al utilizar el método gamma, sin embargo se verificaron los siguientes problemas: errores de medición en los bordes de la muestra, producto de la incidencia parcial, pero directa del haz. Como conclusión se enfatiza la rapidez, el carácter no destructivo, precisión y exactitud del método de irradiación gamma.

Davis et al. (1993), estudió la aplicación potencial de la atenuación de radiación gamma, en el monitoreo del proceso de secado en *Eucalyptus regnans*. En dicho estudio se obtuvieron distribuciones para la humedad, densidad y contracción, para las distintas etapas del proceso, con miras a enfrentar el problema del colapso. Se utilizó un densitómetro de rayos gamma basado en una fuente colimada de  $^{241}\text{Am}$ , con una actividad de 200 mCi y 59.5 keV de energía. La colimación empleada en la fuente y en el detector fue rectangular, de 4 por 0.25 mm. y 0.5 por 1 mm. respectivamente. Se emplearon 5 pares de muestras de 95 por 45 mm. de sección y 100 mm. de longitud. Cada pareja fue secada a 3, 10, 22 y 53 días en una cámara mantenida a un 12% de humedad. La última pareja se mantuvo en condiciones verdes. La determinación de densidad se llevó a cabo en esos períodos, obteniendo un  $\mu_p$  promedio en seco igual a  $0,0189 \pm 0,0002 \text{ m}^2/\text{kg}$ . La distribución de los contenidos de humedad y densidad fueron muy similares, tanto para el método gravimétrico como para el basado en atenuación de fotones, con errores absolutos mínimos de 3% a 2% para el contenido de humedad y  $\pm 0,02 \text{ gr}/\text{cm}^3$  a  $\pm 0,006 \text{ gr}/\text{cm}^3$  para la densidad. En el caso de la contracción, los resultados obtenidos mediante la atenuación de radiación gamma son válidos según la teoría, y muestran la factibilidad del método para mostrar distribuciones espaciales del parámetro,

durante el secado. Ello permitiría según el estudio, desarrollar nuevos esquemas de secado para evitar el colapso en ejemplares de *Euclalyptus*.

Métodos más modernos, como el uso de la tomografía computarizada basada en rayos X, han tenido éxito en el análisis de defectos internos y mensura de parámetros físicos, para trozas de tamaño comercial. Por ejemplo, en el estudio de Benson – Cooper et al. en 1982, se utilizó esta técnica en trozas de *Pinus radiata*, *Pseudotsuga menziesii*, *Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus delegatensis* y *Nothofagus fusca*, utilizando un escáner tomográfico computacional de cuarta generación, con el objeto de ubicar defectos internos (principalmente pudrición y nudos). Las imágenes obtenidas fueron contrastadas con cortes transversales en las trozas, mostrando una excelente definición para problemas tales como túneles larvales, pudrición avanzada y oclusiones en nudos. Para características como anillos de crecimiento, proporción relativa de albura – duramen y defectos como pudrición incipiente y nudos, la detección fue sencilla. No obstante, existe un problema relacionado con la presencia de altos contenidos de humedad, ya que dichas áreas son mostradas como de elevada densidad, cuando en verdad se trata de agua. Los principales problemas de esta metodología, radican principalmente en el alto costo del equipo generador, los problemas derivados del excesivo calor generado por el tubo de rayos X, el requerimiento constante de personal de mantención altamente calificado, etc.

Laufenberg et al. (1986) abordaron la utilización potencial de la atenuación de radiación gamma, en la elaboración de perfiles de densidad en tableros reconstituidos, poniendo atención en la obtención de los coeficientes de atenuación másicos para los distintos constituyentes. En este estudio se utilizó una fuente de  $^{241}\text{Am}$ . Los resultados experimentales de  $\mu_p$  para los diferentes materiales, resultaron ser prácticamente idénticos a los predichos. Así mismo se deja establecida, la importancia que posee el contenido de humedad. También se propone que el comportamiento variable de los perfiles de densidad, es atribuible a los constituyentes del tablero, pudiendo enfrentar dicho problema con fuentes más intensas o en su defecto, aumentar los tiempos de conteo. Por último, se establece la dificultad del método al inspeccionar los bordes del material.

Con respecto a las investigaciones llevadas a cabo en el país, y en particular con las realizadas gracias al apoyo de los proyectos de investigación FONDECYT; el Departamento de Ingeniería de la Madera y el Laboratorio de Haces Lónicos de la Facultad de Ciencias, ambos de la Universidad de Chile, han realizado numerosos estudios conjuntos acerca de la aplicabilidad de la atenuación de radiación gamma, en el área de la tecnología de la madera. Entre los principales trabajos se pueden citar los siguientes:

- En 1996 y al interior del Proyecto Fondecyt N° 1940396, M.I. Dinator et al. estudiaron un método para determinar la densidad en madera, basado en la atenuación de radiación gamma. En dicho trabajo se utilizó una fuente de  $^{241}\text{Am}$  y se determinó el coeficiente de atenuación másico de fotones de 59.5 keV en muestras de pino radiata. El valor obtenido para el coeficiente de atenuación másico, fue de  $0.192 \pm 0.002 \text{ cm}^2/\text{g}$ . La comparación con el método gravimétrico mostró una pendiente de 1.001 y un factor de correlación 0.94. Ello indica que el método empleado es una alternativa confiable y no destructiva para obtener rápidamente perfiles de densidad en muestras de pino radiata.

- Sánchez (1997) abordó el análisis de la factibilidad de emplear la atenuación de radiación gamma, como indicador de la presencia de defectos en madera de Pino radiata. Se utilizó la misma fuente que en el trabajo anterior. Como etapa previa se determinaron los efectos de la densidad, contenido de humedad, inclinación de anillos y dirección de la irradiación sobre el coeficiente de atenuación lineal ( $\mu_L$ ). Se encontró que una variación en densidad ( $0.05 \text{ gr/cm}^3$ ) y en el contenido de humedad (20%), afectan a  $\mu_L$  en un 10% y 8% respectivamente. Con respecto a la individualización de los defectos, es factible detectar nudos, bolsillos de resina y corteza, y madera de reacción. Otro resultado importante, es que no hay diferencias significativas a un 95% de confianza, para el valor de  $\mu_p$  referido a madera de primavera y verano, nudos y madera normal; determinándose un valor de  $0.192 \pm 0.003 \text{ cm}^2/\text{g}$ .
- Utilizando la misma metodología y una fuente de  $^{241}\text{Am}$ , Karsulovic et. al. (1997) determinaron la eficiencia del coeficiente de atenuación lineal, en la detección de nudos presentes en piezas estructurales de Pino radiata. Se procedió a irradiar en sentido radial y tangencial, piezas de 8% a 12% de contenido de humedad y  $0.43 \text{ gr/cm}^3$  a  $0.62 \text{ gr/cm}^3$  de densidad, que presentaban nudo pasante de diámetros fluctuantes entre 20 mm. y 50 mm. Los resultados indicaron que las diferencias del coeficiente de atenuación lineal ( $\mu_L$ ) para el sentido radial y tangencial, estadísticamente no eran significativas a un nivel de significancia del 5%. Comparando los valores de  $\mu_L$  para nudo y la densidad para madera libre de nudo, y de acuerdo a una correlación de 0.86 se concluye la factibilidad de detectar nudos de modo confiable.

## 4. MATERIAL Y MÉTODO

### 4.1 MATERIAL

#### 4.1.1. MATERIAL DE ENSAYO

Para el estudio se dispuso de dos trozas obtenidas de un individuo, el cual fue proporcionado por Bosques Arauco S.A. Dicho individuo pertenecía a un grupo destinado a estudios por parte de la empresa con el objeto de obtener rendimientos de madera libre de nudos. El grupo de individuos aludido, presenta los siguientes antecedentes de manejo silvícola:

PROPIETARIO	BOSQUES ARAUCO S.A.
PREDIO	CUYINCO
UBICACIÓN	CURANILAHUE
SUPERFICIE	274 Há
AÑO PLANTACIÓN	1976
ÉPOCA PODAS	9 años – 11 años
ALTURA DOMINANTE	34 m. (24 años)
DAP (MEDIO)	41.2 cm.

Tabla 4 – 1: Características básicas del predio origen del material de estudio.

Del individuo elegido, se procedió a identificar dos trozas de aproximadamente 70 cm. de longitud cada una, con la precaución de que dicho material incluyera un área nudosa y una buena proporción de madera libre de nudos (Tabla 4 – 2). Luego en laboratorio, se definió un sistema de referencia para realizar las irradiaciones sobre las trozas. Este sistema coordinado de tres ejes (XYZ), fue concebido de tal manera que su origen quedó ubicado en el centro del plato portamuestras del banco de pruebas. Por lo tanto, el eje Y es coincidente con el haz de fotones gamma, el eje X es perpendicular al eje Y, finalmente el eje Z es ortogonal al cruce de los ejes X e Y (centro del plato portamuestras, ver Figura 4 – 1). Este sistema coordinado, permitió posteriormente centrar las trozas en el soporte de muestras, con el objeto de lograr una geometría reproducible.

Luego de establecer este sistema, se observó en ambas trozas una leve excentricidad de la médula, con un desplazamiento hacia la derecha respecto del mayor diámetro paralelo posible al eje “Y”. Lo anterior podría denotar la posibilidad de tener presencia de madera de reacción.

Con respecto a la presencia de corteza, ambas trozas la presentaban en forma parcial en aproximadamente un 70% de su contorno.

	ALTURA	DIÁMETRO MENOR	DIÁMETRO MAYOR
TROZA 1	70 cm.	34.8 cm.	37.8 cm.
TROZA 2	65 cm.	34.0 cm.	36.3 cm.

Tabla 4 – 2: Dimensiones del material de ensayo.

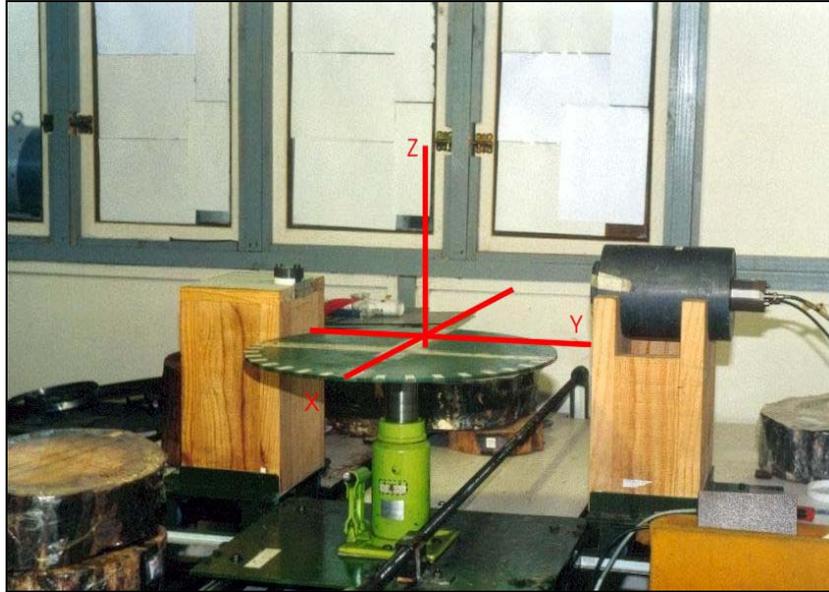


Figura 4 – 1: Sistema de referencia de tres coordenadas rectangulares (Banco de pruebas, Facultad de Ciencias – U. de Chile)

#### 4.1.2. EQUIPOS DE ASERRÍO Y CORTE

Corresponden a equipos utilizados en la preparación de las trozas, rodela, probetas y acondicionamiento del material para la etapa de caracterización física y determinación de densidad; los cuales pertenecen al Departamento de Ingeniería de la Madera de la Universidad de Chile.

- Banco Sierra Huincha “POWERMATIC – 80”. Ancho de corte: 3 mm.  
Usos: Corte primario transversal sobre trozas y obtención de rodela, para caracterización física.
- Bancos Sierra Circular “MÍNIMAS – CU300” y “WADKIN BURNGREEN – PANELMASTER”. Ancho de corte (ambas): 3 mm.  
Usos: Obtención de probetas de dimensiones precisas a partir de rodela, para caracterización física y para determinación de densidad mediante atenuación de fotones.
- Motosierra “STIHL – 70”. Ancho de corte: 10 mm.  
Usos: Disección transversal de rodela, para tamaños longitudinales no recomendados en el uso del banco de sierra huincha “POWERMATIC – 80”.  
Disección transversal exploratoria de rodela, para la etapa de verificación de resultados.

#### 4.1.3. EQUIPOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Los equipos pertenecen al Laboratorio de Propiedades Físicas del Departamento de Ingeniería de la Madera y al Laboratorio de Haces Iónicos del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias, ambos de la Universidad de Chile.

- Balanza digital CHYO “MK – 500C”. Precisión: 0,01 gr.  
Uso: Determinación de pesos, para la etapa de caracterización física del material.
- Balanza digital AND “EK – 1200”. Precisión: 0,1 gr.  
Uso: Determinación pesos en probetas irradiadas, en la determinación de  $\mu_p$ .
- Pie de metro análogo “STORM”. Precisión: 0,05 mm.  
Usos: Determinación de dimensiones en probetas, en etapa de caracterización física inicial y en la determinación de  $\mu_p$ .
- Horno “SHELL LAB – FX 1350”. Precisión: 1°C  
Uso: Secado de probetas a estado anhidro, en etapa de caracterización física inicial.
- Horno MEMMERT – UM100”. Precisión: 1°C  
Uso: Secado a estado anhidro de probetas irradiadas, en etapa de análisis de  $\mu_p$ .

#### 4.1.4. SISTEMA ESPECTROSCÓPICO GAMMA

Reúne todos los elementos electrónicos análogos y digitales, que permiten el análisis por atenuación de fotones gamma del material objetivo. Además de ello, cuenta con elementos mecánicos o bancos de ensayos que permiten el montaje apropiado, para cada tipo de material. La ubicación del sistema en su conjunto, esta en el Laboratorio de Haces Iónicos de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. En dicho laboratorio, y para efectos del presente estudio y posteriores, se habilitó un recinto especial contiguo al antiguo ciclotrón.

##### • Electrónica – Fuente Radiactiva

- Fuente radiactiva: Corresponde a 2 fuentes de  $^{241}\text{Am}$ , más el respectivo blindaje de plomo. Energía: 59,5 keV. Vida Media: 433 años.  
Actividad: 14 mCi. Procedencia: Inglaterra.
- Detector: Cristal de Ioduro de Sodio dopado con Talio (Na(Tl)) de 2” x 2”. Blindado en estructura cilíndrica de plomo de 4,6 cm. de espesor.

Marca: EG&C ORTEC  
Modelo: 266 PM Base

N° Serie: 1280258  
Procedencia: E.U.A.

- Pre – amplificador: Marca: EG&G ORTEC N° Serie: 6980 Modelo: 113

- Amplificador: Marca: EG&G ORTEC N° Serie: Iro581 Modelo: 571
- Fuente alto voltaje: Marca: EG&G ORTEC N° Serie: 2891 Modelo: 556
- BIN Power Suply: Marca: EG&G ORTEC N° Serie: 0377 Modelo: 401A
- Computador: Marca: IBM Compatible Modelo: AT 486
- Tarjeta multicanal: Marca: TENNELEC Modelo: PCA II
- Estabilizador Voltaje: Marca: MATSUNAGA STAVOL Modelo: SVC 1000NM



Figura 4 – 2: Horno digital MEMMERT, precisión 1°C.  
(Facultad de Ciencias – U. de Chile)

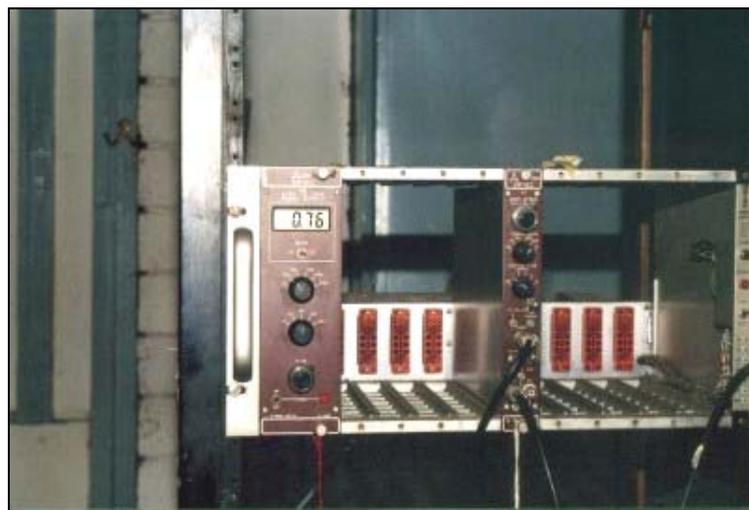


Figura 4 – 3: Electrónica asociada al sistema espectroscópico gamma.  
(Facultad de Ciencias – U. de Chile)

- **Bancos de ensayos (Figuras 4 – 4 y 4 – 5)**

Se utilizaron dos bancos, en donde el material se irradió de acuerdo a los requerimientos específicos. El primer banco permitió el trabajo con un haz colimado (colimación fina – 3 mm), el cual está destinado a ensayos de precisión con muestras dimensionadas. En el segundo banco, el haz no está colimado (colimación amplia) y dada sus especificaciones, permite el trabajo con muestras de gran tamaño, principalmente trozas. Ambos bancos operan con su propia fuente radiactiva, sin embargo utilizan el mismo detector y electrónica. Ello requiere el trasladado del instrumental, según la colimación que se necesite usar.

- Banco colimación fina

**Sistema Fuente – Detector:** Su uso está limitado a piezas de pequeño espesor. Permite variar la distancia fuente – detector. Se puede adoptar una distancia mínima de 4 cm. y una máxima de 21,5 cm. con un paso fijo de 2.5 cm.

**Soporte de la Muestra:** El montaje de las muestras se efectúa sobre un carro móvil, el cual permite trayectos horizontales paralelos de hasta 100 cm. Además es posible subir la cota – posición de la muestra mediante pies de apoyo adecuados.

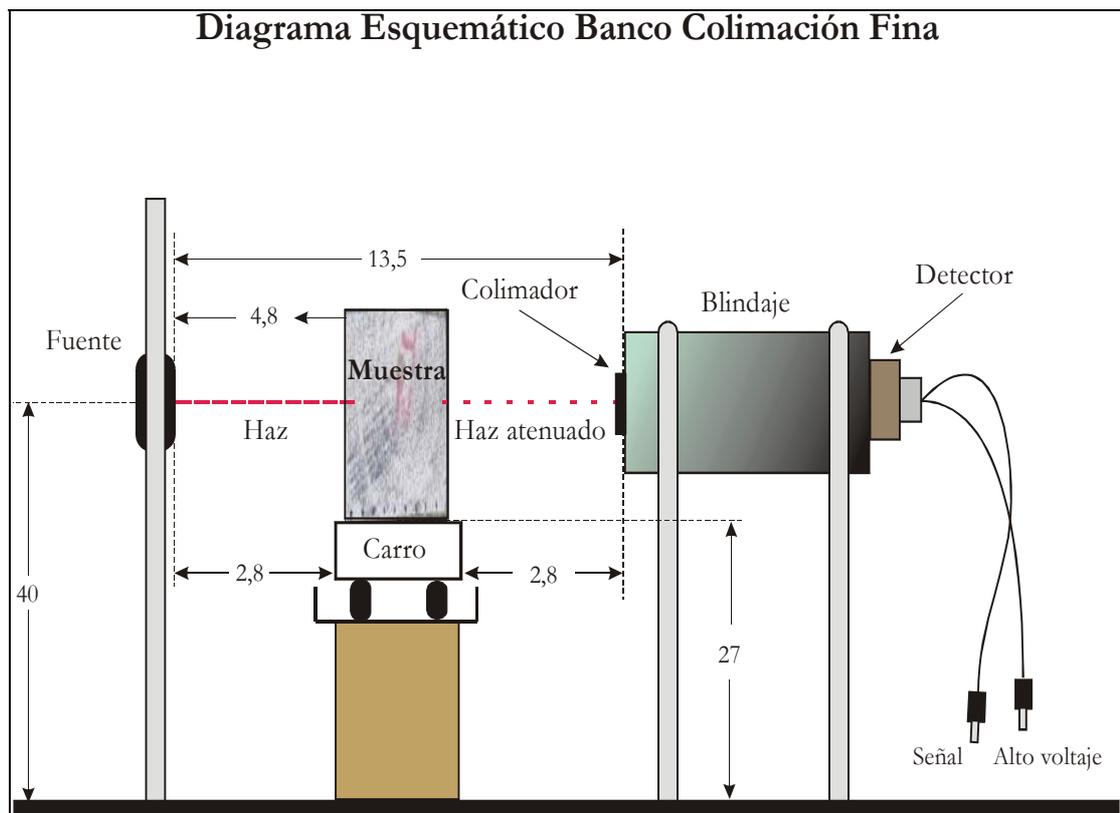


Figura 4 – 4: Esquema Banco Colimación Fina.  
(Las distancias se indican en centímetros)

° Banco colimación amplia

**Sistema Fuente – Detector:** La distancia entre fuente y detector es variable, desde un mínimo de 56,5 cm. hasta un máximo de 114,5 cm. La variación de dicha distancia es continua.

**Soporte de la Muestra:** Su diseño circular está adaptado para trabajar especialmente con trozas. El montaje del soporte permite efectuar desplazamientos de la muestra en tres grados de libertad (horizontal – vertical – angular).

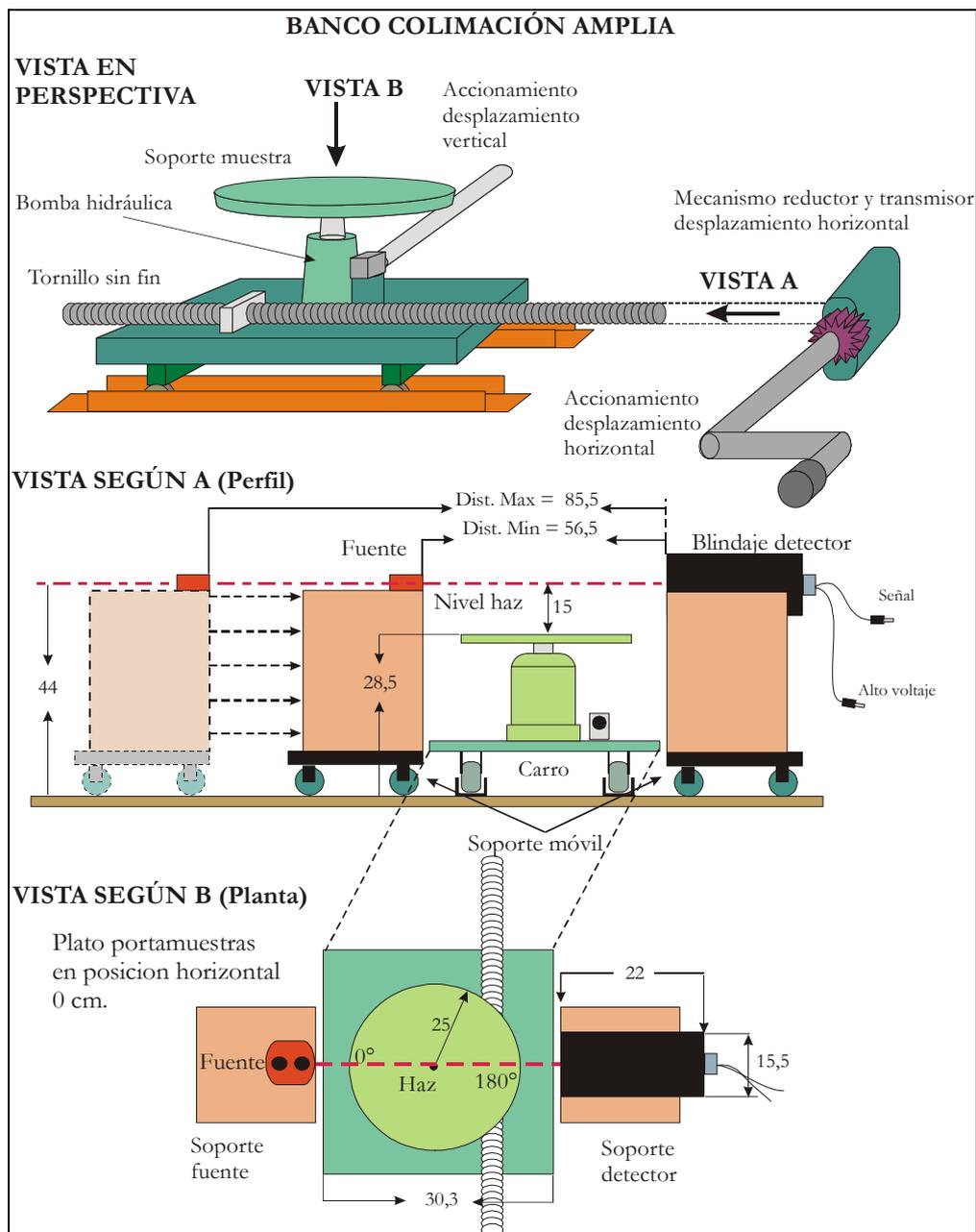


Figura 4 – 5: Banco de colimación amplia – Las distancias se indican en centímetros

El desplazamiento horizontal total, abarca un total aproximado de 90 cm. Cuando la posición horizontal es cero, el haz de fotones gamma pasa por el centro del soporte circular. Tal desplazamiento se realiza por un sistema de transmisión, tornillo sin fin y rieles, accionado por una manivela. El desplazamiento vertical, el cual es realizado por una bomba hidráulica, permite irradiar una muestra desde su base hasta una altura de 15 cm., a un paso continuo de 1 cm. Ello es ideal para examinar defectos que evolucionan verticalmente. El soporte esta adosado a un eje, el cual permite su giro, lo que permite obtener lecturas angulares a un paso mínimo de 10°.



Figura 4 – 6: Banco de pruebas de colimación amplia (Facultad de Ciencias)



Figura 4 – 7: Troza en el banco de colimación amplia (Facultad de Ciencias)

En la figura 4 – 8, se indica además el esquema correspondiente a la electrónica análoga – digital, utilizada en el estudio.

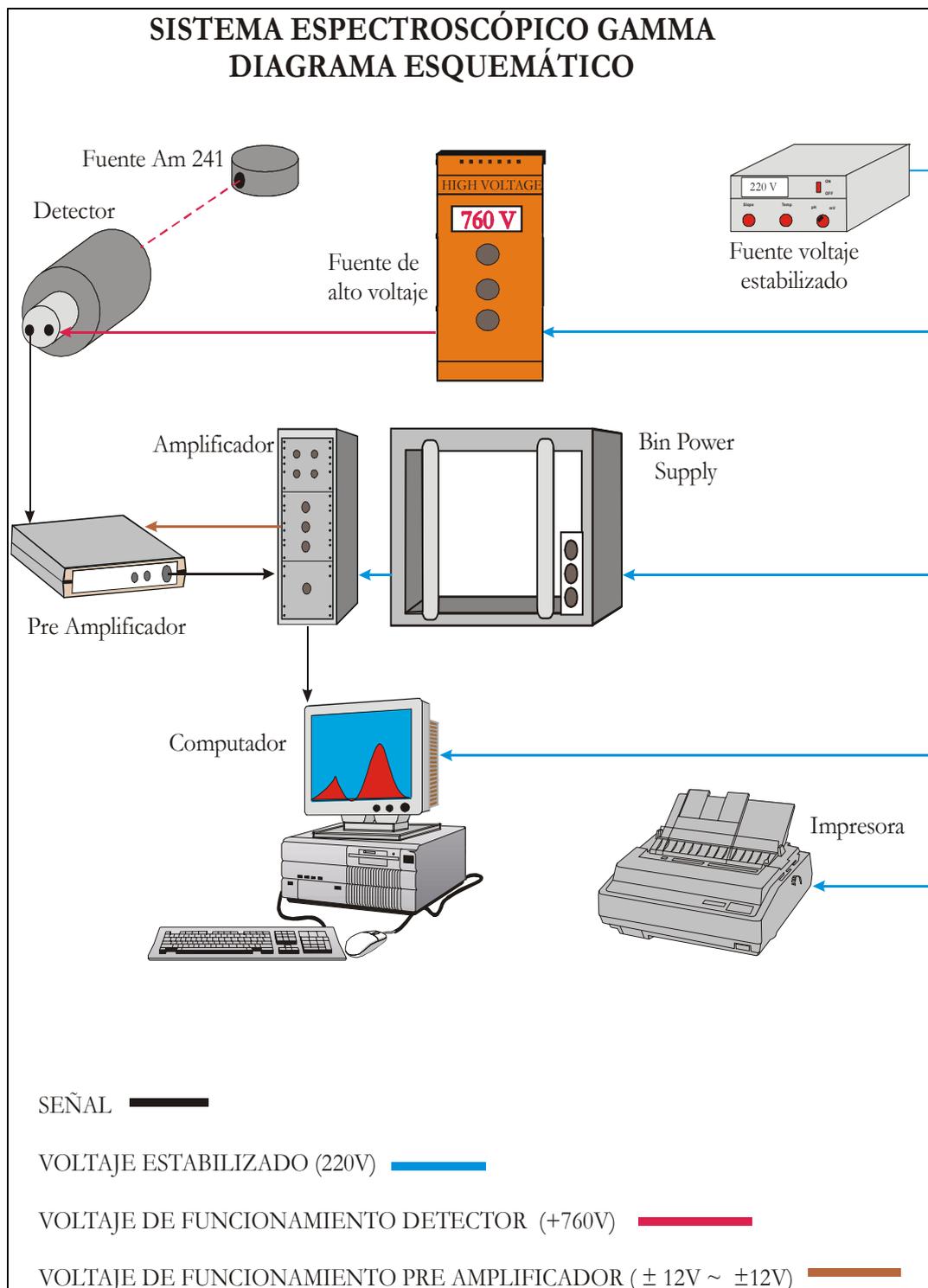


Figura 4 – 8: Diagrama esquemático del sistema espectroscópico gamma.

## 4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL

### 4.2.1. ACONDICIONAMIENTO DEL MATERIAL DE ESTUDIO

Las trozas obtenidas fueron pintadas en ambas caras con pintura de aluminio, para luego recibir la aplicación de una película plástica. Ello con el objeto de evitar al máximo la pérdida de humedad durante el viaje al laboratorio.

Posteriormente se efectuaron despuntes de 5 cm. en ambas trozas con el objeto de eliminar el material afectado por desecamiento. Dicho material fue eliminado y las trozas volvieron a sellarse, para mantener sus condiciones de humedad en las etapas sucesivas del estudio.

### 4.2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL MATERIAL

Esta etapa se llevó a cabo a partir de dos rodela obtenidas de cada troza de las cuales se obtuvieron probetas de una dimensión constante de 5 cm. por 5 cm. y 4 cm. de alto. La ubicación de las probetas en cada rodela se basó en un sistema de coordenadas rectangulares "XY" graduado en centímetros cuyo origen queda representado por la médula de cada rodela.

En la Tabla 4 – 3 y Figura 4 – 9, se indica la organización de las rodela obtenidas de las trozas acondicionadas, para el proceso de caracterización física antes y después de realizar la etapa de irradiación de las trozas.

TROZA 1			TROZA 2		
Rodela	Etapas	Medición	Rodela	Etapas	Medición
1	Caract. física (a)	CH% - Densidades	1	Caract. física (a)	CH% - Densidades
2	Caract. física (d)	CH% - Densidades	2	Caract. física (d)	CH% - Densidades
---	---	---	3	Determinación $\mu_p$	Densidades

Tabla 4 – 3: Distribución del material en rodela para ensayos y caracterización de las Trozas 1 y 2 (a = antes irradiación trozas; d = después irradiación trozas).

Posteriormente se procedió a confeccionar mapas bi – dimensionales de contenidos de humedad (CH%) y densidades (a CH% de ensayo, básica y anhidra). Ello para realizar comparaciones con los mismos parámetros en una etapa post – irradiación y determinar el nivel de variación.

