

UCH-FC
Q. Ambiental
A 289
C. 1



**“ESTUDIO DE LIXIVIACIÓN DE NUTRIENTES Y
METALES PESADOS EN SUELOS VOLCÁNICOS
AFECTADOS POR CENIZAS PROVENIENTES DE
INCENDIOS FORESTALES”**

**SEMINARIO DE TITULO ENTREGADO A LA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE
EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUISITOS
PARA OPTAR AL TITULO DE
QUIMICO AMBIENTAL**

MARIELA ALEJANDRA ACUÑA CESPEDES

DIRECTORES DE TESIS: Dr. MAURICIO ESCUDEY

Dra. MARCIA CAZANGA

PROFESOR(A) PATROCINANTE: M. Cs. SYLVIA COPAJA

AGOSTO, 2007

INFORME DE APROBACIÓN

MEMORIA DE TÍTULO

Se informa a la escuela de Pre-grado de la Facultad de Ciencias, Universidad de Chile que el seminario de título presentado por la alumna:

Mariela Alejandra Acuña Céspedes

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluación de la Memoria de Título como requisito para optar al Título de Químico Ambiental.

Directores de Memoria de Título

Dr. Mauricio Escudey

Dra. Marcia Cazanga



Two handwritten signatures in blue ink are positioned over two horizontal dotted lines. The top signature is for Mauricio Escudey and the bottom signature is for Marcia Cazanga.

Comisión de Evaluación de la Memoria de Título

Profesora Patrocinante: M. Cs. Sylvia Copaja

Corrector: Dr. Juan Pablo Fuentes

Correctora: Dra. Mónica Antilén



Three handwritten signatures in blue ink are positioned over three horizontal dotted lines. The top signature is for Sylvia Copaja, the middle signature is for Juan Pablo Fuentes, and the bottom signature is for Mónica Antilén.

CURRICULUM VITAE



ANTECEDENTES PERSONALES

Nombre : Mariela Alejandra Acuña Céspedes.
Lugar y Fecha de Nacimiento : Santiago – 11 de Julio de 1977.
Dirección : I. Carrera Pinto 136-C Depto. 31, Ñuñoa.
Teléfono : 2715523 – 09 9390727.
e-mail : mariela_a_c@hotmail.com

ANTECEDENTES ACADÉMICOS

Estudios Básicos y Enseñanza Media : Liceo de Niñas N° 7, Providencia.
Estudios Universitarios
Institución Educacional : Universidad de Chile- Facultad de Ciencias,
Campus Juan Gómez Milla.
Nombre Carrera o Programa : Química Ambiental.
Dirección : Las Palmeras 3425, Ñuñoa. Casilla 653 Stgo.
Realización Unidad de Investigación : “Determinación de sales cuaternarias de amonio aromáticas y alifáticas por extracción líquido-líquido evaluada por espectrofotometría clásica, derivada y RATIO”. Profesora guía: María Inés Toral Ponce, Química Analítica, Universidad de Chile, año 2003.

EXPERIENCIA LABORAL

2000 – 2006

:Universidad de Chile, Depto. de Comunicaciones, Casa Central, Programa Colegios.

2007

:Colegio Internacional SEK. Profesora de Ciencias Enseñanza Media

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mis padres, mis amigos y a mi pololo por ayudarme de distintas maneras a terminar esta etapa de mi vida.

Gracias por no dejar de creer en mí...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los profesores que tuve a lo largo de la carrera, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarme y a apoyarme en los momentos en que los necesité. A mis directores de Seminario, Don Mauricio Escudey y Doña Marcia Cazanga, les doy las gracias por permitirme realizar con ellos ésta investigación y a todos los estudiantes que compartieron conmigo en el laboratorio de fisicoquímica de suelos de la Universidad de Santiago les extiendo mis agradecimientos por su solidaridad y gran compañerismo que me otorgaron durante esos años, especialmente a Magdalena Quinteros. Por último, doy mis agradecimientos a la Sra. Sylvia Copaja, jefe de Carrera Química Ambiental por su apoyo, comprensión y gran disposición.

INDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes Generales.....	1
1.2. Impacto de los Incendios en el Suelo.....	5
1.3. Antecedentes Teóricos.....	9
1.3.1. Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas.....	9
1.3.2. Orden Andisol y Ultisol.....	10
1.4. Propiedades Físicas y Químicas del Suelo.....	12
1.4.1. Textura del suelo.....	12
1.4.2. pH.....	13
1.4.3. Conductividad Eléctrica.....	14
1.4.4. Materia Orgánica.....	16
1.4.5. Bases de Intercambio.....	18
A. Sodio.....	19
B. Potasio.....	20
C. Calcio.....	21
D. Magnesio.....	22
1.4.6. Metales Pesados.....	23
A. Cobre.....	24
B. Zinc.....	26
C. Plomo.....	28

1.5. Hipótesis.....	28
1.6. Objetivos del Estudio.....	29
1.6.1. Objetivo General.....	29
1.6.2. Objetivos Específicos.....	29
2. Material Estudiado.....	30
2.1. Suelos.....	30
2.1.1. Serie Diguillín, Ralún y Collipulli.....	30
2.1.2. Ubicación Geográfica de los Suelos.....	33
2.2. Obtención de Cenizas.....	36
2.3. Columnas de Lixiviación.....	36
2.4. Caracterización de las Muestras.....	38
2.4.1. Caracterización de Suelos y Cenizas a priori.....	38
2.4.2. Caracterización de las Fracciones de las Columnas y Secciones....	38
3. Métodos.....	39
3.1. Determinación del % de Humedad y Factor de Humedad.....	39
3.2. Determinación del pH y la Conductividad Eléctrica.....	40
3.3. Determinación del Contenido de Carbono Fácilmente Oxidable.....	41
3.4. Determinación del Contenido de Bases de Intercambio (Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio).....	42
3.5. Determinación de Algunas Especies Solubles en HNO ₃ 4M, Extracción Total: Cobre, Zinc y Plomo.....	42

4. Resultados y Discusión	43
4.1. Efectos Sobre las Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos.....	43
4.1.1. Caracterización de las Muestras de Suelos y Cenizas.....	43
4.2. Caracterización de las Secciones de las Columnas.....	49
4.2.1. Modificaciones en el pH.....	49
4.2.2. Modificaciones en la Conductividad Eléctrica.....	53
4.2.3. Modificaciones en la Materia Orgánica.....	57
4.2.4. Modificaciones en el Contenido de Bases de Intercambio.....	62
A. Sodio.....	62
B. Potasio.....	68
C. Calcio.....	74
D. Magnesio.....	80
4.2.5. Modificaciones de Algunas Especies Solubles en HNO ₃ 4M.....	87
A. Cobre.....	87
B. Zinc.....	93
C. Plomo.....	98
5. Conclusión	104
6. Bibliografía	107
ANEXOS	
Anexo 1	Características de las Series Diguillín, Ralún y Collipulli..... 110
Anexo 2	Clases Texturales de los Suelos..... 116
Anexo 3	Interpretación de Resultados de Análisis Químico de Suelos, Laboratorio INIA..... 117

INDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Número de Incendios Forestales por Temporada desde 1999/00 hasta el 2003/04.....	4
Tabla 2:	Información sobre, Orden de los Suelos, Ubicación Geográfica, Porosidad, y Meteorología.....	32
Tabla 3:	Caracterización de Muestras de Suelos y Cenizas.....	43
Tabla 4:	Concentración de Bases Intercambiables y Algunas Especies Soluble en HNO ₃ en Suelos y Cenizas.....	46
Tabla 5:	pH Suelos con y sin Tratamiento.....	50
Tabla 6:	CE Suelos con y sin Tratamiento.....	54
Tabla 7:	%CO Suelos con y sin Tratamiento.....	58
Tabla 8:	Concentración de Sodio (cmol(+)kg ⁻¹) en los Suelos con Tratamiento.....	63
Tabla 9:	Concentración de Potasio (cmol(+)kg ⁻¹) en los Suelos con y sin Tratamiento.....	69
Tabla 10:	Concentración de Calcio (cmol(+)kg ⁻¹) en los Suelos con y sin Tratamiento.....	75
Tabla 11:	Concentración de Magnesio (cmol(+)kg ⁻¹) en los Suelos con y sin Tratamiento.....	81
Tabla 12:	Concentración de Cobre (mg kg ⁻¹) en los Suelos con y sin Tratamiento...	88
Tabla 13:	Concentración de Zinc (mg kg ⁻¹) en los Suelos con y sin Tratamiento.....	94
Tabla 14:	Concentración de Plomo (mg kg ⁻¹) en los Suelos con y sin Tratamiento...	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Gráfico Superficie Nacional de Bosques.....	3
Figura 2:	Suelo Orden Andisol.....	11
Figura 3:	Suelo Orden Ultisol.....	11
Figura 4:	Mapa VIII región del Bio-Bío.....	33
Figura 5:	Mapa IX región de La Araucanía.....	34
Figura 6:	Mapa X región de Los Lagos.....	35
Figura 7:	Columnas de Lixiviación. (a) Suelo Control (b) Suelo con Tratamiento.....	37
Figura 8(a):	pH suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	51
Figura 8(b):	pH suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	51
Figura 8(c):	pH suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	51
Figura 9(a):	CE Suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	55
Figura 9(b):	CE Suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	55
Figura 9(c):	CE Suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	55
Figura 10(a):	CO Suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	59
Figura 10(b):	CO Suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	59
Figura 10(c):	CO Suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	59
Figura 11:	[Na ⁺] cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	64
Figura 12:	[Na ⁺] cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	65
Figura 13:	[Na ⁺] cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	66

Figura 14:	$[K^+]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	70
Figura 15:	$[K^+]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	71
Figura 16:	$[K^+]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	72
Figura 17:	$[Ca^{+2}]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	76
Figura 18:	$[Ca^{+2}]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	77
Figura 19:	$[Ca^{+2}]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	78
Figura 20:	$[Mg^{+2}]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	82
Figura 21:	$[Mg^{+2}]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	83
Figura 22:	$[Mg^{+2}]$ cmol(+)kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s profundidad (cm).....	84
Figura 23:	$[Cu]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	89
Figura 24:	$[Cu]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	90
Figura 25:	$[Cu]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s profundidad (cm).....	91
Figura 26:	$[Zn]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	95
Figura 27:	$[Zn]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	96
Figura 28:	$[Zn]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	97
Figura 29:	$[Pb]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm).....	100
Figura 30:	$[Pb]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm).....	101
Figura 31:	$[Pb]$ mg kg ⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm).....	102

LISTADO DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

FAO	: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
m.s.n.m.	: Metros sobre el nivel del mar.
MO	: Materia Orgánica.
CO	: Carbono Orgánico.
fh	: Factor de Humedad.
msh	: Masa Suelo Húmedo.
ICP-OES	: Espectroscopía de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente.
AH	: Ácidos Húmicos.
AF	: Ácidos Fúlvicos.
Dcontrol	: Suelo Diguillín Control.
D+CP	: Suelo Diguillín con Ceniza Pino.
D+CE	: Suelo Diguillín con Ceniza Eucaliptus.
D+CN	: Suelo Diguillín con Ceniza Nativa.
Rcontrol	: Suelo Ralún Control.
R+CP	: Suelo Ralún con Ceniza de Pino.
R+CE	: Suelo Ralún con Ceniza de Eucaliptus.
R+CN	: Suelo Ralún con Ceniza de Bosque Nativo.

- Ccontrol : Suelo Collipulli Control.
- C+CP : Suelo Collipulli con Ceniza Pino.
- C+CE : Suelo Collipulli Ceniza Eucaliptus.
- C+CN : Suelo Collipulli con Ceniza Nativa.

GLOSARIO

- Absorción:** Proceso por el cual una sustancia, como el agua o los nutrientes, es captada y retenida al interior de otra sustancia (normalmente una célula biológica) a través de la piel o membranas mucosas o en las plantas, a través de los pelos de la raíz.
- Adsorción:** Proceso por el cual un gas, vapor, materia disuelta o partículas suspendidas son captadas o adheridas en la superficie de otro material tanto por fuerzas físicas como químicas.
- Alofán:** Mineral amorfo que se forma en condiciones de concentraciones medianas a altas de hidronio en sistemas levemente o muy húmedos, mediante la intemperización rápida de cenizas volcánicas no cristalinas, hasta un punto limitado o por la intemperización rápida de los feldespatos.
- Coloides:** Suspensión o dispersión coloidal, es un sistema físico compuesto por dos fases: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas, por lo general sólidas, de tamaño mesoscópico (entre macroscópico y microscópico). Son partículas que no son apreciables a simple vista, pero son mucho más grandes que cualquier molécula, con un tamaño entre 10 nm y 10 μ m.
- Cuarzo:** El cuarzo es un mineral compuesto de sílice (SiO_2) que cristaliza en el sistema trigonal (romboédrico) y es incoloro en estado puro, aunque puede adoptar numerosas tonalidades si lleva impurezas. Resistente a la meteorización, constituye el principal componente de arenas y arcillas y es un medio de fosilización. Cristaliza a partir del

magma, o se forma durante la fase pegmatítico - pneumatolítica o hidrotermal; sus variedades son numerosas. Calentado a grandes temperaturas (por encima de 573°), se convierte en cuarzo alto o cuarzo bajo, originado por un salto brusco a partir del cuarzo bajo, con cambio de propiedades.

- Cristobalita:** Es una modificación del cuarzo (ver cuarzo) a temperaturas elevadas.
- Feldespatos:** Los feldespatos son grupos de minerales constituyentes fundamentalmente de las rocas ígneas aunque pueden encontrarse en cualquier tipo de roca. Los feldespatos corresponden a los silicatos de aluminio y de calcio, sodio o potasio, o mezclas de esas bases.
- Haloisita:** Hidrato de silicato de aluminio monocíclico de color blanco a gris claro brillante, que presenta formas tubulares y se encuentra en suelos derivados de cenizas volcánicas con climas húmedos o secos alternos.
- Mésico:** Es el régimen de temperatura de los suelos con temperatura media anual entre 8° - 15°.
- Micas:** Las micas son minerales pertenecientes a un grupo numeroso de silicatos de alúmina, hierro, calcio, magnesio y minerales alcalinos caracterizados por su fácil exfoliación en delgadas láminas flexibles, elásticas y muy brillantes.
- Microclima:** Clima a que están sometidos en realidad los vegetales de los diferentes estratos que constituyen una comunidad. Conjunto de condiciones climáticas existentes en un área pequeña, definida con precisión, o en sus inmediaciones.

Orografía:	Descripción de la formas superficiales de la tierra. Geomorfología.
Petrografía:	Composición, estructura y clasificación de las rocas.
Piroclásticos:	Fragmentos de rocas derivadas de fenómenos volcánicos.
Plagioclasa:	Es una variedad de un feldespato presente en numerosas rocas eruptivas, de color blanco o gris y brillo nacarado y compuesta de sodio y calcio.
Sustitución Isomórfica:	Como su nombre sugiere, una sustitución isomórfica implica que el sitio que normalmente ocupa un catión formador de red cristalina como: Si^{4+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , es ocupado por otro catión, asimismo formador de red, y con tamaño similar. Esto ocurre en la propia red, ya sea durante el crecimiento cristalino, o durante su alteración química. En cualquier caso, se trata de un proceso lento o muy lento, ya que afecta a la química interna del mineral. Este proceso es uno de los que genera carga permanente en los suelos.
Térmico:	Es el régimen de temperatura de los suelos con temperatura media anual entre 15° - 22° .
Údico:	Régimen de humedad que caracteriza los suelos de climas húmedos con una distribución regular de la pluviometría a lo largo del año, donde hay disponibilidad de agua durante todo el año. Al tratarse de un régimen de humedad percolante existen pérdidas importantes de calcio, magnesio, potasio, entre otros elementos. Los suelos viejos, con régimen údico, tienden a ser ácidos e infértiles. En aquellos casos

en que las condiciones sean muy húmedas y las precipitaciones superen a las evapotranspiraciones todos los meses del año, el régimen se denomina perúdic.

Xérico:

Régimen de humedad que se presenta en suelos de clima mediterráneo, caracterizado por inviernos fríos y húmedos y veranos cálidos y con sequía prolongada. Existe un déficit de agua que coincide con la estación veraniega. Las lluvias se producen en otoño, momento en que la evapotranspiración es baja y el agua permanece en el suelo a lo largo del invierno. Suele haber otro máximo relativo de lluvias en primavera, donde la reserva de agua se agota pronto por la elevada evapotranspiración. Las lluvias durante el verano son poco frecuentes y, aunque a veces son importantes por la cantidad de agua caída, son muy poco eficientes por la elevada evapotranspiración y debido a que la mayor parte del agua de estas lluvias se pierde por escorrentía superficial.

RESUMEN

En la zona Sur de Chile, durante la temporada 2003-2004 se produjeron 3900 incendios forestales entre la VIII y X región, que afectaron miles de ha de plantaciones de Pino, Eucaliptus y bosque nativo. En el presente trabajo se estudia, a través de un ensayo de columnas, el efecto de las cenizas generadas durante el incendio de plantaciones de pino, eucaliptos y bosque nativo, sobre las propiedades físicas y químicas de tres suelos derivados de materiales volcánicos; Diguillín, Ralún y Collipulli.

Las columnas fueron caracterizadas según pH-agua, conductividad eléctrica, carbono orgánico fácilmente oxidable (CO), contenido de bases de intercambio (sodio, potasio, calcio y magnesio), contenido de algunas especies solubles en HNO₃ 4M (cobre, zinc y plomo) lo que permitió establecer el impacto de las cenizas en el horizonte superficial del suelo.

Los datos indican un aumento en el pH y la conductividad eléctrica, debido al aporte de las cenizas, además de una disminución en el contenido de materia orgánica. En cuanto a las bases intercambiables, se observó un incremento en las concentraciones de éstas, menor en el caso de sodio y potasio por ser cationes fácilmente lavados y mayor para el caso de caso de los cationes calcio y magnesio que son más retenidos. En el caso de los metales, el cobre llega a concentraciones consideradas tóxicas, el zinc disminuye y el plomo presenta un pequeño aumento.

ABSTRACT

During the 2003- 2004 season, throughout southern Chile, 3900 forest fires were produced between the Chile's 7th and the 10th region that harmed thousands pine, eucalyptus and native woodland plantations. The present work studies through a column test the effect that the fire's ashes produced in the said plantations to the physical and chemical properties in three places where the soil derivates from volcanic substances: Digullin, Ralun and Collipulli.

The columns were categorized according to their pH- water, electric conductivity, easily oxidized organic carbon (CO), to its exchange content bases (in sodium, potassium, calcium and phosphorus) and finally to some soluble type contents in HNO₃ 4M (in copper, zinc and lead). All this allowed to establish the impact that the ashes had in the ground's superficial horizon.

The recollected data indicates a raise in the pH and the electric conductivity due to the ashes, and a decrease in the organic matter. Regarding the exchange bases, it was observed an increase in these concentrations, lower in the sodium and potassium case being easily washed cations and higher in the calcium and magnesium cations that are more retainable. In the metals case, copper reaches concentrations considered toxic, zinc decreases and lead presents a small raise.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

El suelo actúa como soporte y sumidero de sustancias nutritivas para diferentes organismos y está constituido por un sistema trifásico sólido-líquido-gas donde tanto el contenido como la disposición de las partículas minerales y orgánicas originan una estructura donde tienen lugar procesos de naturaleza física, química y biológica. La combinación adecuada de los distintos componentes del suelo y la ausencia de procesos interferentes hace posible que sea un medio idóneo para el desarrollo de organismos vivos.

En la Carta Mundial de Suelos elaborada por la conferencia mundial de la FAO en el año 1982 se entiende como *degradación de los suelos*: “La pérdida parcial o total de la productividad de los mismos, cuantitativa y cualitativamente, como consecuencia de procesos tales como la erosión hídrica y eólica de los suelos, la salinización, el anegamiento, el agotamiento de los nutrientes de las plantas, el deterioro de la estructura de los suelos, la desertificación y la contaminación. La degradación de los suelos repercute directamente en la agricultura, al disminuir los rendimientos de los cultivos y los recursos hídricos, pero también se ven gravemente afectados otros sectores de la economía y el medio ambiente en su conjunto, entre ellos la industria y el comercio, debido a factores como las inundaciones, o la acumulación de sedimentos en los ríos, las represas y los puertos”.

Cuando en el suelo se rompe el equilibrio entre los factores y las condiciones ambientales apropiadas para una buena producción de biomasa, la evolución se modifica y se desarrollan una serie de procesos que tienden a alterar sus propiedades y que contribuyen a su degradación tanto física, química y biológica. Dentro de las causas de la degradación de los suelos se encuentran los incendios forestales que tiene como efectos generales, un impacto térmico temporal en todos los componentes del ecosistema, que además pueden contaminar ríos y lagos por efecto de la deposición atmosférica de partículas. En cuanto al impacto que se tiene en el mismo suelo se distingue la pérdida parcial o total de la cubierta vegetal y la disminución de materia orgánica y de microorganismos.

Según los resultados del estudio “Catastro y Evaluación de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile”, concluido en el año 1997, la superficie del territorio nacional alcanza un total de 75,7 millones de ha, distribuidos en 13 regiones. Los bosques de Chile cubren una superficie de 15,6 millones de ha, lo que representa el 20,7% de la superficie total del territorio nacional, de los cuales el bosque nativo cubre una superficie aproximada de 13,4 millones de ha, lo que representa el 85%. Las plantaciones forestales, principalmente de *Pinus radiata* (D.Don) y especies del género *Eucalyptus*, abarcan una superficie cercana a los 2,1 millones de ha equivalentes al 13,5%, mientras que el resto corresponde a bosque mixto el que alcanza una superficie de 87.625 ha equivalentes al 0,5% de la superficie del territorio de bosques.

Estos valores se encuentran ilustrados en la figura 1 (Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. CONAF, CONAMA, 1994-1997)

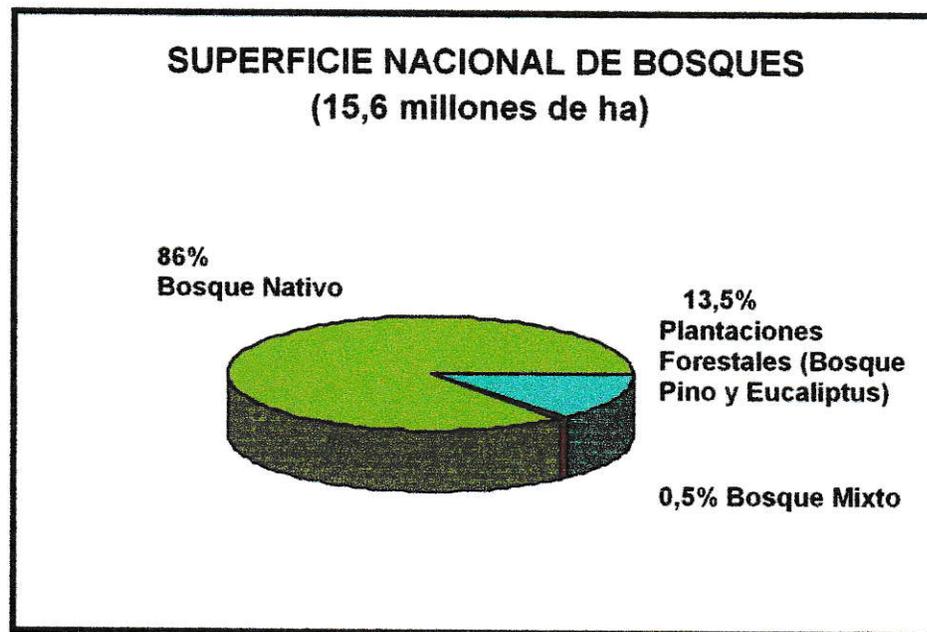


Figura 1: Gráfico Superficie Nacional de Bosques

Fuente: Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. CONAF, CONAMA, 1994-1997.

En Chile, entre octubre 2002 y mayo 2003 se produjeron 4320 incendios forestales entre la VIII y X región, (ver tabla 1). Estos incendios afectaron 43.750 ha forestales de un total de alrededor de 6 millones de ha, tanto de plantaciones de Pino y Eucaliptus como de bosque nativo (Estadísticas del Medio Ambiente, 1999-2004, CONAF)

Tabla 1: Número de Incendios Forestales por Temporada desde 1999/00 hasta el 2003/04

OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES (número) POR TEMPORADAS*					
REGIÓN/Año	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04
VIII del Bío-Bío	1.802	886	2.183	3.272	2.277
IX de La Araucanía	1.114	1.068	1.320	768	1.277
X de Los Lagos	126	20	767	280	346
TOTAL	3.042	1.974	4.270	4.320	3.900

Fuente: Corporación Nacional Forestal (CONAF) a través del Departamento Forestal y Medio Ambiente y Carabineros de Chile

*La temporada de peligrosidad de incendios forestales abarca desde el 1 de octubre de cada año al 15 de mayo del año siguiente.

1.2. IMPACTO DE LOS INCENDIOS EN EL SUELO

El fuego afecta las propiedades físicas, químicas y biológicas de los ecosistemas forestales, en función a factores tales como: intensidad del siniestro, humedad del suelo, cobertura vegetal remanente al paso de las llamas, pendiente del terreno, clima y propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Pritchett, 1990 y Rodríguez, 1996).

El bosque, en condiciones normales, presenta una menor luminosidad siendo menos caluroso, además de ser menos ventoso y más húmedo. La eliminación parcial o total de la cubierta vegetal provocada por el fuego, implica una alteración en este microclima debido a que la superficie oscura generada por las cenizas absorbe de manera más completa la radiación solar; en consecuencia, esta superficie es más caliente que la de un suelo no quemado. Las áreas arboladas limitan las variaciones de temperatura haciéndolas menos extremas y disminuyen el efecto desecador que provoca el viento. Como consecuencia de un incendio, el suelo sufre el impacto de factores tales como el calor, la destrucción de fauna y microorganismos, la exposición directa a los agentes ambientales al desaparecer la cubierta vegetal, el aumento de sedimentos debido a la acumulación de cenizas y la modificación del microclima (Pritchett, 1990).

El fuego contribuye a acelerar la mineralización de la materia orgánica, proceso que normalmente tarda décadas, junto con los microorganismos descomponedores ayuda a reincorporar los minerales provenientes de la MO al suelo, libera parcial o totalmente la humedad contenida en las plantas vivas y la retenida por higroscopía por los

combustibles muertos, pese a ser en una proporción mínima en comparación con la proveniente de la evapotranspiración (Rodríguez, 1996).

Los incendios forestales provocan contaminación térmica temporal del aire, suelo, cuerpos de agua angostos y vegetación, además emiten partículas nocivas a la atmósfera y compuestos que contribuyen al calentamiento global del planeta y además favorecen la erosión (Rodríguez, 1996). Por lo tanto, un impacto inicial que considera la destrucción de la masa forestal y el efecto de las altas temperaturas sobre el suelo, a largo plazo generará un efecto secundario como consecuencia de la distribución superficial y la incorporación al suelo de las cenizas generadas durante el evento.

Dependiendo de la severidad del incendio, el fuego puede alterar varias propiedades del piso forestal (MO parcial o totalmente descompuesta), y del suelo, que afectan el movimiento del agua dentro y sobre éste, y su susceptibilidad a la erosión. Cuando se quema el piso forestal, algunos compuestos orgánicos son parcialmente volatilizados; muchos se pierden en forma de humo, pero otros se mueven hacia abajo del suelo por convección, condensándose en la superficie de las partículas del suelo más frías. Los compuestos de hidrocarburos alifáticos de cadena larga, se creen causan repelencia al agua cuando se condensan en las partículas del suelo. Esta capa repelente reduce la infiltración e incrementa el potencial de escorrentía y la erosión (Rodríguez, 1996).

Los cambios en las propiedades químicas del suelo producto de un incendio forestal, se relacionan con la rápida transformación u oxidación de los nutrientes contenidos en los materiales orgánicos de la vegetación viva y de la capa superficial del suelo. Producto de esta rápida liberación de nutrientes algunos de ellos se pierden por volatilización y los minerales solubles pueden lixiviar por el suelo (Pritchett, 1990).

El aumento de la alcalinidad de la capa superficial del suelo se debe a los elementos básicos contenidos en los residuos de cenizas, la magnitud del cambio depende de la cantidad, del contenido de bases en las cenizas, así como de la textura y del contenido de materia orgánica del suelo. La liberación de óxidos y carbonatos que ocurre en la quema contribuye a reducir la acidez del suelo, sin embargo estos efectos no perduran en el tiempo debido a la lixiviación de estos compuestos alcalinos y a la formación de humus nuevo. La destrucción de la materia orgánica por efecto de la quema reduce también la formación de ácidos orgánicos que se forman normalmente durante la descomposición biológica y que contribuyen a acidificar el suelo (Pritchett, 1990).

La cubierta vegetal contiene una reserva de nutrientes que son puestos a disposición de las plantas por medio de un proceso lento de descomposición. El fuego, como se ha mencionado anteriormente, acelera este proceso de oxidación biológica liberando a los nutrientes minerales, y algunos de ellos se lixivian rápidamente en el suelo. Por lo tanto,

no es extraño encontrar altos contenidos de P, K, Ca y Mg disponibles en el suelo después de un incendio forestal (Pritchett, 1990).

Las cenizas esparcidas aportan contenidos variables de sodio, potasio, calcio, magnesio, carbonatos, sulfatos y otros, además de contribuir a elevar significativamente el pH del medio. En estas condiciones, por acción de la lluvia o el riego se puede producir solubilización y transporte de materia orgánica, disolución de especies químicas, con la consecuente modificación en la distribución de macro y micronutrientes en profundidad.

El presente trabajo fue realizado en la Facultad de Química y Biología de la Universidad de Santiago, específicamente en el laboratorio de Físico-química de Suelos. Dicho lugar, cuenta con los equipos y materiales adecuados para realizar los experimentos que se requieren en la presente memoria de título.

A continuación se detalla información trascendental para la propuesta en estudio.

1.3. ANTECEDENTES TEÓRICOS

1.3.1. SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan una serie de particularidades que los diferencia de los suelos provenientes de otros materiales. Las cenizas volcánicas son un material piroclástico, de naturaleza pulvurulenta cuyo tamaño varía desde el polvo impalpable hasta el límite de las arenas (< 2 mm) y están constituidas principalmente por vidrio volcánico (Tosso y col., 1985).

La composición mineralógica de los suelos derivados de cenizas volcánicas depende, esencialmente de la petrografía de las cenizas de origen y del estado de meteorización del suelo (Besoain, 1969; Malagon, 1975). La fracción arena de estos suelos contiene muchos de los minerales presentes en otros suelos, con una adición notable de vidrio volcánico y un bajo contenido de micas (Birrel, 1964; Swindale, 1969); su limo contiene algo de los minerales primarios además de los minerales secundarios (Birrel, 1964; Martini, 1969), y está compuesto principalmente por vidrio volcánico y plagioclasa (Egawa, 1964) y la fracción arcilla está constituida esencialmente por minerales secundarios (materiales amorfos, haloisita y metahaloisita principalmente), pero es frecuente la presencia de algunos minerales primarios como d-cristobalita, cuarzo y feldespatos, especialmente en la fracción arcilla gruesa (2-0,2 μm) (Tosso y col., 1985).

1.3.2. ORDEN ANDISOL Y ULTISOL

Existen numerosas clasificaciones de suelos, desarrolladas bajo muy diferentes puntos de vista. Actualmente existe una fuerte tendencia a utilizar dos: La Soil Taxonomy de EE.UU. y la desarrollada por la FAO/UNESCO. Ambas utilizan como caracteres diferenciales propiedades del suelo medibles cuantitativamente (en el campo o en el laboratorio). Estos caracteres diferenciales, denominados de diagnóstico, son muy numerosos, de manera que las clases establecidas quedan definidas de una manera muy rigurosa y precisa. Al utilizar criterios cuantitativos, las clases definidas resultan ser mutuamente excluyentes.