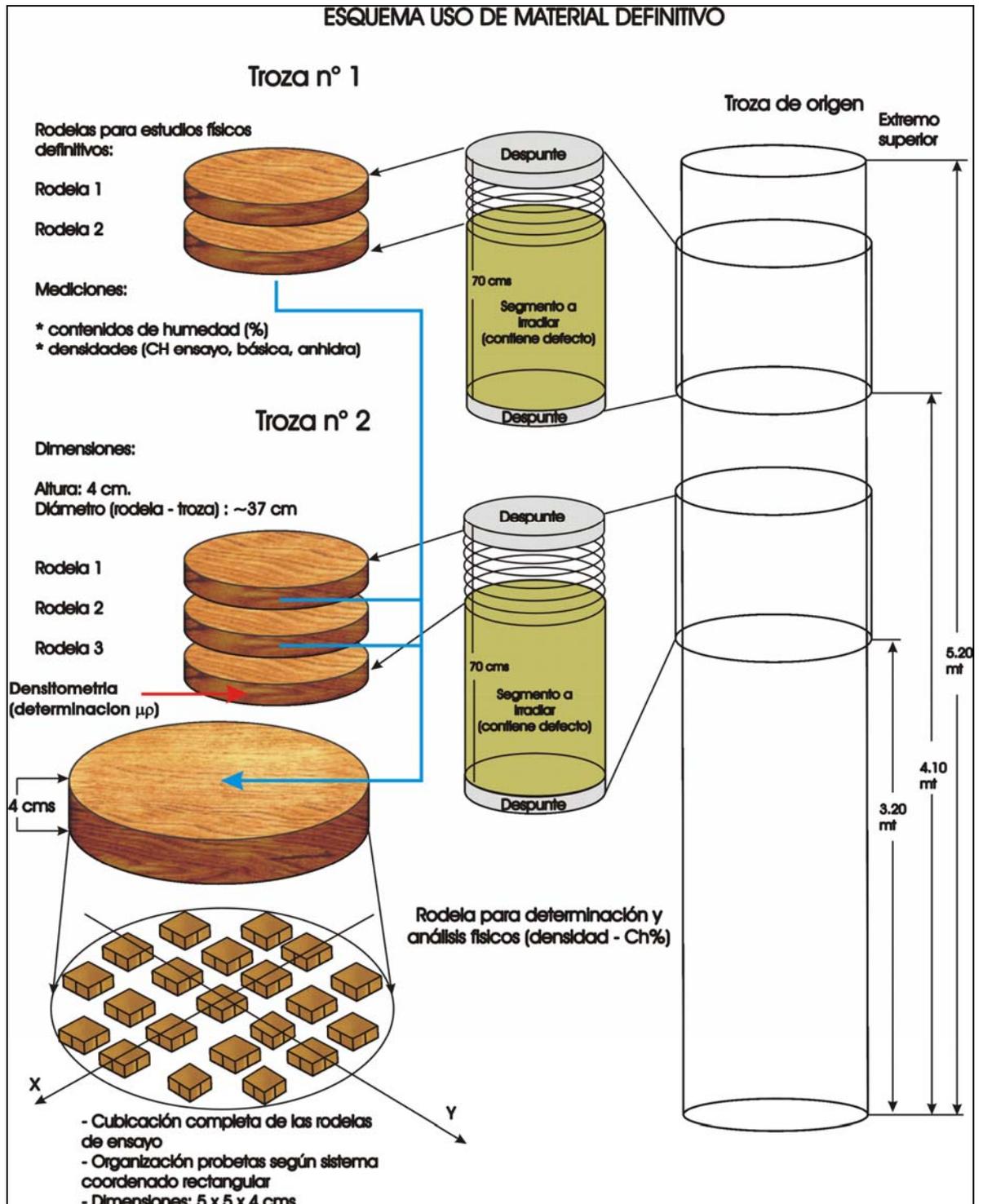


Figura 4 – 9: Obtención del material para su caracterización física y nomenclatura utilizada

- **Contenido de humedad (CH%)**

La obtención de CH% se llevó a cabo a partir de las rodela indicadas en la Tabla 4 – 3. Además se construyeron mapas bidimensionales de contenido de humedad (CH%) antes y después de la etapa de irradiación, para poder efectuar comparaciones y determinar si existió desecamiento en el material. Los contenidos de humedad porcentual se determinaron a partir de la gravimetría, para lo cual se utilizó el peso húmedo (Ph) y el peso seco (Po). La base comparativa para el CH% es el peso seco:

$$CH\% = \frac{Ph - Po}{Po} \cdot 100 \quad \text{Ec. 14}$$

- **Densidad**

Con las mismas rodela utilizadas en el cálculo de CH, indicadas en la Tabla 4 – 3, se calcularon las densidades actual (Dh), básica (Db) y anhidra (Do) mediante las siguientes relaciones:

$$Dh = \frac{Ph}{Vh}; Db = \frac{Po}{Vh}; Do = \frac{Po}{Vo} \quad \text{Ec.15}$$

En donde: Ph y Vh, corresponden al peso y volumen en verde, respectivamente.  
Po y Vo, peso y volumen en condiciones anhidro, respectivamente.

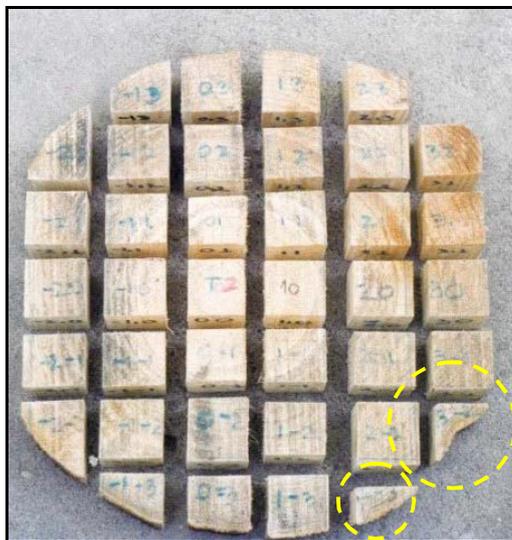


Figura 4 – 10: Troza 2 / Rodela 2, etapa de caracterización física.  
(se indican probetas irregulares descartadas)

Para la obtención de los pesos verdes y anhidro, se utilizó una balanza electrónica, cuidando hacer el proceso rápidamente, con el objeto de minimizar el desecamiento o la hidratación de las probetas, según el caso.

La determinación de volúmenes se efectuó con ayuda un pié de metro, promediando un mínimo de tres lecturas en las tres direcciones (longitudinal, transversal y tangencial),

para disminuir el error. La excepción correspondió a las probetas de forma irregular (bordes de rodela), en donde se efectuaron mayor número de medidas por dimensión (5 repeticiones). En casos de excesiva irregularidad, se eliminó la probeta (Figura 4 – 10).

#### 4.2.3. CALIBRACIÓN DEL SISTEMA ESPECTROSCÓPICO GAMMA

##### 4.2.3.1. ESTABILIDAD TEMPORAL

El trabajo con un sistema efectivamente estable, permite eliminar una parte importante de los inconvenientes asociados a errores instrumentales. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad en ambos bancos (colimación fina y amplia), se procedió a tomar lecturas no atenuadas (lo) durante 9 días.

- **Banco Colimación Fina**

Se utilizaron diferentes períodos entre lecturas, variando además las condiciones de reposo inicial<sup>6</sup> del sistema. El análisis abarcó tres días (Tabla 4 – 4).

COLECCIÓN	N° SESIONES	TIEMPO ENTRE LECTURA	REPOSO INICIAL
30 segundos	1	Corto (5 minutos)	30 minutos
30 segundos	1	Corto (5 minutos)	Sin reposo
30 segundos	1	Corto (5 minutos)	Sin reposo
30 segundos	1	Largo (20 minutos)	Sin reposo

Tabla 4 – 4: Caracterización de la prueba estabilidad en banco colimación fina.

En toda la prueba se mantuvo el tiempo de colección de cada lectura, y se emplearon 30 segundos. Sólo se varió el período que transcurrió entre lectura y lectura (5 y 20 minutos) y las condiciones de reposo inicial (30 minutos y 0 minutos).

Para el análisis de la prueba de estabilidad temporal, se ocupó una estadística descriptiva de las variaciones de las lecturas (cuentas), en función a los períodos de lecturas (corto – largo) y de acuerdo al reposo inicial de voltaje del sistema. Además, para cada prueba se analizó la bondad de los datos entregados por el sistema espectroscópico, utilizando un criterio basado en la estadística  $X^2$  (chi cuadrada – relación Ec. 16). Así es factible cuantificar la anormalidad en los datos:

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{n} - n_i)^2}{N} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde  $n_i$  representa a cada una de las N medidas realizadas por período y  $\bar{n}$  es el promedio asociado. Esta prueba compara el valor obtenido, con la distribución estadística tabulada para  $X^2$ . Utilizando la distribución de probabilidad para  $X^2$ , es posible calcular la probabilidad p asociada a partir de tablas de probabilidades para dicha distribución (ver

<sup>6</sup> Es el tiempo que transcurre desde el encendido de la fuente de alto voltaje, hasta efectuar la primera lectura.

Tsoufanidis, Measurement and Detection of Radiation. Pág. 56). Dicho valor indicará la ocurrencia de variabilidades muy grandes o muy pequeñas respecto a los valores esperados.

Si el valor de  $p$  es cercano a 0.5, ello indica que existe igual probabilidad que los próximos datos sean muy distintos o muy similares a los ya colectados. Esta situación se considera óptima para los procesos aleatorios, como la desintegración radiactiva (Tsoufanidis, 1983).

La obtención del valor  $X^2$  se realizó a través del software estadístico "STATISTICA", a partir de los valores de  $N$  y los grados de libertad correspondientes ( $N - 1$ ). Finalmente se llevó a cabo un análisis de varianza (ANDEVA) respecto de la hipótesis de igualdad de medias, suponiendo varianzas homogéneas para "k" poblaciones normales (ver Anexo 9.1).

- **Banco Colimación Amplia**

Se emplearon diferentes tiempos de colección: 30, 120 y 600 segundos, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 4 - 5. Estos tiempos son los mismos que se emplearon en la etapa 4.2.3.4. En este caso no se realizan reposos iniciales del sistema. Los diferentes grupos de lecturas se contrastaron mediante la prueba  $X^2$ . El análisis abarcó 6 días.

COLECCIÓN	N° SESIONES <sup>7</sup>	N° LECTURAS	REPOSO INICIAL
30 segundos	4	46	Sin reposo
120 segundos	3	24	Sin reposo
600 segundos	4	29	Sin reposo

Tabla 4 – 5: Caracterización de la prueba estabilidad en banco colimación amplia.

#### 4.2.3.2. ALINEACIÓN ANGULAR DE LA FUENTE

El banco de colimación amplia está diseñado con una fuente radiactiva móvil en dos direcciones. Además del movimiento en dirección "fuente – detector", puede girar en torno a su propio eje vertical. En atención a que la emisión del haz asemeja a un volumen cónico (Figura 4 – 11), se procedió a centrar su dirección respecto al centro del detector y definir las áreas restringidas al tránsito de personas. Se define así, la abertura máxima de dicho cono imaginario. La posición angular  $0^\circ$ , se hizo coincidir con el máximo registro de fotones.

El método consistió en registrar lecturas no atenuadas ( $I_0$ ), con un tiempo de colección de 30 segundos, para un paso angular de 5 grados. Este procedimiento se realizó para las dos posiciones extremas del carro que porta la fuente (Figura 4 – 5), es decir:  $r_1 = 56,5$  cm. y  $r_2 = 85,5$  cm. Todo lo anterior fue realizado con el soporte de muestras ubicado en la posición horizontal (PH) cero, que es cuando el haz pasa por el centro del plato portamuestras. El carro soporte del detector se mantuvo fijamente en la posición más cercana a la fuente.

<sup>7</sup> Indica el número de sesiones o períodos de colección empleados, para la cantidad de lecturas indicadas.

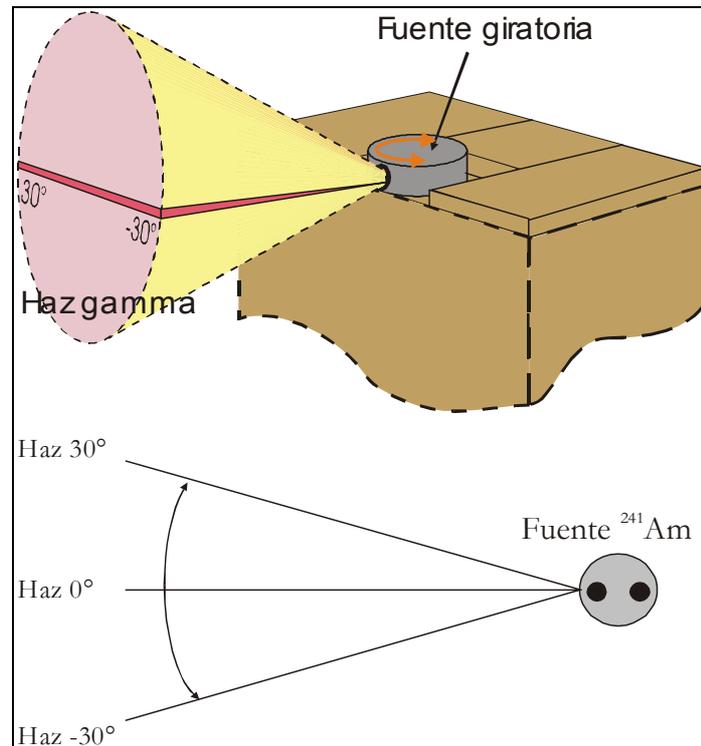


Figura 4 – 11: Alineación angular de la fuente  $^{241}\text{Am}$ .

#### 4.2.3.3. RELACIÓN ENTRE “DISTANCIA FUENTE” E INTENSIDAD

En el banco de pruebas con colimación amplia, se efectuó una determinación de la relación entre la distancia “fuente – detector” ( $r$ ) y la intensidad ( $I_0$ ). Dicha intensidad o cantidad de cuentas no atenuadas, fue obtenida para 30 segundos de colección. Luego se realizó el análisis de los datos, en base a una comparación con la relación teórica indicada a continuación, que debe cumplirse para  $r$  e  $I_0$ :

$$I_0 = a \cdot \frac{1}{r^2} \quad \text{Ec. 17}$$

En donde el cálculo de la constante “ $a$ ”, se obtuvo con el valor  $r$  máximo (85.65 cm.) y la intensidad “ $I_0$ ” asociada. Luego se obtuvo una curva teórica, en función de  $r$ ; la cual se comparó con la curva experimental.

La relación dada por Ec. 17, se cumple para condiciones especiales de distancia entre la fuente y el detector; es decir para valores grandes de  $r$  tal que el volumen del detector es despreciable, siendo este considerado plano. Por lo tanto si se compara la curva teórica con la experimental, se espera que sean similares para valores grandes de  $r$ , y que la curva teórica muestre valores mayores que la experimental a medida que los valores de  $r$  disminuyan<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Comunicación personal (2002): Prof. M. I. Dinator R. MSc., Facultad de Ciencias, Universidad de Chile

Finalmente se establece un ajuste, comparando la tendencia teórica con la experimental. El análisis completo, se lleva a cabo para las dos posiciones verticales extremas del soporte de muestras: 5 y 15 centímetros bajo el haz (posición máxima y mínima respectivamente).

#### 4.2.3.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LAS MUESTRAS

El efecto de la geometría cilíndrica de las muestras sobre la espectroscopia se llevó a cabo mediante la utilización de tres recipientes de plástico, cuyas dimensiones asemejan a las trozas empleadas (principalmente en diámetro) las que se indican en la Tabla 4 – 6. Se analizó la atenuación, con respecto al diámetro de la muestra. Para dicho análisis, los recipientes fueron llenados con agua (ver Figura 4 – 12).



Figura 4 – 12: Recipientes (cilindros) utilizados para simular las trozas reales. (Facultad de Ciencias U. Chile).

	<b>CILINDRO A</b>	<b>CILINDRO B</b>	<b>CILINDRO C</b>
<b>DIÁMETRO (CM)</b>	18.3	29.2	37.8
<b>TIEMPO DE COLECCIÓN (SEG)</b>	30	120	600

Tabla 4 – 6: Características de los bidones utilizados en la simulación de las trozas reales.

El procedimiento utilizado fue igual para los tres recipientes: en la base del recipiente se dibujaron dos diámetros ortogonales, los cuales se hicieron coincidir con los diámetros ortogonales preestablecidos en el soporte de muestras. Este procedimiento se hizo en la posición horizontal 0 (PH = 0), de modo que el haz de radiación gamma fuese coincidente con ambos diámetros. En relación al soporte de muestras, éste se mantuvo en su posición mínima a 15 cm. bajo el haz.

El desplazamiento horizontal del plato portamuestra, implica un desplazamiento desde PH = -45 cm., hasta PH = 45 cm. Al principio se utilizó un paso de 5 cm. para luego

adoptar otro paso de 2 cm., en el momento que el haz se acerca a la tangente del recipiente (4 lecturas antes), procediendo de manera simétrica luego de que el haz pasó por PH = 0 (ver Figura 4 – 13).

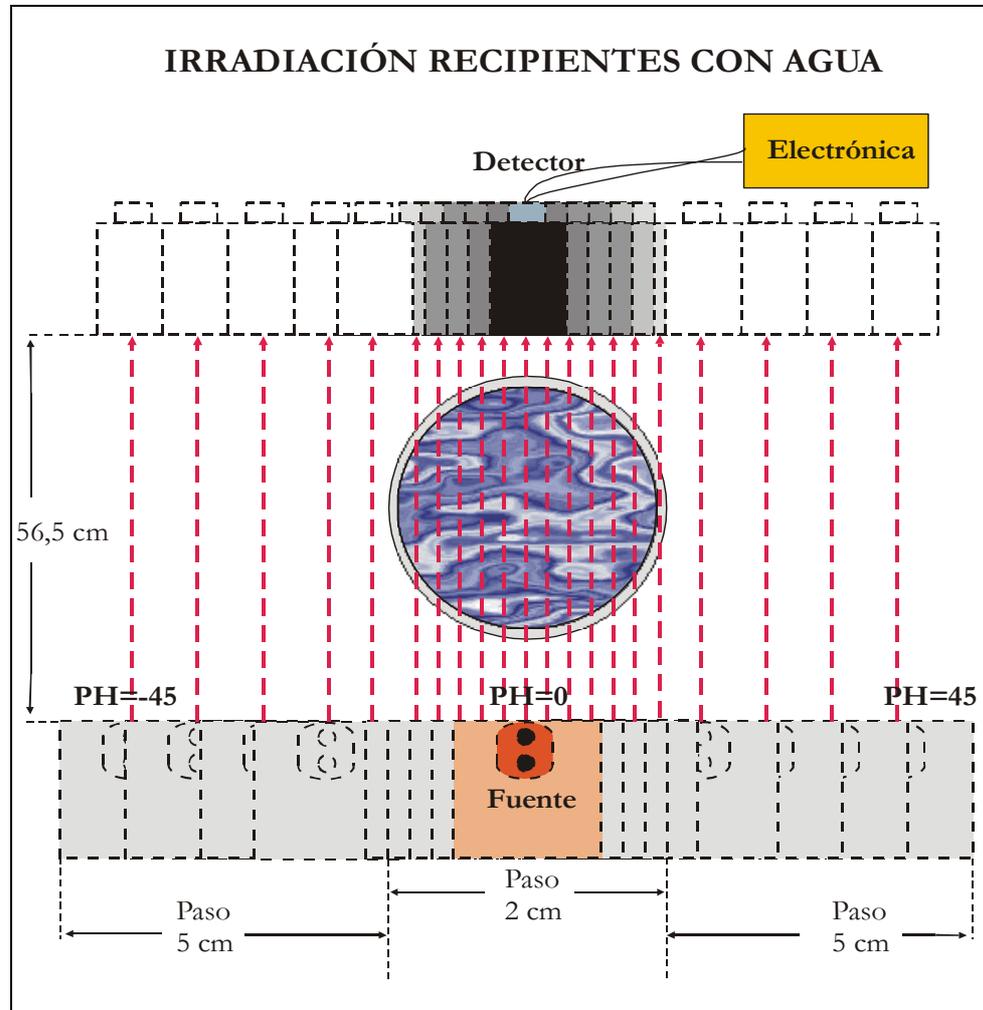


Figura 4 – 13: Irradiación de recipientes (esquema)

Antes de irradiar, se determinó el tiempo apropiado de colección para un error estadístico no mayor a 1%, según la relación (Knoll, 1989):

$$E\% = \frac{100}{\sqrt{N}} \quad \text{Ec. 18}$$

En la relación anterior, N son las cuentas registradas en un tiempo definido de conteo y E, el error porcentual asociado a la lectura de esas N cuentas.

Para evaluar la calidad de la geometría del banco de pruebas, se realizó la comparación de los diámetros reales de los bidones con los diámetros estimados, ocupando atenuación de radiación gamma.

#### 4.2.4. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN MÁSCO $\mu_p$ EN MADERA VERDE DE PINO RADIATA

Antes de las etapas de irradiación de las trozas, se determinó el coeficiente de atenuación másico ( $\mu_p$ ) en madera de pino radiata en condiciones verdes. Se analizaron los efectos de dos variables en la madera, para ello se utilizó el banco de colimación fina.

La primera variable analizada fue el contenido de humedad (estado verde, estado ambiente y estado anhidro). La segunda variable analizada, fue la posición diametral del material irradiado en la rodela. Ambas variables se sometieron a un análisis conjunto (su efecto combinado sobre  $\mu_p$ , el cual se detalla en la sección 4.2.4.2.)

##### 4.2.4.1. MATERIAL UTILIZADO

Se empleó la Rodela 3 extraída de la Troza 2 ( ver Tabla 4 – 3), elección fundamentada en la regularidad de la troza en términos de menor excentricidad de su médula, con lo que se intentó minimizar el efecto de la presencia de madera de reacción. De esta rodela, se extrajeron dos viguetas ortogonales entre sí, obteniendo una continua (vigueta 1) y otra discontinua (vigueta 2); de las cuales a su vez se extrajeron bloques para los análisis. De la vigueta 1 se extrajeron 6 bloques iguales y 4 bloques iguales de la vigueta 2. La nomenclatura empleada con los bloques fue la siguiente: V1-B1, V1-B2, V1-B3, V1-B4, V1-B5, V1-B6, para la vigueta 1, y de forma análoga fueron designados los 4 bloques de vigueta 2. Las posiciones de los bloques en la rodela y sus dimensiones se indican en la Figura 4 – 14 y Tabla 4 – 7 respectivamente.

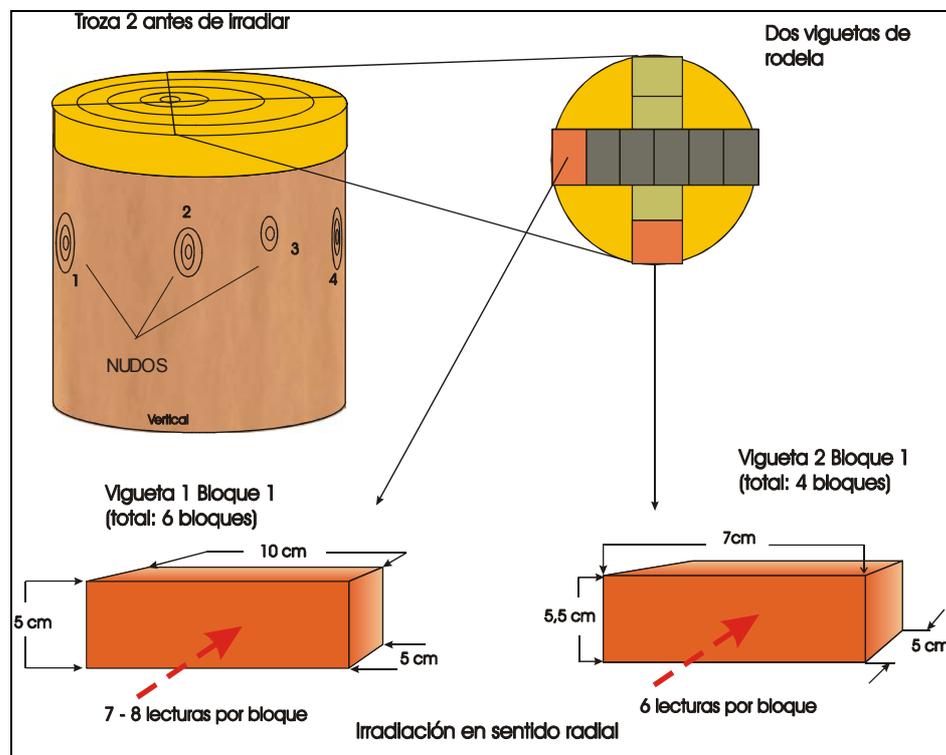


Figura 4 – 14: Material para caracterización densitométrica y tamaño bloques. (Troza 2 - Rodela 3)

VIGUETA 1	POSICIÓN DIAMETRAL	VIGUETA 2	POSICIÓN DIAMETRAL
BLOQUE 1 (V1 – B1)	2,5	BLOQUE 1 (V2 – B1)	2,5
BLOQUE 2 (V1 – B2)	7,5	BLOQUE 2 (V2 – B2)	7,5
BLOQUE 3 (V1 – B3)	12,5	BLOQUE 3 (V2 – B3)	22,5
BLOQUE 4 (V1 – B4)	17,5	BLOQUE 4 (V2 – B4)	27,5
BLOQUE 5 (V1 – B5)	22,5	---	---
BLOQUE 6 (V1 – B6)	27,5	---	---

Tabla 4 – 7: Posiciones en cm. (desde el borde de la rodela) y denominaciones para los bloques.

#### 4.2.4.2. VARIABLES CONSIDERADAS EN EL ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN MÁSCICO

- **Contenido de humedad**

En un material anisotrópico como la madera y en árboles en pie, es normal esperar variabilidades en el contenido de humedad. Dicha humedad puede provocar efectos sobre la determinación del coeficiente de atenuación másico, producto de su comportamiento heterogéneo en el fuste del árbol (en dirección diametral y altura). Por tal motivo, los 10 bloques se irradiaron a 3 condiciones de humedad:

- Condición verde, inmediatamente de la extracción de la rodela y la troza.
- Seco al ambiente, hasta lograr condición de equilibrio (peso constante  $\approx$  1 semana).
- Condición anhidra, (lecturas diarias de los pesos, hasta verificar valores constantes)

- **Posición diametral**

El haz de radiación gamma al atravesar un material como una troza, no lo hace a través de un material homogéneo (presencia de albura y duramen), ello permite proponer la hipótesis de significancia de la posición del material en el diámetro del fuste en la variabilidad del coeficiente de atenuación másico de la radiación gamma.

#### 4.2.4.3. CÁLCULO DE COEFICIENTES DE ANTENUACIÓN

El coeficiente de atenuación másico ( $\mu_p$ ) se determinó en el banco de colimación fina mostrado en la Figura 4 – 1, utilizando la gravimetría detallada en la sección 4.2.2. y la relación dada por la Ec. 19.

$$\mu_p = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{t \cdot \rho} \quad \text{Ec. 19}$$

De acuerdo a la Figura 4 – 14 el valor nominal de t (espesor muestra) es igual a 5 cm.; no obstante los valores reales pueden ser levemente distintos, por errores pequeños en el corte de las probetas. La irradiación se efectuó en dirección radial, en atención a antecedentes que indican que las irradiaciones radiales minimizan el error en la determinación de  $\mu_p$  (Dinator, 1996).

El número de lecturas a efectuar ( $n$ ) en cada bloque, se determinó mediante Ec. 20, a partir de una muestra piloto de 126 lecturas de  $\mu_p$  (ver Apéndice 10.4). Se ocupó el coeficiente de variación de dichas lecturas, más la adopción de un error máximo de  $E = 5\%$  y el valor de la estadística  $T$  (estadística Student para un  $\alpha$  fijado en 0,05 y  $n-1$  grados de libertad).

$$n = \frac{T^2 \cdot CV^2}{E^2} \quad \text{Ec. 20}$$

Respecto a los tiempos de colección y según la Ec. 22, se efectuaron diversas pruebas piloto de irradiación (utilizando los bloques en condiciones verdes), determinando un tiempo mínimo de colección de 90 segundos. Dicho valor permitió obtener lecturas sobre 10000 cuentas promedio, con el objeto de obtener un error estadístico máximo de 1%.

#### 4.2.4.4. ESTADÍSTICA EMPLEADA

Con los valores obtenidos de  $\mu_p$ , se procedió en primer lugar a realizar una estadística descriptiva; fundamentalmente basada en el cálculo de medias, desviación estándar y coeficientes de variación; cuyo objeto fue analizar la variabilidad del coeficiente de atenuación másico, y comparar con otros estudios.

Luego al incluir los factores controlables en laboratorio (contenido de humedad, posición diametral), se procedió a analizar la significancia estadística<sup>9</sup> de estos factores sobre  $\mu_p$ .

Se utilizó como herramienta estadística, un diseño experimental completamente al azar de dos factores:  $A = 1 \dots a$  y  $B = 1 \dots b$ , según el modelo de efectos fijos (Ostle, 1983). Dicha estadística se basó en la Prueba F, según:

Estadística de prueba<sup>10</sup>:  $F_{a-1, ab(n-1); 1-\alpha} \quad F_{b-1, ab(n-1); 1-\alpha} \quad F_{(a-1)(b-1), ab(n-1); 1-\alpha}$

Modelo Estadístico:  $Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{Ec. 21}$

Condiciones de los factores:  $\sum_{i=1}^a \alpha_i = \sum_{j=1}^b \beta_j = \sum_{i=1}^a (\alpha\beta)_{ij} = \sum_{j=1}^b (\alpha\beta)_{ij} = 0 \quad \text{Ec. 22}$

Los estadígrafos asociados se muestran en el Anexo 9.2, incluyendo la tabla de ANDEVA correspondiente.

#### 4.2.5 SIMULACIÓN DE IRRADIACIÓN DE TROZAS CON DEFECTOS

Al examinar por primera vez materiales de una característica dada, y poner en marcha un sistema experimental nuevo, es importante la realización de una simulación previa del experimento. EL objetivo principal, es indagar posibles indicadores de irregularidades, detectar problemas en la metodología y recabar cualquier información que ayude a

<sup>9</sup> Se emplea un nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

<sup>10</sup> Se indican en los subíndices, los grados de libertad y el nivel de significancia  $\alpha$ , para los factores y su interacción.

depurar al máximo la potencialidad de la determinación de la densidad por medio de la atenuación de fotones<sup>11</sup>. De este modo, como última etapa antes de la irradiación, se efectuó un ensayo sobre los recipientes cilíndricos, modificando las condiciones indicadas en la sección 4.2.3.4. La modificación consistió en reproducir las características de las trozas reales (incluyendo el defecto), lo más fielmente posible; en particular las condiciones de densidad de los materiales atenuadores. Evidentemente la principal diferencia con la situación real, radica en la homogeneidad del medio atenuador utilizado.

De este modo el diseño y construcción de las estructuras de simulación comenzó con la inserción de un vástago que asemeja un verticilo (4 defectos), el cual consistió en tubos herméticos de PVC rellenos con agua (densidad  $1 \text{ gr/cm}^3$ ) con un diámetro aproximado de 2.5 cm. Respecto a la forma de la estructura completa, los nudos simulados están insertados en el vástago vertical, manteniendo un ángulo de  $90^\circ$  (ver Figura 4 – 16). Las dimensiones de dicha estructura fueron registradas (ver Tabla 4 – 8), teniendo especial cuidado en indicar su extensión vertical y horizontal con la mayor precisión posible para definir los planos de irradiación. Lo anterior es válido para los recipientes “B” y “C”.

Para el caso del recipiente “A”, la estructura que simula al defecto posee una configuración diferente y simplificada, la cual se definió por cuatro tubos verticales iguales, los cuales fueron colocados de manera simétrica de acuerdo al centro del mismo. El esquema de la geometría del defecto en el recipiente “A” se muestra en la Figura 4 – 15.

Luego los recipientes fueron llenados con aceite de motor quemado cuya densidad gravimétrica promedio fue  $0.86 \text{ gr/cm}^3$ , la cual es encontrada como promedio en madera de Pino radiata en condiciones verdes. El objetivo es reproducir la relación de densidades promedio entre madera húmeda y nudos, a partir de la relación existente entre la densidades del aceite y el agua.

Los recipientes fueron acomodados en el soporte de muestras según se indica en la sección 4.2.3.4. Luego, la primera irradiación se efectuó sobre los recipientes con defecto incluido, en dos direcciones angulares:  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , con respecto a la posición angular de los nudos simulados (ver secciones 5.4.2. y 5.4.3).

Después se quitaron las estructuras y se repitió el esquema de medición, para conformar las lecturas libres de defectos. Para todos los recipientes, se siguió un esquema de irradiación según cuerdas paralelas. Luego se realizaron comparaciones entre los perfiles obtenidos de atenuación de fotones. Dichas comparaciones se realizaron para las condiciones de ausencia y presencia de defecto.

Los resultados del método se compararon con DH (Figura 4 –16), y se estableció la sensibilidad de la atenuación para determinar el desarrollo horizontal del defecto. Con los valores de DV (Figura 4 –16) se definieron los planos de irradiación en ambos recipientes, antecedentes que se resumen en las Tablas 4 – 8 a 4 – 10.

---

<sup>11</sup> Comunicación personal (2002): Prof. Dr. José Roberto Morales. Facultad de Ciencias. Universidad de Chile.

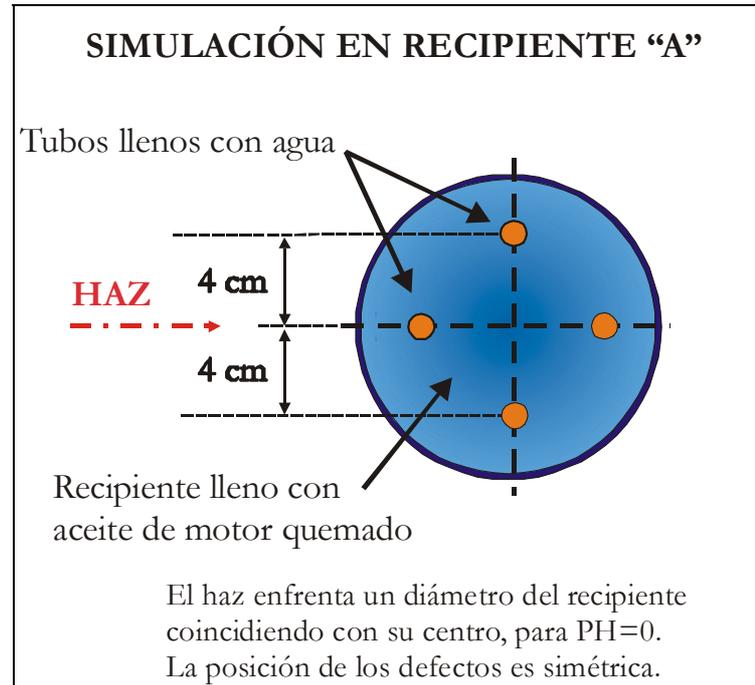


Figura 4 – 15: Simulación del defecto en el recipiente "A"

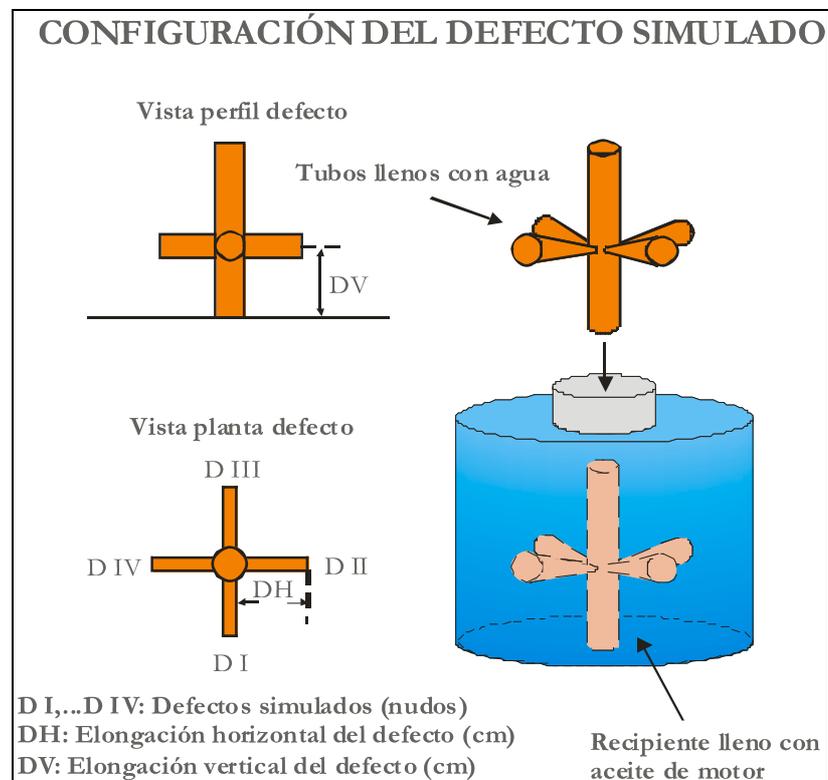


Figura 4 – 16: Esquematización del defecto simulado para recipientes B y C

RECIPIENTE B	DH	DV
DEFECTO I	10	12
DEFECTO II	9,5	12,5
DEFECTO III	10	12,5
DEFECTO IV	9,5	13

Tabla 4 – 8: Dimensiones de las estructuras insertadas en el cilindro B (en centímetros.)