La Soil Taxonomy define a los suelos del orden **Andisol** (Figura 2) como suelos jóvenes e inmaduros que presentan perfiles expresados más débilmente que los suelos maduros y que se han formado en la ceniza volcánica. Están constituidos por cristales y materiales coloidales amorfos tales como alofán, imogolita y haloisita que provienen de la mineralización de los materiales piroclásticos producto de deposiciones volcánicas, su fracción arcilla está dominada por alofán. Una de sus características principales es su alta capacidad de inmovilizar o “fijar” al fósforo, es un suelo ácido con un alto contenido de bases intercambiables, en comparación a los Ultisoles, por lo tanto posee mayor fertilidad. A los suelos de orden **Ultisol** (Figura 3) se los define como aquellos suelos viejos e intemperizados que se han formado en la ceniza volcánica y donde la fracción arcilla está dominada por caloinita. Son suelos ácidos, con bajo contenido de

bases intercambiables por lo que su fertilidad es baja, son de coloración rojiza (Buol y col., 1990).

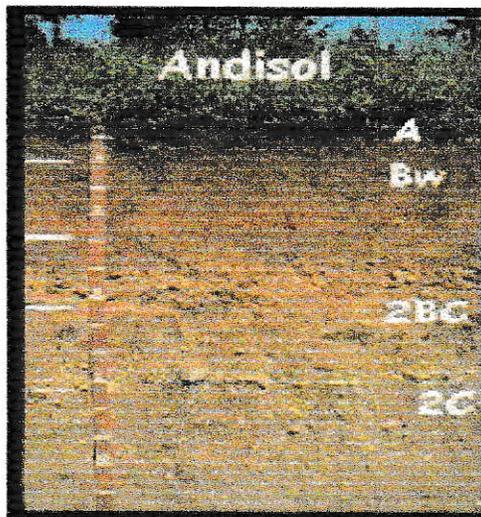


Figura 2: Suelo Orden Andisol

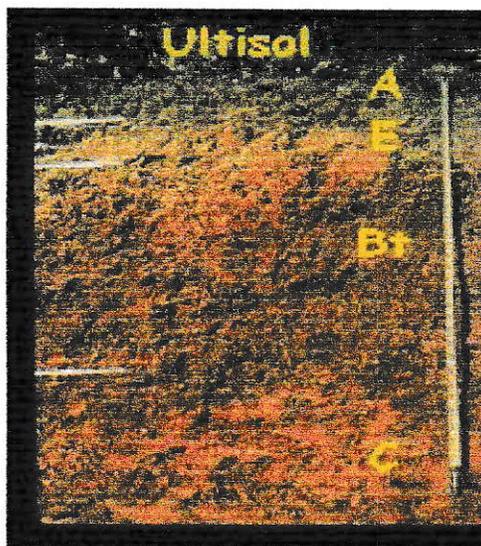


Figura 3: Suelo Orden Ultisol

Fuente figuras 2-3: United States Departamento of Agriculture (USDA).

1.4. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

1.4.1. TEXTURA DEL SUELO

La fase sólida del suelo esta formada por una mezcla de partículas inorgánicas y orgánicas de tamaño y forma variable. La distribución proporcional de los diferentes tamaños de partículas minerales determina la textura de un suelo. La textura del suelo indica la cantidad de partículas individuales de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. En general, en este contexto, se define como arcilla a las partículas de tamaño < 0,002 mm; limo a las de tamaño entre 0,002 y 0,05 mm y arena a partículas de tamaño entre 0,05 y 2 mm. Cuando más pequeña es la partícula más se acerca a la arcilla; cuando más grande es la partícula más se acerca a arena, de esta manera:

- Cuando están presentes pequeñas cantidades de limo y arcilla el suelo es “franco arenoso” o “arena franca”.
- Los suelos compuestos principalmente por arcilla se denominan “Arcillosos”.
- Cuando la arena, limo y arcilla están presentes en cantidades iguales, el suelo se denomina “franco”.

Se han definido 12 clases texturales, que están representadas en el Anexo 2.

Esta propiedad ayuda a determinar la facilidad de abastecimiento de los nutrientes, agua y aire que son fundamentales para la vida de la planta. La textura de un suelo forestal influye indirectamente en su productividad, por ejemplo, los suelos arenosos al retener muy poco la humedad y los nutrientes, a menudo sostienen especies con bajos requerimientos de humedad y nutrientes (Pritchett, 1990).

La textura de un suelo afecta la acumulación y disponibilidad de los metales en el suelo, la arcilla tiende a adsorber los metales pesados, quedando retenidos en sus posiciones de cambio. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de esta capacidad de fijación y los metales pesados pasan rápidamente al subsuelo pudiendo contaminar niveles freáticos (Fassbender y Bornemisza, 1987).

1.4.2. pH

El pH es un parámetro que permite determinar la disponibilidad de los elementos en el suelo. Las fuentes de acidez del suelos son los iones hidrógeno y los iones aluminio adsorbidos. La descomposición de la materia orgánica, la actividad microbiana y el lavado de bases intercambiables (sodio, potasio, calcio y magnesio) son factores que influyen en los valores de pH que registran los suelos. Así por ejemplo, cuando aumentan las bases intercambiables, disminuye la acidez del suelo. En general, los metales son más móviles en condiciones ácidas, estando menos biodisponibles cuando aumenta el pH, es decir cuando se esta en condiciones alcalinas, excepto para el caso del As, Mo, Se y Cr, los que tienden a estar más disponibles a pH alcalino (Alloway, 1990 y Chacón y col., 1995).

La mayoría de los suelos forestales presentan valores de pH entre moderada y extremadamente ácidos, como resultado de la liberación de ácidos orgánicos durante la descomposición de la capa de la capa superficial del suelo y la lixiviación de las bases

del suelo mineral superficial. Por lo tanto, el tipo de vegetación que crece sobre un suelo influye sobre la acidez del mismo (Pritchett, 1990).

La disponibilidad de micronutrientes como el boro, el cobre, el manganeso y el hierro aumentan cuando se está en condiciones ácidas del suelo. En los suelos donde las reservas de estos micronutrientes son bajas, una reducción significativa en la acidez del suelo puede dar como resultado la deficiencia de alguno de éstos nutrientes (Pritchett, 1990).

En un evento como los incendios forestales, el tiempo de recuperación del pH original de los suelos depende de factores como: intensidad del incendio, cantidad y naturaleza de las cenizas aportadas, pH original del suelo, contenido de materia orgánica y características orográficas y climáticas de la zona en cuestión. Es por esto que resulta importante estudiar las variaciones de éste parámetro en el suelo tras un incendio forestal (Rodríguez, 1996).

1.4.3. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica es una medida directa del contenido de iones disueltos en la solución del suelo, se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Por lo tanto, la conductividad eléctrica, refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

Al aumentar la conductividad eléctrica aumenta la movilidad de los metales pesados, porque los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (asociados a las sales) pueden reemplazar a los metales en los lugares de adsorción. La movilidad de los metales también puede aumentar si los aniones cloruro forman complejos solubles estables con ellos (Chichón y col., 1995).

La conductividad eléctrica está asociada al concepto de salinidad, por lo tanto, para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede del 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de 2 dSm^{-1} como límite para el carácter salino, pues considera que a partir de ese valor las propiedades morfológicas y fisicoquímicas del perfil (y por tanto la génesis) quedan fuertemente influenciadas por el carácter salino. Mientras que el Laboratorio de Salinidad de los EE.UU. ha establecido el límite de 4 dS/m para que la salinidad comience a ser tóxica para las plantas.

Las cenizas provenientes de los incendios forestales provocan un incremento en el contenido de sales en el suelo, dicha situación se cuantifica a través de la medición de la conductividad eléctrica. La persistencia de este cambio depende de los mismos factores mencionados anteriormente para el pH, siendo de gran importancia el que dice relación con las condiciones climáticas, especialmente con el régimen pluviométrico y la pendiente del terreno. Las zonas con pluviometría elevada y pendientes pronunciadas

provocan un transporte más rápido de sales hacia niveles más bajos rápidamente, provocando un empobrecimiento de nutrientes en el suelo.

1.4.4. MATERIA ORGÁNICA

La MO del suelo está constituida por residuos de plantas, animales y microbios en varios estados de descomposición, humus, tejidos y células de organismos que viven en el suelo y sustancias producidas por los habitantes del suelo. Un nivel adecuado de ésta, mejora las condiciones físicas del suelo, incrementa la infiltración de agua, reduce las pérdidas por erosión y proporciona nutrientes a las plantas. La MO es de gran importancia, debido a que regula los procesos químicos y bioquímicos que ocurren en el suelo, así como influye sobre las características físicas y en las actividades biológicas. La parte más estable de la MO es el humus, definido por la *Soil Science Society of America*, como la fracción más o menos estable de la MO del suelo, que se obtiene después que se ha descompuesto la mayor parte de las sustancias vegetales y animales que cubren al suelo, la que comúnmente es de color oscuro (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Los residuos de plantas, animales y microbios contienen cantidades variables de nutrientes y micronutrientes, y a medida que se descomponen, estos nutrientes pasan a formar parte del suelo, donde quedan disponibles para el consumo de las plantas. La MO reacciona con los metales formando complejos de cambio y quelatos. Una vez que se forman los complejos o los quelatos, los metales pueden migrar con mayor facilidad a lo

largo del perfil del suelo. La MO puede adsorber fuertemente a algunos metales, por ejemplo, el Cu puede quedar no disponible para las plantas, mientras que el Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables. (Pritchett, 1990).

La solubilización y bioasimilación de metales pesados en el suelo dependen de la complejación de la MO. La toxicidad de los metales pesados se potencia, en gran medida, por su fuerte tendencia a formar complejos órgano-metálicos lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. Además, muchos de estos complejos son estables frente a la degradación biológica provocando una persistencia en la toxicidad (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El contenido de MO se relaciona con el pH, debido a que ayuda a la estabilización de la acidez, gracias a su poder amortiguador. Por lo general, en suelos ácidos, se produce una acumulación de materia orgánica, debido a que el pH incide en el contenido y composición de los microorganismos del suelo: en condiciones ácidas se limita la acción bacteriana y de la macroflora y se favorece la reproducción de hongos, lo que da por resultado una menor eficiencia en la mineralización y en la humificación, teniendo como consecuencia una acumulación de materia orgánica. Por otro lado en condiciones ácidas aumenta el Al intercambiable, lo que produce una estabilización de los complejos organominerales y se producen deficiencias en los contenidos de Ca y Mg, para los microorganismos, conduciendo también a la acumulación de materia orgánica. (Fassbender y Bornemisza, 1987)

La materia orgánica se relaciona también con el contenido y tipo de arcillas. Al aumentar los minerales arcillosos en los suelos se estabiliza la materia orgánica debido a que se forman complejos organominerales. Además, el contenido de materia orgánica en suelos antiguos con baja retención de cationes, como los Ultisoles, es muy importante debido a que promueve la capacidad de intercambio catiónico de los suelos. (Fassbender y Bornemisza, 1987)

1.4.5. BASES DE INTERCAMBIO (SODIO, POTASIO, CALCIO Y MAGNESIO)

En los suelos se encuentran retenidos distintos cationes que pueden ser reemplazados por otros cationes, lo que significa que son intercambiables, como el sodio, potasio, calcio y magnesio. A este grupo de cationes se les denomina bases intercambiables.

Por otra parte, en los tejidos vegetales también se encuentran estos cationes, formando sales o en forma iónica en el citoplasma celular de los tejidos vegetales. Cuando ocurre un incendio forestal, estos tejidos son quemados y las bases pasan a constituir carbonatos, bicarbonatos y óxidos en función de la temperatura de calentamiento, posteriormente éstas reaccionan con el agua del suelo y con la que proviene de las lluvias y se transforman a sus formas iónicas: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} con la correspondiente liberación de OH^- y elevación del pH. Estos cationes cargados positivamente son atraídos hacia las superficies cargadas negativamente de las partículas

coloidales del suelo, tanto minerales como orgánicas. Posterior a la quema se produce una gran acumulación de bases en la solución del suelo y en el complejo coloidal, la que disminuye gradualmente debido a la lixiviación, la erosión y la absorción de Na, K, Ca y Mg por las plantas (Fassbender y Bornemisza, 1987).

La adsorción de bases intercambiables en el suelo depende, entre otras cosas, de la valencia y radio de hidratación del catión. En general, a mayor valencia y menor tamaño del radio del catión hidratado mayor es la fuerza con que quedan retenidos.

A. SODIO

Existe un fenómeno llamado sodicidad que se presenta cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio.

Un elevado contenido en sodio en el complejo de cambio, en relación con el calcio y magnesio, da lugar al incremento de este ión en el complejo de cambio, lo que provocaría, dada su baja densidad de carga (elevado radio de hidratación y baja carga), el aumento del espesor de la doble capa difusa, los efectos de repulsión entre los coloides y, con ellos, la dispersión de la arcilla y la solubilización de la materia orgánica, provocando una destrucción de la estructura del suelo. La alcalinización del perfil produce una serie de consecuencias desfavorables para las propiedades fisicoquímicas del suelo, puesto que provoca una intensa alteración mineral (Pritchett, 1990).

B. POTASIO

El potasio se encuentra en la litósfera, con un porcentaje promedio de 2,6%, generalmente el potasio se acumula en la fracción fina del suelo, la arcilla. El potasio presente en los suelos forestales proviene de materiales edáficos a través de la meteorización y descomposición de los minerales que lo contienen y restos de animales y vegetales (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El ión K^+ intercambiable se encuentra en las superficies electrostáticas de las arcilla, materia orgánica y sesquióxidos, adsorbido al complejo coloidal del suelo. Se encuentra en equilibrio con el potasio que se encuentra en la solución del suelo. Cuando el potasio es absorbido por las plantas o es lavado, su reposición en la solución del suelo se produce a partir del potasio intercambiable, siendo entonces, una reserva de este catión que se pone a disposición de la planta cuando ésta lo necesita, además como es adsorbido por el suelo se protege en cierta medida del lavado (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El potasio es un elemento abundante en los tejidos vegetales, es un nutriente primario, esencial para los organismos vivos y su deficiencia provoca una serie de alteraciones metabólicas. Es absorbido del suelo por las plantas en forma iónica (K^+) y es vital para el proceso de fotosíntesis (Pritchett, 1990).

C. CALCIO

El calcio se encuentra en la corteza terrestre en aproximadamente un 4,2%. La naturaleza del calcio es mineral, la principal fuente son los feldespatos, la apatita, la dolomita y la calcita. En el suelo se presenta como carbonato de calcio o sulfato de calcio. Así como también se presenta formando puentes entre montmorillonita con la materia orgánica y como catión divalente intercambiable adherido en la superficie de los coloides. Generalmente es el catión dominante en el suelo, ocupando un alto porcentaje de los sitios en el complejo de intercambio. Su ciclo es muy similar al del potasio, pero el calcio no se fija en las arcillas solo se adsorbe fuertemente y no es fácilmente lixiviado. (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Es un nutriente secundario y es adsorbido por las plantas en el crecimiento celular, absorción de elementos nutritivos, actividad de enzimas, transporte de carbohidratos y proteínas. Es esencial en la estabilidad de las membranas proporcionando mayor consistencia a los tejidos, provocando mayor firmeza en el tallo de la planta. Por otro lado, actúa favoreciendo la estabilidad estructural del suelo, mejorando la porosidad, el laboreo, el riego, etc. Por lo tanto, se llega incluso a considerar al calcio como un sustituto de la materia orgánica en los suelos pobres en esta (Pritchett, 1990).

Un déficit de Ca detiene el crecimiento de la planta y origina clorosis, pérdida de clorofila. Por otra parte, el exceso produce inmovilización de algunos elementos en el suelo como, Fe, B, Zn y Mn, como consecuencia de encontrarse al Ca como carbonato lo que produce un aumento del pH del suelo que favorece la precipitación de dichos elementos.

D. MAGNESIO

El magnesio se encuentra en la corteza terrestre en aproximadamente un 1,95 %. Las principales fuentes de magnesio en el suelo son minerales: biotita, hornablenda, dolomita y clorita (ferro-magnesianos). Otra fuente de minerales secundarios son: clorita, illita, montmorillonita y vermiculita. Se adsorbe en las superficies de las arcillas y en la materia orgánica, se encuentra en la solución del suelo en menor cantidad que el calcio porque el magnesio no es adsorbido tan fuertemente por los coloides del suelo como el calcio y puede perderse más fácilmente por lixiviación, además que la mayoría de los materiales parentales contienen menos magnesio que calcio (Fassbender y Bornemisza, 1987).

El magnesio es absorbido por las plantas como catión Mg^{2+} , cumple muchas funciones importantes en las plantas, como por ejemplo, es el átomo central en la molécula de clorofila, por lo que se encuentra involucrado activamente en la fotosíntesis (Pritchett, 1990).

1.4.6. METALES PESADOS: COBRE, ZINC Y PLOMO.

Los metales pesados son muy estables en el suelo y en el proceso natural de transformación de las rocas. Para originar a los suelos suelen concentrarse, pero, en general, sin rebasar los umbrales de toxicidad y además los metales pesados presentes en las rocas se encuentran bajo formas muy poco asimilables para los organismos.

En general, se considera que la movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo, además los cationes de los metales pesados son más móviles en condiciones ácidas y un aumento de pH provoca una menor biodisponibilidad de estos nutrientes, a excepción del Molibdeno. Su adsorción depende de la valencia y del radio de hidratación al igual que el resto de los cationes. Varios mecanismos diferentes pueden estar implicados en la adsorción de iones metálicos, incluyendo el intercambio catiónico (o la adsorción no específica), la adsorción específica, la complejación orgánica y la co-precipitación (Pritchett,1990 y Alloway, 1990).

El cobre y el zinc son metales pesados que están dentro de la categoría de oligoelementos o micronutrientes, o sea, son requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Sin embargo, superado cierto umbral se vuelven tóxicos. El plomo es un metal pesado sin función biológica conocida, cuya presencia en

determinadas cantidades en seres vivos lleva aparejadas disfunciones en el funcionamiento de sus organismos, con lo que resulta altamente tóxico y presenta una importante característica de acumulación en organismos vivos (Alloway, 1990).

A. COBRE

El cobre es un elemento esencial muy importante para plantas y animales. En la naturaleza este elemento se puede encontrar principalmente en sulfuros y carbonatos, existiendo también una pequeña fracción como cobre nativo. Los niveles normales de cobre en suelo son de 2-100 mg kg⁻¹, considerándose un valor medio de 20 mg kg⁻¹. El cobre total en el suelos se encuentra como: iones solubles, complejos inorgánicos y orgánicos en la solución de suelo; cobre intercambiable; complejos estables orgánicos en humus; cobre adsorbido por los hidróxidos de manganeso, hierro y aluminio; cobre adsorbido sobre el humus en el complejo coloidal de arcillas y cobre fijado en los minerales de suelo. La forma en que se encuentra normalmente es como ión Cu²⁺, en su mayoría como constituyente de las estructuras cristalinas de los minerales primarios y secundarios. (Alloway, 1990).

Este oligoelemento se encuentra disponible para las plantas como ión Cu²⁺ en suelos ácidos y como Cu⁰ en suelos neutros y alcalinos. El nivel y la distribución de cobre total y cobre disponible en el perfil de suelo varía con el tipo de suelo y el material parental. El cobre es adsorbido o fijativo en suelos, por lo tanto, es de muy baja movilidad. En

suelos con altas concentraciones de cobre y pH alcalino es posible su precipitación como óxido, hidróxido o hidróxi-carbonato (Alloway, 1990).

Una fracción importante se encuentra unida a la materia orgánica, donde forma un complejo estable con los ácidos húmicos. En la disolución del suelo se encuentra fundamentalmente como ión Cu^{+2} . El 99% del cobre en disolución puede estar en forma orgánica (Fassbender y Bornemisza, 1987).

Los suelos orgánicos son los más propensos a ser deficientes en cobre. Estos suelos generalmente contienen niveles adecuados de cobre, pero lo retienen tan fuertemente que solo una pequeña cantidad es disponible para el cultivo. Los suelos arenosos, bajos en materia orgánica, también pueden llegar a ser deficientes en cobre, debido a pérdidas por lixiviación. Los suelos arcillosos son los que tienen menos probabilidad de desarrollar deficiencias de este catión (Pritchett, 1990).

A causa de su alta afinidad con los coloides de el suelo el cobre presenta una baja movilidad, es retenido con más fuerza en los suelos alcalinos que en los suelos ácidos. Pese a su baja movilidad, el cobre adsorbido se encuentra disponible para las plantas en forma de complejos orgánicos y según diversos estudios realizados se ha encontrado que mientras más húmedo el clima de la región, menor es la disponibilidad del cobre al igual que en los suelos derivados de rocas ácidas (Fassbender y Bornemisza, 1987).

B. ZINC

El zinc se encuentra en las arcillas, dentro de la estructura de las arcillas sustituyendo isomórficamente al Al y al Mg, debido a que presentan tamaños similares así como también se encuentra en la fracción orgánica. El zinc total en la litosfera es de aproximadamente 80 mg/kg, encontrándose en un rango de 10-300 mg kg⁻¹, con un valor promedio de 50 mg/kg en la mayoría de los suelos (Alloway, 1990).

El zinc procede de diferentes minerales, principalmente silicatos, sulfuros, óxidos y carbonatos. En la disolución del suelo se encuentra fundamentalmente como ión Zn²⁺. Los suelos de textura fina contienen más zinc que los arenosos (Pritchett, 1990).

Es un micronutriente esencial, importante para la metabolización en general, y cuando falta, casi todos los otros nutrientes se acumulan en la planta, inclusive el fósforo, sin lograr formar sustancias orgánicas. Es absorbido por las plantas como ión Zn²⁺, tanto por vía radicular como por vía foliar, actuando como un componente metálico de enzimas o como cofactor funcional, estructural, o regulador de un gran número de enzimas, participando en el metabolismo de proteínas y de carbohidratos. (Alloway, 1990).

Se concentra en los horizontes superficiales (2/3 del total del zinc asimilable se encuentra en la capa arable). Debido a que los residuos de las plantas se depositan en la superficie, donde proporcionan pequeñas cantidades de este elemento y además presenta baja movilidad descendente en el perfil, a diferencia de otros elementos, debido a que

queda fijado por la materia orgánica, las arcillas y los óxidos e hidróxidos de hierro. Niveles bajos de MO son a menudo indicativos de una baja disponibilidad de zinc (Alloway, 1990).

El zinc total se encuentra como zinc soluble en agua (fracción presente en la solución del suelo); zinc intercambiable (ión unido a partículas del suelo por medio de cargas eléctricas); zinc adsorbido, quelatado o complejado (metales unidos a complejos orgánicos); zinc en minerales secundarios y óxidos metálicos insolubles y zinc en minerales primarios. Sólo las fracciones solubles son las que están disponibles para las plantas (Alloway, 1990).

En cuanto al pH, el zinc se encuentra más móvil y disponible en los suelos ácidos que en los alcalinos, siendo su mínima disponibilidad para pH por encima de 7. En suelos neutros registra una baja movilidad y en suelos alcalinos la solubilidad del ión Zn^{2+} disminuye gracias a la formación de óxidos, hidróxidos y carbonatos, sin embargo puede aumentar su movilidad si forma complejos orgánicos. La fijación del Zn a valores altos de pH viene favorecida por un fenómeno relacionado sólo al pH del suelo (Romig D. y col. 1995).

C. PLOMO

El plomo es un metal pesado que se encuentra en el horizonte superficial de los suelos principalmente en su estado de oxidación +2. La solubilidad de este catión se relaciona con el pH, en suelos alcalinos su solubilidad es baja debido a que en estas condiciones se producen: complejación del metal con la materia orgánica, formación de óxidos (especialmente óxidos de Mn y Fe), adsorción con las arcillas y su precipitación como carbonato, hidróxido o fosfato. La mayor parte del plomo en el suelo no se encuentra disponible para las plantas, aunque si éstas llegan a absorberlo, lo hacen en su estado divalente y lo acumulan en las raíces (Alloway, 1990).

La importancia de la toxicidad del plomo, viene dada por sus efectos perjudiciales en animales y seres humanos, donde no presenta una función biológica conocida, y su presencia en determinadas concentraciones produce disfunciones en el funcionamiento de sus órganos, afectando el sistema nervioso (Alloway, 1990).

1.5. HIPÓTESIS:

La adición de cenizas provenientes de incendios forestales sobre suelos de origen volcánico, provocará cambios significativos en las propiedades físicas y químicas del suelo, que serán evaluadas mediante un diseño experimental de columnas de lixiviación que considera como variable la profundidad.

1.6. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.6.1. OBJETIVO GENERAL:

- Determinar el efecto de cenizas provenientes de incendios forestales sobre suelos volcánicos mediante la determinación de nutrientes y metales pesados.

1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Caracterizar física y químicamente suelos y cenizas para establecer los cambios que se tienen después de agregar las cenizas a los suelos.
- Determinar los cambios del suelo en profundidad por efecto de cenizas superficiales, mediante columnas de lixiviación
- Establecer los contenidos de bases intercambiables (nutrientes primarios: sodio, potasio, calcio y magnesio) en el horizonte superficial de los suelos.
- Establecer los contenidos de algunas especies solubles en HNO_3 4M (cobre, plomo y zinc) en el horizonte superficial de los suelos.

2. MATERIAL ESTUDIADO

2.1. SUELOS

En el siguiente trabajo se estudió el comportamiento del horizonte superficial de 3 suelos chilenos de origen volcánico, representativos de la zona Centro-Sur del país (Talca-Pto. Montt): Diguillín, Ralún y Collipulli.

2.1.1. SERIE DIGUILLÍN, RALÚN Y COLLIPULLI

A continuación se presentan las descripciones de las series: Diguillín, Collipulli y Ralún junto con las principales características físicas y morfológicas de los primeros centímetros de profundidad del perfil del suelo que representan a los analizados en este estudio (Tosso y col., 1985).

Los suelos de la serie **Diguillín** pertenecen a la familia Arrayán que se caracteriza por ser suelos derivados de cenizas volcánicas modernas que se ubican en la parte central de la depresión intermedia desde la VII a la VIII región, a una altura entre 120 a 180 m.s.n.m., en posición de terrazas remanentes, en un relieve plano a suavemente ondulado. Son suelos muy profundos, de texturas medias, de color pardo amarillento oscuros a pardo amarillento en profundidad. El régimen de temperatura es térmico y el de humedad es xérico. En la serie Diguillín, el substratum está constituido por toba volcánica y la profundidad efectiva es menor que en los otros miembros de la familia. El drenaje varía de bueno a moderado (Anexo 1).

Los suelos de la serie **Ralún** pertenecen a la familia Ralún que se ha desarrollado a partir de cenizas y arenas volcánicas recientes en la Cordillera de los Andes. Se ubican a partir del paralelo 39°45', ocupan una posición de montañas con pendientes abruptas y a una altura entre 600 y 1.400 m.s.n.m. El régimen de temperatura es mésico y el de humedad es perúdico. La serie Ralún, se caracteriza por ser un suelo muy estratificado, con estratas pumicitas y arenas volcánicas, muy tixotrópico de pendientes abruptas en el cual el desarrollo radicular de la vegetación arbórea se concentra prácticamente en el horizonte A. (Anexo 1).

Los suelos de la serie **Collipulli** pertenecen a la familia Collipulli que se caracteriza por ser suelos derivados de cenizas volcánicas antiguas, que descansan sobre un substratum constituido por un conglomerado volcánico de composición petrográfica mixta y muy meteorizada, que no guarda relación genética con el desarrollo del perfil. Se ubican dentro de la depresión intermedia entre los paralelos 34°45' al 38°10' L.S., en posición de lomajes con pendientes compleja y a una altura de 120 a 400 m.s.n.m. y ocasionalmente sobrepasan esta última. El régimen de temperatura es térmico y el de humedad es xérico. La serie Collipulli, ocupa la parte central y oriental de la depresión intermedia, son suelos de texturas finas o muy finas, moderadamente profundos a profundos, de color pardo rojizo a rojizo y ocupan una posición de lomajes, con pendientes complejas y con diversos grados de erosión (Anexo 1).

Las muestras de todos los suelos fueron extraídas hasta una profundidad de 15 cm y se tamizaron a un tamaño de partícula < 2 mm.

La ubicación, orden, pluviometría y temperatura media anual de los suelos utilizados se presentan en la tabla 2; una descripción detallada de los suelos y horizontes se presenta en el Anexo 1.

Tabla 2: Información sobre Orden de los Suelos, Ubicación Geográfica, Pluviometría y Meteorología.

Suelo	Orden de los suelos	Ubicación		Pluviometría anual (mm)	Temp. media anual (°C)
		latitud	longitud		
Diguillín	Andisol	36°25'S	71°50'O	1,2-1,8	15,5
Ralún	Andisol	39°45'S	72°17'O	4,0-5,0	10,5
Collipulli	Ultisol	37°55'S	71°25'O	1,2-1,5	15,8

2.1.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS SUELOS

VIII REGIÓN DEL BÍO-BÍO, UBICACIÓN SUELO SERIE DIGILLÍN

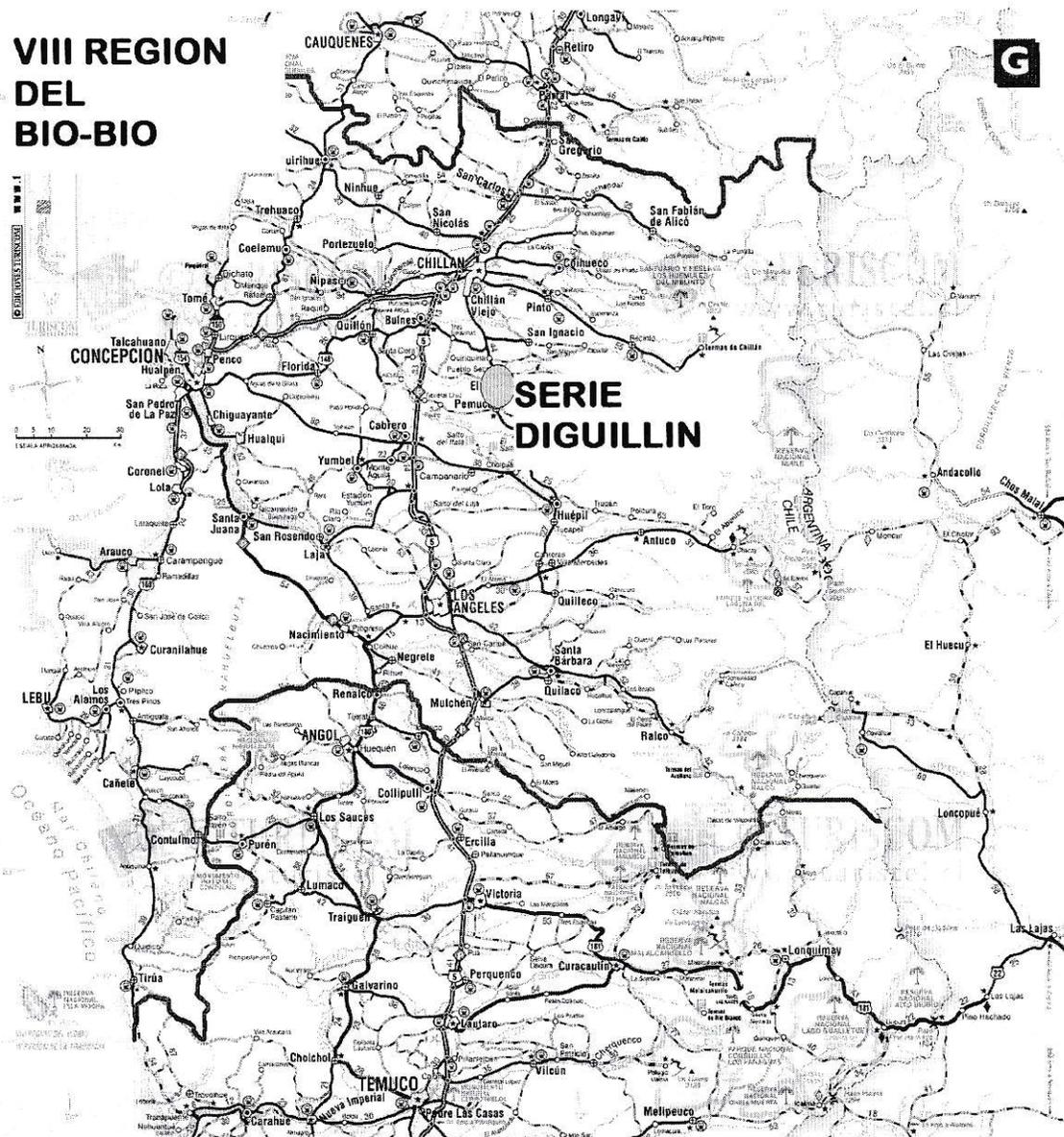


Figura 4: Mapa VIII región del Bío-Bío.