RECIPIENTE C	DH	DV
DEFECTO I	9	11,5
DEFECTO II	8	10,5
DEFECTO III	8,5	13,5
DEFECTO IV	9,5	10,5

Tabla 4 – 9: Dimensiones de las estructuras insertadas en el cilindro C (en centímetros.)

(RECIPIENTE B)	ALTURA	(RECIPIENTE C)	ALTURA
PLANO 1	12,5	PLANO 1	12
PLANO 2	12	PLANO 2	10,5

Tabla 4 – 10: Planos de irradiación, distancia vertical entre haz y soporte de muestras (en centímetros)

Puesto que los recipientes irradiados son de distintos diámetros, el tiempo de colección utilizado fue distinto: 30, 60 y 210 segundos para los recipientes “A”, “B” y “C”, respectivamente.

#### 4.2.6. ANÁLISIS DEL FACTOR DE BUILD – UP

Con los datos de atenuación obtenidos en la sección 4.2.5, se procedió a calcular el factor de Build Up para el banco de colimación amplia, utilizando los recipientes A y B con aceite sin la inclusión de la estructura que simula el defecto.

Luego se determinó dicho factor para cada espesor “t” del material, de acuerdo a lo esperado según la literatura. Al respecto, Tsoufanidis (1983) y Knoll (1989), indican que el valor del factor debe tender a la unidad cuando “t” se hace cero.

Respecto al método para calcular el espesor del recipiente “t” referido a cada lectura de atenuación, se procedió de acuerdo con la geometría básica (Teorema de Pitágoras). En dicho caso el trayecto del haz a través del recipiente, equivale al cateto de un triángulo rectángulo que se forma por los ejes ortogonales imaginarios de un sistema coordenado rectangular, siendo el radio del recipiente la hipotenusa (ver Figura 4 – 17).

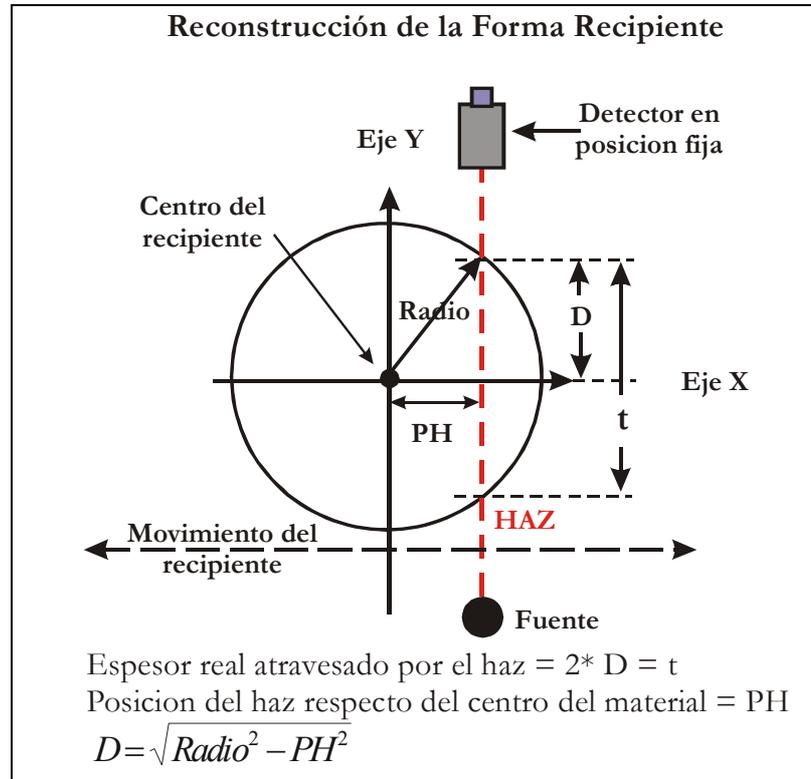


Figura 4 – 17: Cálculo indirecto del espesor atravesado por el haz.

El cálculo del factor de build up se realizó a partir de lo señalado en la sección 3.6.4.2., utilizando la Ec. 13, a la cual se le aplicó logaritmo natural, obteniendo así:

$$\ln\left[\frac{I}{I_0}\right] = \ln[B(t) \cdot e^{-\mu_L \cdot t}] \quad \text{Ec. 23}$$

$$\ln[I] - \ln[I_0] = \ln[B(t)] + \ln[e^{-\mu_L \cdot t}] \quad \text{Ec. 24}$$

Aplicando la definición dada por Ec. 11:

$$\ln[I] = \ln[I_0] + \ln[B(t)] - \mu_\rho \cdot \rho \cdot t \quad \text{Ec. 25}$$

Entonces, al emplear variables auxiliares, según:

$$M = \mu_\rho \cdot \rho \quad \text{Ec. 26}$$

$$N = \ln[I_0] + \ln[B(t)] \quad \text{Ec. 27}$$

Así la relación 27 quedó de la forma:

$$\ln[I] = M \cdot t + N \quad \text{Ec. 28}$$

Luego a partir de los datos de atenuación, se realizó un ajuste lineal en la Ec. 28 ( $\ln [I]$  versus  $t$ ), obteniendo  $M$  y  $N$ . Puesto que  $\ln[I_0]$  es conocido, se calculó  $B(t)$  ocupando la Ec. 28 para cada caso. Con respecto al ajuste lineal y según Dinator (2002)<sup>12</sup>; una buena geometría del sistema espectroscópico debería reflejarse en un valor de  $R^2$  próximo a 1.0, para los diferentes valores de  $t$ .

#### 4.2.7. IRRADIACIÓN DE TROZAS

El procedimiento de montaje fue realizado de igual manera que la sección anterior, es decir, haciendo coincidir los dos diámetros ortogonales de la troza, con los pertenecientes al soporte de muestras. La definición de los dos diámetros (a modo de ejes coordenados), se hizo en función al nudo más exuberante, de acuerdo al tamaño mostrado en la corteza. En la Figura 4 – 18 se esquematiza esta situación. El origen del sistema coordenado, coincide con la médula.

El paso horizontal (PH) se prefijó en 1 centímetro, para todo el proceso de irradiación, como respuesta al desconocimiento de la exactitud en la posición interna de los nudos. El número y la altura de los planos horizontales de irradiación, se definieron en función a la posición vertical de las marcas de nudo en la corteza, teniendo en consideración la extensión vertical de dichas marcas.

El soporte posee graduaciones angulares en su borde, con ellos se posicionó a la rodela en dos valores angulares:  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Cabe hacer notar que en la posición  $0^\circ$ , el haz incidió frontalmente al nudo más exuberante, coincidiendo con el eje coordenado “Y” definido sobre la rodela. De este modo, se define a la vez, la posición angular  $90^\circ$ .

En ambas trozas se utilizó un tiempo de colección de 220 segundos en acuerdo a la Ec. 18, con el objeto de obtener un error estadístico aproximado de 1%, asociado al área del peak fotoeléctrico. Con respecto a la posición vertical de los planos de irradiación, estos se indican en la Tabla 4 - 11.

Altura (cm)		
Plano	Troza 1	Troza 2
1	5.0	8.0
2	8.0	10.0
3	15.0	12.0

Tabla 4 – 11: Alturas de los planos de irradiación, para  $0^\circ$  y  $90^\circ$  (desde la base de la troza).

La troza 1 estaba cubierta parcialmente por corteza, evidenciando importantes áreas laterales sin ella. En cambio la troza 2, sufrió el desprendimiento de un 90% de su corteza; finalmente ésta fue retirada en su totalidad. Ello permitió eliminar el efecto atenuador de la corteza, y añadió regularidad en las medidas.

<sup>12</sup> Comunicación personal (2002): Prof. María Inés Dinator R. MSc., Facultad de Ciencias, Universidad de Chile

El análisis se basó fundamentalmente en la geometría cilíndrica de la troza, en donde los perfiles de intensidades atenuadas se contrastaron con la geometría de un perfil sin defectos, para visualizar irregularidades atribuibles al defecto nudo.

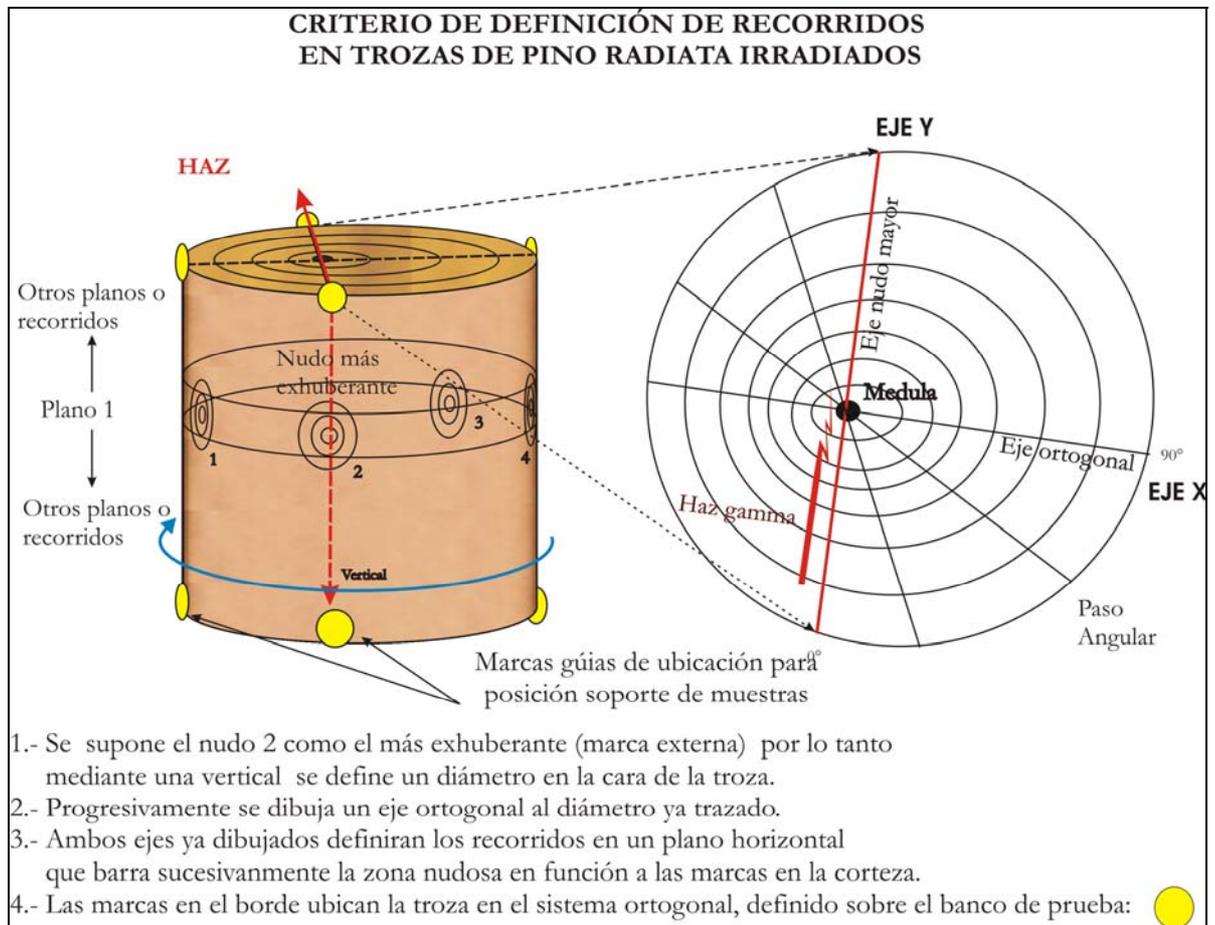


Figura 4 – 18: Ubicación de las trozas en el banco de pruebas, y definición de ejes coordenados.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

#### 5.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

- **Contenido de humedad previo a etapa de irradiación.**

En la Tabla 5 – 1 se presentan valores de contenidos de humedad en porcentaje (CH%) para el material en estudio (trozas 1 y 2), antes de irradiación. El cálculo se realizó en base al peso seco indicando los valores mínimos, máximos y promedios obtenidos para cada troza.

CONTENIDOS DE HUMEDAD (%)	TROZA 1 RODELA 1	TROZA 2 RODELA 1
Mínimo	46.95	43.30
Máximo	171.04	184.33
Promedio	135.45	141.10
Desviación estándar	31.61	44.52

Tabla 5 – 1: Contenidos de humedad, en base al peso seco en % antes de irradiación.

Los valores obtenidos permiten generar las Figuras 5 – 1 y 5 - 2, mediante asignación de colores a los distintos porcentajes. Se indica además la posición de cada probeta en la rodelas (cm.).

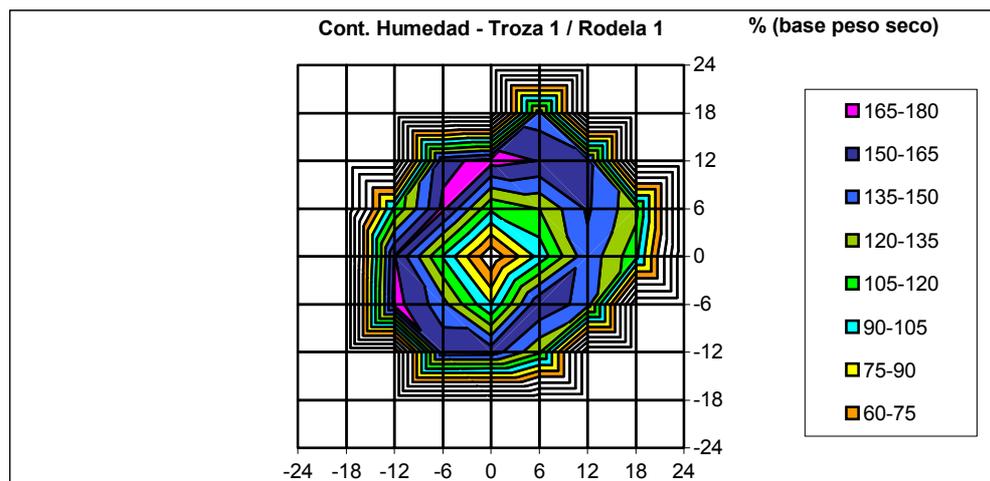


Figura 5 – 1: Contenidos de humedad (%) de la troza 1, previa a la irradiación.

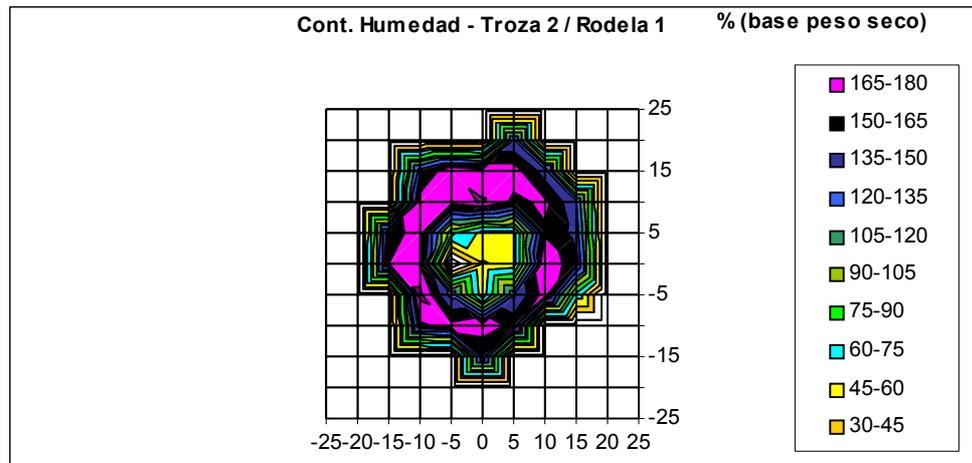


Figura 5 – 2: Contenidos de humedad (%) de la troza 2, previa a la irradiación.

Entre todos los valores de contenidos mínimos de humedad, el menor fue de 43.3%, ubicándose todos ellos en las zonas central y periférica de cada rodela. En cambio los valores de contenidos máximos de humedad, ubicados de preferencia en la zona sub – periférica, arrojó un máximo de 184.3%.

- **Contenido de humedad posterior a la etapa de irradiación.**

En esta etapa se volvió a extraer 2 rodela (una de cada troza, ver Tabla 4 – 2), así se generaron las Figuras 5 – 3 y 5 - 4, para controlar el nivel de desecamiento en el material. De acuerdo a los resultados (ver Tabla 5 – 2), en la troza 1 el contenido de humedad promedio bajó a un 107.3%, situación similar se constató en la troza 2, donde se registró disminución hasta 123.92%.

<b>CONTENIDO DE HUMEDAD (%)</b>	<b>TROZA 1 RODELA 2</b>	<b>TROZA 2 RODELA 2</b>
Mínimo	30.44	39.61
Máximo	164.27	180.05
Promedio	107.30	123.92
Desviación estándar	35.96	38.53

Tabla 5 – 2: Contenidos de humedad, después de la irradiación.

Dichas disminuciones, implican la necesidad de realizar el proceso de irradiación en un menor tiempo. Aunque la mayor disminución de la humedad promedio alcanza a un 26% respecto del contenido de humedad original, el contenido de humedad final permanece dentro de los valores normales esperables en árboles en pie (ver sección 3.2.2). A continuación se indican las variaciones promedios para los CH%.

Troza 1:      134.5% a 107.3% (pérdida de humedad de un 26% )  
Troza 2:      141.1% a 123.9% (pérdida de humedad de un 13% )

En relación a los gradientes de humedad, queda de manifiesto su mínima alteración.

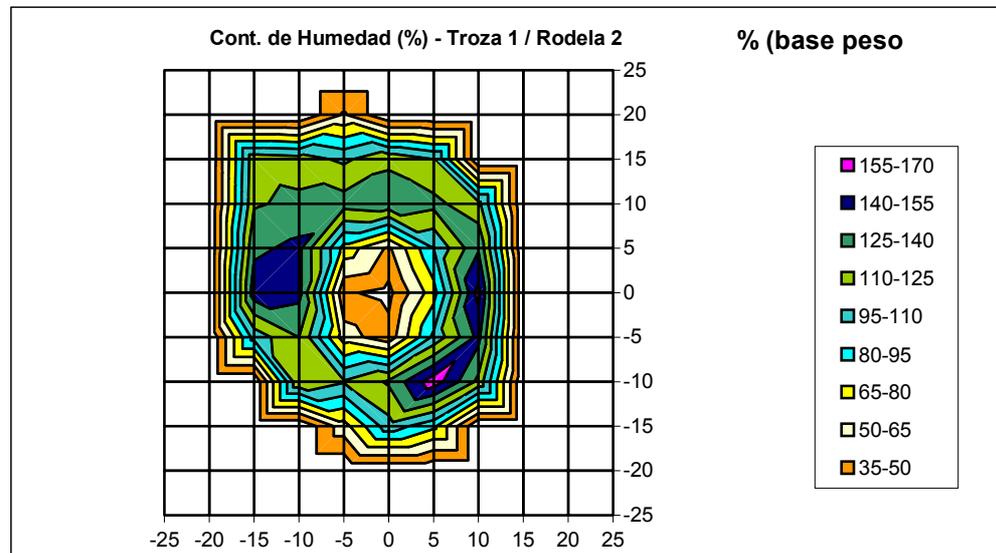


Figura 5 – 3: Contenidos de humedad (%) a partir de la troza 1, posterior a la irradiación.

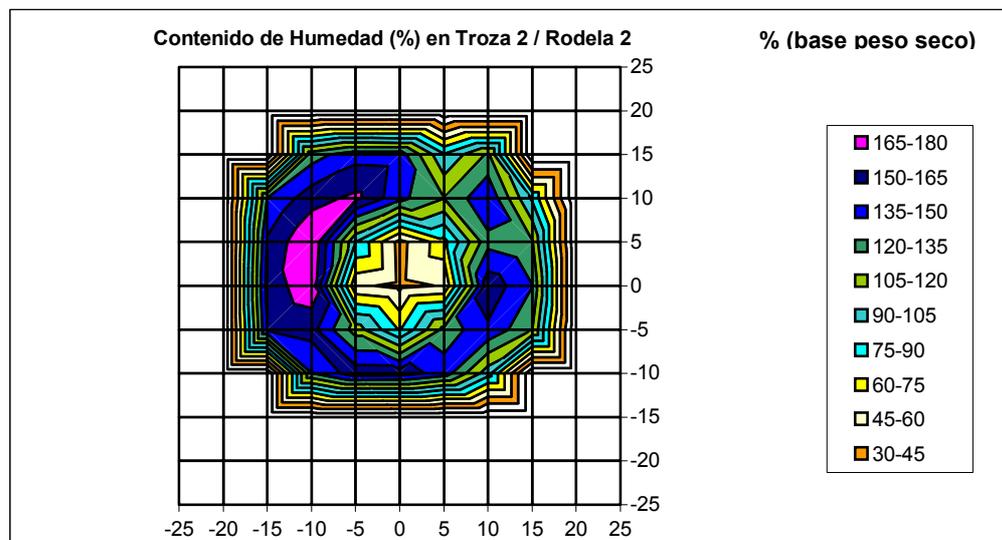


Figura 5 – 4: Contenidos de humedad (%) a partir de la troza 2, posterior a la irradiación.

### 5.1.2. DENSIDADES

En las Figuras 5 – 5 a 5 – 10 se muestran las distribuciones de densidades, indicando además la posición de las probetas en la rodela mediante ejes coordenados graduados en cm. Se asignó colores iguales para rangos similares de densidad, con el objetivo de comparar los distintos mapas bidimensionales.

La información se obtuvo a partir de las mismas rodela usadas en la determinación del contenido de humedad (1 y 2 de ambas trozas, ver tabla 4 – 2), generando información

acerca de los valores máximo, mínimo, promedio y desviación estándar, para la densidad previa y posterior a la irradiación. Ello permitió apreciar las variaciones en la densidad en el estudio.

- **Densidades antes de irradiación**

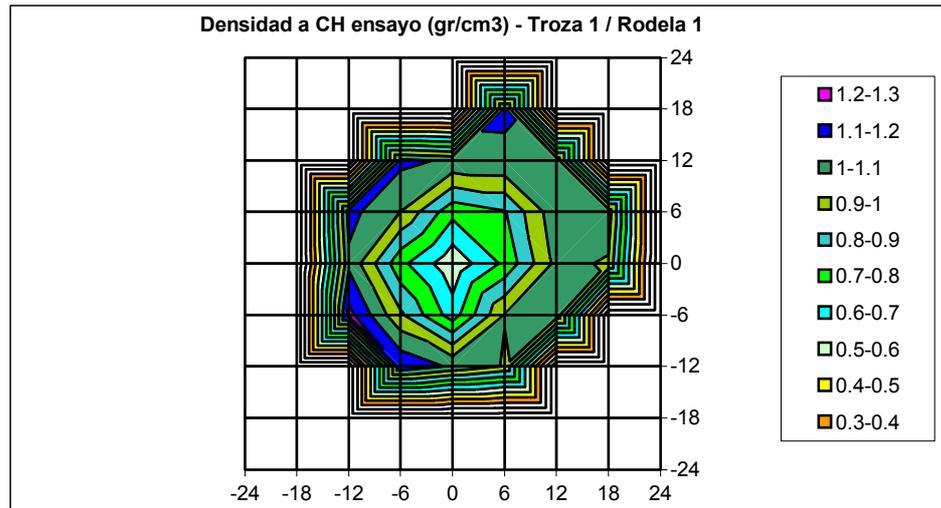


Figura 5 – 5: Distribución de densidad a CH ensayo, previa a la irradiación.

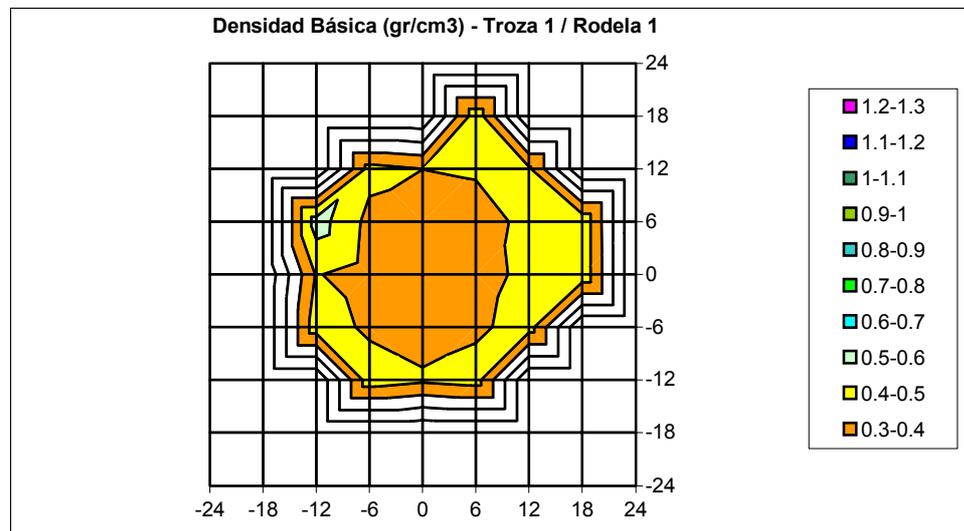


Figura 5 – 6: Distribución de densidad básica, previa a la irradiación.

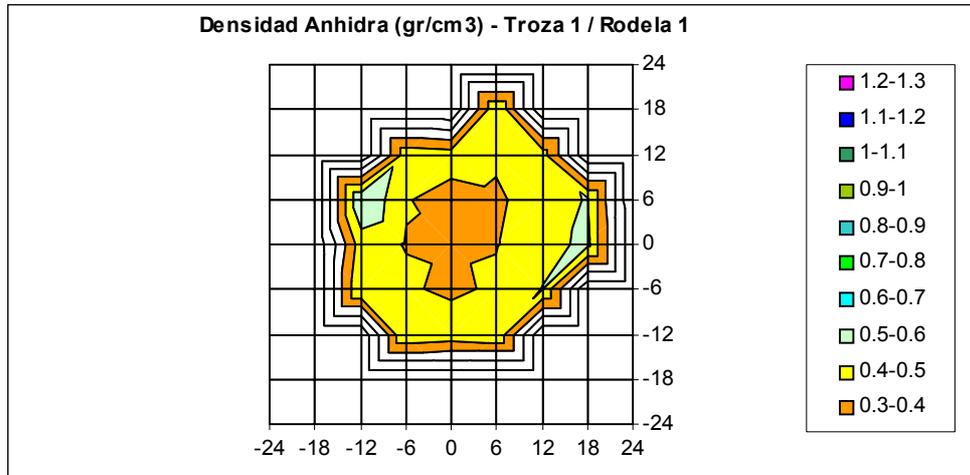


Figura 5 – 7: Distribución de densidad anhidra, previa a la irradiación.

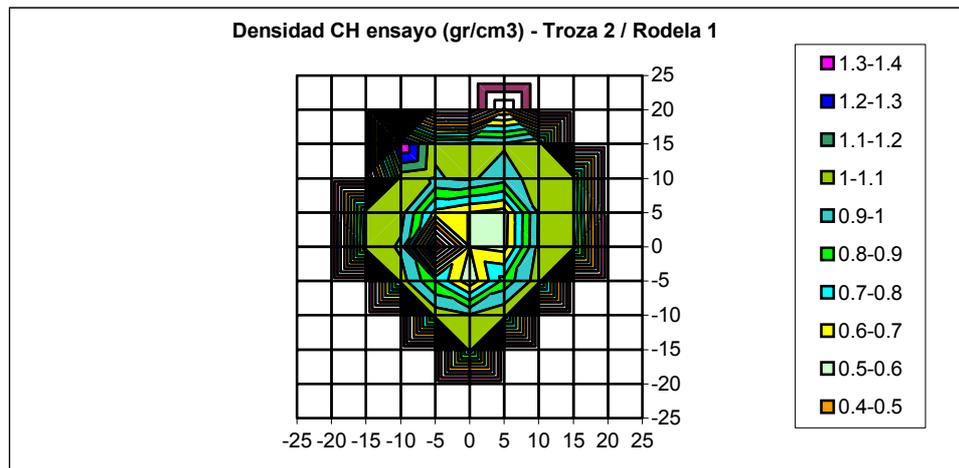


Figura 5 – 8: Distribución de densidad a CH ensayo, previa a la irradiación.

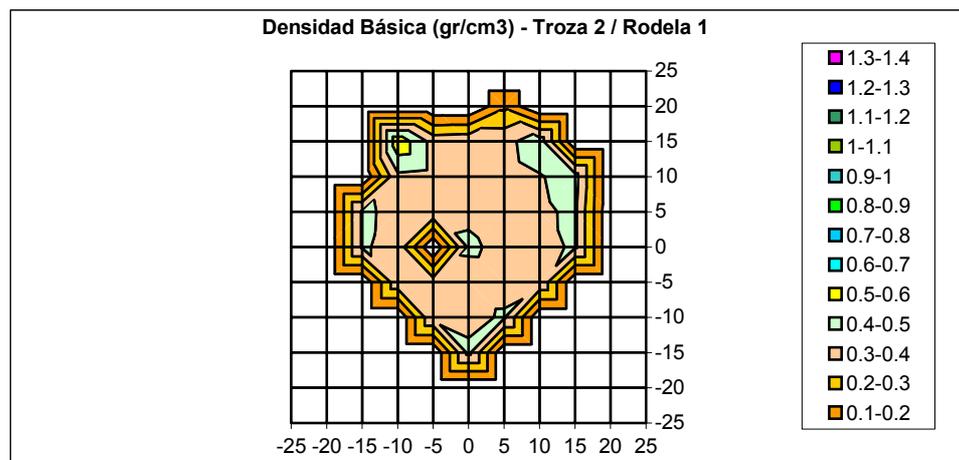


Figura 5 – 9: Distribución de densidad básica, previa a la irradiación.

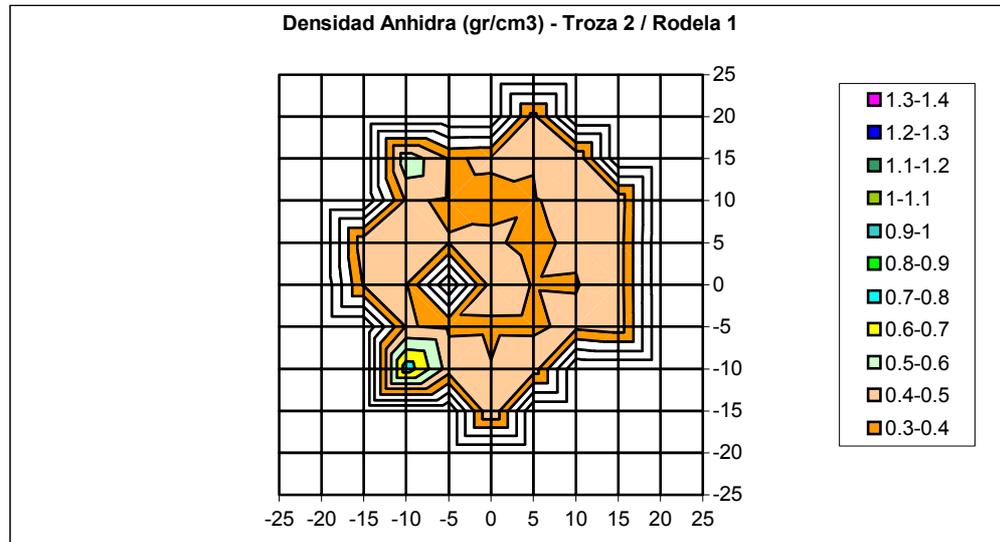


Figura 5 – 10: Distribución de densidad anhidra, previa a la irradiación.

En la Tabla 5 – 3 y Tabla 5 – 4, se resumen las densidades previa a la irradiación.

DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	ENSAYO	BÁSICA	ANHIDRA
Mínimo	0,52	0,34	0,36
Máximo	1,23	0,55	0,60
Promedio	0,98	0,41	0,45
Desv. Est.	0,18	0,04	0,06

Tabla 5 – 3: Resumen de densidades para Troza 1 – Rodela 1, previa a la irradiación.

DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )	ENSAYO	BÁSICA	ANHIDRA
Mínimo	0,41	0,18	0,38
Máximo	1,41	0,58	0,76
Promedio	0,93	0,38	0,43
Desv. Est.	0,22	0,06	0,07

Tabla 5 – 4: Resumen de densidades para Troza 2 – Rodela 1, previa a la irradiación.

- **Densidades después de irradiación**

Una vez concluida la etapa de irradiación, se repitieron las mediciones anteriores a partir de las segundas rodela obtenidas de cada troza. De este modo se construyeron las Figuras 5 – 11 a 5 – 16 y las Tablas 5 – 5 y 5 – 6.