Fuente: www.turistel.cl

IX REGIÓN DE LA ARAUCANÍA, UBICACIÓN SUELO SERIE COLLIPULLI

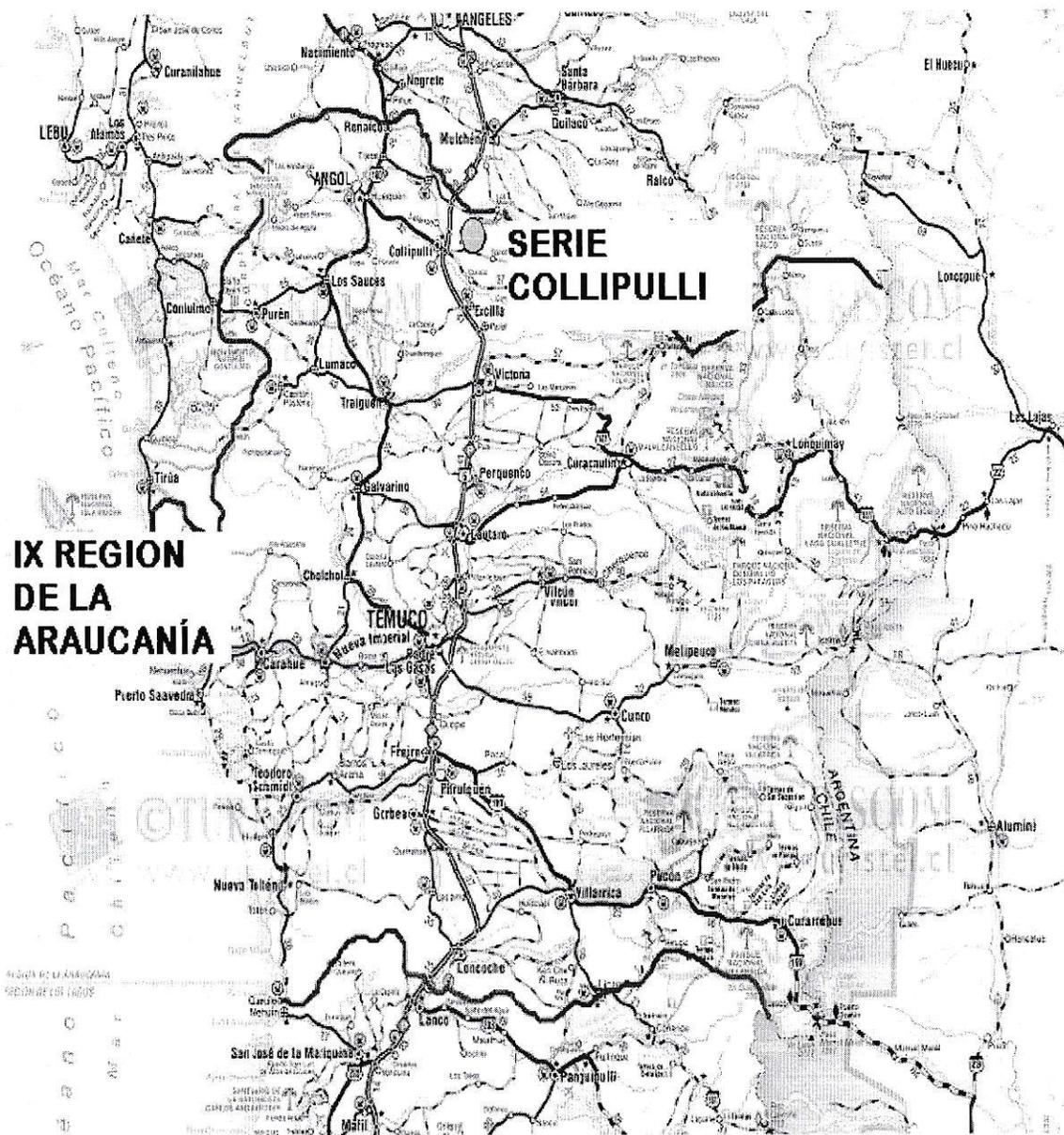


Figura 5: Mapa IX región de La Araucanía.

Fuente: www.turistel.cl

X REGIÓN DE LOS LAGOS, UBICACIÓN SUELO SERIE RALÚN

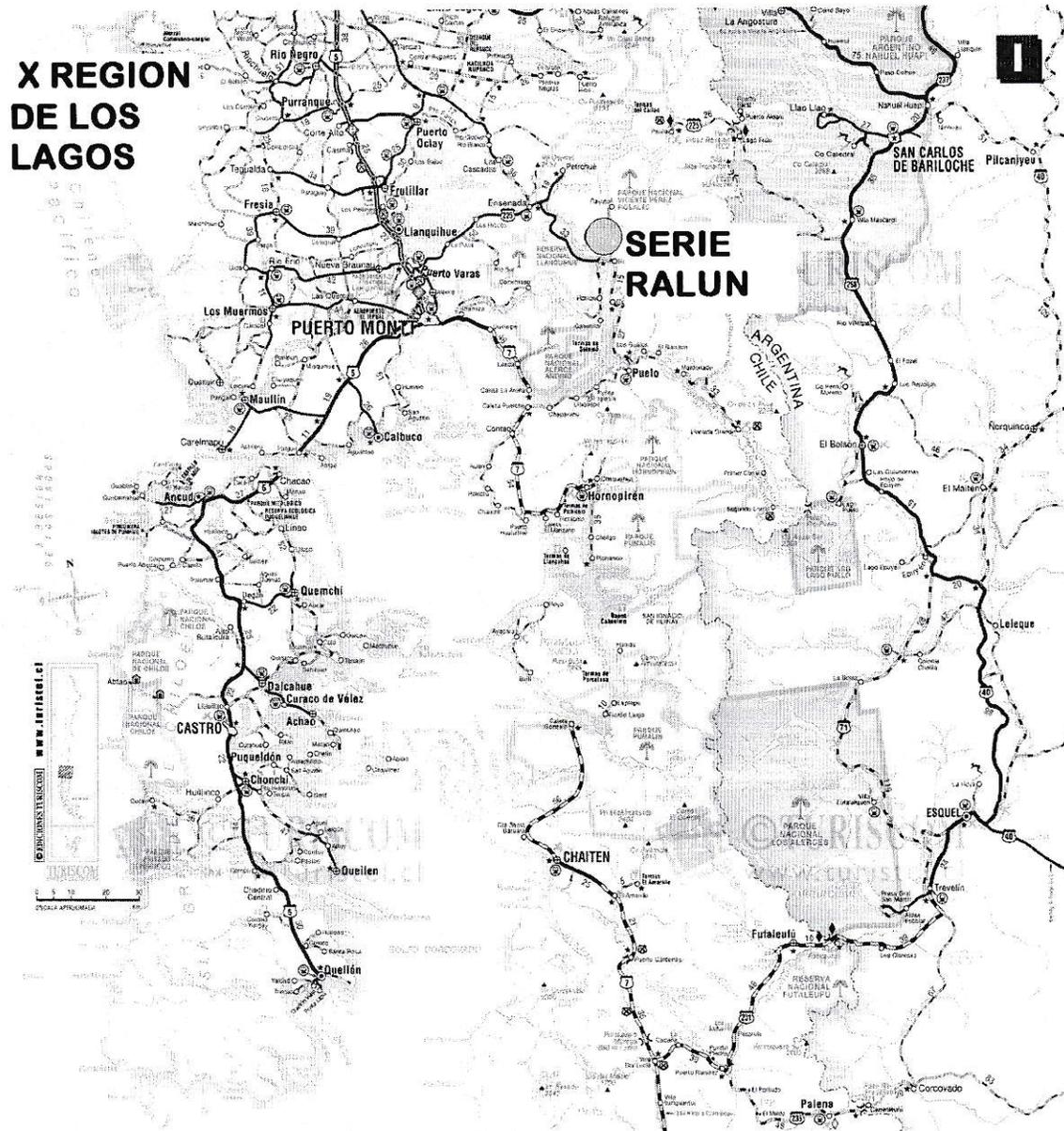


Figura 6: Mapa X región de Los Lagos.

Fuente: www.turistel.cl

2.2. OBTENCIÓN DE CENIZAS

Las cenizas de *pinus radiata* (D.Don) y *Eucaliptus* se obtuvieron quemando en terreno ramas y hojas secas de la VIII región y las cenizas de vegetación nativa se obtuvieron quemando ramas y hojas secas de la IX región.

2.3. COLUMNAS DE LIXIVIACIÓN

Se construyeron columnas de acrílico transparente de 35 cm de largo 10 cm de diámetro, con la base del mismo material, la cual fue perforada y sobre ella se colocó un trozo de tela, para evitar pérdidas de muestra.

Las columnas fueron empacadas con los suelos, hasta completar 25 cm de altura; para cada suelo se preparó una columna control y tres columnas a las que se agregó 60 g de ceniza de pino, eucaliptus o vegetación nativa, completando un total de 12 columnas. Es importante mencionar que las cenizas no fueron incineradas sobre los suelos estudiados, por lo tanto, ellos no presentan alteraciones atribuibles a las temperaturas alcanzadas en la quema de las cenizas.

Las columnas se montaron sobre una rejilla y se envolvieron en papel aluminio con el fin de evitar el desarrollo de microorganismos en presencia de luz. A cada columna se adicionó un volumen de poro, de agua destilada, semanalmente hasta completar 12 volúmenes de poro (Figura 7). Cada volumen de poro se agregó en su totalidad sobre la columna y se dejó drenar por gravedad.

Posteriormente, cada columna se cortó en 5 secciones de 5 cm cada una, las que se guardaron rotuladas en frascos plásticos, se secaron a temperatura ambiente y se tamizaron a 2 mm.

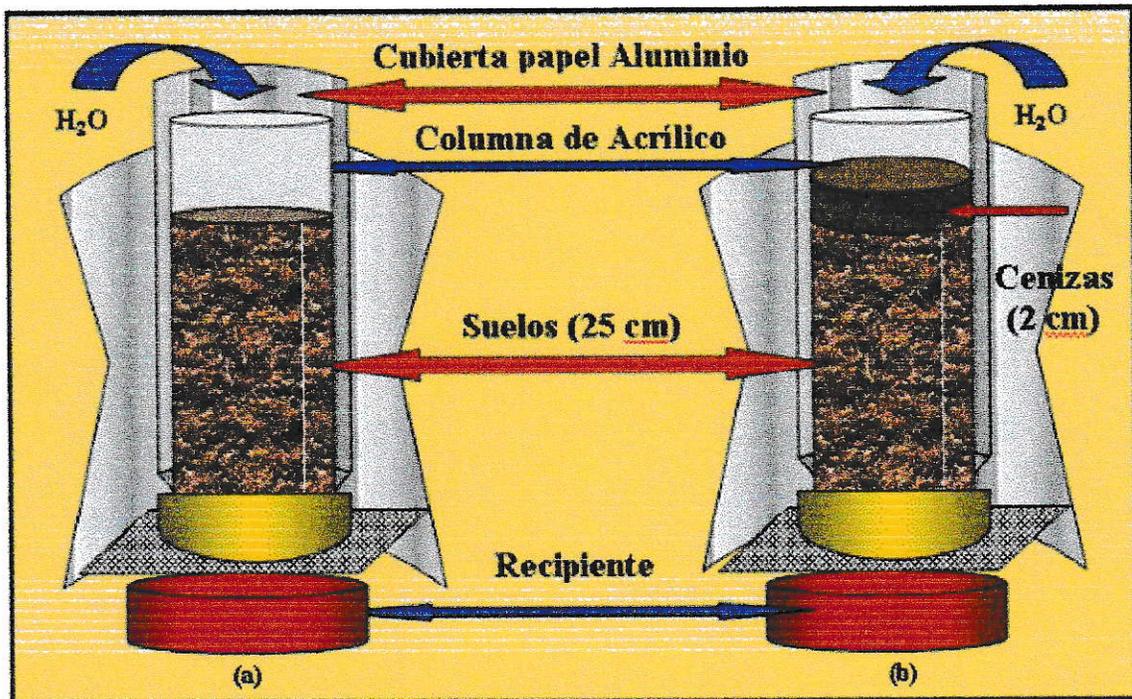


Figura 7: Columnas de Lixiviación. (a) Suelo Control (b) Suelo con Tratamiento

2.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS

2.4.1. CARACTERIZACIÓN DE SUELOS Y CENIZAS

La caracterización de los suelos y las cenizas utilizadas en este estudio consistió en la determinación de las siguientes propiedades: pH y conductividad eléctrica (razón 1:2,5 sólido/agua), carbono orgánico fácilmente oxidable (CO), contenido de bases de intercambio (Na, K, Ca y Mg), contenido de especies solubles en HNO₃ 4M (Cu, Zn y Pb).

2.4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS FRACCIONES DE LAS COLUMNAS Y SUS SECCIONES

Las secciones de las columnas ya tamizadas se caracterizaron según: pH, conductividad eléctrica, carbono orgánico fácilmente oxidable, contenido de bases de intercambio (Na, K, Ca y Mg) y contenido de algunas especies solubles en HNO₃ 4M (Cu, Zn y Pb).

3. MÉTODOS

3.1. DETERMINACIÓN DEL % DE HUMEDAD Y FACTOR DE HUMEDAD

Se pesó 5 g de muestra aproximadamente, en balanza analítica modelo AE100 Metler, en un vaso de precipitado de vidrio limpio, seco y previamente tarado, el cual se dejó secar en estufa modelo BTL a 105 °C durante 24 h, luego se dejó enfriar en una desecadora y se registró la masa (Sadzawka, 1990).

El % de Humedad se obtuvo como:

$$\% \text{ de Humedad} = \left(\frac{a-b}{b-c} \right) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

a = peso en g de suelo seco al aire + recipiente.

b = peso en g de suelo seco a 105 °C + recipiente.

c = peso en g del recipiente.

El factor de corrección por humedad (fh) para los resultados analíticos corresponde a:

$$fh = (100 + \% \text{humedad}) / 100 \quad (2)$$

El cálculo del peso del suelo seco a 105 °C a partir del suelo seco al aire es:

$$\text{masa suelo seco a } 105 \text{ °C} = \frac{\text{masa suelo húmedo}}{fh} \quad (3)$$

3.2. DETERMINACIÓN DEL pH Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

pH- H₂O: la medición del pH se realizó potenciométricamente con un electrodo combinado de vidrio-calomelano modelo Radiometer Copenhagen PHM 83 autocal, en el sobrenadante de una suspensión de una mezcla suelo-H₂O en la razón 1:2,5.

Se pesó 20 g de suelo en un recipiente plástico, se agregó 50 mL de agua destilada. Se agitó la solución durante 2 h en un agitador, luego se introdujo en el sobrenadante un electrodo combinado de vidrio-calomelano, previamente calibrado con una solución tampón de pH 7,00 y 4,00. Una vez estabilizada la lectura se registró el valor de pH.

Conductividad Eléctrica: Se midió en el sobrenadante descrito anteriormente (mezcla sólido-líquido en la razón 1:2,5), con un conductímetro, calibrado con una solución 0,001 m de KCl.

3.3. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO FÁCILMENTE OXIDABLE (CO)

Para determinar el contenido de CO de las secciones de cada columna, se utilizó el método de Walkley y Black (Sadzawka, 1990). Se agregó entre 0,3 a 0,5 g de suelo a un matraz de 500 mL incluyendo dos blancos. Luego se adicionó 10 mL de $K_2Cr_2O_7$ 0,1667M, para oxidar la muestra de suelo, se agregó cuidadosa y rápidamente 20 mL de H_2SO_4 concentrado. Se agitó vigorosamente en agitador magnético durante 1 min y se dejó reposar por 30 min bajo campana. Posteriormente se agregó 180 mL de agua destilada y se realizó la retrovaloración con $FeSO_4$ 0,5M en un titulador automático Radiometer modelo Copenhagen TTT 80 Tritator, ABU 80 Autoburette, PHM 84 Research pH meter, provisto de un electrodo de Pt combinado hasta un potencial de 630 mV.

El % CO se obtuvo según la expresión:

$$CO(\%) = \frac{(V1 - V2) \times M \times 0,39 \times fh}{msh} \quad (4)$$

Donde:

V1 = mL de $FeSO_4$ gastados en el blanco

V2 = mL de $FeSO_4$ gastados en la muestra

M = molaridad del $FeSO_4$

0,39 = $(3 \times 100 \times 1,3)/1000$ (3 peso eq del C)

msh = masa del suelo húmedo

nota: el factor 1,3 es un factor de compensación por la combustión incompleta de la materia orgánica (MO) en este procedimiento.

3.4. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE BASES DE INTERCAMBIO (SODIO, POTASIO, CALCIO Y MAGNESIO)

Se pesó 5 g de suelo en un matraz erlenmeyer, incluyendo un blanco. Se les agregó 50 mL de solución de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1M a pH 7,0, se agitó y se dejó reposar durante toda la noche, luego se filtró transfiriendo a un matraz de 100 mL, se lavó con pequeñas porciones de solución de Acetato de amonio y se enrasó con la misma solución (Sadzawka, 1990).

3.5. DETERMINACIÓN DE ESPECIES SOLUBLES EN HNO_3 4M EXTRACCIÓN TOTAL: COBRE, ZINC Y PLOMO, (CHANG et al., 1984)

Un total de 3,5 g de suelo en base seca son tratados con 21 mL de solución de HNO_3 4M a 70°C durante toda la noche (Chang y col., 1984), la solución así obtenida se enrasó a 50 mL y se filtró a través de una membrana de 0,45 μm . Los contenidos de cada uno de ellos se determinaron por espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES) donde las mediciones se realizaron incluyendo un blanco.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS

4.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELOS Y CENIZAS

En la Tabla 3 se encuentra la caracterización físicas y químicas de las muestras de suelos y cenizas utilizadas.

Tabla 3: Caracterización de Muestras de Suelos y Cenizas

Muestra	Textura*	Fh	pH-H ₂ O	CE (dS/m)	%CO
Diguillín	Franco	1,25	5,9	0,1	6,3
Ralún	Franco- Arenoso	1,46	4,5	0,1	5,2
Collipulli	Arcillo-Limoso	1,19	5,4	0,1	2,3
Ceniza Nativa		1,01	13,0	42,5	0,6
Ceniza Pino		1,00	12,0	35,5	1,0
Ceniza Eucaliptus		1,00	12,8	81,3	1,0

*Fuente: Mella y Kühne, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Ministerio de Agricultura, 1985.

La Tabla 3 indica que los **suelos** en estudio son ácidos con valores de pH que van desde 4,5 a 5,9, según la “Tabla de Interpretación de Resultados de Análisis Químico de Suelos”, proporcionada por el Laboratorio INIA (ver Anexo 3), los suelos Diguillín, Ralún y Collipulli se encuentran en las categorías moderadamente ácido, muy fuertemente ácido y fuertemente ácido respectivamente, mientras que las cenizas están todas en la categoría de muy fuertemente alcalinas. Carrasco, P. y Millán, J., en 1990 caracterizaron los suelos de la VIII región ubicándolos en la categoría de moderadamente ácido, al igual que en este estudio.

La acidez esta determinada por su composición y por reacciones de intercambio de iones y de hidrólisis que presentan los componentes inorgánicos y orgánicos presentes. Los componentes inorgánicos son: minerales de arcilla cristalinos, óxidos e hidróxidos, alofán y otros compuestos amorfos y ácidos solubles en los suelos. Los componentes orgánicos están dados por los grupos carboxílicos y fenólicos aportados por la materia orgánica y que participan en reacciones de intercambio catiónico. Los suelos formados bajo condiciones de altas precipitaciones, como se da en el Sur de Chile, son más ácidos, ya que a medida que las aguas lluvias percolan en el suelo producen la lixiviación de nutrientes básicos como el calcio y el magnesio, los que son reemplazados por elementos ácidos como aluminio, hidrógeno o manganeso (Fassbender y Bornemisza, 1987).

La conductividad eléctrica es similar (aproximadamente de 0,1dS/m) y se encuentra en coherencia con los valores de pH, de cationes y aniones en solución. Los contenidos de carbono orgánico presentan una clara diferencia entre Andisoles y Ultisoles. Es así como el suelo Diguillín y Ralún (Andisoles) presentan valores más altos de materia orgánica que el suelo Collipulli (Ultisol), probablemente porque los primeros son suelos jóvenes, que no han sufrido pérdidas de nutrientes importantes, a diferencia del Collipulli que es más viejo, con un alto contenido de arcilla y con un bajo porcentaje de MO. Sin embargo, no se debe olvidar que el contenido de materia orgánica de un suelo no sólo depende de su edad sino que también influye la adición de materia orgánica en el tiempo. Estudios realizados por Escudey et al., el año 2003, sobre estos mismos suelos, los caracterizan de igual manera en relación al contenido de materia orgánica.

Las **cenizas** son muy fuertemente alcalinas con valores de pH entre 12,0 y 13,0, sus valores de conductividad eléctrica son altos y tienen relación con el alto contenido de iones sodio, potasio, calcio y magnesio. El bajo contenido de materia orgánica se debe a que gran parte de ésta se desintegró con las altas temperaturas equivalentes a las alcanzadas en un incendio.

En la Tabla 4 se presenta la concentración de las especies determinadas en este estudio, es decir, las bases intercambiables y cobre, plomo y zinc soluble en HNO₃ 4M.

Tabla 4: Concentración de Bases Intercambiables y Algunas Especies Solubles en HNO₃ en Suelos y Cenizas

Muestra	Bases Intercambiables (cmol(+)kg⁻¹)					Especies solubles en HNO₃ 4M (mg kg⁻¹)		
	Na⁺	K⁺	Ca⁺²	Mg⁺²	Total	Cu	Pb	Zn
Diguillín	0,17	0,54	8,57	1,09	10,37	58	3	163
Ralún	0,02	0,12	2,48	0,09	2,71	21	0	230
Collipulli	0,12	0,16	6,22	2,12	8,62	96	0	69
C. Nativa	9,32	124,56	202,42	98,51	434,81	142	0	496
C. Pino	5,08	93,83	42,02	66,54	207,47	59	0	207
C. Eucaliptus	6,76	72,99	168,91	98,36	347,02	47	0	89

Según la “Tabla de Interpretación de Resultados de Análisis Químico de Suelos” del laboratorio INIA, los suelos Diguillín, Ralún y Collipulli se encuentran en las categorías para los valores de **sodio** en: bajo, muy bajo y muy bajo, para los valores de **potasio** en: alto, muy bajo y bajo, para los valores de **calcio** en: medio, bajo y medio y para los valores de **magnesio** en alto, muy bajo y muy alto respectivamente. Mientras que las cenizas están todas en la categoría de muy alto. Los valores de concentración de bases intercambiables totales indican que el suelo Diguillín está dentro de la categoría de alto contenido de bases, el suelo Collipulli en la categoría de medio y el suelo Ralún de muy bajo. Dichos valores están en coherencia con los pH que registran los suelos, es decir, a mayor pH mayor contenido de bases intercambiables. Es así como el suelo Diguillín al tener el pH más alto presenta también la mayor cantidad de bases y el suelo Ralún que es el más ácido es el que posee un menor contenido de bases intercambiables.

En el suelo **Diguillín** la secuencia que se registra en la concentración de los cationes en sentido decreciente es $\text{Ca}^{+2} \gg \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. En el suelo **Ralún** el orden es: $\text{Ca}^{+2} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^+$ y en el suelo **Collipulli** el orden es: $\text{Ca}^{+2} \gg \text{Mg}^{+2} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Por lo que se infiere que el catión más abundante en los suelos estudiados es el calcio y el que se encuentra en menor concentración es el catión sodio.

Al comparar los valores de concentración de metales de la Tabla 4 con los citados en la introducción como rangos normales de éste parámetro encontrados en la literatura, se deduce que el **cobre** se encuentra dentro del rango de concentraciones normales de este elemento en los suelos, siendo el suelo Collipulli el que registra la mayor concentración, seguido por el suelo Diguillín y por último el suelo Ralún. El contenido de **plomo** en los tres suelos se encuentra bajo el límite de detección. El **zinc** se encuentra dentro de los rangos normales que presentan los suelos de origen volcánico, donde los Andisoles presentan concentraciones más altas que los Ultisoles (Alloway, 1990).

Entre 1981 y 1990 el laboratorio INIA estudió el contenido en suelos de algunos elementos metálicos. En relación al cobre total se detectó que los suelos de la VIII región aparentan una situación normal. Según antecedentes en literatura un límite de 100 mg kg⁻¹ implica una existencia de suelos contaminados, no obstante, la certificación de la existencia de contaminación estará en el conocimiento del cobre nativo para el área estudiada. En la IX y X región el cobre, plomo y zinc presentan valores mínimos.

En cuanto a las **cenizas**, éstas registran un aumento en el contenido de bases intercambiables acorde al aumento de pH y de conductividad eléctrica. Dicho aumento se atribuye a que las cenizas contienen los cationes que se encontraban formando parte de los tejidos vegetales. La ceniza nativa posee mayor cantidad de bases totales, le sigue la ceniza eucaliptus y por último la ceniza pino.

Dentro de la ceniza nativa el orden que se da en la concentración de los cationes en sentido decreciente es $\text{Ca}^{+2} > \text{K}^{+} > \text{Mg}^{+2} > \text{Na}^{+}$, en la ceniza pino es $\text{K}^{+} > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2} > \text{Na}^{+}$ y en la ceniza eucaliptus es $\text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2} > \text{K}^{+} > \text{Na}^{+}$.

La concentración de los metales cobre y zinc es más elevada en las cenizas que en los suelos, debido a que en las cenizas se encuentra concentrado el contenido de los metales que se encontraban formando parte de las ramas y hojas secas.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS SECCIONES DE LAS COLUMNAS

Las columnas de suelo se caracterizaron según: pH, CE, bases de intercambio (sodio, potasio, calcio y magnesio), especies solubles en HNO_3 4M (cobre, plomo y zinc). Los valores registrados por las muestras comienzan a analizarse a continuación:

4.2.1. MODIFICACIONES EN EL pH:

Se determinó pH- H_2O potenciométricamente en el sobrenadante de una suspensión de una mezcla sólido-líquido (1:2,5). Los valores de pH obtenidos para las secciones en estudio de los horizontes superficiales de los suelos, mencionados anteriormente, se presentan en la Tabla 5 y en la figura 8 (a) - (c).

Tabla 5: Valores de pH para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas

pH												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	5,8	7,9	8,7	8,5	5,1	8,1	9,6	8,7	5,8	8,6	8,5	9,3
5-10	6,0	6,5	6,6	6,6	5,0	6,5	8,5	7,4	5,8	6,9	6,9	7,0
10-15	6,0	6,7	6,7	6,1	5,0	6,6	7,1	6,6	5,7	6,3	6,2	6,2
15-20	6,0	6,0	6,4	6,0	5,0	6,4	6,4	6,2	5,8	5,7	5,8	5,9
20-25	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	6,2	6,0	5,8	5,8	5,7	6,0	5,7

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

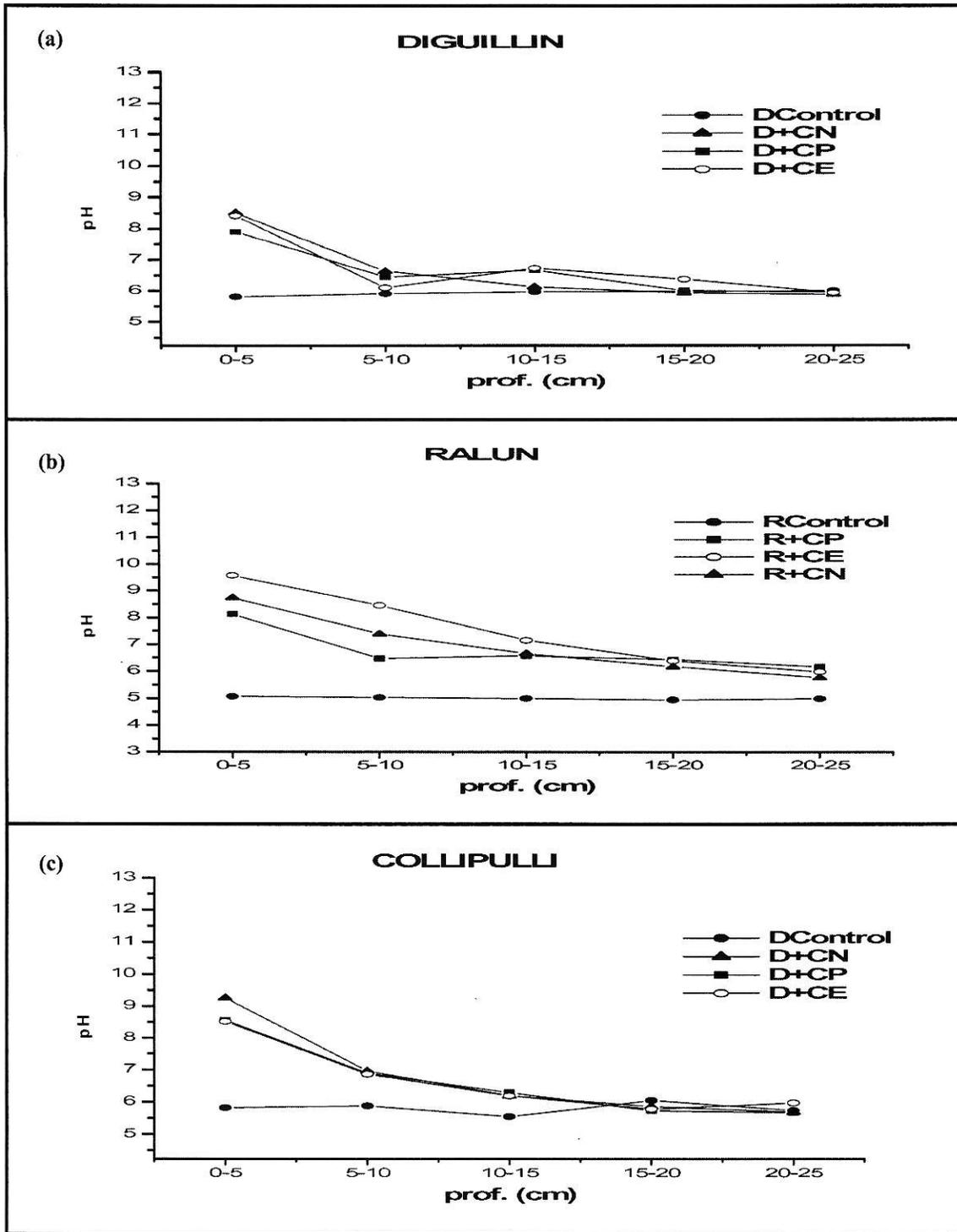


Figura 8: Variación del pH v/s Profundidad (cm).