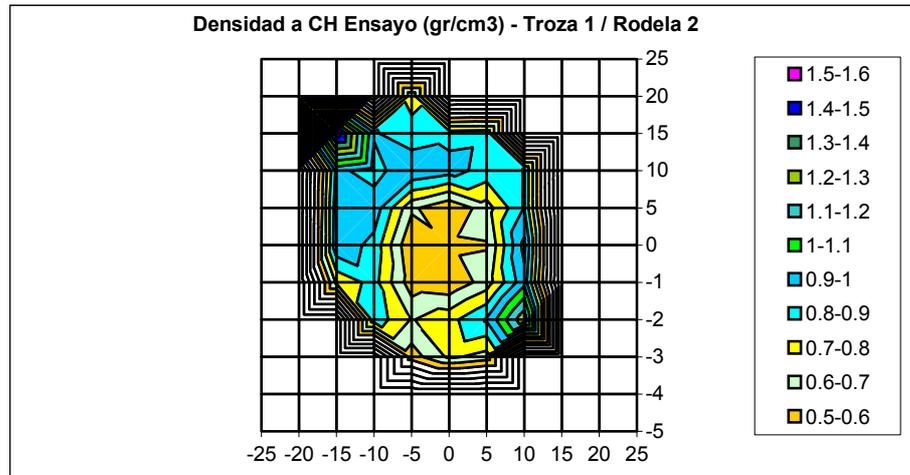


Figura 5 – 11: Distribución de densidad a CH ensayo, posterior a la irradiación.

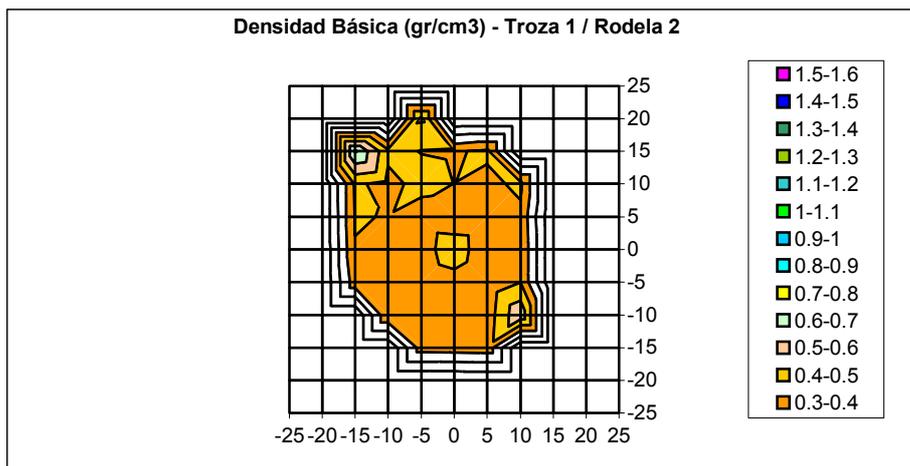


Figura 5 – 12: Distribución de densidad básica, posterior a la irradiación.

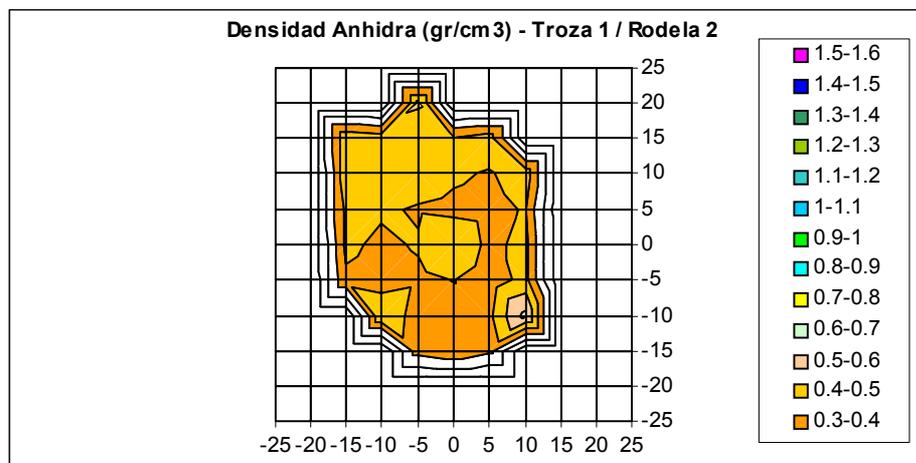


Figura 5 – 13: Distribución de densidad anhidra, posterior a la irradiación.

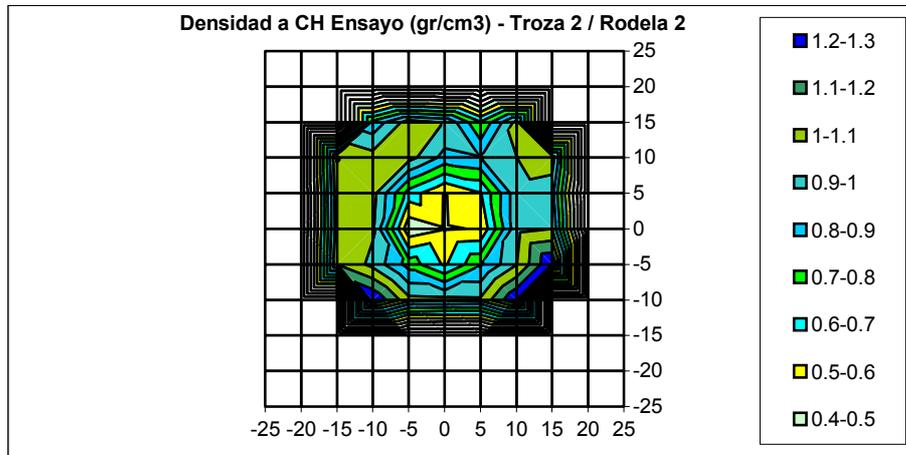


Figura 5 – 14: Distribución de densidad CH ensayo, posterior a la irradiación.

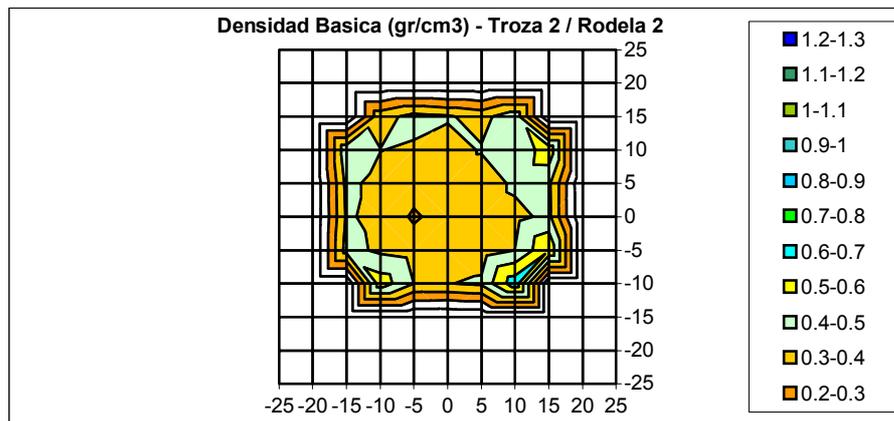


Figura 5 – 15: Distribución de densidad básica, posterior a la irradiación.

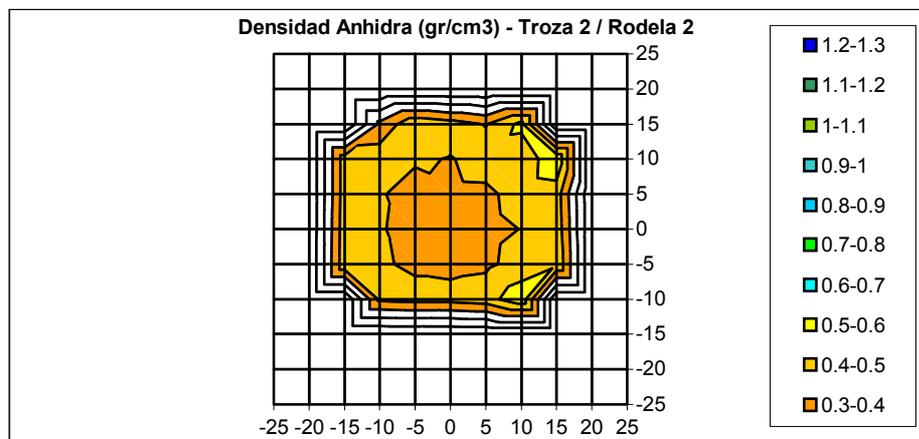


Figura 5 – 16: Distribución de densidad anhidra, posterior a la irradiación.

Las tablas 5 – 5 y 5 – 6, resumen la información de los gráficos de distribución de densidades (Figuras 5 – 11 a 5 – 16).

<b>DENSIDAD (gr / cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>BÁSICA</b>	<b>ANHIDRA</b>
Mínimo	0.50	0.32	0.32
Máximo	1.28	0.71	0.63
Promedio	0.80	0.39	0.41
Desv. Est.	0.18	0.07	0.06

Tabla 5 – 5: Resumen de densidades Troza 1 – Rodela 2, posterior a la irradiación.

<b>DENSIDAD (gr / cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>BÁSICA</b>	<b>ANHIDRA</b>
Mínimo	0.42	0.28	0.32
Máximo	1.10	0.66	0.58
Promedio	0.89	0.41	0.43
Desv. Est.	0.20	0.08	0.05

Tabla 5 – 6 Resumen de densidades Troza 2 – Rodela 2, posterior a la irradiación.

De acuerdo a las Tablas 5 – 3 a la 5 – 6, se observan diferencias para los distintos tipos de densidad calculadas para las etapas previas y posteriores a la irradiación. En la troza 1, los valores máximos de densidad en condiciones de humedad de ensayo, mostraron un aumento de 1.23 a 1.28 gr./cm<sup>3</sup> (+ 4%). En la troza 2 en cambio, los valores máximos de densidad en iguales condiciones mostraron un disminución de 1.41 a 1.10 gr./cm<sup>3</sup> (- 22%). Esto indica que en la primera troza, no hubo gran pérdida de humedad. Ello se explicaría porque la troza 1, estuvo menos tiempo afectada por la desecación la troza (fue la primera troza en irradiarse).

En cambio en la troza 2 se observa una disminución que podría deberse a que fue la última troza irradiada, ello indicaría que un mayor tiempo afecta al proceso de desecación (esta troza fue la última en irradiarse). No obstante los valores anteriores al corresponder a probetas individuales, pueden ser poco representativos. Por tal motivo se presentan en la Tabla 5 – 7 las variaciones en los valores promedios de las densidades, al contrastar las situaciones previa y posterior a la etapa de irradiación del material.

<b>VARIACIÓN <math>\bar{\rho}</math></b>	<b>DENSIDAD CH ENSAYO gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>DENSIDAD BÁSICA gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>DENSIDAD ANHIDRA gr/cm<sup>3</sup></b>
<b>TROZA 1</b>	<b>-18.4%</b>	<b>-4.8%</b>	<b>-8.8%</b>
<b>TROZA 2</b>	<b>-4.3%</b>	<b>+7.9%</b>	<b>0.0%</b>

Tabla 5 – 7: Variación en los promedios de densidades, previo y posterior a la irradiación.

La variación de promedios muestra un efecto general acorde con las disminuciones notadas en los contenidos de humedad, ello se verificó principalmente en la densidad a CH de ensayo. Así queda en evidencia la importancia de acortar los procesos de irradiación, a fin de mantener lo más estable posible las condiciones físicas del material en cuanto a los contenido de humedad.

## 5.2. CALIBRACIÓN SISTEMA ESPECTROSCÓPICO GAMMA

### 5.2.1. ESTABILIDAD TEMPORAL

#### 5.2.1.1. BANCO DE COLIMACIÓN FINA

Las pruebas llevadas a cabo durante tres días seguidos se resumen en las Tablas 5 – 8 y 5 - 9, para valores de conteo sin material atenuador (I<sub>0</sub>). En la Tabla 5 – 8, se indica la ubicación temporal de los períodos de colección y el lapso entre cada medición o lectura.

PERÍODOS	TIEMPO ENTRE LECTURA	TIEMPO TOTAL	Nº LECTURAS	REPOSO VOLTAJE
1	5 minutos	105 minutos	21	si
2	5 minutos	125 minutos	25	no
3	5 minutos	65 minutos	13	no
4	20 minutos	8.5 horas	25	no

Tabla 5 – 8: Esquema temporal del análisis para el banco de colimación fina.

En la Tabla 5 – 9, se puede observar la buena estabilidad general que presentan las lecturas, al considerar que la máxima variación porcentual, para la totalidad de períodos, es de un 1.21%. Asimismo al evaluar las desviaciones estándar obtenidas, los promedios de los cuatro períodos pueden incluirse en un solo rango ( $\pm$  una desviación  $\sigma_{n-1}$ ).

PERÍODOS	PROMEDIO DE CUENTAS (I <sub>0</sub> )	VARIANZA	DESV. EST.	CV %
1	11022.8	12104.4	110.0	1.00
2	11060.8	11953.7	109.3	0.99
3	11003.6	13808.2	117.5	1.07
4	10973.2	17571.6	132.5	1.21

Tabla 5 – 9: Estadígrafos para análisis de estabilidad en banco colimación fina

La buena estabilidad que muestran los resultados, al interior de cada período y entre distintos períodos, puede observarse de mejor manera en gráficos extendidos en el tiempo, con la inclusión de  $\pm$  una desviación estándar ( $\sigma_{n-1}$ ). Esta situación se muestra en las Figuras 5 – 17 a 5 – 19, donde además se observan valores que escapan del intervalo definido por  $\pm$  una desviación estándar. Sin embargo el porcentaje de dichos casos es mínimo y no afecta la calidad de la estabilidad general.

Además del análisis descriptivo, los análisis estadísticos siguientes pueden poner a prueba y verificar a fondo la estabilidad del sistema. Mediante la realización de un análisis de varianza (ANDEVA), se puede establecer la similitud entre los distintos períodos, de acuerdo a las observaciones individuales de cada uno de ellos. Este análisis de ANDEVA está basado en la prueba **F** para la hipótesis de igualdad de medias (H<sub>0</sub>), la cual trabaja bajo el supuesto de “k” poblaciones normales de varianzas homogéneas. Si se cumple que **F<sub>c</sub>** es menor que **F<sub>α; (v1,v2)</sub>**, entonces la hipótesis H<sub>0</sub> debe ser aceptada para el nivel de significancia ( $\alpha$ ) escogido.

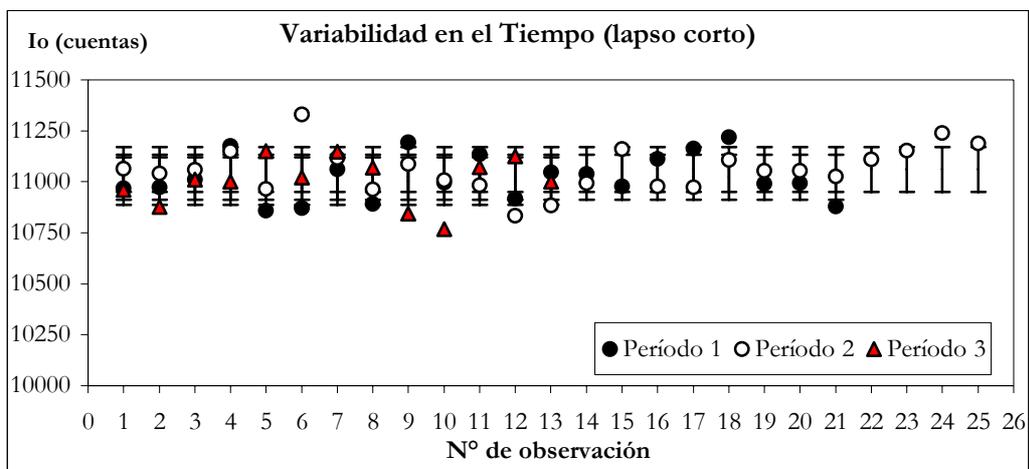


Figura 5 – 17: Estabilidad extendida para lapso de 5 minutos

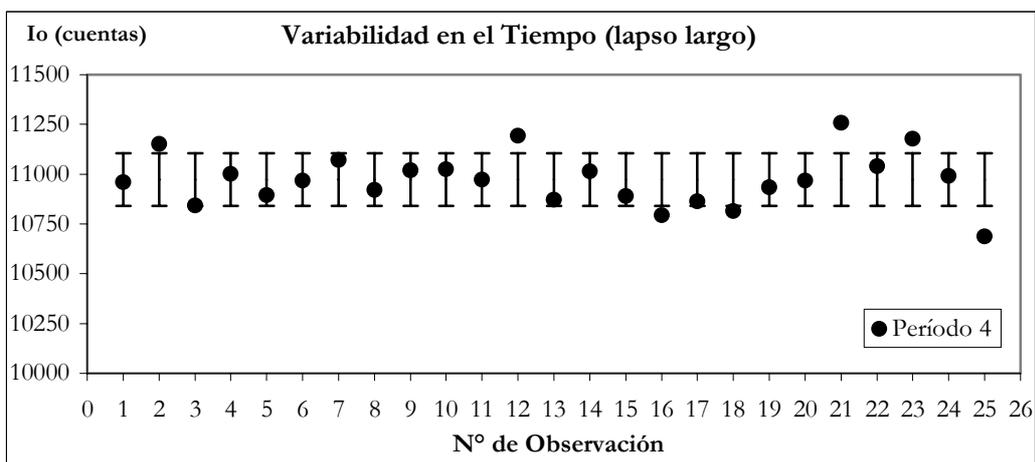


Figura 5 – 18: Estabilidad extendida para lapso de 20 minutos

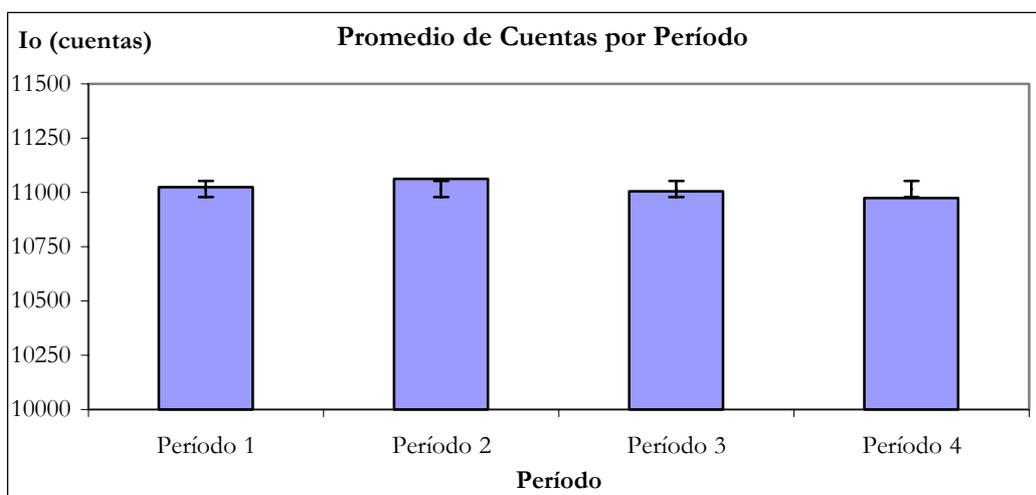


Figura 5 – 19: Promedio de cuentas por período

El análisis de ANDEVA arrojó los resultados resumidos en la Tabla 5 – 10. Dicho análisis se realizó ocupando las fórmulas descritas en el Anexo 9.1.

FTE. DE VARIACIÓN	G.L.	S. C.	C. M.	Fc	$F_{\alpha,(v1, v2)}$
<b>MEDIA</b>	1	925375	925375		
<b>ENTRE GRUPOS</b>	3	98838.6	32946.2	<b>2.36</b>	<b>2.72</b>
<b>DENTRO DE GRUPOS</b>	80	1116398.8	13954.9		
<b>TOTAL</b>	84	2140612.5			

Tabla 5 – 10: Tabla ANDEVA para prueba de igualdad de medias.

Puesto que  $F_c = 2.36$  es menor que  $F_{0,05, (3, 80)} = 2.72$ ; es posible afirmar que: estadísticamente para el nivel de significancia adoptado ( $\alpha = 0.05$ ), la hipótesis de igualdad de medias para los cuatro períodos de colección, se acepta.

Este resultado, es de vital importancia para períodos extensos de irradiación, como normalmente ocurre cuando se analiza gran cantidad de muestras en estado verde. En dichos casos una irradiación completa fácilmente puede ocupar un día.

De acuerdo con la prueba Chi – cuadrado ( $X^2$ ) propuesta, se establece la calidad de las fluctuaciones en las mediciones, al interior de un período en particular. Este análisis es importante además para caracterizar sesiones individuales de medición. En la Tabla 5 – 11, se muestra el tipo de fluctuaciones que caracterizan a los períodos de colección realizados. Dicha caracterización se basa en la siguiente clasificación de probabilidades, asociada al valor particular de  $X^2$ , según lo definido en la sección 4.2.3.1.

PROBABILIDAD	CALIDAD EN LA FLUCTUACIÓN
$p < 0.02$	FLUCTUACIÓN ANORMALMENTE GRANDE
$p > 0.98$	FLUCTUACIÓN ANORMALMENTE PEQUEÑA
$p \approx 0.5$	FLUCTUACIÓN NORMAL

Tabla 5 – 11: Tipos de fluctuaciones de acuerdo al valor de p.

PERÍODO	P1	P2	P3	P4
$X^2$ CALCULADO	21.96	25.94	15.06	38.43
P ASOCIADA	0.66	0.64	0.76	0.97
FLUCTUACIÓN	Normal	Normal	Normal	Anormalmente pequeña

Tabla 5 – 12: Probabilidad asociada a cada período de colección y calidad de fluctuación<sup>13</sup>

De acuerdo a los resultados, los 3 primeros períodos muestran valores “p” cercanos a 0.5 y por lo tanto sus fluctuaciones pueden clasificarse de normales. Dicha conclusión tiene más relevancia ya que las mediciones se hicieron en días diferentes.

La fluctuación mostrada por el cuarto período, si bien es calificada de anormal, no indica una situación complicada para el estudio, puesto que se refiere a “fluctuaciones inusualmente pequeñas”. Muy diferente sería un resultado para “p” menor a 0.02, en cuyo

<sup>13</sup> Según criterio establecido en Knoll (1989) y Tsoulfanidis (1983).

caso las fluctuaciones entre una medida y otra serían muy grandes para una misma sesión de irradiación, implicando en la práctica gran inexactitud y un error instrumental necesario de corregir, antes de llevar a cabo la etapa de irradiación.

#### 5.2.1.2. BANCO DE COLIMACIÓN AMPLIA

En este caso los resultados tienen especial relevancia, pues en este banco de pruebas se realizó el proceso de irradiación del material objetivo, además del hecho que el sistema mecánico y las instalaciones eléctricas fueron construidos especialmente para este tipo de trabajo.

Los datos utilizados son similares al caso anterior, a los cuales se les analizan sus fluctuaciones mediante el criterio de la prueba Chi – cuadrado ( $X^2$ ), a pesar que se utilizaron diferentes tiempos de colección: 30, 120 y 600 segundos.

Los períodos de colección llevados a cabo, sin reposo inicial de voltaje en el sistema, abarcaron seis días lo cual es coherente con la extensión promedio de las sesiones prácticas de irradiación. Los resúmenes de los datos para el análisis se muestran en las Tablas 5 – 13, 5 – 14 y 5 – 15.

PERÍODOS	Nº LECTURAS	PROMEDIO	VARIANZA	DESV. EST.	CV %	DÍA
1	13	771662.1	2526844.7	1589.6	0.21	4
2	10	769848.1	1235726.8	1111.6	0.14	4
3	13	773499.1	1318128.6	1148.1	0.15	4
4	10	773495.4	1392802.3	1180.2	0.15	4

Tabla 5 – 13: Estadística descriptiva para períodos de colección de 30 segundos.

En la Tabla 5 – 13, se observan coeficientes de variaciones bastante bajos, en donde la variabilidad de los datos no supera el valor porcentual de 0.21% para los 4 períodos de lectura. La totalidad de los períodos abarcó un solo día.

PERÍODOS	Nº LECTURAS	PROMEDIO	VARIANZA	DESV. EST	C.V%	DÍA
1	8	3125584.6	15658277.4	3957.1	0.13	5
2	8	3090577.6	20369866.6	4513.3	0.15	6
3	8	3084581.6	10471204.8	3235.9	0.10	7

Tabla: 5 – 14: Estadística descriptiva para períodos de colección de 120 segundos.

En la Tabla 5 – 14, las variaciones porcentuales de todos los períodos no superan a 0.15%. Se aprecia mayor estabilidad respecto a los períodos de 30 segundos. Estas lecturas utilizaron un tiempo de colección similar a los tiempos utilizados en la irradiación de las trozas.

PERÍODOS	Nº LECTURAS	PROMEDIO	VARIANZA	DESV. EST.	C.V. %	DÍA
1	6	15305330.1	134409237.4	11593.5	0.075	7
2	8	15202763.1	135600039.0	11644.7	0.076	8
3	7	15241417.4	148070929.0	12168.4	0.079	9
4	8	15252567.0	72961261.4	8541.7	0.056	9

Tabla 5 – 15: Estadística descriptiva para períodos de colección de 600 segundos.

Finalmente para 600 segundos de colección por observación (Tabla 5 – 15), se tienen las menores variaciones por período, solamente de un 0.08% como máximo. Sin embargo dichas regularidades son factibles de obtener en sesiones individuales de colección, pues al comparar los promedios y desviaciones de cada período se verifican diferencias mas notorias. Este hecho no ocurrió en el banco de colimación fina (Figuras 5 – 20 a 5 – 22).

Las Tablas 5 – 16, 5 – 17 y 5 - 18, muestran la prueba de estabilidad para cada período de irradiación, según los tres tiempos de colección empleados.

PERÍODO	PERÍODO 1	PERÍODO 2	PERÍODO 3	PERÍODO 4
$X^2$	39.29	14.45	20.45	16.21
PROBABILIDAD	1.00	0.89	0.94	0.94

Tabla 5 – 16: Prueba Chi – cuadrado, para 30 segundos de colección.

PERÍODO	PERÍODO 1	PERÍODO 2	PERÍODO 3
$X^2$	35.07	49.14	23.76
PROBABILIDAD	≈ 1.00	≈ 1.00	≈ 1.00

Tabla 5 – 17: Prueba Chi – cuadrado, para 120 segundos de colección.

PERÍODO	PERÍODO 1	PERÍODO 2	PERÍODO 3	PERÍODO 4
$X^2$	43,91	62,44	58,29	33,48
PROBABILIDAD	≈ 1,00	≈ 1,00	≈ 1,00	≈ 1,00

Tabla 5 – 18: Prueba Chi – cuadrado, para 600 segundos de colección.

Con relación a la calidad de las fluctuaciones y de acuerdo a lo especificado en la Tabla 5 – 11 para el tipo de variabilidad según la prueba  $X^2$ , el primer período del set de datos coleccionados para 30 segundos, muestra una variación anormalmente pequeña.

A pesar que las demás probabilidades son cercanas a 0.98, sus variabilidades asociadas se clasifican como normales, según el criterio  $X^2$ . Por el contrario para los otros tiempos de colección, las fluctuaciones obtenidas son clasificadas como anormalmente pequeñas. El análisis de esta situación, es similar a lo especificado en la sección anterior, en donde hubiese sido muy preocupante obtener fluctuaciones anormalmente grandes.

Se presentan de igual modo, gráficos extendidos en el tiempo para las lecturas anteriores, indicando para cada caso, barras de error igual al promedio mas menos una desviación estándar (Figuras 5 – 20, 5 – 21 y 5 – 22).

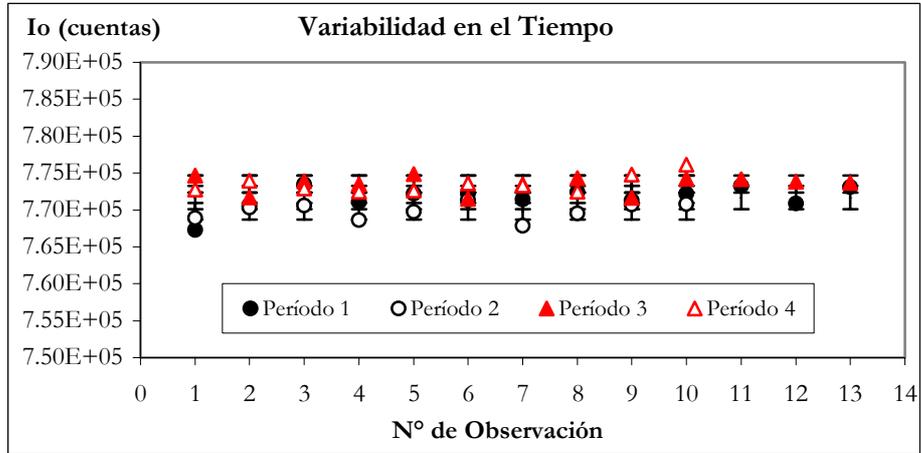


Figura 5 – 20: Variabilidad para 30 segundos de conteo.

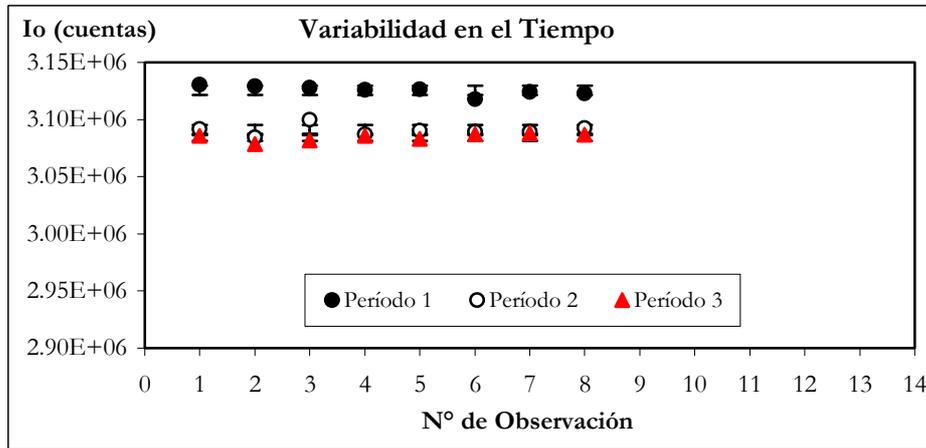


Figura 5 – 21: Variabilidad para 120 segundos de conteo.

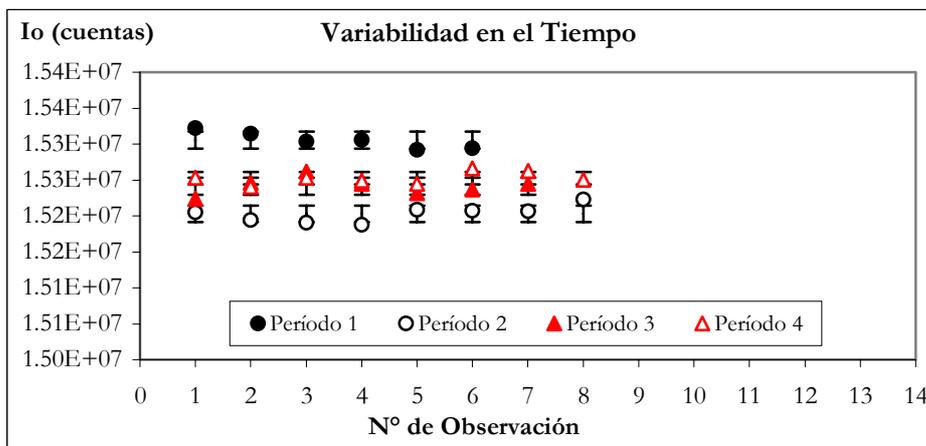


Figura 5 – 22: Variabilidad para 600 segundos de conteo.

En el set de lecturas para 120 segundos de conteo por lectura (Figura 5 – 21), se aprecia una diferencia en los valores para el primer período respecto a los períodos 2 y 3. Este hecho puede deberse a que todos los períodos de lectura se efectuaron en días distintos, lo que por ejemplo implicó el apagado y encendido de la electrónica del sistema entre períodos. Incluso no podría descartarse el efecto de diferentes condiciones externas (variación en el voltaje de la red eléctrica externa, efectos del funcionamiento de otros equipos del laboratorio, etc.) sobre dicho período. Lo relevante en estos análisis es que se establece la conveniencia de efectuar una sesión completa de irradiación en un único lapso de tiempo, sin interrupciones. Ello evitaría sesiones que podrían estar afectadas por condiciones de días distintos. Por tal motivo se puede recomendar no apagar la electrónica del sistema espectroscópico, hasta concluir una sesión.

### 5.2.2. ALINEACIÓN ANGULAR DE LA FUENTE

Después de girar la fuente en un ángulo de  $60^\circ$ , se obtuvo valores de intensidades para cada paso angular de 5 grados. La posición cero grados, marcada sobre el soporte de la fuente, coincidió con el máximo valor para la intensidad. A pesar de ello, se apreció una ausencia de simetría en las intensidades para el rango  $[-15^\circ \sim +15^\circ]$ . Por lo tanto, sería necesario realizar una nueva inspección en el rango  $[-5^\circ \sim +5^\circ]$  utilizando un paso menor, con el objeto de afinar la posición del máximo.

El comportamiento descrito, como se muestra en la Figura 5 - 23, fue análogo para las dos posiciones de acercamiento "r" de la fuente al detector: 56.5 cm. (r mínimo) y 86.5 cm. (r máximo). Ello permite confirmar la correcta alineación, coincidente con el eje imaginario representado por la línea del haz de fotones.

Con respecto a la abertura efectiva del cono que representa la emisión de fotones gamma, se determinó en  $20^\circ$  ó  $[-10^\circ \sim +10^\circ]$  aproximadamente, si se consideran valores a partir de 10000 cuentas como mínimo. Dicha información es importante para determinar dos puntos importantes: en primer lugar la seguridad del operador al evitar la exposición accidental a la radiación, y en segundo lugar permite determinar el rango efectivo de irradiación horizontal de cualquier muestra. Este último hecho permitiría conocer mejor las posiciones afectadas por efecto de borde.