(a) Suelo Digullín, (b) Suelo Ralún y (c) Suelo Collipulli

Para los tres suelos se produce un aumento de pH al adicionar cenizas, cualquiera sea el origen de estas. Las cenizas, de naturaleza alcalina, al entrar en contacto con los suelos de pH ligeramente ácido, hacen variar esta propiedad del suelo alcalinizándolo, lo que se observa en el horizonte superficial del suelo, es decir, en los primeros 5 cm de profundidad. Este brusco aumento del pH presenta una disminución gradual en las fracciones más profundas, para finalmente presentar valores similares a los registrados en los suelos control. La acidez del suelo se reduce debido al aporte de cationes contenidos en las cenizas. Al humectarse las cenizas se produce la hidrólisis de los cationes contenidos en ellas y como consecuencia se eleva el pH. Otra razón del aumento del pH es la alta combustión de materia orgánica producida en el incendio. Estudios realizados por Mataix (1999), en suelos afectados por incendios forestales después de 6 meses de ocurrido el siniestro observaron incrementos de pH debido al aporte de las cenizas, sin embargo este aumento decae al pasar el tiempo retornando a valores de pH de los suelos antes del incendio. Maycotte y col. (2002), realizaron estudios similares en suelos afectados por incendios forestales, observando luego de 11 meses que el incremento de pH en el tiempo no constituyó un cambio significativo. Por lo que se puede suponer que el aumento del pH en el suelo luego de un incendio forestal es importante en los primeros meses luego de ocurrido el incendio y que a medida que pasa el tiempo el pH del suelo se va recuperando, gracias a su capacidad tamponante y procesos de lixiviación.

En la figura 8 (a), (b) y (c) se observan aumentos bruscos en los valores de pH de las primeras secciones de las columnas analizadas, debido a la incorporación de las cenizas. En relación al impacto que provoca cada ceniza, los datos obtenidos indican que la ceniza de eucaliptus es la que provoca mayor aumento en los valores de pH de los suelos Diguillín y Ralún y la ceniza de bosque nativo es la que genera la mayor variación del pH en el suelo Collipulli. En los tres suelos la ceniza de pino es la que genera las menores variaciones del pH. Además, se observa en los tres suelos y con los tres tipos de cenizas, que a medida que se avanza en profundidad el pH disminuye acercándose a los valores de pH del suelo control.

En general, no se distingue un comportamiento diferenciado entre Andisoles y Ultisol, en relación a la variación que registran en el pH tras la incorporación de las cenizas. Sin embargo, se tiene un efecto tamponante del suelo, más marcado en el suelo Diguillín, luego en el suelo Collipulli y por último en el suelo Ralún.

4.2.2. MODIFICACIONES EN LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos para todas las secciones en estudio de los horizontes superficiales de los suelos estudiados se presentan en la Tabla 6, mientras que su comportamiento se encuentra ilustrado en la figura 9 (a) – (c).

Tabla 6: Valores de conductividad eléctrica para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas

Conductividad Eléctrica (dS cm ⁻¹)												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	0,1	0,6	0,7	0,8	0,1	0,5	0,6	0,7	0,1	0,3	0,4	0,6
5-10	0,1	0,4	0,2	0,3	0,1	0,2	0,5	0,3	0,0	0,1	0,1	0,1
10-15	0,1	0,2	0,1	0,4	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1
15-20	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1
20-25	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,1	0,0	0,0	0,1

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

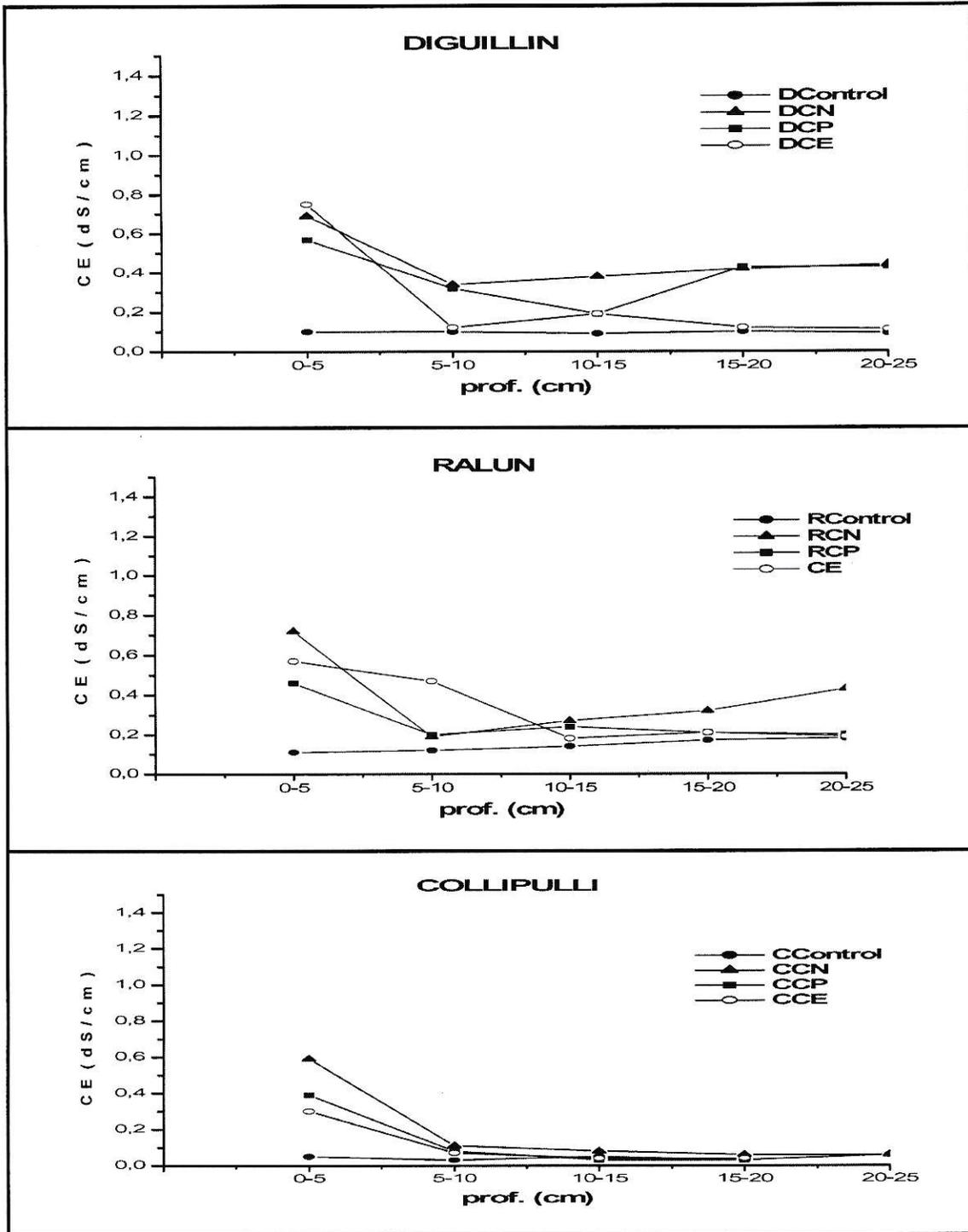


Figura 9: Variación de la Conductividad Eléctrica v/s Profundidad (cm)

(a) Suelo Digullín, (b) Suelo Ralún y (c) Suelo Collipulli

En la Figura 9 (a), (b) y (c), se observa que la conductividad eléctrica aumenta al adicionar las cenizas. Las cenizas, poseen una conductividad eléctrica mayor en comparación a los suelos, las que al entrar en contacto con los suelos, de CE más baja, producen un aumento en la salinidad, lo que se traduce en un aumento de conductividad eléctrica. Este comportamiento ocurre debido a la solubilización de iones que hasta ese momento estaban inmovilizados, y pueden ser lavadas fácilmente por el agua. Éste incremento se observa como un drástico cambio en la primera sección (0-5 cm) de cada suelo. En general, se observa una notable disminución de conductividad eléctrica en la sección 5-10 cm, mientras que permanece relativamente constante en el resto de la columna.

Los horizontes superficiales de los suelos presentan valores de conductividad eléctrica bien diferenciados entre los Andisoles y el Ultisol. Los suelos Diguillín y Ralún, registran conductividades mayores a la del suelo Collipulli. La ceniza nativa es la que provoca el mayor impacto, le sigue la ceniza de eucaliptus y por último la ceniza de pino.

Como se mencionó en el caso del pH, los estudios realizados por Mataix (1999) determinaron que la conductividad eléctrica en el suelo aumenta luego de la incorporación de las cenizas, no obstante este aumento decae al pasar el tiempo al igual que el pH.

En los suelos Diguillín y Ralún se observa un aumento de la conductividad eléctrica en niveles más profundos de la columna de suelo en contacto con ceniza nativa, lo que se puede atribuir a la solubilidad de las sales, las que pueden ser lavadas por el agua y ser transportadas a niveles más profundos.

4.2.3. MODIFICACIONES EN LA MATERIA ORGÁNICA:

Para determinar el contenido de carbono orgánico se utilizó el método de Walkey y Black descrito anteriormente. Los valores de % de carbono orgánico (%CO) obtenidos para las secciones en estudio de los horizontes superficiales de los tres suelos estudiados, se encuentran en la Tabla 7, en la figura 10 (a) - (c).

Tabla 7: Valores de % de carbono orgánico para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas

Porcentaje de Carbono Orgánico												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN (%)				SUELO COLLIPULLI (%)			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	6,5	5,9	5,6	5,1	5,3	4,3	3,3	3,7	2,3	2,1	2,1	2,0
5-10	6,5	6,9	6,3	5,5	5,3	4,4	4,7	4,7	2,2	2,4	2,4	2,4
10-15	6,5	6,8	6,4	6,3	5,3	5,1	5,7	5,0	2,2	2,3	2,3	2,5
15-20	6,4	6,6	6,8	6,4	5,3	5,3	6,0	5,3	2,2	2,3	2,3	2,5
20-25	6,5	6,3	6,7	6,6	5,2	4,8	5,1	5,3	2,1	2,2	2,3	2,4

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

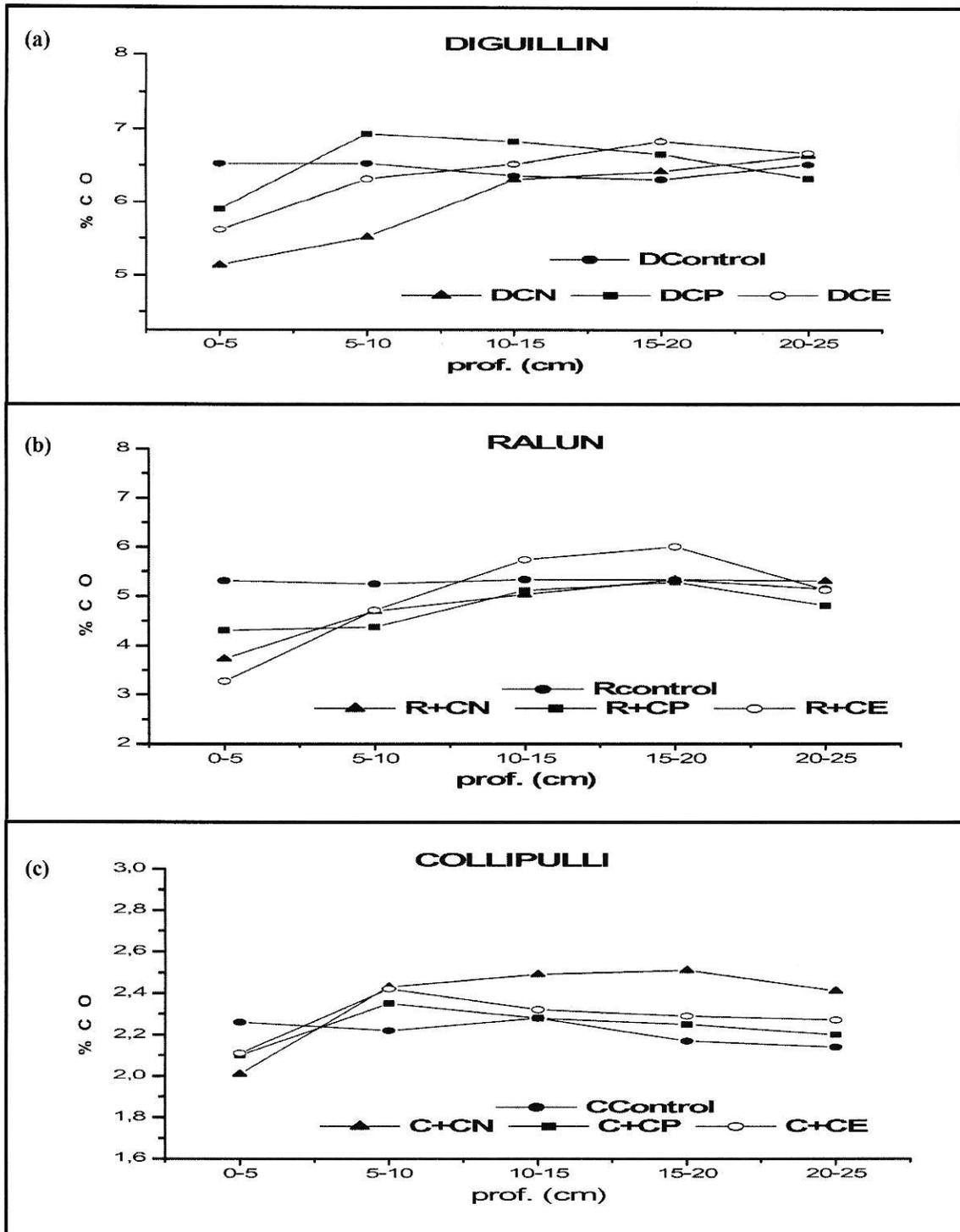


Figura 10: Variación del % CO v/s Profundidad (cm)

(a) Suelo Digullín, (b) Suelo Ralún y (c) Suelo Collipulli

La Figura 10 (a), (b) y (c) indica que, en general, los suelos registran una disminución del %CO en los primeros 5 cm de profundidad de las columnas, respecto a los suelos control, lo que es justificado por la presencia de las cenizas, las que prácticamente no presentan materia orgánica debido a que las altas temperaturas alcanzadas en la quema provocan la destrucción de la MO, lo que se traduce en un aumento del pH, como se puede observar en los datos entregados.

Los valores en el %CO se diferencian entre los suelos Andisoles y el suelo Ultisol estudiados. Los primeros al ser suelos jóvenes poseen un mayor contenido de CO que el suelo Ultisol, que es más antiguo y degradado.

Una vez que los suelos entran en contacto con las cenizas se observa que la disminución del %CO es más acentuada en los suelos Diguillín y Ralún, porque éstos poseen más MO que el suelo Collipulli, por lo tanto, la diferencia entre el control y suelo con ceniza es mayor.

A medida que se observan las secciones más profundas de las columnas se observa un aumento gradual del contenido de carbono orgánico incluso superando al valor del suelo control. Este fenómeno se puede atribuir al aumento de pH, ya que éste provoca la disolución de parte de la materia orgánica, la que puede acumularse en capas más profundas del perfil del suelo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Mataix (1999), Maycotte y col. (2002) y por Escudey y col. (2003).

Resulta importante mencionar que la quema de ramas y hojas secas utilizadas para la obtención de las cenizas no se realizó sobre las columnas de las muestras de suelo, por lo tanto, éstos no fueron afectados por la temperatura.

Las muestras de suelo con ceniza nativa son las que, en general, registran las mayores diferencias en el %CO, ya que éstas son las que tienen menos contenido de CO. La muestra de suelo **Diguillín** con ceniza nativa es la que presenta la mayor disminución en el contenido de carbono orgánico en los primeros 5 cm, luego aumenta gradualmente hasta llegar a igualar al control en la sección de 10 a 15 cm de profundidad de la columna y se mantiene relativamente constante hasta el final de la columna.

Para el suelo **Ralún** la disminución más acentuada la obtuvo el suelo en presencia de ceniza de eucaliptus en los primeros 5 cm y se observa una acumulación de materia orgánica en la tercera y cuarta sección de la columna.

El suelo **Collipulli** registra su mayor descenso en presencia de ceniza nativa en la primera sección, ya en la segunda sección de la columna se observa una acumulación de materia orgánica en el caso de las tres cenizas utilizadas, no obstante, estos valores vuelven a decaer hasta llegar a valores más bajos que el control, a excepción del suelo en contacto de ceniza nativa.

4.2.4. MODIFICACIONES EN EL CONTENIDO DE BASES DE INTERCAMBIO (SODIO, POTASIO, CALCIO Y MAGNESIO)

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada base intercambiable.

A. SODIO

Los valores de concentración de Na^+ en $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ obtenidos para todas las secciones en estudio de los horizontes superficiales de los suelos estudiados, se encuentran en la Tabla 8, mientras que el comportamiento de dicho catión se encuentra ilustrado en las Figuras 11-13.