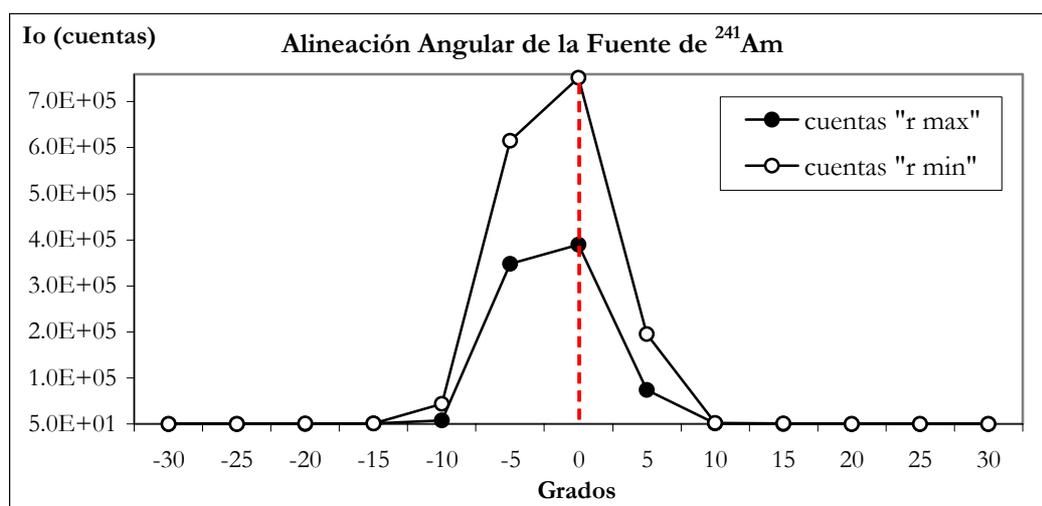


Figura 5 – 23: Intensidad no atenuada, para distintas posiciones angulares de la fuente.

### 5.2.3. ANÁLISIS DE LA RELACIÓN: DISTANCIA “FUENTE – DETECTOR” E INTENSIDAD

Según lo señalado en la sección 4.2.3.3., luego de establecida la Ec. 17, debería observarse similitud entre las curvas teórica y experimental. Pero a medida que  $r$  disminuye, la curva teórica debiera superar a la experimental, debido al efecto del volumen del detector (ver figuras 5 – 24 y 5 – 25).

Todo el análisis se llevó a cabo para las dos posiciones extremas del soporte de muestras. Utilizando la relación dada por Ec. 17, los valores del parámetro “ $a$ ” (utilizado en la construcción de las curvas teóricas r v.s lo) son los siguientes:

- $a = 2.86 \times 10^9$  (posición mínima del soporte de muestras – 15 cm. bajo haz)
- $a = 2.87 \times 10^9$  (posición máxima del soporte de muestras – 5 cm. bajo haz)

De acuerdo al ajuste potencial llevado a cabo, resultaron las siguientes relaciones funcionales, con los respectivos valores de los coeficientes:

AJUSTE POTENCIAL:

$$Y = \alpha \cdot X^\beta$$

Ec. 29

MODELO	POSIC. SOPORTE	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
POTENCIAL	MÍNIMA	6.12 E8	-1.650	<b>0.998</b>
	MÁXIMA	6.14 E8	-1.651	<b>0.998</b>

Tabla 5 - 19: Resultados del Ajuste con Ec. 29.

El coeficiente de determinación correspondiente al ajuste potencial está de pleno acuerdo con la relación teórica dada por Ec. 17, también potencial, en donde se aprecia que el valor del exponente es cercano a -2. Los gráficos (Figuras 5 – 24 y 5 – 25), para la relación teórica y experimental demuestran lo anteriormente señalado.

Otro aspecto importante, es la similitud de ambas regresiones tanto para la posición mínima como máxima del soporte de las muestras. Ello queda demostrado al momento de establecer una matriz de correlación para los datos utilizados en ambas regresiones. (Tabla 5 – 20). Este hecho permite señalar que no hay un efecto importante del soporte de las muestras, según su posición vertical, sobre el conteo de fotones por parte del detector (scattering).

DATOS $I_0$	5 CMS BAJO HAZ	15 CMS BAJO HAZ
5 CMS BAJO HAZ	1.0	---
15 CMS BAJO HAZ	0.99	1.0

Tabla 5 – 20: Correlación para las dos posiciones del soporte de muestras.

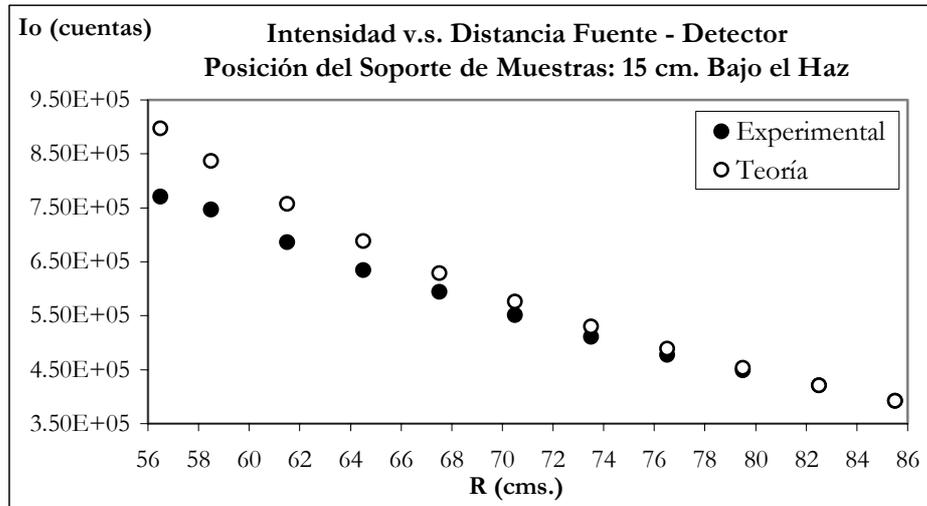


Figura 5 – 24: Comparación curvas, para posición mínima del soporte de muestras

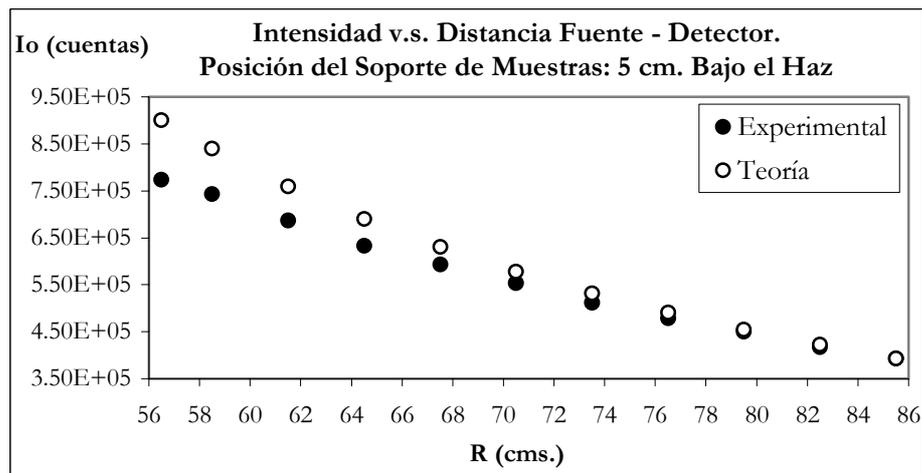


Figura 5 – 25: Comparación curvas, para posición máxima del soporte de muestras

#### 5.2.4. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA GEOMETRÍA DE LAS MUESTRAS (ATENUACIÓN)

En la irradiación de los recipientes que simulan las trozas se determinaron con la Ec. 18, los valores de  $I_0$  para trabajar con un error estadístico de  $\sim 1\%$  (ver Tabla 5 – 21).

RECIPIENTE	$I_0$ APROXIMADO (CUENTAS)
A	770000
B	3100000
C	15225000

Tabla 5 – 21: Intensidades no atenuadas, para conseguir  $E \approx 1\%$

Las Figuras 5 – 27 a 5 – 29, muestran una buena sensibilidad del método en relación a las dimensiones reales de los recipientes. Esta afirmación se explica por los antecedentes que siguen:

- En dichas figuras se reflejan 3 hechos importantes referidos a la geometría de los recipientes, al momento de irradiarlos con agua en su interior. Teniendo presente que el recipiente siempre avanzó relativo al haz de izquierda a derecha, y la nomenclatura siguiente:
  - 1.- Primera atenuación del haz (**punto derecho color azul**): corresponde a la posición horizontal en donde el haz es prácticamente tangente al límite derecho del recipiente. Por lo tanto indica el inicio del recipiente y la primera diferencia con los valores lo, la cual se acentúa cada vez mas.
  - 2.- Máxima atenuación del haz (**puntos color rojo**): es la lectura en donde el haz sufre la máxima atenuación, y teóricamente corresponde al mayor espesor del recipiente y por ende a su centro, en casos de muestras simétricas.
  - 3.- Última atenuación del haz (**punto izquierdo color azul**): es la última lectura antes de alcanzar los valores de lo no atenuado, para el recipiente respectivo. Corresponde al límite izquierdo del recipiente.
  
- La atenuación del haz en recipientes sin agua en su interior, sólo es capaz de mostrar dos hechos relevantes:
  - 1.- Primera atenuación (**punto derecho color azul**): En esta posición el haz se atenúa levemente más que en las posiciones centrales. Esto se debe a que el haz, tangente al recipiente, atraviesa más material (Figura 5 –26).
  - 2.- Última atenuación (**punto izquierdo color azul**): homólogo a la primera atenuación
  
- Las diferencias con las dimensiones reales, se deben evidentemente a irregularidades y falta de simetría o cilindridad en los recipientes. El problema se verifica fundamentalmente, en cilindros de reducido tamaño (cilindro A), mas aún cuando el haz de fotones no es colimado, lo que hace perder precisión. En la Tabla 5 – 22, se verifican las diferencias numéricas, en donde se cuantifican las diferencias para cada caso.
  
- De acuerdo al inicio y final de las atenuaciones, puede observarse el bajo error en la predicción del desarrollo horizontal, para los recipientes restantes (B y C). Debe considerarse, por cierto, que el paso horizontal empleado fue de 2 centímetros (menos precisión). Con respecto a las posiciones de atenuación máxima, influye fuertemente el correcto posicionamiento de los cilindros sobre el soporte. Además, corrobora la calidad simétrica de los recipientes empleados; en donde el centro de cada recipiente coincide, con la posición de atenuación máxima. Este hecho es de suma importancia, como indicador indirecto de excentricidades en las muestras a emplear (trozas), o presencias de alguna irregularidad interna, en una zona donde se espera encontrar una máxima atenuación.

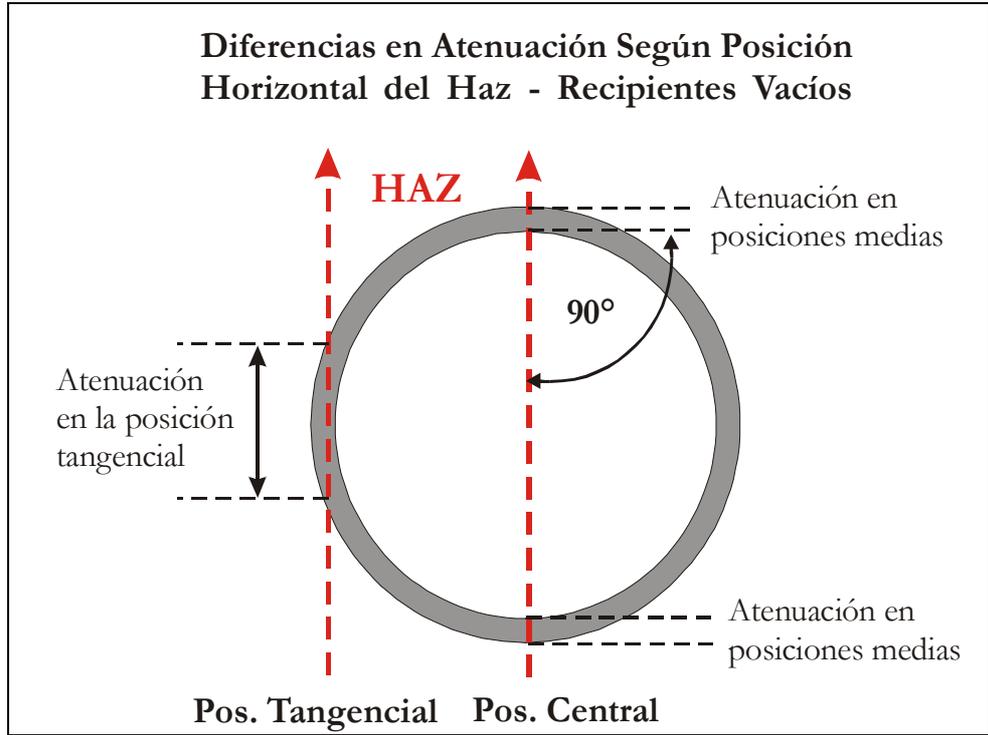


Figura 5 – 26: Haz de fotones gamma, atravesando un recipiente vacío.

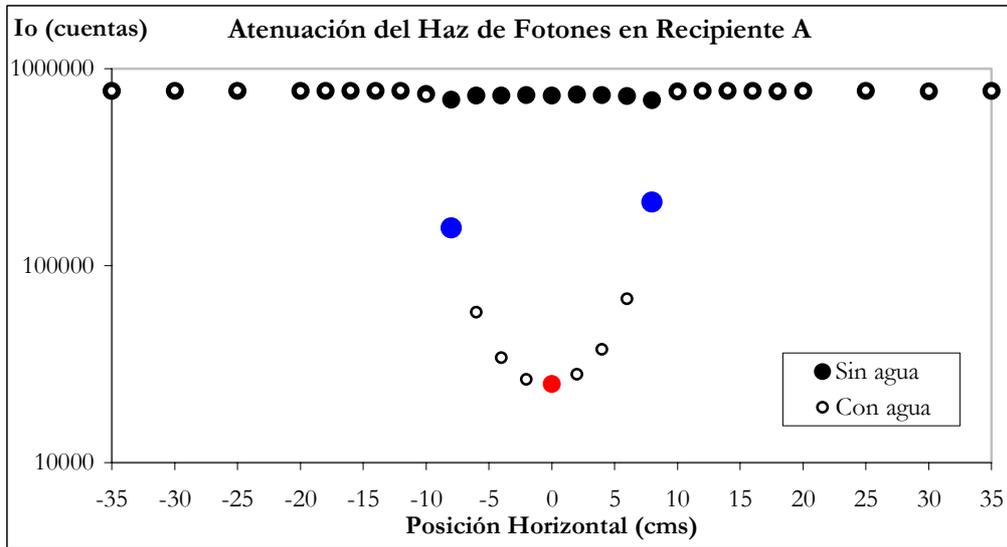


Figura 5 – 27: (Eje Y en escala logarítmica)

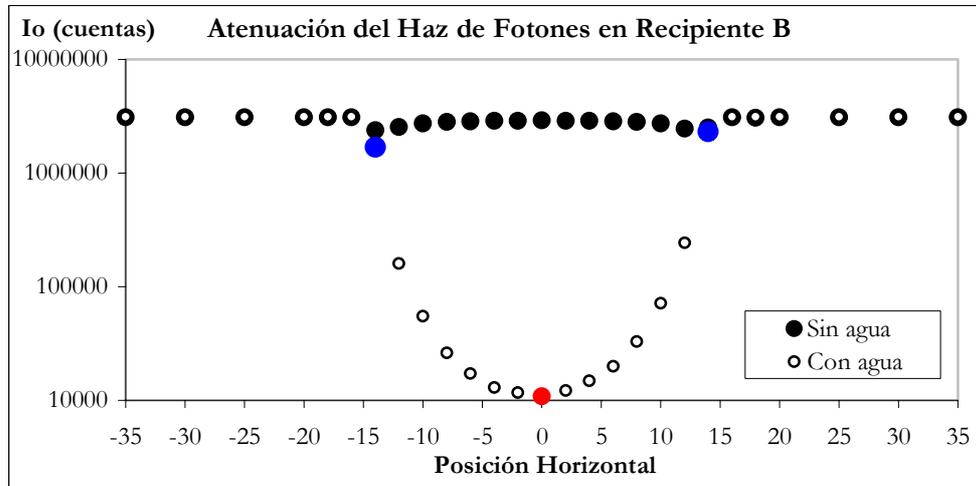


Figura 5 - 28 (Eje Y en escala logarítmica)

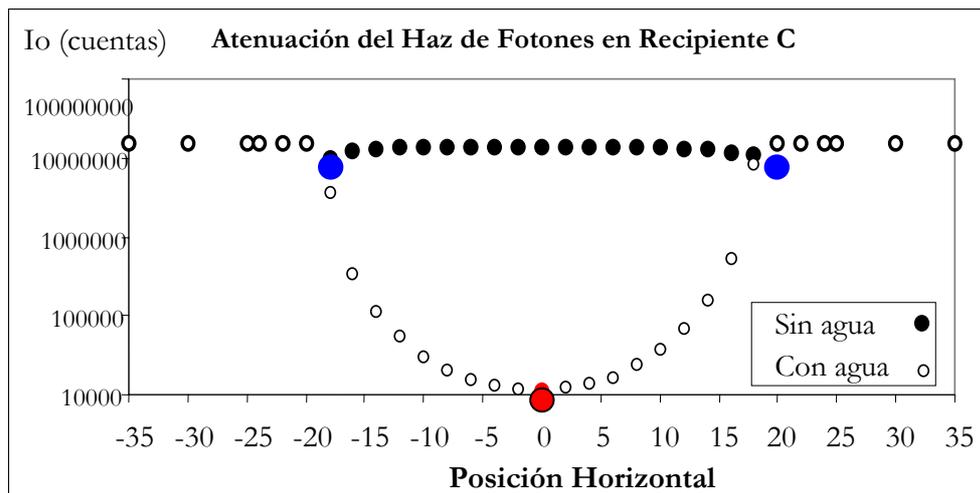


Figura 5 - 29 (Eje Y en escala logarítmica)

RECIPIENTE	A	B	C
INICIO ATENUACIÓN	-8	-14	-20
INICIO REAL	<b>-9.165</b>	<b>-14.6</b>	<b>-18.9</b>
ATENUACIÓN MÁX.	0	0	0
CENTRO REAL	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
FIN ATENUACIÓN	8 cm.	14	18
FIN REAL	<b>9.165</b>	<b>14.6</b>	<b>18.9</b>
ERROR INICIO	-12%	-4.12%	5.82%
ERROR CENTRO	0%	0%	0%
ERROR FIN	-12%	-4.12%	-4.76%

Tabla 5 – 22: Distancias en Centímetros, referidas al centro real del recipiente.

Con respecto a los signos de los porcentajes de error, sólo indican subestimación (-) o sobreestimación (+) en las longitudes.

### 5.2.5. DETERMINACIÓN DEL FACTOR “BUILD UP – B(t)”

De acuerdo a lo indicado en la sección 4.2.6., en relación a los datos de atenuación obtenidos en la etapa de irradiación de cilindros con aceite, y los valores respectivos de espesores de material; se obtuvieron los siguientes resultados.

#### 5.2.5.1. RECIPIENTE A

Para este recipiente se obtuvo la siguiente regresión lineal:

$$\ln I = -0,1839 \cdot t + 13,937; \quad R^2 = 0,997 \quad \text{Ec. 30}$$

La regresión lineal (Ec. 30) muestra un alto coeficiente de correlación. Esto indica un factor de Build Up (B) constante e independiente del espesor del material. De acuerdo con la Ec. 27, el valor de B(t) es 1.47, diferente del valor uno correspondiente a una situación ideal. El gráfico correspondiente a la regresión lineal se muestra en la Figura 5 – 30.

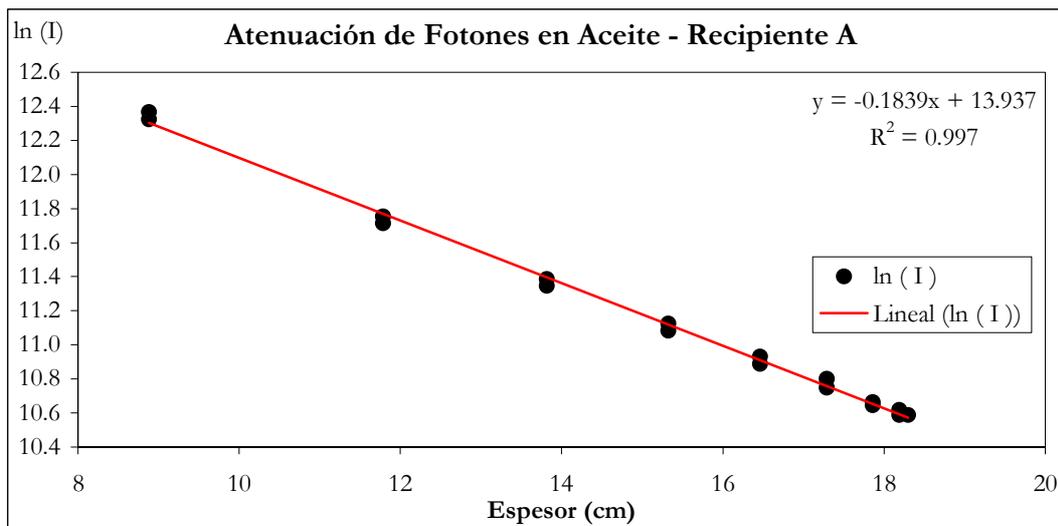


Figura 5 – 30: Atenuación de Fotones en Aceite – Recipiente A

#### 5.2.5.2. RECIPIENTE B

Para este recipiente, se efectuaron dos recorridos en distintos planos horizontales de irradiación. Por ello se muestran dos regresiones y por ende dos resultados para B(t).

- Plano horizontal 1       $\ln I = -0.1669 \cdot t + 14.334$        $R^2 = 0,994$       Ec. 31
- Plano horizontal 2       $\ln I = -0.1687 \cdot t + 14.358$        $R^2 = 0,993$       Ec. 32

PLANO IRRADIACIÓN	PLANO 1	PLANO 2
B(T)	1.11	1.14

Tabla 5 – 23: Factor de “Build – Up”, en recipiente B

Como puede observarse en la tabla anterior, se obtienen valores de B(t) mas cercanos a la situación ideal ( B(t) = 1 ); con un coeficiente de Build – Up que no depende del espesor del material atravesado.

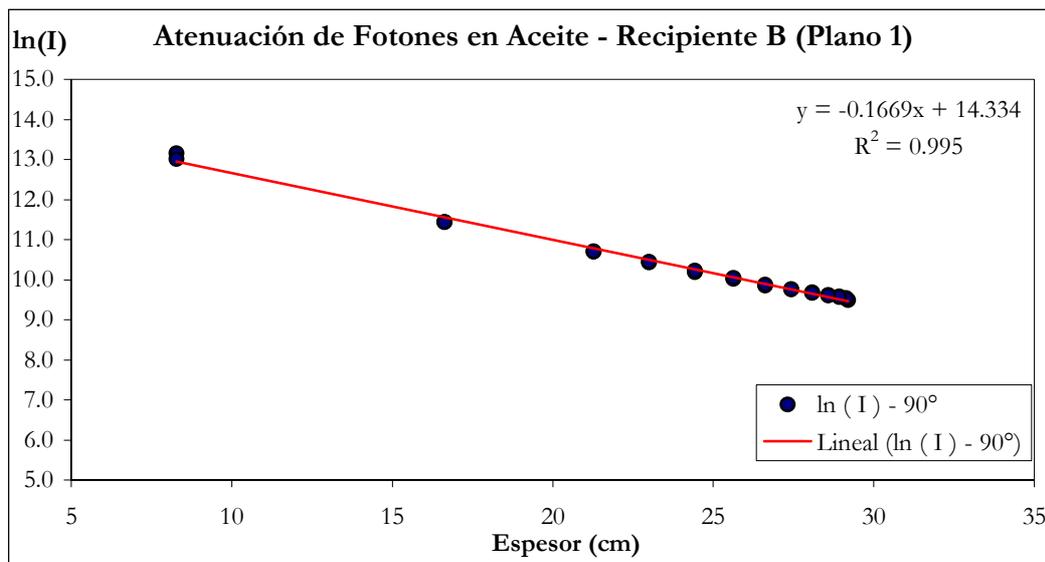


Figura 5 – 31: Atenuación de fotones en aceite – Recipiente B / Plano 1

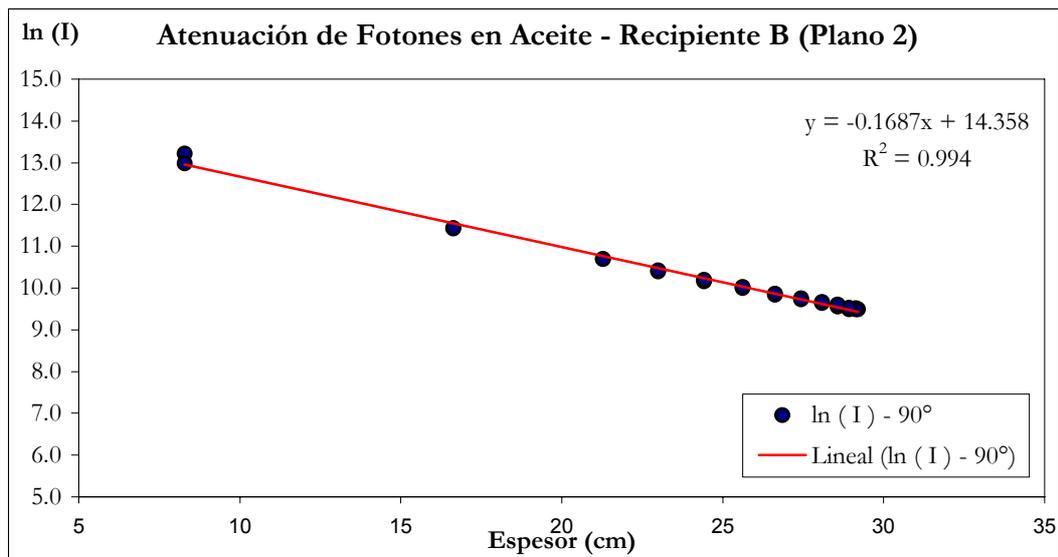


Figura 5 – 32: Atenuación de fotones en aceite – Recipiente B / Plano 2

Respecto a las trozas que se irradiaron, sus diámetros son similares al recipiente B. Ello implica que para la etapa de irradiación del material objetivo, el factor de “build up” debería ser muy cercano 1.1.

En general, la geometría del banco de colimación amplia es buena. Pero sin duda, debe ponerse sumo cuidado en la manipulación de los materiales de prueba, en el momento de montarlos en el soporte, de modo que ambos centros coincidan.

### 5.3 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN MASICO EN MADERA VERDE DE PINO RADIATA

De acuerdo a la metodología, se obtuvieron 126 lecturas para el coeficiente de atenuación másico  $\mu_p$ . Dichas lecturas calculadas a partir de irradiaciones en el centro (dirección radial) de 14 bloques en condiciones verdes, permitió definir un número mínimo de ~10 lecturas para un error muestral inferior a 5% (Ec. 20). Así en el análisis posterior, los datos tomados de 10 bloques provenientes de la Troza 2 – Rodela 3 permitieron realizar una ANDEVA (prueba F), a fin de observar los efectos de la posición diametral y del contenido de humedad, sobre el valor de  $\mu_p$ . En cada bloque de la vigueta 1 (6 bloques) se tomaron siete observaciones, y para la vigueta 2 (4 bloques), seis observaciones.

- Determinación de  $\mu_p$  en distintas condiciones de humedad para vigueta 1 y 2.

Bloque N°	Posición en Diámetro (cm.)	Ch% ensayo	Ch% ambiente	Ch % anhidro
		$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /gr)	$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /gr)	$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /gr)
1	2.5	0.205	0.198	0.186
2	7.5	0.205	0.187	0.189
3	12.5	0.185	0.183	0.188
4	17.5	0.170	0.190	0.190
5	22.5	0.190	0.180	0.188
6	27.5	0.199	0.186	0.185
---	<b>Promedio</b>	<b>0.192</b>	<b>0.187</b>	<b>0.188</b>
---	<b>Desv. Est.</b>	0.014	0.006	0.002
---	<b>Coef. Variac.</b>	7.1	3.2	1.0

Tabla 5 – 24: Coeficientes de atenuación másico (promedios por bloque) Vigueta 1, en madera verde.

Bloque N°	Vigueta 2 Diámetro (cm.)	Ch% ensayo	Ch% ambiente	Ch % anhidro
		$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /gr)	$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /gr)	$\mu_p$ (cm <sup>2</sup> /gr)
1	2.5	0.197	0.186	0.188
2	7.5	0.198	0.188	0.184
	12.5	---	---	---
	17.5	---	---	---
3	22.5	0.203	0.190	0.195
4	27.5	0.191	0.187	0.184
---	<b>Promedio</b>	<b>0.198</b>	<b>0.188</b>	<b>0.188</b>
---	<b>Des. Estándar</b>	0.005	0.002	0.005
---	<b>Coef. Variac.</b>	2.5	1.0	2.8

Tabla 5 – 25: Coeficientes de atenuación másico (promedios por bloque) Vigueta 2, en madera verde.

De este modo se tienen un total de 10 estimaciones para  $\mu_p$ , según los 10 bloques individualizados como distintas posiciones diametrales en centímetros, contando desde el borde de la rodela. Es posible observar una similitud importante para las estimaciones en Ch% ambiente y anhidro, además del distinto valor esperado para  $\mu_p$ , en las condiciones de humedad en que arribaron las trozas al laboratorio (135.45% ~ 141.10%).

Dichos valores de  $\mu_p$  muestran un comportamiento esperado en función de los contenidos de humedad. Ello porque en condiciones de menor humedad, el material irradiado debería mostrar distinto valor de  $\mu_p$ . Además los valores indicados para las condiciones de humedad en ensayo y anhidro, son coherentes según estudios precedentes reportados por Karsulovic *et. al.* (1999), en donde se indica un valor de  $0.192 \pm 0.002$  para un contenido de humedad de un 10%

- **Efecto Contenido de Humedad y Posición Diametral en  $\mu_p$**

La prueba de ANDEVA del diseño factorial llevado a cabo (dos factores y significancia  $\alpha = 0.05$ ); se dividió en dos partes. Recordando que de los 10 bloques utilizados, seis pertenecen a la vigueta 1 y cuatro a la vigueta 2. Por medio de números verdes, se indica un efecto no significativo; y con números rojos, efectos significativos (ver Tablas 5 – 26 y 5 – 27).

FTE. DE VARIACIÓN	G. LIBERTAD	S. CUADRADOS	<CUADRADOS>	F CALC.	F CRÍTICO
DIÁMETRO	2	0.001	3.26E-04	2.304	3.080
HUMEDAD	5	0.003	0.001	3.861	2.298
INTERACCIÓN	10	0.005	0.001	3.630	1.919
DENTRO DEL GRUPO	108	0.015	1.41E-04		
TOTAL	125	0.024			

Tabla 5 – 26: Tabla de ANDEVA, diseño de 2 factores para bloques de vigueta 1

FTE. DE VARIACIÓN	G. LIBERTAD	S. CUADRADOS	<CUADRADOS>	F CALC.	F CRÍTICO
DIÁMETRO	2	0.002	0.001	12.351	3.150
HUMEDAD	3	0.001	2.44E-04	3.860	2.758
INTERACCIÓN	6	2.82E-04	4.70E-05	0.744	2.254
DENTRO DEL GRUPO	60	0.004	6.31E-05		
TOTAL	71	0.006			

Tabla 5 – 27: Tabla de ANDEVA, diseño de 2 factores para bloques de vigueta 2

Los resultados para ambas viguetas, coinciden en identificar los efectos del factor contenido de humedad como relevante con un 95% de confianza. En el caso del factor posición diametral, en el set de datos provenientes de la vigueta 1, se observa que no hay efectos significativos al mismo nivel de confianza.

En el caso de la vigueta 2, los resultados del análisis de ANDEVA indican que el factor posición diametral es significativo, lo mismo que el factor contenido de humedad con un 95% de confianza. Este resultado diferente, puede responder a que en la vigueta 2 no existen bloques provenientes del centro de la rodela (ver Figura 4 – 14: Obtención de viguetas y bloques), en donde los datos son mas homogéneos.

#### 5.4. SIMULACIÓN DE IRRADIACIÓN DE TROZAS CON DEFECTOS

De acuerdo a los resultados de la irradiación, se construyeron perfiles de atenuación, para los tres recipientes con aceite. La presentación de los resultados se organiza por recipiente.

- **Simulación Recipiente A**

El siguiente gráfico (Figura 5 – 33) muestra la atenuación de fotones, con defecto (singularidad) y sin defecto (sin singularidad).

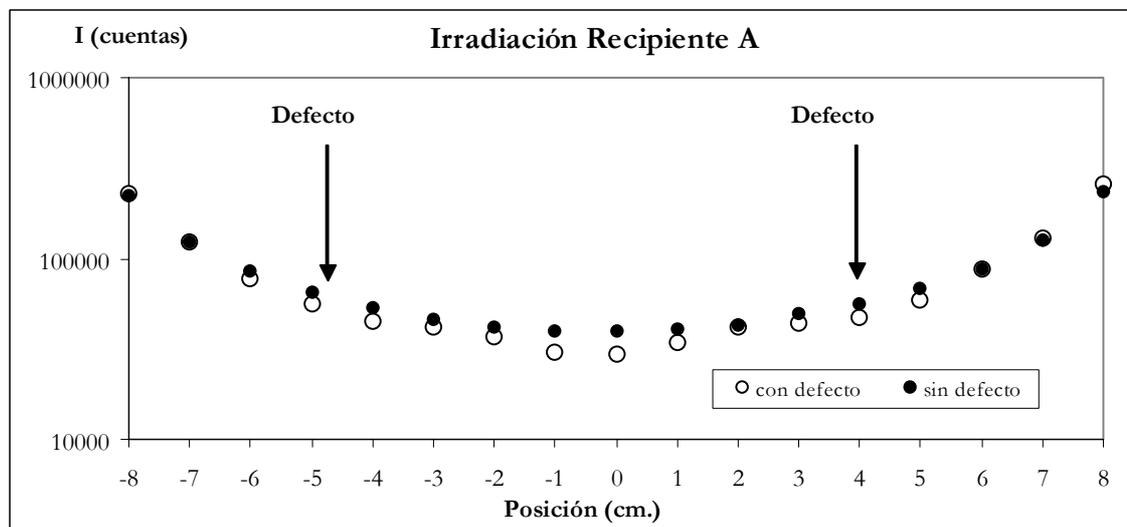


Figura 5 – 33: Atenuación en recipiente A, con aceite.

Según las atenuaciones, se ve claramente la presencia del defecto en la posición horizontal -5 y +4. De acuerdo a la extensión real del defecto (-4 cm. y +4cm.), se concluye una leve sobreestimación del defecto, no obstante el error es de  $\pm 1$  cm.

- **Simulación Recipiente B**

Para este caso la irradiación se realizó en dos planos, según lo señalado en la Tabla 4 – 10. Adicionalmente, para cada plano, el haz enfrenta a los defectos en dos ángulos ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) de acuerdo al diagrama de la Figura 5 – 34.

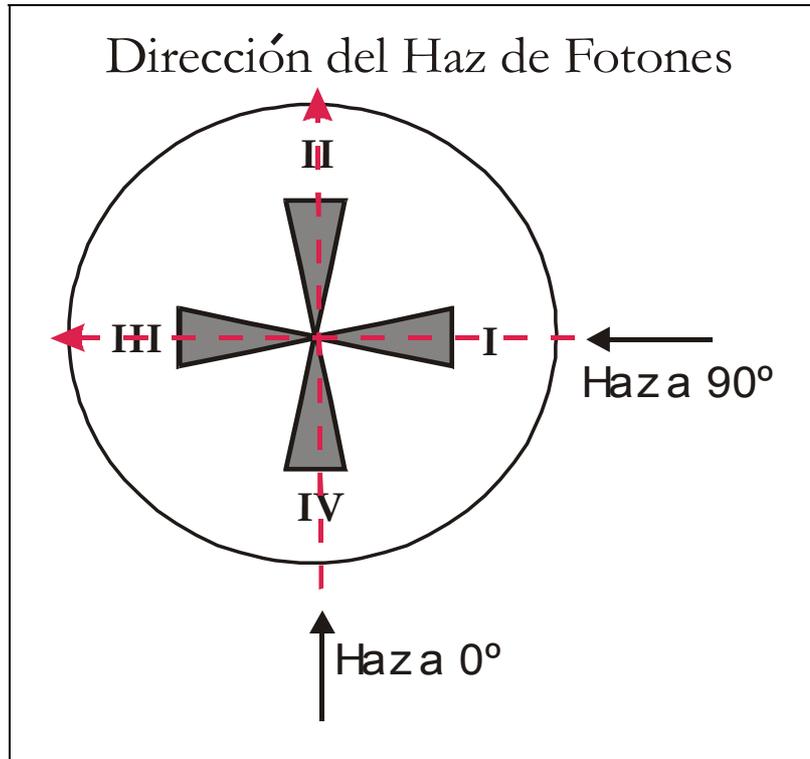


Figura 5 – 34: Irradiación en dos ángulos, sobre recipiente B

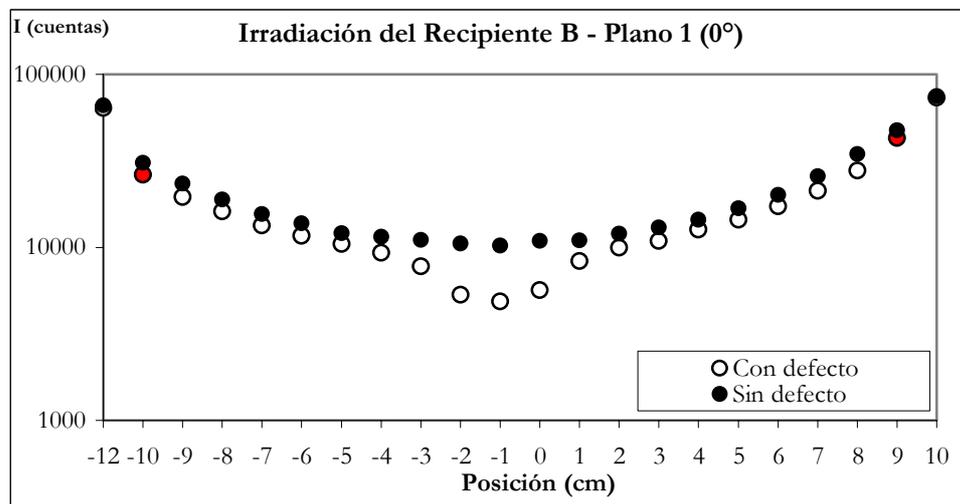


Figura 5 – 35: Atenuación en Recipiente B (con aceite) – Plano horizontal 1.

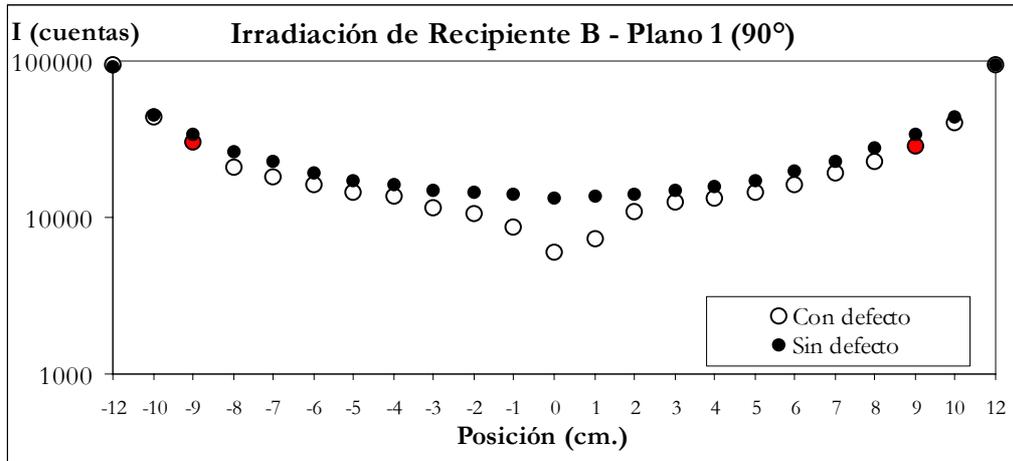


Figura 5 – 36: Atenuación en Recipiente B (con aceite) – Plano horizontal 1.

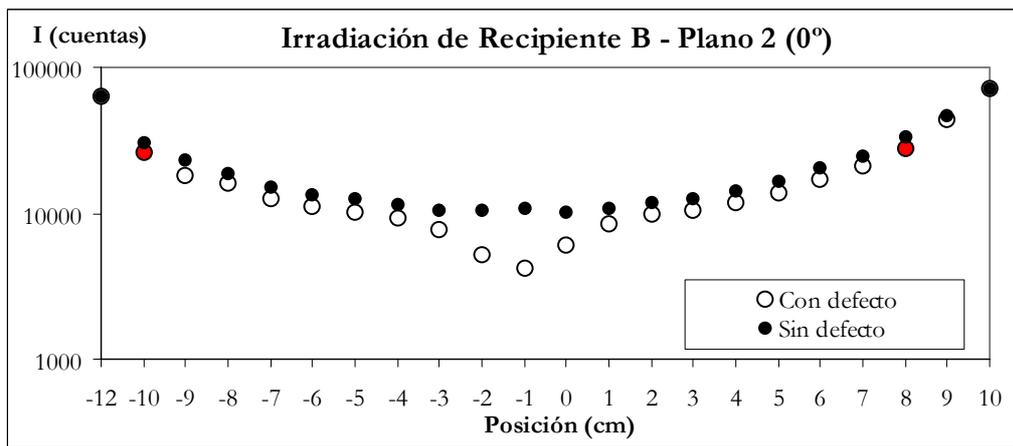


Figura 5 – 37: Atenuación en Recipiente B (con aceite) – Plano horizontal 2.

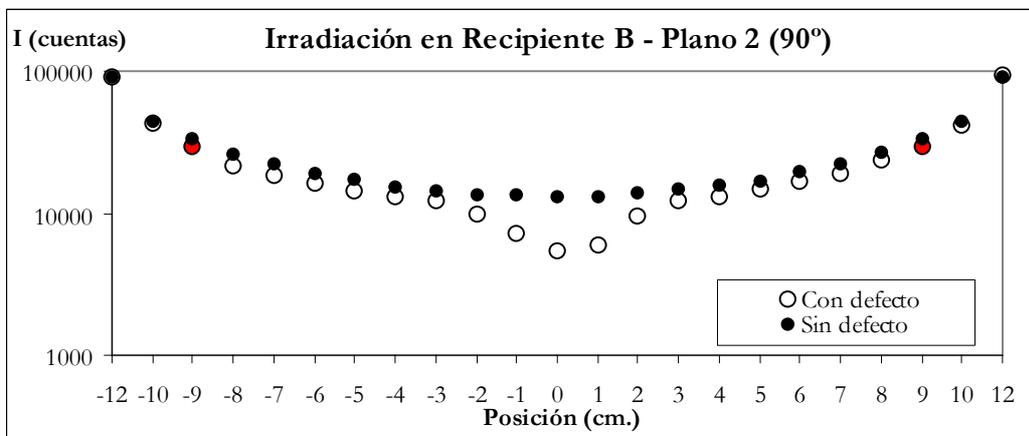


Figura 5 – 38: Atenuación en Recipiente B (con aceite) – Plano horizontal 2.

Se aprecian diferencias de atenuación (puntos rojos), al comparar los perfiles con la presencia del defecto versus los perfiles sin la presencia del defecto. Según la Tabla 4 – 8, la longitud total del defecto en función del ángulo de irradiación puede compararse con lo mostrado en los gráficos anteriores. En la Tabla 5 – 28, los datos en verde corresponden a la estimación de los defectos mediante perfiles de atenuación (I).

Longitud del Defecto (cm.)				
PLANO	0°		90°	
	Medido	Método	Medido	Método
1	20	18	19	18
2	20	18	19	17

Tabla 5 – 28: Comparación entre las longitudes medidas del defecto y las determinadas con atenuación de fotones (en centímetros).

En general se aprecia una subestimación máxima de 2 centímetros (10% de error), al comparar la longitud medida del defecto respecto a la determinada por medio de atenuación, según la orientación del haz de fotones en 0° respecto de la muestra. No se aprecia ninguna sobrestimación del defecto.

- **Simulación Recipiente C**

En la Figura 5 – 39, se esquematizan los defectos en este recipiente, y la orientación angular del haz respecto al mismo. Los análisis realizados, son análogos a los efectuados en el recipiente B.

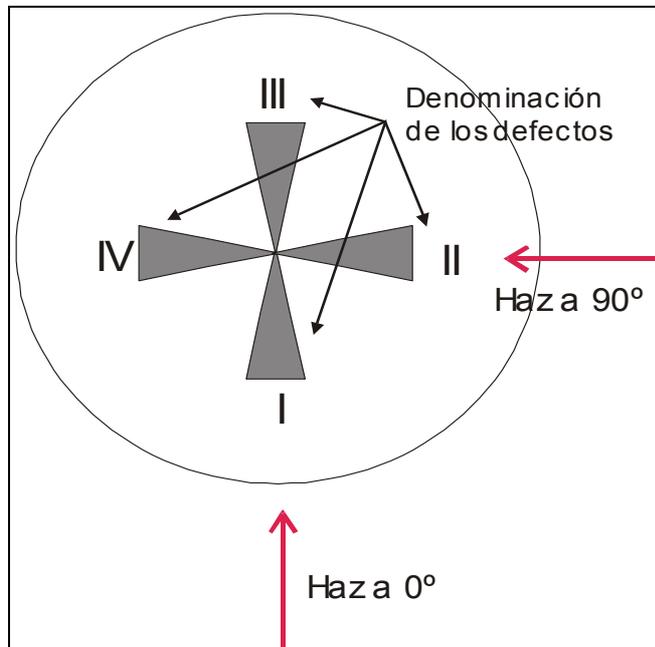


Figura 5 – 39: Irradiación en dos ángulos sobre el recipiente C.

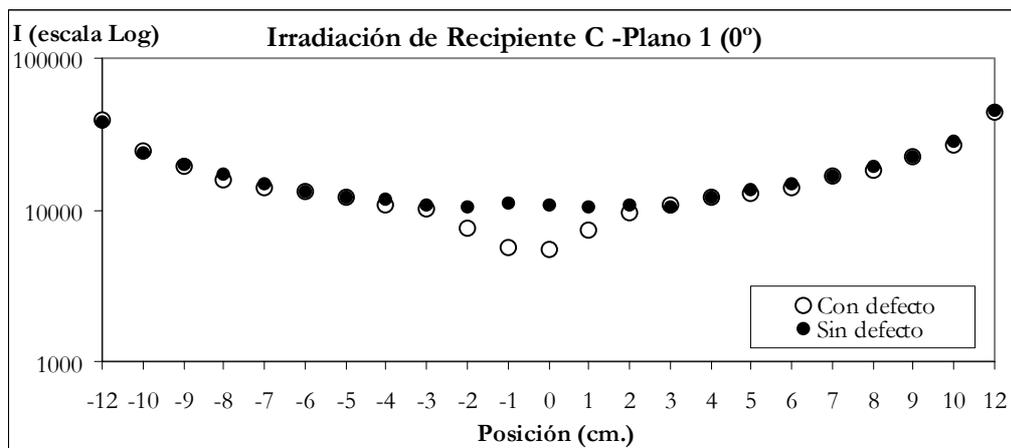


Figura 5 – 40: Atenuación en Recipiente C (con aceite) – Plano horizontal 1.

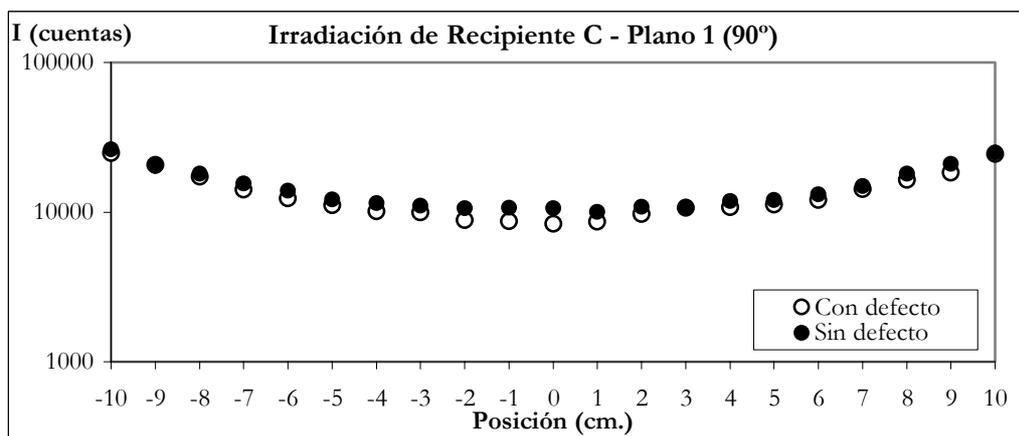


Figura 5 – 41: Atenuación en Recipiente C (con aceite) – Plano horizontal 1

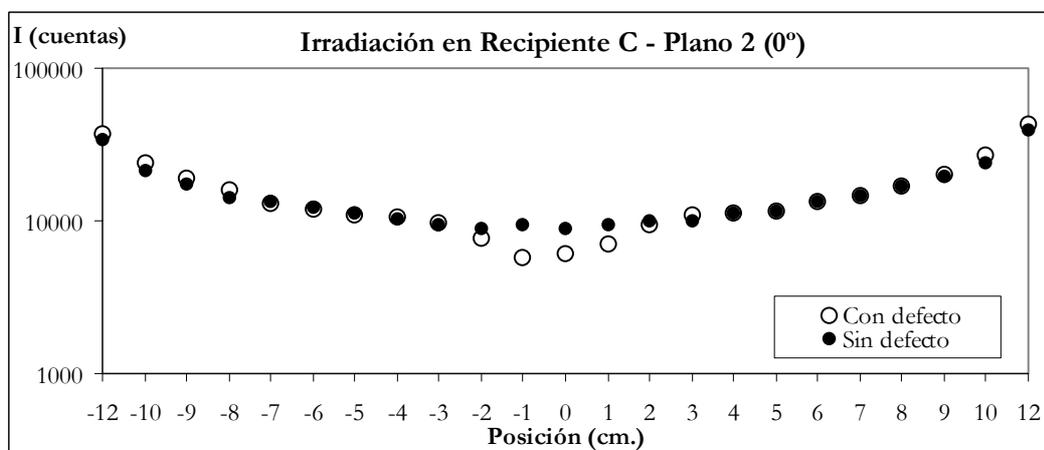


Figura 5 – 42: Atenuación Recipiente C (con aceite) – Plano horizontal 2.

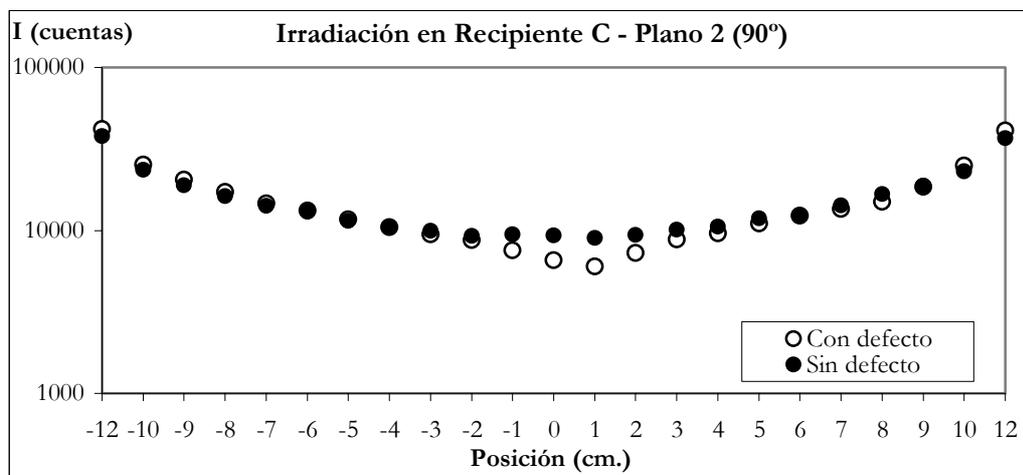


Figura 5 – 43: Atenuación Recipiente C (con aceite) – Plano horizontal 2.

En las Figuras 5 – 40, 5 – 41, 5 – 42 y 5 – 43 y de acuerdo a la irradiación a través del primer plano, se aprecian levemente las situaciones con y sin defecto en lo referido a su comienzo y término. En las Figuras referidas al plano 2, no se aprecia un comienzo o un final. Sin embargo, es posible observar el efecto atenuador de los defectos que se desarrollan en la dirección del haz gamma (disminución en las cuentas, en la posición horizontal cero).

Aunque la sensibilidad de la atenuación para esta simulación es débil, llama la atención la regularidad de los perfiles denotando una buena simetría, y por tanto una geometría óptima.

## 5.5. RESULTADOS DE LA IRRADIACIÓN EN TROZAS

Los resultados de la etapa de irradiación, se basan en las magnitudes de la atenuación mostrada por el haz de fotones, de acuerdo a los distintos planos horizontales de irradiación (sección 4.2.6).

De acuerdo al comportamiento exhibido por la atenuación, en los recipientes cilíndricos sin defectos (Simulación – sección 5.4); se espera un comportamiento semejante a una parábola cóncava hacia arriba, con una curvatura regular, en el caso de trozas sin defectos. Es decir, al acercarse al centro (por la izquierda o la derecha), cada lectura debería ser inferior a la anterior.

No obstante, y debido a que los materiales densos tienen mayor capacidad atenuadora, la presencia de nudos en los verticilos, provocan una alteración en la forma parabólica del perfil de atenuación. Esto último es lo que precisamente puede observarse en los siguientes gráficos, relativos a las trozas 1 y 2, mostrando discrepancia a lo previsto según la forma de la troza.

### 5.5.1. ATENUACIÓN EN TROZA 1

Las siguientes figuras, se organizan por **plano de irradiación** y por **ángulo de irradiación**, según se definió en la sección 4.2.6.

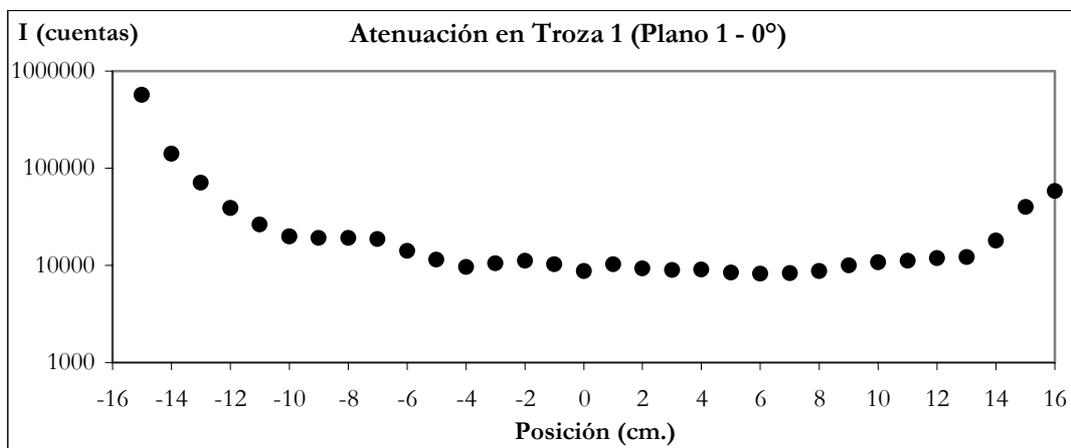


Figura 5 – 44: Atenuación Troza 1 – Plano a 5 cm. sobre el soporte de muestras.

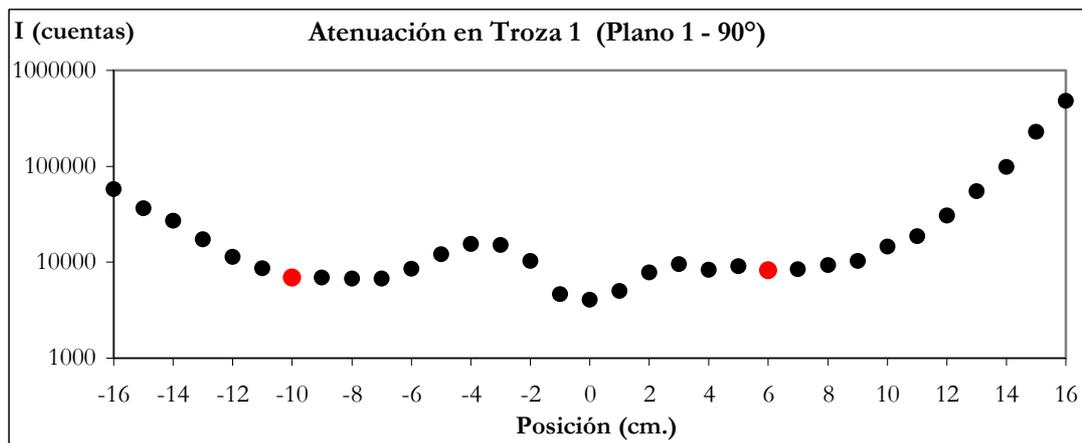


Figura 5 – 45: Atenuación Troza 1 – Plano a 5 cm. sobre el soporte de muestras.

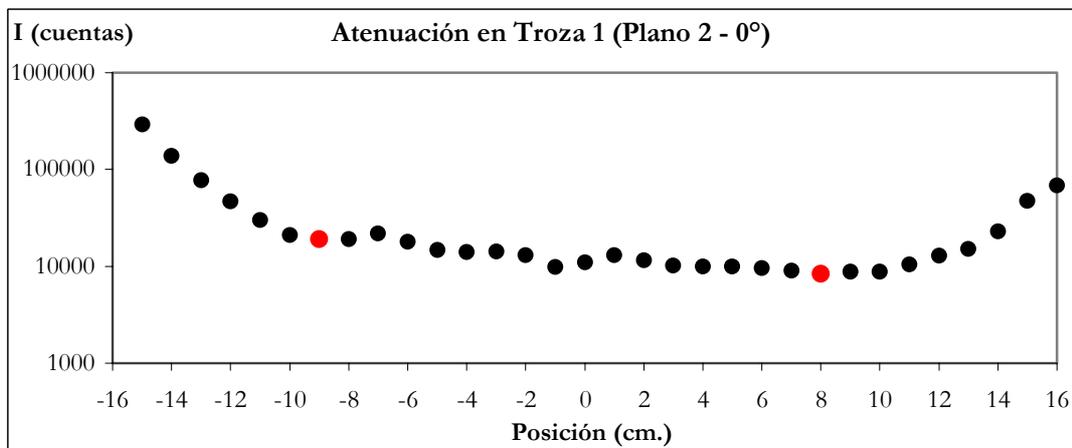


Figura 5 – 46: Atenuación Troza 1 – Plano a 8 cm. sobre el soporte de muestras.

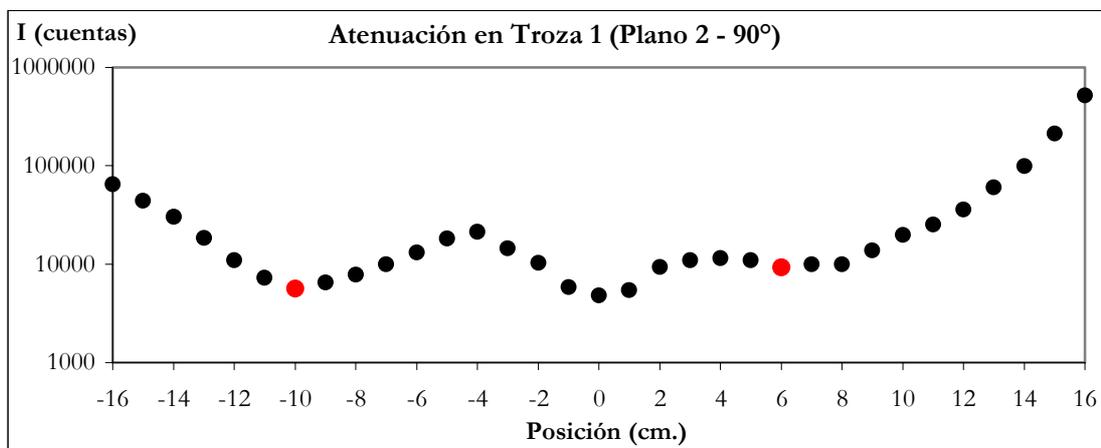


Figura 5 – 47: Atenuación Troza 1 – Plano a 8 cm. sobre el soporte de muestras.

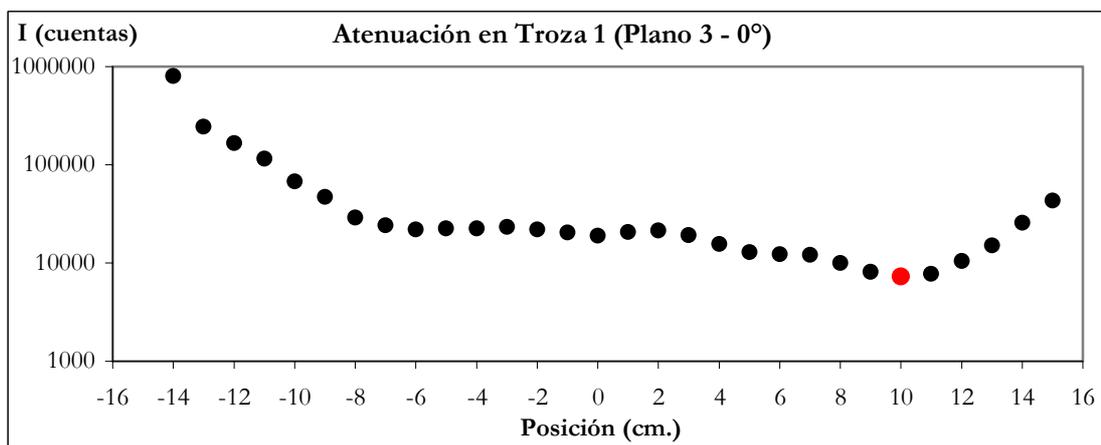


Figura 5 – 48: Atenuación Troza 1 – Plano a 15 cm. sobre el soporte de muestras.

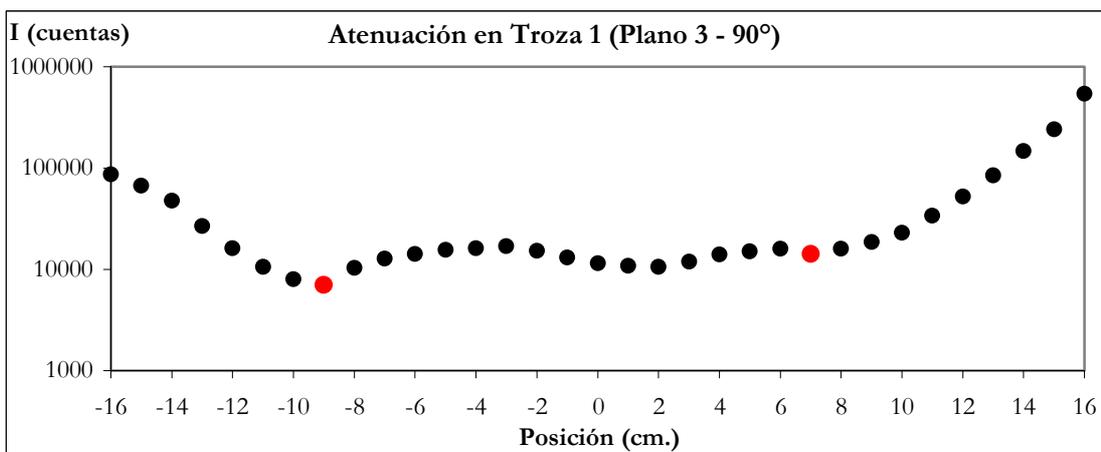


Figura 5 – 49: Atenuación Troza 1 – Plano a 15 cm. sobre el soporte de muestras.

El examen visual de la troza 1 (mediante cortes horizontales, en cada plano), mostró que el desarrollo vertical del conjunto de nudos alcanza a 15 centímetros, desde la base de la troza. Al mismo tiempo se determinó la longitud horizontal del defecto, mediante la proyección de los límites de los nudos sobre los ejes "X" e "Y" (sistema coordenado cuyo origen está en la médula, que fue dibujado sobre la troza para la etapa de irradiación), según las dos orientaciones utilizadas para el haz de fotones: 0° y 90° respectivamente (Figura 5 – 50).

Según el comportamiento de las atenuaciones, el comienzo de irregularidad en la tendencia de cada perfil denota la presencia de nudo. Ello se estableció de acuerdo al perfil esperado (de forma homogénea) en una troza sin defectos, en base a los resultados de simulación de trozas sin defectos. Existen sin embargo casos, en donde no se logra apreciar dicha irregularidad o alteración en la tendencia del perfil, por lo que no se puede asegurar la presencia de defecto.

Así, en la Tabla 5 – 29 se indican las longitudes reales del defecto en la troza n° 1 proyectadas sobre el eje X e Y

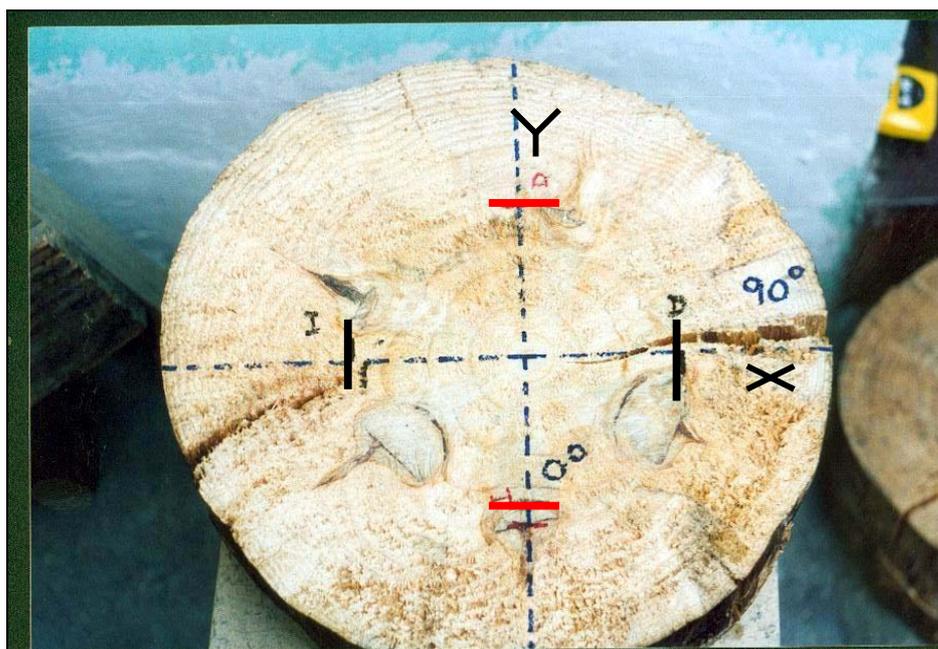


Figura 5 – 50: Troza 1 y proyección de nudos sobre eje X (negro) e Y (rojo)

ÁNGULO INCIDENCIA HAZ <sup>14</sup>	EXTREMO IZQ.	EXTREMO DER.	LONGITUD TOTAL - REAL
0° (PROYECCIÓN SOBRE EJE X)	9.5	8.7	18.2
90° (PROYECCIÓN SOBRE EJE Y)	9.6	9.3	18.9

Tabla 5 – 29: Desarrollo horizontal real del defecto según ángulo de irradiación (Troza 1). Estos valores son válidos para los tres planos (en cm.).

<sup>14</sup> Las proyecciones del defecto sobre los ejes X e Y definidos en Troza, se muestra en la Figura 5 – 50.

PLANO	ÁNGULO	EXTREMO IZQ.	EXTREMO DER.	LONGIT. TOTAL	DIFERENCIA	%
1	0°	---	---	---	...	---
	90°	10	6	16	-2.9	- 15.3 %
2	0°	9	8	17	-1.2	-6.59 %
	90°	10	6	16	<b>-2.9</b>	<b>-15.34 %</b>
3	0°	---	10	---	* 1.3	13 % *
	90°	9	7	16	-2.9	-15.3 %

Tabla 5 – 30: Desarrollo horizontal del defecto (valores según atenuación ), en cm.<sup>15</sup>. La disección de la Troza1 solo permitió verificar el extremo derecho del defecto.

En la Tabla 5 –30 se compararon las extensiones horizontales reales del defecto (Tabla 5 - 29) con las predichas mediante atenuación. La extensión real del defecto se obtuvo con la medida de la distancia de los extremos derecho e izquierdo de la proyección de los nudos sobre los ejes coordenados “X” e “Y” ya descritos (ver Figuras 5 – 50). Así, los porcentajes de variación entre la predicción del defecto y la situación real, se realizó según:  $((\text{valor predicho} - \text{valor real})/(\text{valor real})) \times 100$ .

Al contrastar las longitudes horizontales a distintos planos y ángulos de irradiación, se obtienen subestimaciones del defecto en 1.2 cm. como mínimo y en 2.9 cm. como máximo. Claramente en el primer plano en 0° (el más cercano a la base de la troza), no se aprecia detección de irregularidad. Este resultado es coherente con el examen visual y morfología del defecto, el cual sólo se verifica en la sección central de la troza, mostrando escaso desarrollo en diámetro. En los demás planos, la irradiación en 90° entrega mayor notoriedad respecto a la irregularidad, la explicación radica, en el mayor tamaño de los nudos, para dicho sentido de irradiación.

### 5.5.2. ATENUACIÓN EN TROZA 2

En esta troza, se continúa con la misma estructura de presentación, mediante las Figuras 5 – 51 a 5 – 56. De acuerdo a un análisis similar del comportamiento de las intensidades atenuadas, para posiciones horizontales al irradiar la troza, se definieron posiciones predichas de los nudos (ver puntos rojos en Figuras 5 – 51 a 5 – 56). En dicho sentido el examen visual del defecto mediante dos disecciones paralelas ( a 8 y 15 centímetros de la base de la troza), evidenció que la presencia de la estructura de nudos explicaban dichos perfiles de atenuación.

De igual forma que en la troza 1 se procedió ubicar la posición de los nudos reales en la rodela, marcando las proyecciones de la estructura defectuosa sobre el mismo sistema coordenado, es decir los ejes “X” (ángulo 0° de irradiación) e “Y” (ángulo 90° de irradiación). Ello se aprecia en la Figura 5 – 57.

De este modo en la Tabla 5 – 31 se indican las dimensiones de la estructura de nudos, según su extensión a partir de la médula.

<sup>15</sup> Según la simetría esperada del defecto, en el plano 3 – orientación haz 0°, sólo se manifiesta nudo hacia el lado derecho de la médula, por lo que la diferencia indicada corresponde a información parcial respecto a la extensión horizontal real del defecto.

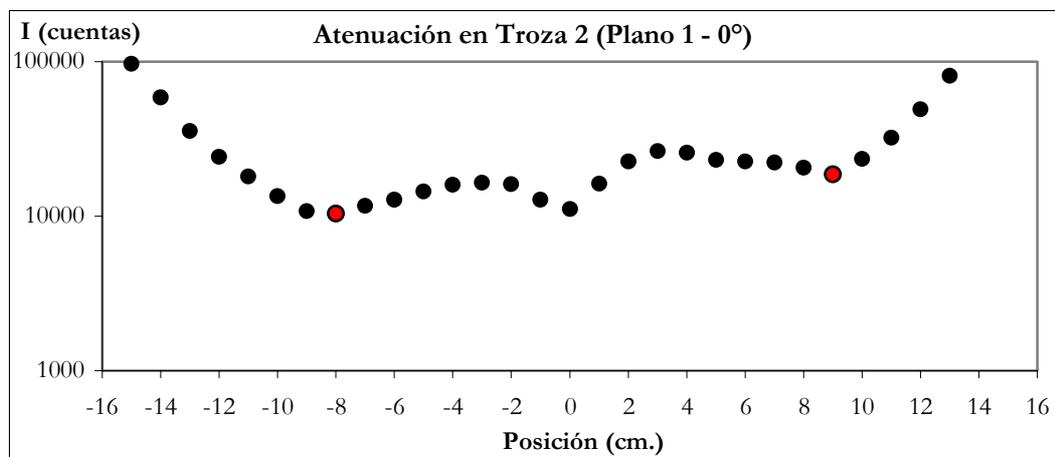


Figura 5 – 51: Atenuación Troza 2 – Plano a 8 cm. sobre el soporte de muestras.

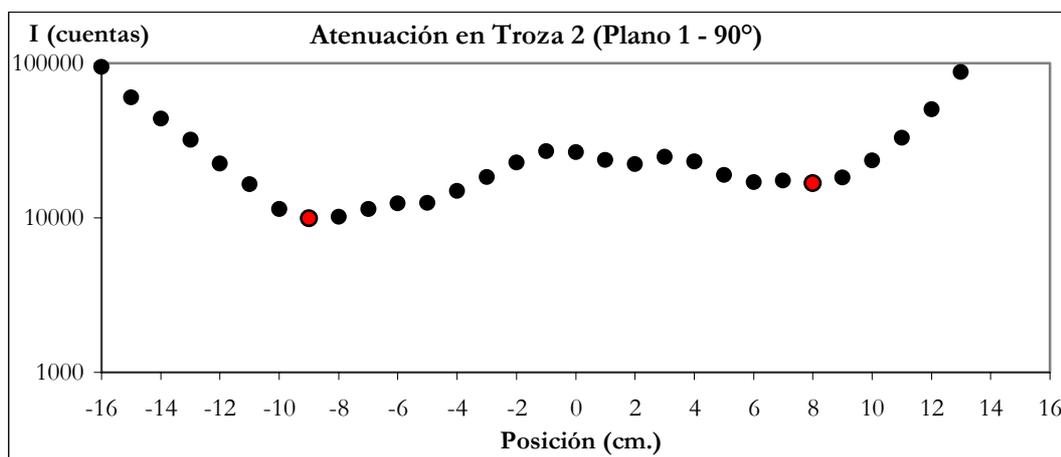


Figura 5 – 52: Atenuación Troza 2 – Plano a 8 cm. sobre el soporte de muestras.

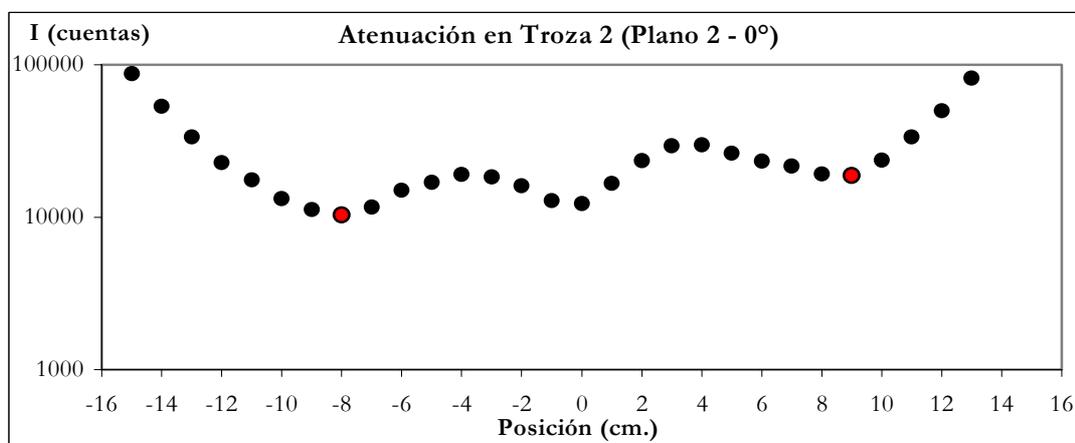


Figura 5 – 53: Atenuación Troza 2 – Plano a 10 cm. sobre el soporte de muestras.

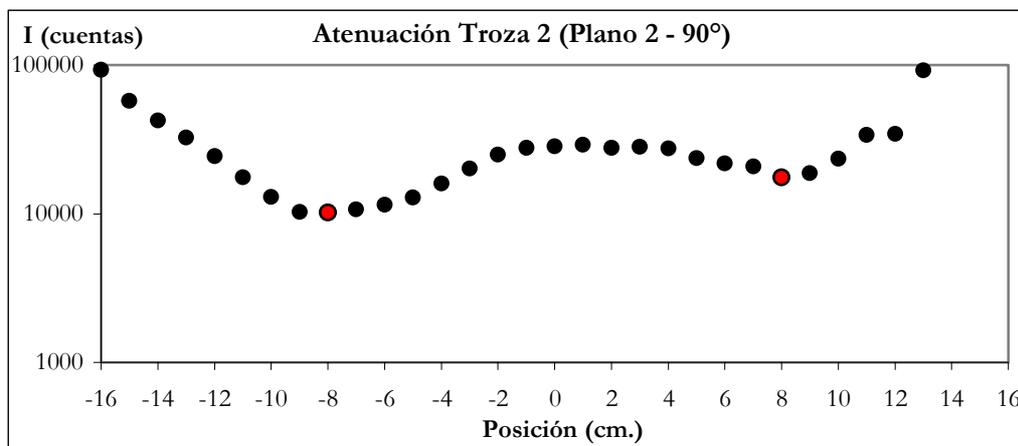


Figura 5 – 54: Atenuación Troza 2 – Plano a 10 cm. sobre el soporte de muestras.

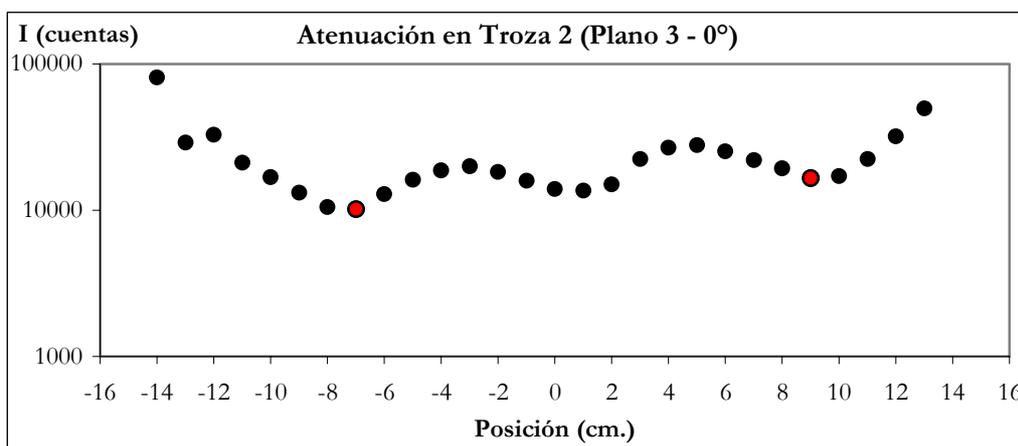


Figura 5 – 55: Atenuación Troza 2 – Plano a 12 cm. sobre el soporte de muestras.

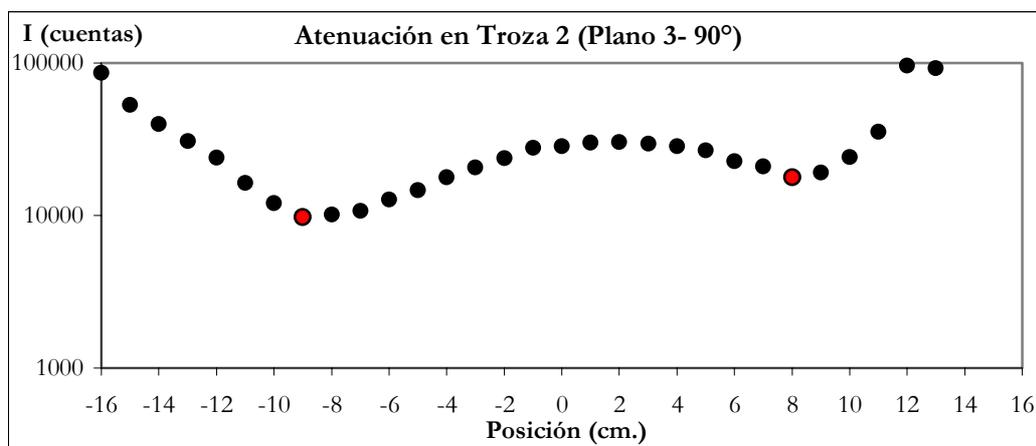


Figura 5 – 56: Atenuación Troza 2 – Plano a 12 cm. sobre el soporte de muestras.

En función al inicio y término de la irregularidad (predichos) en los perfiles de atenuación registradas en la Tabla 5 – 32, se obtienen igual cantidad de sobreestimaciones y subestimaciones para la longitud horizontal total del defecto, alcanzando un valor constante aproximado de 3% para la orientación 0° del haz. En cambio para la orientación 90°, ocurren subestimaciones de las longitudes horizontales con un máximo de 8.57% y un mínimo de 2.8% (sobreestimación).

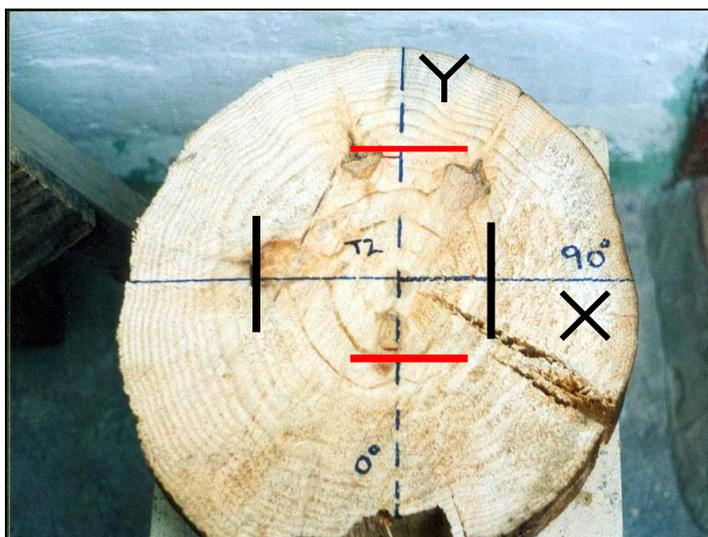


Figura 5 – 57: Proyecciones en Troza 2 (Eje X = orientación 0° - Eje Y = orientación 90°)

Respecto a las sobreestimaciones, y de manera como ocurrió en estudios precedentes (Ramírez, 1997), se atribuye de ello a la alta densidad de la madera alrededor de los nudos, lo que hace parecer a un nudo, mas grande de lo que es. Por el contrario, las subestimaciones pueden explicarse por las distancias grandes entre los nudos y el borde de la troza que enfrenta a la fuente emisora, así mismo como por tratarse de nudos de pequeño diámetro. Lo anterior implica una relación “nudo / madera sana” baja, lo cual sin duda provoca imprecisión o nula detección por parte de la atenuación.

ÁNGULO DE REFERENCIA	EXTREMO IZQ.	EXTREMO DER.	TOTAL PROYECCIÓN
0°	9.5	7	16.5
90°	10	8.5	17.5

Tabla 5 – 31: Desarrollo horizontal real del defecto según ángulo de irradiación (Troza 2).  
Estos valores son válidos para los tres planos (en cm.)

PLANO	ÁNGULO	EXTREMO IZQ.	EXTREMO DER.	TOTAL	DIFERENCIA	%
1	0°	8	9	17	0.5	3%
	90°	9	8	17	-0.5	-2.8%
2	0°	8	9	17	0.5	3%
	90°	8	8	16	-0.5	-8.57%
3	0°	8	8	16	-0.5	-3%
	90°	9	8	17	0.5	2.8%

Tabla 5 – 32: Desarrollo horizontal del defecto en centímetros (dimensiones predichas).

## 6.- CONCLUSIONES

- La estimación del coeficiente de atenuación másico ( $\mu_p$ ) de fotones de 59.5 keV de energía para madera de pino radiata en distintas condiciones de humedad (142.3%, 57.5% y anhidro), dio como resultados los siguientes **valores promedios**:  $0.198 \pm 0.005 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ,  $0.188 \pm 0.002 \text{ cm}^2/\text{gr}$  y  $0.188 \pm 0.005 \text{ cm}^2/\text{gr}$ , respectivamente.
- El contenido de humedad de la madera, afecta al coeficiente de atenuación másico en sus **valores promedios** (5 % de variación porcentual). Según el análisis de ANDEVA para un nivel  $\alpha = 0.05$  y considerando **lecturas individuales** de  $\mu_p$ , se establece estadísticamente el efecto del contenido de humedad como significativo.
- La metodología es capaz de definir claramente el diámetro de los materiales analizados. Ello queda establecido con un error de estimación máximo de un 12% y uno mínimo de un 4.12%.
- La atenuación de la radiación gamma fue capaz de detectar claramente los nudos en las trozas, a través de las irregularidades detectadas en los perfiles de atenuación. Así, el método fue capaz de definir el Cilindro Central Defectuoso: para la Troza 1 se registró un valor promedio de 16.25 cm. (con una subestimación máxima de 15.34%), y para la Troza 2 se registró un valor promedio de 16.6 cm. (con una subestimación máxima de 8.57%)
- La metodología de atenuación de radiación gamma entregó subestimaciones en la determinación del defecto, para nudos muy pequeños o para situaciones en que la relación “nudo / madera sana” es muy baja.
- El tiempo empleado en la toma de los datos y generación de resultados, es muy extenso para ser implementado a escala industrial. El problema puede solucionarse con el diseño de equipos mas eficientes (bancos de pruebas con mayor número de detectores o fuentes radiactivas mas intensas, etc.).

## 7.- RECOMENDACIONES

- Los análisis futuros deberían realizarse con material proveniente de árboles más jóvenes. Lo que permitiría mejorar la precisión en la estimación del defecto, al aumentar la relación mencionada “volumen nudo / volumen madera sana”. Ello implicará una mayor sensibilidad de la metodología.
- Para estudios llevados a cabo en laboratorio es importante que las trozas ensayadas mantengan un gran porcentaje de corteza intacta, ya que así se favorecerá la mayor exactitud en la detección de los defectos (trozas de contornos mas definidos). Esto debido a que sectores con y sin corteza pueden generar perfiles de atenuación irregulares.
- El análisis de ANDEVA sobre los valores para el coeficiente de atenuación másico  $\mu_p$  en madera verde de pino radiata, indica la necesidad de efectuar los ensayos en el menor tiempo posible o en épocas donde la humedad ambiental, impida el desecamiento acelerado de la troza.
- EL efecto de la humedad sobre los coeficientes de atenuación másico, hace necesario el desarrollo de nuevas formulaciones que consideren el contenido de humedad como variable.
- Para el caso de trozas de diámetros mayores, se sugiere la posibilidad de manejar otras opciones de fuentes radioactivas (mas intensas, etc.) o mayor número de detectores. Lo anterior permitirá realizar los análisis en menos tiempo.
- Para el trabajo de laboratorio, se recomienda automatizar el proceso de colección de datos y su posterior tratamiento, con el objeto de disminuir los tiempos de análisis.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. BAMBER, R; Burley, J. The Wood properties of radiata pine. Commonwealth Agricultural Bureaux. Editorial Farnham Royal. England 1983.
2. BEADLE, C; Hall, M. Farm forestry. Technical information sheet N° 20 Level 2. Private Forest Tasmania. 1999. EN: <http://www.nzffa.org.nz>
3. BEISER, A. Concepts of modern physics. Editorial McGraw-Hill, New York. EEUU. 1995.
4. DAVIS, J; et al. Moisture content in drying wood using direct scanning gamma – ray densitometer. Wood and Fiber Science 25 (2). EEUU. 1993.
5. DINATOR, M.I; et al. Método para determinar densidad en madera mediante atenuación de radiación gamma de 59.9 keV. Nucleotécnica Año 16, N° 30. 1996.
6. EMMINGHAM, W; Fitzgerald, S. Pruning to enhance tree and stand value. Oregon State University Extension Service. 1995. EN: <http://oasis.orst.edu/search/aEmmingham/>
7. GOSNELL, T. Equations for predicting defect core size for pruned radiata pine butt logs. Forest Research Institute. N° 131. New Zeland. 1987.
8. HEARMON, R. Non-destructive tests to evaluate the physical and mechanical properties of wood and wood products. Department of Scientific and Industrial Research. Forest Products Laboratory. England. 1960.
9. INFOR. Resúmenes estadísticas forestales. 2002. EN: [www.infor.cl](http://www.infor.cl)
10. KARSULOVIC, J; et al. The use of linear attenuation coefficients of gamma radiation for detecting knots in *Pinus radiata*. Forest Products Journal Vol. 49 N° 2. 1999.
11. KNOLL, G. Radiation detection and measurement, 2° Edition. Editorial John Wiley & Sons. 1989.

12. KRANE, K. Modern physics. Editorial John Wiley, New York. EEUU. 1996.
13. LAUFENBERG, T. Using gamma radiation to measure density gradients in reconstituted wood products. Forest Products Research Society. EEUU. 1986.
14. McDONALD, P; Laacke, J. Pinus radiata D. Don. Monterrey Pine. EN: [http://www.forestworld.com/public/silvics/conifers/pinus/radiata/radiata\\_a.html](http://www.forestworld.com/public/silvics/conifers/pinus/radiata/radiata_a.html)
15. MENESES, M; Velasco, J. Comportamiento del diámetro del cilindro con defectos en parcelas sometidas a diversos tratamientos de poda y raleo. Resumen informe convenio Facultad de Ciencias Forestales Universidad Austral de Chile – Forestal Valdivia. 1990.
16. OSTLE, B. Estadística aplicada. Editorial Limusa. México. 1968.
17. PALAZUELOS, S. Análisis del diámetro de cilindro defectuoso en árboles podados de Pinus radiata D. Don en la Precordillera andina de la VIII Región. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, 1995.
18. RAMÍREZ, D. Aplicación de densitometría gama en la obtención de perfiles de densidad en madera de Pino Radiata (Pinus radiata D. Don). Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, 1995.
19. RAMIREZ, J. Análisis de la eficiencia del coeficiente de atenuación de gama como indicador de presencia de nudos en madera de pino radiata. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, 1997.
20. RESNICK, R. Física cuántica. Editorial Limusa. México. 1978.
21. SANCHEZ, J. Atenuación de radiación gama como indicador de la presencia de defectos en madera de pino radiata. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, 1997.
22. SCHAD, K; et al. Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs. Forest Products Laboratory, Research Paper FPL-RP-546. 1996.

23. SEMAT, H. Física atómica y nuclear. Editorial Aguilar, Madrid. 1971.
24. SERWAY, R. Física Tomo II. Editorial McGraw – Hill Interamericana. México. 1992
25. STATSOFT. Statistica - Quick reference. Statsoft Inc. 1999 Edition.
26. TSOULFANIDIS, N. Measurement and detection of radiation. Editorial Hemisphere Publishing Corporation. 1983
27. VIGNOTE, S. Tecnología de la madera. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. 2000.
28. VITA, A. Los tratamientos silviculturales. Universidad de Chile, Departamento de Silvicultura. 1996.
29. WINISTORFER, P; et al. A direct scanning densitometer to measure density profiles in wood composite products. Forest Products Research Society. EEUU.1986.
30. ZIMMERMANN, M; Brown, C. Trees: Structure and function. Editorial Springer-Verlag. New York. 1971.

## 9. ANEXOS

### 9.1. ANÁLISIS DE UN DISEÑO COMPLETAMENTE AL AZAR QUE INVOLUCRA COMBINACIONES DE TRATAMIENTOS FACTORIALES<sup>16</sup>

La prueba de hipótesis sobre igualdad de medias (suponiendo varianzas homogéneas) utilizada en la etapa del análisis de estabilidad del sistema - Sección 4.2.3.1., se indica en la Tabla 8 – 1. Se base fundamental es el supuesto de k poblaciones normales ( $k \geq 2$ ), cada una con varianzas iguales:  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 \dots \dots = \sigma_k^2$ .

Fuente variación	Grados libertad	Suma cuadrados	Cuadrado medio	F calculado
Media Entre grupos	1	Myy	M=Myy/1	G/W
Dentro de grupos	k-1	Gyy	G=Gyy/(k-1)	
	$\sum_1^k (n_i - 1)$	Wyy	$W=Wyy / \sum_1^k (n_i - 1)$	
Total	$\sum_1^k n_i$	$\sum Y^2$	.....	

Tabla 9 – 1: Presentación tabulada de la prueba F para igualdad de medias de k poblaciones normales.

La nomenclatura utilizada en la Tabla 8 – 1, se indica a continuación:

\*  $Y_{ij}$ : j – ésima observación en el i – ésimo grupo (muestra).  $i=1,2,3,\dots,k$   $j=1,2,3,\dots,n_i$

\*  $n_i$ : número de observaciones en el i – ésimo grupo.

\*  $\bar{Y}_i = \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} / n_i$ ; media de las j – ésimas observaciones en el grupo i – ésimo.

\*  $\bar{Y} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij} / \sum_{i=1}^k n_i$ ; media de todas las observaciones.

\*  $F = \frac{\sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 / (k - 1)}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 / \sum_{i=1}^k (n_i - 1)}$ ; cálculo de F, para contrastar con tabla estadística.

<sup>16</sup> Los detalles del análisis, y la deducción de sus fórmulas, pueden verse en Ostle, B. 1983, pág. 161.

## 9.2. ANÁLISIS DE UN DISEÑO COMPLETAMENTE AL AZAR QUE INVOLUCRA COMBINACIONES DE TRATAMIENTOS FACTORIALES

La tabla de ANDEVA utilizada en el análisis de  $\mu\rho$ , en función de los contenidos de humedad y posición diametral, se confeccionó de acuerdo al siguiente modelo y esquema.

MODELO:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$i=1 \dots a$$

$$j=1 \dots b$$

$$k=1 \dots n$$

en donde se tiene que:

$\mu$  : efecto medio verdadero

$\alpha_i$  : efecto verdadero del  $i$  – ésimo nivel del factor “A”.

$\beta_j$  : efecto verdadero del  $j$  – ésimo nivel del factor “B”.

$(\alpha\beta)_{ij}$  : efecto verdadero de la interacción del  $i$  – ésimo nivel del factor “A” con el  $j$  – ésimo nivel del factor “B”.

$\varepsilon_{ijk}$  : efecto verdadero de la  $k$  – ésima unidad experimental sujeto a la  $ij$  – ésima combinación de tratamientos.

ANDEVA:

FUENTE VARIACIÓN	GRADOS LIBERTAD	SUMA CUADRADOS	DE	CUADRADOS MEDIOS
MEDIA	1	Myy		M
TRATAMIENTOS				
A	$a - 1$	Ayy		A
B	$b - 1$	Byy		B
AB	$(a - 1)(b - 1)$	(AB)yy		AB
ERROR EXPERIMENT.	$ab(n - 1)$	Eyy		E
TOTAL	$abn$	$\sum Y^2$		

Tabla 9 – 2: ANDEVA utilizada en análisis de  $\mu\rho$ .

## 10. APÉNDICES

### 10.1. DATOS PARA CARACTERIZACIÓN FÍSICA MATERIAL.

- Datos para el cálculo de contenidos de humedad, antes etapa irradiación.

Troza 1	-10	-5	0	5	10	15
15			115.40	132.79		
10		206.59	225.24	237.03	232.92	
5	140.38	212.17	155.56	174.31	237.74	143.97
0	229.66	139.81	115.02	160.03	235.85	
-5	206.91	197.30	159.74	216.72	219.86	
-10		204.01	228.14	181.12		

Tabla 10 – 1: Pesos en condiciones de humedad (Ph), para Troza 1 – Rodela 1.

Troza 1	-10	-5	0	5	10	15
15			55.09	59		
10		85.34	91.71	94.04	92.02	
5	62.99	80.52	79.76	79.18	89.87	59.65
0	88.67	73.65	78.27	77.03	87.17	
-5	79.62	81.9	78.34	80.74	84.44	
-10		75.27	85.88	87.39		

Tabla 10 – 2: Pesos en condiciones anhidras (Po), para Troza 1 – Rodela 1.

Troza 2	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
3			65.2	98.82	118.73	89.35		
2			129.60	125.25	122.69	128.65	122.53	
1		130.11	103.00	69.07	69.19	117.72	126.63	51.57
0	65.64	121.70	65.04	74.23	74.09	126.43	125.97	
-1		120.79	99.70		83.83	124.66	124.83	
-2		76.19	128.80	121.68	129.48	121.84	47.53	
-3				85.07	88.11			

Tabla 10 – 3: Pesos en condiciones de humedad (Ph), para Troza 2 – Rodela 1.

Troza 2	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
3			38.40	38.90	48.70	37.90		
2			47.50	44.80	46.60	48.00	50.70	
1		50.00	44.30	46.20	44.40	45.00	46.40	21.90
0	26.50	44.10	44.00	51.80	47.60	45.00	46.00	
-1		44.80	43.30		47.10	45.30	44.80	
-2		29.10	45.30	45.70	47.50	44.50	19.40	
-3				32.10	34.30			

Tabla 10 – 4: Pesos en condiciones anhidras (Po), para Troza 2 – Rodela 1.

- **Datos para la confección de contenidos de humedad, luego etapa irradiación.**

<b>Troza 1</b>	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
15								
10		76,60	125,60	127,30	118,60	122,20		
5	35,20	125,00	79,20	76,60	88,20	118,10	142,10	
0	61,50	106,20	64,50	73,70	65,60	129,90	139,90	
-5	40,20	94,20	68,60	68,00	88,90	138,90	123,60	53,30
-10		112,20	91,60	115,20	131,00	117,10	148,20	
-15			83,50	132,20	136,60	122,80	45,50	
<b>Troza 2</b>	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
15			88,60	128,00	120,50	94,50		
10		95,10	120,50	119,10	105,80	120,60	107,30	
5		115,20	85,40	50,20	71,00	105,90	81,10	
0		124,30	72,80	56,20	57,80	105,90	121,60	
-5		111,90	87,70	55,00	72,40	121,10	130,40	
-10		99,00	119,90	131,60	113,70	141,40	48,40	
-15			74,70	108,10	115,80	46,10		

Tabla 10 – 5: Pesos en gramos a CH% de ensayo (Ph), luego de irradiación.

<b>Troza 1</b>	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
15								
10		34,70	51,40	49,10	49,80	57,00		
5	19,20	47,30	39,90	44,10	45,20	51,50	67,60	
0	30,10	46,80	45,90	56,50	44,60	55,00	63,20	
-5	25,40	44,60	43,60	49,60	51,00	59,90	59,70	35,20
-10		50,40	40,70	47,10	53,70	51,20	68,40	
-15			41,60	53,20	57,70	55,00	20,70	
<b>Troza 2</b>	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
15			40,20	54,40	54,40	50,40		
10		48,40	48,70	45,80	46,00	48,50	48,30	
5		47,30	38,00	34,40	41,90	48,10	42,30	
0		48,20	41,90	39,90	41,40	44,30	50,00	
-5		43,30	41,10	37,20	38,00	45,10	53,40	
-10		42,30	46,90	47,90	40,60	54,60	21,20	
-15			29,80	42,10	45,90	19,60		

Tabla 10 – 6: Pesos en gramos a condición anhidra (Po), luego de irradiación.

- Datos para la determinación de densidades, antes de etapa irradiación.

Volumen	-12	-6	0	6	12	18
18			116,86	125,34		
12		192,86	218,70	221,26	220,53	
6	141,51	211,61	215,70	220,53	218,89	129,47
0	212,25	215,12	219,12	219,43	217,55	
-6	174,83	215,01	219,23	217,67	195,44	
-12		165,61	211,68	159,86		
Peso	-12	-6	0	6	12	18
18			115,40	132,79		
12		206,59	225,24	237,03	232,92	
6	140,38	212,17	155,56	174,31	237,74	143,97
0	229,66	139,81	115,02	160,03	235,85	
-6	206,91	197,30	159,74	216,72	219,86	
-12		204,01	228,14	181,12		

Tabla 10 – 7: Datos de probetas provenientes de Troza 1 a CH% e ensayo.

Volumen	-12	-6	0	6	12	18
18			105,13	116,25		
12		169,55	199,10	207,59	200,42	
6	129,39	191,60	202,04	205,94	216,40	119,88
0	187,67	197,21	202,88	211,83	198,05	
-6	161,31	195,94	198,45	198,63	183,20	
-12		153,01	191,62	145,29		
Peso	-12	-6	0	6	12	18
18			55,09	59,00		
12		85,34	91,71	94,04	92,02	
6	62,99	80,52	79,76	79,18	89,87	59,65
0	88,67	73,65	78,27	77,03	87,17	
-6	79,62	81,90	78,34	80,74	84,44	
-12		75,27	85,88	87,39		

Tabla 10 – 8: Datos de probetas provenientes de Troza 1, en condiciones anhidras.

Volumen	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
18			90,05	93,80	117,21	86,30		
12			122,71	123,00	121,20	121,92	111,62	
6		120,78	123,39	123,74	124,66	125,10	124,88	124,88
0	62,31	120,83	123,74	124,47	124,34	124,25	123,14	
-6		113,94	124,96		126,22	125,61	123,43	
-12			122,94	123,98	124,11	117,87	33,62	
-18				78,22	83,37			
Peso	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
18			65,20	98,82	118,73	89,35		
12			129,60	125,25	122,69	128,65	122,53	
6		130,11	103,00	69,07	69,19	117,72	126,63	51,57
0	65,64	121,70	65,04	74,23	74,09	126,43	125,97	
-6		120,79	99,70		83,83	124,66	124,83	
-12		76,19	128,80	121,68	129,48	121,84	47,53	
-18				85,07	88,11			

Tabla 10 – 9: Datos de probetas provenientes de Troza 2 a CH% de ensayo.

<b>Volumen</b>	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
18			82,88	85,24	106,25	80,52		
12			112,59	113,62	112,40	112,15	104,97	
6		110,34	114,97	116,52	115,97	114,24	114,88	50,80
0	53,30	109,27	113,88	117,90	116,36	116,44	113,01	
-6		98,39	112,82		116,67	116,59	113,54	
-12		38,08	111,53	114,13	115,01	107,82	33,74	
-18				78,31	73,43			
<b>Peso</b>	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
18			38,40	38,90	48,70	37,90		
12			47,50	44,80	46,60	48,00	50,70	
6		50,00	44,30	46,20	44,40	45,00	46,40	21,90
0	26,50	44,10	44,00	51,80	47,60	45,00	46,00	
-6		44,80	43,30		47,10	45,30	44,80	
-12		29,10	45,30	45,70	47,50	44,50	19,40	
-18				32,10	34,30			

Tabla 10 – 10: Datos de probetas provenientes de Troza 2, en condiciones anhidras.

- **Datos utilizados en la determinación de densidades, luego de irradiación.**

<b>Volumen</b>	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
12		59,93	129,48	123,98	131,49	135,64		
6	53,50	137,30	122,98	129,19	134,78	137,42	162,37	
0	85,49	139,04	124,62	126,51	129,16	137,86	162,22	
-6	73,47	135,97	126,60	136,30	143,41	139,36	150,42	68,60
-12		129,65	109,51	133,30	136,17	137,39	162,45	
-18			115,65	135,18	140,99	132,74	29,10	
<b>Peso</b>	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
12		76,60	125,60	127,30	118,60	122,20		
6	35,20	125,00	79,20	76,60	88,20	118,10	142,10	
0	61,50	106,20	64,50	73,70	65,60	129,90	139,90	
-6	40,20	94,20	68,60	68,00	88,90	138,90	123,60	53,30
-12		112,20	91,60	115,20	131,00	117,10	148,20	
-18			83,50	132,20	136,60	122,80	45,50	

Tabla 10 – 11: Datos de probetas, provenientes de Troza 1 a CH% de ensayo.

<b>Volumen</b>	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
12		55,06	119,66	115,38	121,83	124,86		
6	59,19	125,82	115,21	117,63	126,57	131,50	148,87	
0	77,94	127,72	114,23	119,17	119,09	131,84	156,88	
-6	73,04	124,42	114,61	121,39	131,16	130,42	141,47	68,12
-12		105,58	113,20	124,31	129,20	126,08	148,93	
-18			108,70	126,89	133,07	117,42	43,00	
<b>Peso</b>	-18	-12	-6	0	6	12	18	24
12		34,70	51,40	49,10	49,80	57,00		
6	19,20	47,30	39,90	44,10	45,20	51,50	67,60	
0	30,10	46,80	45,90	56,50	44,60	55,00	63,20	
-6	25,40	44,60	43,60	49,60	51,00	59,90	59,70	35,20
-12		50,40	40,70	47,10	53,70	51,20	68,40	
-18			41,60	53,20	57,70	55,00	20,70	

Tabla 10 – 12: Datos de probetas, provenientes de Troza 1 en condiciones anhidras.

<b>Volumen</b>	-12	-6	0	6	12	18
18		67,92	127,96	129,02	89,16	
12	73,03	121,40	123,36	109,99	120,78	104,03
6	113,33	108,54	99,32	120,35	118,24	114,87
0	121,81	124,33	114,59	117,25	122,59	122,14
-6	108,54	115,68	130,61	110,76	116,48	124,23
-12	76,07	123,53	129,55	109,74	135,94	58,42
-18		67,92	101,97	108,61	41,74	
<b>Peso</b>	-12	-6	0	6	12	18
18		88,60	128,00	120,50	94,50	
12	95,10	120,50	119,10	105,80	120,60	107,30
6	115,20	85,40	50,20	71,00	105,90	81,10
0	124,30	72,80	56,20	57,80	105,90	121,60
-6	111,90	87,70	55,00	72,40	121,10	130,40
-12	99,00	119,90	131,60	113,70	141,40	48,40
-18		74,70	108,10	115,80	46,10	

Tabla 10 – 13: Datos de probetas, provenientes de Troza 2 a CH% de ensayo.

<b>Volumen</b>	-12	-6	0	6	12	18
18		81,96	116,45	120,42	87,16	
12	85,26	111,66	113,97	105,95	114,64	91,77
6	103,70	99,74	91,75	109,97	109,35	107,09
0	110,51	113,13	110,31	109,46	112,37	112,65
-6	99,31	107,70	100,38	108,68	108,58	111,13
-12	99,77	113,68	117,74	98,68	119,05	65,88
-18		63,58	91,98	102,61	43,56	
<b>Peso</b>	-12	-6	0	6	12	18
18		40,20	54,40	54,40	50,40	
12	48,40	48,70	45,80	46,00	48,50	48,30
6	47,30	38,00	34,40	41,90	48,10	42,30
0	48,20	41,90	39,90	41,40	44,30	50,00
-6	43,30	41,10	37,20	38,00	45,10	53,40
-12	42,30	46,90	47,90	40,60	54,60	21,20
-18		29,80	42,10	45,90	19,60	

Tabla 10 – 14: Datos de probetas, provenientes de Troza 2 en condiciones anhidras.

## 10.2. DATOS EMPLEADOS PARA CALIBRACIÓN DEL ESPECTROSCOPIO.

Período:	1	2	3	4	Datos para calculo de X2			
OBS	n1	n2	n3	n4	$(\langle n1 \rangle - ni)^2$	$(\langle n2 \rangle - ni)^2$	$(\langle n3 \rangle - ni)^2$	$(\langle n4 \rangle - ni)^2$
1	10967	11065	10960	10960	3114,70	17,98	1902,30	174,24
2	10974	11041	10876	11151	2382,37	390,46	16285,69	31612,84
3	11012	11058	11011	10843	116,85	7,62	54,53	16952,04
4	11176	11150	11001	11001	23467,32	7963,78	6,84	772,84
5	10859	10966	11151	10895	26833,56	8979,46	21722,22	6115,24
6	10871	11331	11021	10969	23046,13	73029,66	302,22	17,64
7	11061	11117	11149	11072	1458,51	3162,94	21136,69	9761,44
8	10893	10963	11070	10921	16850,51	9557,02	4406,92	2724,84
9	11194	11088	10843	11021	29306,18	742,02	25797,30	2284,84
10	10997	11008	10769	11024	666,13	2783,62	55044,38	2580,64
11	11136	10982	11071	10972	12812,08	6203,14	4540,69	1,44
12	10918	10833	11124	11193	10985,04	51874,62	14492,46	48312,04
13	11047	10884	11001	10872	585,18	31244,10	6,84	10241,44
14	11040	10993		11016	295,51	4591,42		1831,84
15	10979	11161		10889	1919,27	10048,06		7089,64
16	11113	10979		10793	8134,32	6684,70		32472,04
17	11162	10972		10864	19373,99	7878,34		11924,64
18	11218	11106		10815	38099,32	2046,66		25027,24
19	10991	11053		10935	1011,85	60,22		1459,24
20	10992	11054		10967	949,23	45,70		38,44
21	10879	11027		11258	20681,18	1139,74		81111,04
22		11109		11041		2327,10		4596,84
23		11153		11179		8508,22		42353,64
24		11238		10992		31414,02		353,44
25		11188		10687		16190,02		81910,44
<b>n:</b>	<b>21</b>	<b>25</b>	<b>13</b>	<b>25</b>	<b>Suma P1</b>	<b>Suma P2</b>	<b>Suma P3</b>	<b>Suma P4</b>
<b>Media:</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>242089,24</b>	<b>286890,56</b>	<b>165699,08</b>	<b>421720,00</b>
	<b>X2 P1</b>	<b>X2 P2</b>	<b>X2 P3</b>	<b>X2 P4</b>	<b>Pobab. P1</b>	<b>Pobab. P2</b>	<b>Pobab. P3</b>	<b>Pobab. P4</b>
	<b>21,96</b>	<b>25,94</b>	<b>15,06</b>	<b>38,43</b>	<b>0,66</b>	<b>0,64</b>	<b>0,76</b>	<b>0,97</b>

Tabla 10 –15: Intensidad sin atenuación ( $I_0$ ), en banco con colimación (análisis de estabilidad – cálculo de  $X^2$ ).

Fte - Detect. r (cm.)	15 cm. bajo haz		5 cm. bajo haz	
	Real (I <sub>o</sub> )	Teórico	Real (I <sub>o</sub> )	Teórico
56.5	770733	897068.3	774201	900006.3
58.5	746517	836778.8	743301	839519.4
61.5	686295	757133.0	686728	759612.7
64.5	634281	688339.9	633349	690594.4
67.5	594209	628513.8	593144	630572.3
70.5	551716	576161.4	553361	578048.4
73.5	510940	530087.7	511421	531823.8
76.5	477901	489327.4	478463	490930.0
79.5	448922	453093.8	449917	454577.8
82.5	420585	420740.7	417643	422118.7
85.5	391733	391733.0	393016	393016.0

Tabla 10 – 16: Valores experimentales y teóricos para relación: distancia fuente / detector – I<sub>o</sub>; utilizados en la regresión lineal entre ambas variables.

Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
767317	768918	774653	772755
770677	770323	771693	773947
773446	770609	773873	772874
771098	768611	773493	772494
772214	769757	774887	772593
772173	771345	771489	773591
771422	767857	773499	773347
772420	769563	774284	772469
771316	770707	771677	774765
772205	770791	774246	776119
773286		774197	
770905		773826	
773128		773671	
Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
3130369	---	3091584	3085843
3129411	---	3084261	3078350
3127641	---	3099658	3081946
3125922	---	3087110	3085833
3126280	---	3090370	3083008
3117935	---	3089281	3087262
3124075	---	3089637	3087888
3123044	---	3092720	3086523
Período 1	Período 2	Período 3	Período 4
15322438	15204707	15223662	15253569
15314211	15194060	15246300	15240258
15303324	15190387	15261883	15253561
15305644	15187417	15244615	15249095
15292401	15208473	15231997	15244818
15293963	15207427	15236822	15266159
	15206569	15244643	15262405
	15223065		15250671

30 seg.

120 seg.

600 seg.

Tabla 10 – 17: Intensidad (I<sub>o</sub>) en banco sin colimación (cálculo de X<sup>2</sup>)

Posic. Plato	5 cms bajo haz	15 cms bajo haz
r (cm.)	Real (I <sub>o</sub> )	Real (I <sub>o</sub> )
56.5	820119	820467
58.5	787797	790167
61.5	724996	724131
64.5	664957	666879
67.5	621026	623405
70.5	579281	577492
73.5	534155	533440
76.5	499037	498997
79.5	467575	467156
82.5	434725	437721
85.5	407974	406061

Tabla 10 – 18: Datos utilizados en la correlación, entre posiciones extremas del plato porta muestras.

Distancia	R =86,5 cm.	56,5 cm.
Ángulo	Real (I <sub>o</sub> )	Real (I <sub>o</sub> )
-30	192	302
-25	275	447
-20	348	677
-15	782	1602
-10	8545	45085
-5	360775	647712
0	404211	800236
5	75647	200482
10	1121	2070
15	482	792
20	254	470
25	177	330
30	-	247

Tabla 10 – 19: Datos de intensidades I<sub>o</sub>, según ángulo de emisión y para dos posiciones de acercamiento (R = 86,5 cm. y R = 56,5 cm.) de la fuente radiactiva de Am<sup>241</sup>.

### 10.3. DATOS EMPLEADOS EN EL ANÁLISIS DEL EFECTO CILINDRICO DE LAS MUESTRAS, SOBRE LA GEOMETRÍA DEL ESPECTROSCOPIO

CILINDRO	A		B		CILINDRO	C	
Pos. Horizontal	Sin agua	Con agua	Sin agua	Con agua	Pos. Horizontal	Sin agua	Con agua
-45	771098	773493	3091584	3130369	-45	15322438	15223662
-40	772214	774887	3084261	3129411	-40	15314211	15246300
-35	772173	771489	3099658	3127641	-35	15303324	15261883
-30	771422	773499	3087110	3125922	-30	15305644	15244615
-25	772420	774284	3090370	3126380	-25	15292401	15231997
-20	771316	771677	3089281	3117935	-24	15293963	15236822
-18	772205	774246	3089637	3124075	-22	15182425	15244643
-16	773286	774197	3092720	3123044	-20	15090430	14988513
-14	770905	773826	2371804	1693384	-18	9788150	3604041
-12	773128	773671	2538063	160367	-16	12401017	333489
-10	744383	736224	2739575	54845	-14	13199967	113098
-8	696361	155851	2823190	26228	-12	13568528	54235
-6	730030	57950	2857445	17221	-10	13785438	30049
-4	731710	34189	2883308	12951	-8	13921012	20354
-2	734066	26417	2892920	11651	-6	14019017	15722
0	729586	25005	2894863	10905	-4	14068471	13262
2	740298	28102	2888543	12213	-2	14094540	11848
4	735549	37530	2879640	14863	0	14094914	11454
6	727314	67749	2855772	19983	2	14085236	12220
8	692640	210675	2813388	33002	4	14041934	14096
10	765899	760293	2728891	71775	6	13971677	16682
12	768918	772755	2461252	244502	8	13837012	23760
14	770323	773947	2518167	2302164	10	13653691	37178
16	770609	772874	3085843	3119936	12	13357353	67255
18	768611	772494	3078350	3121760	14	12815403	154405
20	769757	772593	3081946	3117885	16	11441937	519619
25	771345	773591	3085833	3121026	18	10720964	8378070
30	767857	773347	3083008	3120199	20	15204707	15253569
35	769563	772469	3087262	3119214	22	15194060	15240258
40	770707	774765	3087888	3121850	24	15190387	15253561
45	770791	776119	3086523	3119192	25	15187417	15249095
					30	15208473	15244818
					35	15207427	15266159
					40	15206569	15262405
					45	15223065	15250671

Tabla 10 – 20: Colección de intensidades sin atenuación ( $I_0$ ), para cilindros A, B y C, según posición de irradiación.

<b>Cilindro A</b>	<b>Plano único</b>	
<b>Posición eje</b>	<b>t calculado</b>	<b>ln ( I )</b>
-8	8.88	12.32
-7	11.79	11.71
-6	13.82	11.35
-5	15.33	11.08
-4	16.46	10.89
-3	17.29	10.75
-2	17.86	10.65
-1	18.19	10.59
0	18.30	10.59
1	18.19	10.62
2	17.86	10.66
3	17.29	10.80
4	16.46	10.93
5	15.33	11.13
6	13.82	11.39
7	11.79	11.75
8	8.88	12.37

Tabla 10 – 21: Valores empleados en cálculo de  $B(t)$ , mediante regresión lineal.

<b>Cilindro B</b>	<b>Plano 1</b>		<b>Plano 2</b>	
<b>Posición eje</b>	<b>t calculado</b>	<b>ln ( I )</b>	<b>t calculado</b>	<b>ln ( I )</b>
-14	8.28	13.15	8.28	13.21
-12	16.63	11.44	16.63	11.42
-10	21.28	10.71	21.28	10.69
-9	22.99	10.44	22.99	10.40
-8	24.43	10.18	24.43	10.16
-7	25.62	10.02	25.62	10.00
-6	26.62	9.85	26.62	9.84
-5	27.43	9.76	27.43	9.76
-4	28.08	9.68	28.08	9.65
-3	28.58	9.61	28.58	9.56
-2	28.92	9.58	28.92	9.49
-1	29.13	9.55	29.13	9.52
0	29.20	9.49	29.20	9.49
1	29.13	9.53	29.13	9.49
2	28.92	9.56	28.92	9.53
3	28.58	9.60	28.58	9.61
4	28.08	9.68	28.08	9.67
5	27.43	9.76	27.43	9.72
6	26.62	9.88	26.62	9.87
7	25.62	10.04	25.62	10.02
8	24.43	10.23	24.43	10.20
9	22.99	10.44	22.99	10.43
10	21.28	10.70	21.28	10.70
12	16.63	11.44	16.63	11.43
14	8.28	13.02	8.28	12.98

Tabla 10 – 22: Valores empleados en el cálculo de  $B(t)$ , mediante regresiones lineales.

Cilindro C Posición eje	Plano 1		Plano 2	
	t calculado	ln (I)	t calculado	ln (I)
-18	11.53	14.39	11.53	14.25
-16	20.12	12.29	20.12	14.48
-14	25.39	11.26	25.39	11.19
-12	29.20	10.65	29.20	10.54
-10	32.08	10.17	32.08	10.06
-9	33.24	9.92	33.24	9.85
-8	34.25	9.80	34.25	9.69
-7	35.11	9.65	35.11	9.56
-6	35.84	9.54	35.84	9.48
-5	36.45	9.41	36.45	9.34
-4	36.94	9.35	36.94	9.26
-3	37.32	9.31	37.32	9.21
-2	37.59	9.27	37.59	9.14
-1	37.75	9.28	37.75	9.16
0	37.80	9.27	37.80	9.14
1	37.75	9.21	37.75	9.11
2	37.59	9.29	37.59	9.15
3	37.32	9.29	37.32	9.22
4	36.94	9.38	36.94	9.27
5	36.45	9.40	36.45	9.39
6	35.84	9.48	35.84	9.43
7	35.11	9.61	35.11	9.57
8	34.25	9.80	34.25	9.72
9	33.24	9.96	33.24	9.84
10	32.08	10.13	32.08	10.05
12	29.20	10.61	29.20	10.51
14	25.39	11.27	25.39	11.18
16	20.12	12.16	20.12	14.38
18	11.53	14.09	11.53	13.90

Tabla 10 – 23: Valores empleados en el cálculo de  $B(t)$ , mediante regresiones lineales.

#### 10.4. DATOS PARA LA DENSITOMETRÍA DEL MATERIAL DE ENSAYO

Bloque	Coeficientes de Atenuación Madera De Pino Radiata ( $\mu\rho$ )								
1	0.171	0.167	0.160	0.162	0.196	0.206	0.181	0.214	0.251
2	0.182	0.181	0.173	0.178	0.213	0.195	0.241	0.184	0.195
3	0.223	0.200	0.224	0.174	0.168	0.181	0.198	0.209	0.204
4	0.178	0.185	0.185	0.205	0.219	0.219	0.183	0.186	0.224
5	0.209	0.208	0.185	0.192	0.192	0.207	0.184	0.198	0.180
6	0.171	0.174	0.205	0.182	0.200	0.261	0.203	0.190	0.235
7	0.183	0.194	0.179	0.182	0.176	0.181	0.215	0.207	0.200
8	0.180	0.201	0.195	0.206	0.224	0.202	0.190	0.197	0.197
9	0.207	0.172	0.190	0.191	0.199	0.193	0.190	0.200	0.184
10	---	0.215	0.184	0.190	0.200	0.191	0.187	0.197	0.193
11	0.153	0.161	0.164	0.159	0.168	0.221	0.220	0.231	0.234
12	0.204	0.151	0.197	0.203	0.218	0.204	0.181	0.160	0.167
13	0.184	0.182	0.179	0.184	0.204	0.187	0.198	0.223	0.214
14	0.160	0.132	0.233	0.200	0.199	0.189	0.227	0.223	0.266

Tabla 10 – 24: Muestreo previo de 14 bloques (126 lecturas), para determinar  $n$  muestral (análisis de  $\mu\rho$ .)

Vigueta 1	D1	D2	D3	D4	D5	D6
	0.202	0.151	0.188	0.159	0.198	0.204
	0.208	0.196	0.186	0.161	0.188	0.201
<b>Húmedo</b>	0.208	0.212	0.172	0.165	0.176	0.201
	0.204	0.214	0.188	0.21	0.187	0.199
	0.211	0.216	0.183	0.183	0.186	0.201
	0.205	0.219	0.191	0.161	0.19	0.197
	0.199	0.225	0.189	0.151	0.202	0.191
	0.195	0.173	0.185	0.177	0.186	0.187
	0.197	0.190	0.199	0.176	0.186	0.188
<b>Ambiente</b>	0.199	0.185	0.183	0.219	0.174	0.182
	0.202	0.202	0.195	0.218	0.169	0.185
	0.201	0.189	0.167	0.187	0.179	0.185
	0.196	0.185	0.170	0.168	0.182	0.188
	0.195	0.188	0.185	0.184	0.186	0.185
	0.188	0.177	0.192	0.166	0.197	0.181
	0.190	0.189	0.197	0.179	0.192	0.188
<b>Anhidro</b>	0.179	0.184	0.190	0.221	0.187	0.186
	0.185	0.197	0.198	0.208	0.185	0.186
	0.187	0.190	0.173	0.206	0.183	0.184
	0.184	0.193	0.183	0.167	0.179	0.180
	0.188	0.192	0.183	0.184	0.192	0.191

Tabla 10 – 25: Valores de  $\mu\rho$  utilizados en ANDEVA, para los factores de CH y posición diametral (Di).

Vigueta 2	D1	D2	D5	D6
	0.205	0.203	0.216	0.193
	0.204	0.208	0.198	0.192
<b>Húmedo</b>	0.205	0.194	0.200	0.189
	0.184	0.195	0.231	0.195
	0.182	0.197	0.195	0.190
	0.202	0.192	0.181	0.190
	0.180	0.188	0.188	0.194
	0.191	0.191	0.186	0.187
<b>Ambiente</b>	0.186	0.185	0.184	0.177
	0.189	0.187	0.199	0.186
	0.185	0.189	0.188	0.188
	0.183	0.188	0.197	0.193
	0.202	0.185	0.186	0.194
	0.184	0.190	0.184	0.182
<b>Anhidro</b>	0.192	0.183	0.199	0.180
	0.186	0.179	0.204	0.181
	0.186	0.176	0.204	0.178
	0.179	0.189	0.192	0.187

Tabla 10 – 26: Valores de  $\mu\rho$  utilizados en ANDEVA, para iguales factores en vigueta 2.

### 10.5. DATOS UTILIZADOS EN LA ETAPA DE SIMULACIÓN DEL DEFECTO

<b>Cilindro A</b>	<b>Singularidad</b>	<b>No Singularidad</b>
<b>Posición</b>	<b>Intensidad</b>	<b>Intensidad</b>
-30	766696	770218
-25	768037	769565
-20	767721	770193
-18	767152	770501
-16	766686	769246
-14	768326	769901
-12	769864	773538
-10	747006	754549
-8	226018	225182
-7	123657	122377
-6	77804	84606
-5	55748	65087
-4	45137	53506
-3	41466	46549
-2	37270	42031
-1	29950	39703
0	29273	39675
1	34516	40941
2	42131	42790
3	43590	49055
4	47209	55923
5	58987	67870
6	86476	88147
7	129553	127136
8	255367	234685
10	746828	748238
12	763959	770335
14	764409	771581
16	764741	770867
18	767139	772846
20	767230	771973
25	766961	770299
30	767150	772206

Tabla 10 – 27: Valores de intensidad atenuadas, con y sin singularidad en Cilindro A

Plano Posición Haz	Plano Irradiación 1				Plano Irradiación 2			
	Con Singularidad		Sin Singularidad		Con Singularidad		Sin Singularidad	
	Int. 0°	Int. 90°	Int 0°	Int. 90°	Int. 0°	Int. 90°	Int 0°	Int. 90°
-30	1500900	1501787	1515876	1522607	1494223	1495865	1515966	1513058
-25	1499997	1490305	1518173	1515379	1494042	1495032	1518374	1512530
-20	1501603	1489724	1512447	1516284	1492687	1496737	1516759	1514881
-18	1501603	1493979	1512346	1518877	1495402	1495774	1519080	1518512
-16	1491969	1495263	1491285	1521648	1478347	1501544	1478596	1515383
-14	350743	555589	329082	526661	318709	498811	309026	526684
-12	65091	97012	65090	92762	64525	93572	65183	94158
-10	29490	43685	31091	44574	27355	43218	30434	43995
-9	21933	30541	23291	32845	20655	29685	23279	34038
-8	17587	23588	18405	26641	16698	22029	19004	27590
-7	14761	19841	15504	22677	14088	18472	15572	22031
-6	12712	17679	13719	19497	12390	16041	13236	18745
-5	11590	15336	12180	17341	10948	14547	12298	16989
-4	10596	14468	11115	16038	9963	13017	11654	15665
-3	9130	13407	10922	14726	7873	12502	10243	14444
-2	6838	12271	10695	13860	5674	11003	10271	13702
-1	5970	10707	10361	13154	4822	8627	10487	13445
0	7635	9353	10798	13375	6100	7667	10682	13560
1	9650	10474	11000	13606	9112	8507	10987	13436
2	10557	12982	12014	13774	9768	11411	11962	14178
3	12051	14092	13154	14891	11328	13044	12875	14905
4	13638	14915	14757	15704	12281	13835	14131	15856
5	15759	16252	17123	17662	15148	15355	16940	17208
6	18954	18007	20471	19977	17969	16775	20847	19490
7	24084	20419	25320	23236	22814	19205	25963	23055
8	31425	24235	33917	27862	29726	22342	34173	27270
9	45601	30056	47700	34618	44463	28225	45761	34091
10	72554	43641	72408	45799	73205	41246	72368	45343
12	433967	92677	407165	93873	458845	94092	392445	92823
14	1475096	463707	1469248	449830	1463527	445627	1481246	450206
16	1501737	1480500	1514656	1504266	1492844	1486662	1516737	1497459
18	1502186	1495096	1512588	1520090	1494947	1497743	1517355	1512654
20	1500566	1489740	1514385	1518699	---	1494754	1514561	1513797
25	1498288	1496822	1512482	1517050	1495012	1495066	1512953	1509723
30	1496084	1492604	1518611	1518448	1496480	1499530	1514869	1513937

Tabla 10 – 28: Valores de intensidad atenuadas, con y sin singularidad en Cilindro B, según ángulo de irradiación.

Plano Posición Haz	Plano Irradiación 1				Plano Irradiación 2			
	Con Singularidad		Sin Singularidad		Con Singularidad		Sin Singularidad	
	Int. 0°	Int. 90°	Int 0°	Int. 90°	Int. 0°	Int. 90°	Int 0°	Int. 90°
-20	5295538	5368462	5288644	5370956	5321727	5384315	5205961	5244196
-18	1537854	1740103	1421975	1774826	1362489	1643461	1370790	1538176
-16	182363	194585	192393	218362	187560	209121	173562	1948869
-14	72547	77608	72872	77725	72747	80652	66928	72736
-12	38788	40348	38305	42036	37483	41960	34210	37822
-10	24257	24942	24037	26215	23751	25325	21296	23504
-9	19589	20655	20016	20297	18794	20475	17347	18922
-8	15818	17299	17304	18033	15740	17172	14228	16209
-7	14195	14133	14949	15506	12902	14715	13427	14141
-6	13169	12324	13076	13942	11828	13246	12161	13056
-5	12052	11176	12058	12154	10945	11686	11252	11434
-4	10865	10101	11641	11498	10568	10476	10314	10472
-3	10279	9955	10674	11007	9615	9461	9490	9972
-2	7567	8868	10497	10627	7657	8720	8849	9284
-1	5583	8678	10924	10678	5820	7561	9469	9476
0	5555	8339	10800	10578	6008	6568	9011	9360
1	7319	8621	10372	10011	7103	6015	9329	9021
2	9706	9731	10677	10848	9300	7301	9948	9411
3	10802	10696	10564	10847	10978	8781	9879	10122
4	12075	10793	12088	11879	11343	9593	11107	10599
5	13006	11201	13750	12067	11712	11002	11537	11910
6	13974	12015	14906	13117	13251	12331	13196	12436
7	16467	14292	16795	14987	14682	13513	14718	14259
8	18069	16468	19441	18037	17128	14950	16864	16687
9	22464	18383	22596	21085	20201	18566	19816	18759
10	26962	24448	28210	25128	27139	24932	24008	23078
12	44358	40263	45723	40612	43357	41010	39571	36736
14	92475	75606	93870	78090	86199	77395	80052	71680
16	252536	189867	247918	190762	239927	184869	231960	1757171
18	2595064	1306267	2682961	1310116	2601526	1176268	2374260	1091826
20	5357445	5297126	5393122	5248929	5321587	5217285	5229625	5039305

Tabla 10 – 29: Valores de intensidad, con y sin singularidad en Cilindro C, según ángulo de irradiación.

### 10.6. DATOS UTILIZADOS EN LA ETAPA DE IRRADIACIÓN DE TROZAS.

Plano: Posición horizontal	5 cm. sobre plato		8 cm. sobre plato		15 cm. sobreplato	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°
<lo>	5623176.50	5659493.63	5594666.17	5504507.50	5715672.0	5548147.2
23	4274606	5716575	5466520	5525431	5132092	5585384
22	2709630	5714586	4696607	5529320	3282333	5533410
21	1500260	5704347	3178748	5531423	1238334	5545146
20	564868	5690178	1627427	5532706	393464	5545916
19	218850	5145437	536309	5538035	181091	5101355
18	117048	3223167	206725	4873556	102561	3564805
17	77310	1274321	121161	3075567	75406	1641849
16	58124	482386	83841	1375947	63527	540335
15	39922	228592	68386	519640	43390	241073
14	17963	98179	47530	211612	25735	147656
13	12164	54703	22913	99402	15169	84817
12	11844	30537	15154	60117	10504	52564
11	11193	18658	12892	36071	7743	33909
10	10747	14542	10420	25340	7287	23126
9	10038	10351	8805	19804	8166	18674
8	8771	9286	8846	13767	9959	16030
7	8350	8397	8370	9911	12207	14230
6	8182	8191	9031	9939	12268	15990
5	8379	9089	9560	9277	12945	15135
4	9037	8346	9960	10965	15693	14043
3	9000	9534	9947	11525	19226	11968
2	9315	7792	10203	10983	21405	10559
1	10224	4996	11611	9396	20610	10809
0	8707	4060	13070	5407	19099	11566
-1	10207	4630	11026	4842	20397	13058
-2	11188	10357	9860	5820	21939	15354
-3	10443	15069	13043	10322	23407	16902
-4	9631	15552	14143	14569	22572	16168
-5	11479	12049	14012	21429	22580	15677
-6	14152	8509	14742	18268	22052	14192
-7	18751	6712	18016	13079	24136	12761
-8	19255	6789	21817	9902	29154	10323
-9	19030	6887	19021	7857	46950	7052
-10	19799	6937	19007	6529	67940	8002
-11	26247	8696	21093	5642	115225	10582
-12	38717	11394	30009	7282	165899	16195
-13	71340	17362	47013	11015	244029	26694
-14	141003	27016	77416	18388	801956	47892
-15	569853	36510	137505	30357	3024016	67259
-16	3124958	58052	291007	44202	5258850	86813
-17	5200759	105349	1961646	65209	5722014	130288
-18	5532777	331891	4497234	120419	5715914	301758
-19	5579134	1238470	5517370	285377	5719197	1137733
-20	5595613	3584387	5508342	1075430		3471452
-21		5292512	5523452	3167022		5194155
-22		5550540	5525594	5032399		5541138
-23				5501805		

Tabla 10 – 30: Datos de atenuación en Troza 1, mas valores promedios de lo.

<b>Plano:</b>	8 cm. sobre plato		10 cm. sobre plato		12 cm. sobre plato	
<b>Posición Horizontal</b>	<b>0°</b>	<b>90°</b>	<b>0°</b>	<b>90°</b>	<b>0°</b>	<b>90°</b>
<lo>	<b>5612573.83</b>	<b>5566618.17</b>	<b>5627277.33</b>	<b>5639281.17</b>	<b>5608861.17</b>	<b>5606554.50</b>
18	5636321	5582862	5644012	5606530	5623850	5585469
17	4408369	4119613	4433094	3979521	4424934	4057148
16	---	---	---	1521613	---	---
15	272645	367364	299972	341475	325712	339317
14	139025	178226	139978	167641	141594	167689
13	81130	87837	81584	92202	49711	92814
12	49126	50403	50075	34407	32060	96313
11	32359	33011	33631	33994	22385	35296
10	23429	23548	23704	23524	17097	24073
9	18683	18193	18809	18699	16512	19113
8	20679	16707	19195	17538	19365	17801
7	22351	17379	21678	20817	21998	20964
6	22627	17042	23254	21781	25237	22733
5	23068	19016	26240	23674	27922	26765
4	25877	23138	29943	27477	26706	28523
3	26310	24878	29336	28237	22411	29533
2	22634	22346	23548	27769	15080	30307
1	16215	23612	16643	29245	13623	30016
0	11152	26674	12267	28356	13974	28355
-1	12805	26989	12815	27791	15934	27712
-2	16095	22802	16096	24957	18268	23755
-3	16536	18386	18424	20105	19930	20589
-4	16016	14943	19096	15983	18726	17863
-5	14479	12482	16921	12820	16224	14696
-6	12801	12391	14990	11508	12819	12737
-7	11630	11410	11660	10693	10123	10725
-8	10393	10192	10380	10221	10520	10119
-9	10814	9948	11199	10323	13135	9765
-10	13456	11416	13210	12961	16778	12106
-11	18039	16456	17586	17576	21103	16334
-12	24175	22384	22833	24441	32705	23948
-13	35735	32056	33571	32511	29054	30797
-14	58753	43999	53555	42586	81107	39901
-15	96850	60037	87340	57317	137553	53046
-16	155307	94703	137734	92844	293320	86301
-17	313837	193877	280470	200071	1044688	184433
-18	1056275	653349	1147462	616858	3554603	597154
-19	3558270	2723985	3331715	2612694	5359034	2628375
-20	5412289	4791956	5438859	4790845	5359034	4734639
-21	5611892	5514569	5638143	5624434	5606701	5617476

Tabla 10 – 31: Datos de atenuación en Troza 2, mas valores promedios de lo.