Tabla 8: Concentración de Sodio ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas.

SODIO ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	0,03	0,19	0,36	0,43	0,01	0,16	0,13	0,58	0,00	0,13	0,09	0,62
5-10	0,04	0,11	0,11	0,25	0,00	0,10	0,14	0,32	0,01	0,08	0,07	0,15
10-15	0,03	0,10	0,26	0,18	0,00	0,14	0,23	0,26	0,01	0,06	0,05	0,10
15-20	0,02	0,08	0,14	0,12	0,00	0,09	0,21	0,26	0,02	0,16	0,07	0,08
20-25	0,01	0,09	0,09	0,00	0,01	0,11	0,03	0,20	0,02	0,07	0,05	0,11

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

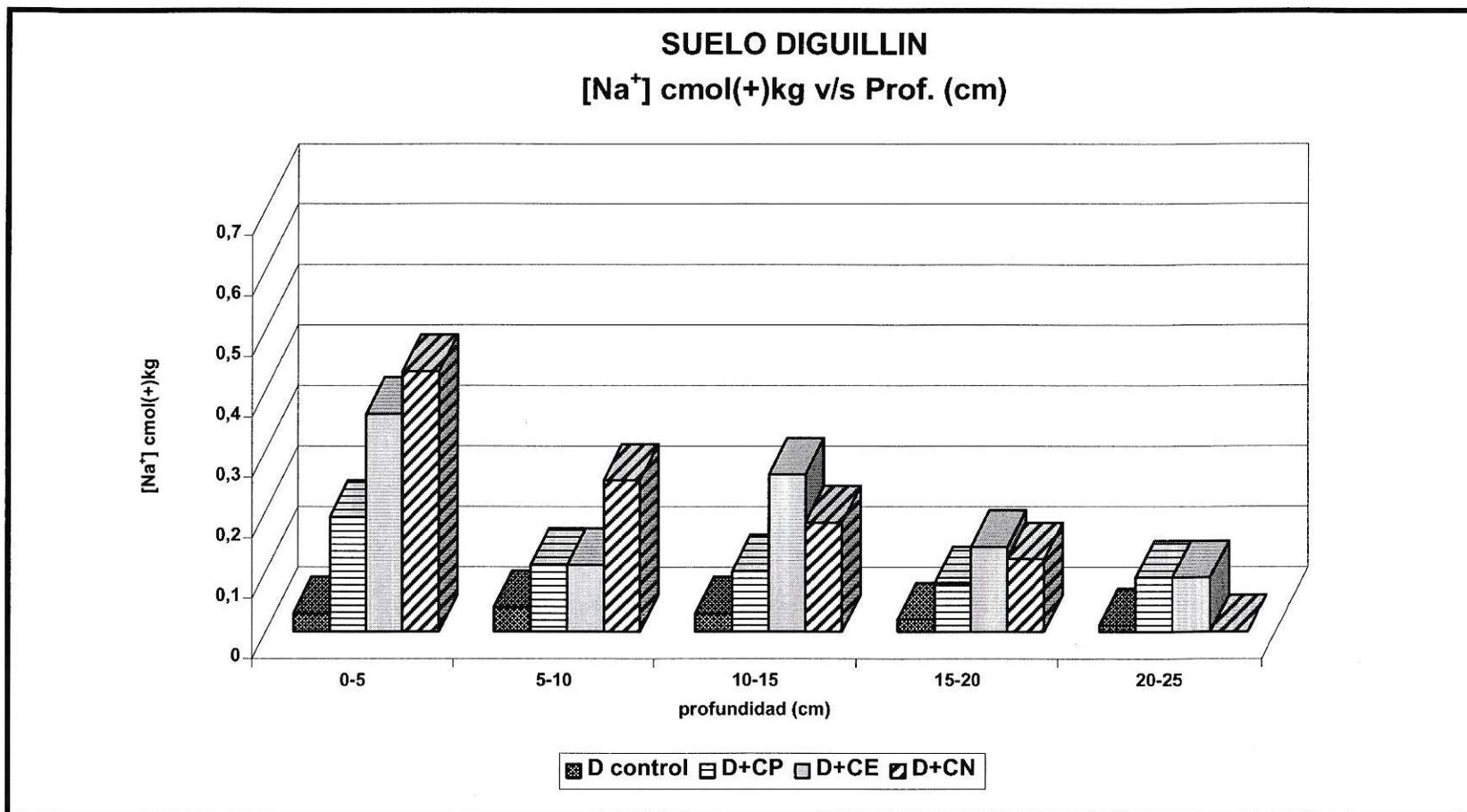


Figura 11: [Na⁺] cmol(+)/kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

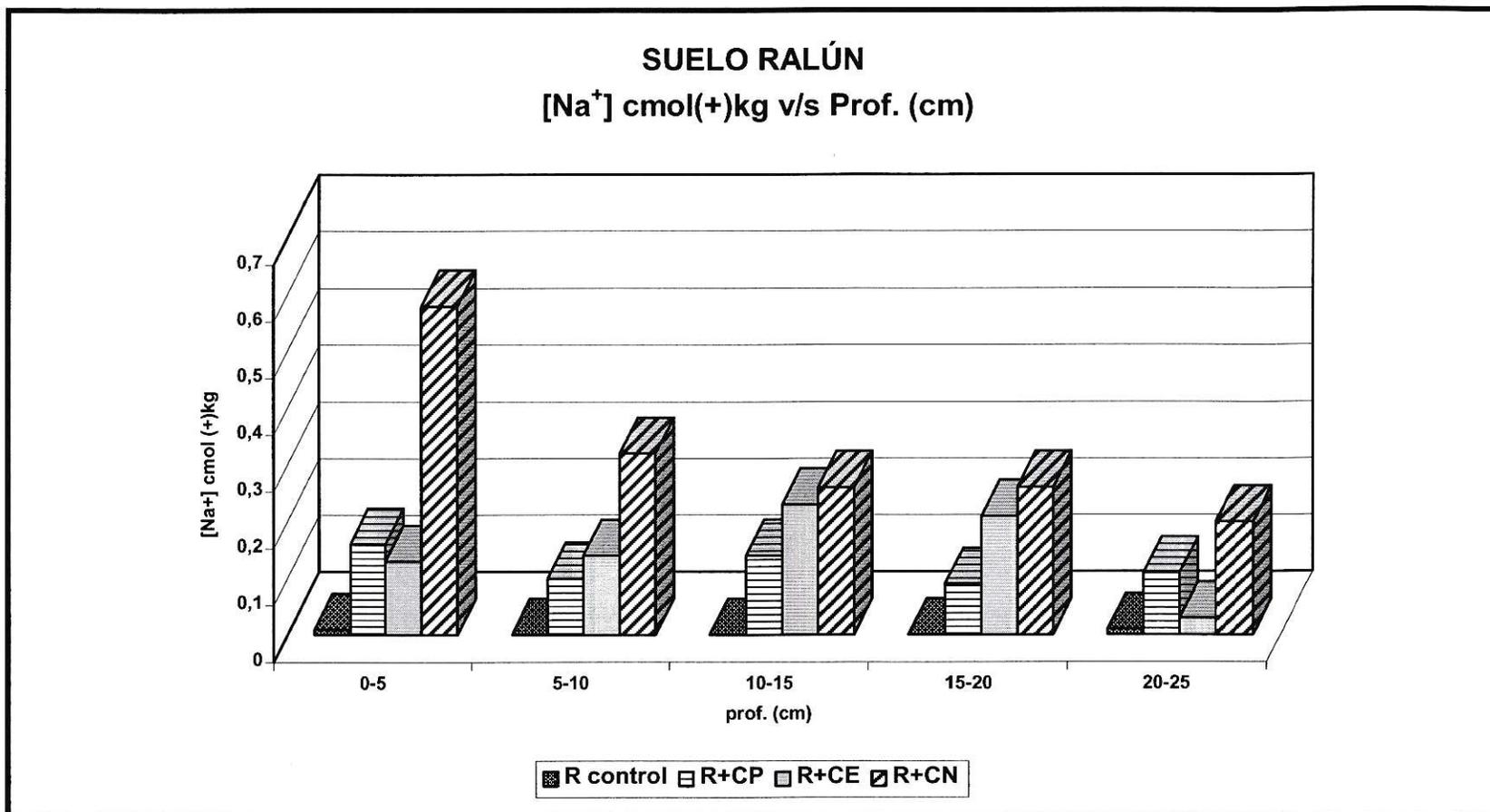


Figura 12: $[Na^+]$ cmol(+)Kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

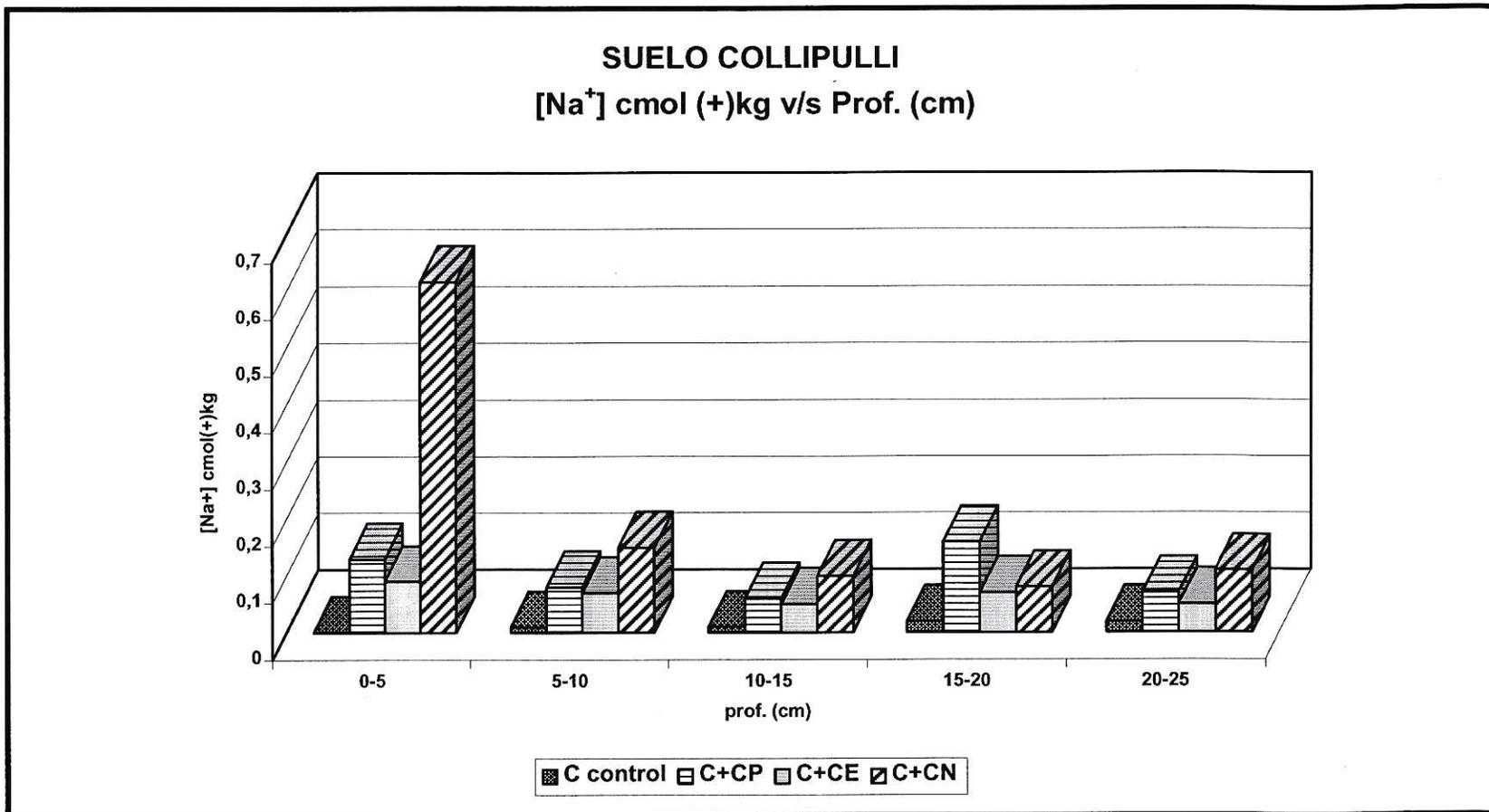


Figura 13: [Na⁺] cmol(+)/kg⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm)

No se observan diferencias entre Andisoles y Ultisol en relación al contenido de sodio en el horizonte superficial del suelo, los tres suelos poseen concentraciones de sodio intercambiable que según la tabla de interpretación de resultados (ver Anexo 3), están dentro de la categoría de muy bajo contenido de Na^+ , y las cenizas en la categoría de muy alto contenido de Na^+ . La ceniza nativa es la que aporta más sodio y consecuentemente es la que provoca el mayor aumento en la concentración de este catión en el suelo, luego viene la ceniza eucaliptus y finalmente, la ceniza pino. Por lo tanto al adicionar la ceniza al suelo se produce un aumento de sodio intercambiable en los suelos, que es más importante en los primeros 5 cm de profundidad de las columnas estudiadas, tal como se observa en las Figuras 11-13. Estudios realizados por Mataix (1999) en suelos con bajo contenido de sodio intercambiable encontraron que tras la incorporación de las cenizas estas concentraciones aumentan, sin mantenerse en el tiempo debido a su rápida lixiviación.

En el suelo **Diguillín**, la ceniza pino tiene un efecto menor que las otras dos cenizas, elevando la concentración de este catión sólo hasta la categoría de bajo, por lo que no presenta un efecto negativo en el suelo. Las cenizas de eucaliptus y nativa elevan las concentraciones de sodio intercambiable hasta llegar a un alto contenido del catión en el suelo.

En el suelo **Ralún**, la ceniza pino tampoco aporta gran cantidad de este catión, a pesar de lo cual el suelo sólo varía de la categoría de muy bajo a bajo contenido de Na^+ . La ceniza eucaliptus registra un efecto mayor en la tercera y cuarta sección, es decir, entre los 10 y 20 cm de profundidad de la columna, donde las concentraciones aumentan a valores medios.

La ceniza nativa nuevamente registra el mayor impacto dejando al suelo en la categoría de muy alto contenido de este catión en el suelo.

En el suelo **Collipulli**, tanto la ceniza pino como la eucaliptus no provocan un efecto sobre la categoría del suelo ya que se mantiene en la categoría de muy bajo contenido de Na^+ . Sin embargo, la ceniza nativa, eleva las concentraciones de sodio intercambiable hasta dejarlo en la categoría de muy alto contenido de este catión en el suelo, en la primera fracción de la columna..

Los resultados indican que los tres suelos estudiados se ven más afectados con la ceniza nativa, debido a que contiene los mayores aportes de sodio intercambiable. Afortunadamente el catión sodio es poco retenido por el complejo de cambio y se produce una moderada lixiviación de este elemento, por lo tanto, se puede suponer que en caso de existir un efecto perjudicial, en un corto período de tiempo el sodio en el suelo desaparece producto de su fácil lavado. Además los riesgos de sodicidad en el suelo deben ser analizados considerando la RAS (relación de absorción de sodio), la cual expresa la relación entre los iones de sodio con el calcio y el magnesio en el suelo.

B. POTASIO

Los valores de concentración de K^+ intercambiable en $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ obtenidos para las secciones de los horizontes superficiales de los suelos, son presentados en la Tabla 9, mientras que el comportamiento del catión se encuentra ilustrado en las Figuras 14-16.

Tabla 9: Concentración de Potasio ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas.

POTASIO ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	0,46	4,09	6,26	6,62	0,10	0,97	1,21	4,61	0,12	7,85	5,13	13,69
5-10	0,52	5,85	1,74	5,69	0,09	1,35	1,61	3,67	0,12	5,38	4,12	7,90
10-15	0,54	4,56	4,75	4,21	0,09	2,06	2,65	2,97	0,12	2,91	1,91	3,10
15-20	0,56	3,73	2,54	2,97	0,09	1,78	2,43	2,67	0,13	0,65	0,31	0,72
20-25	0,56	4,14	1,04	3,54	0,10	1,45	1,48	2,45	0,12	0,21	0,15	0,21

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

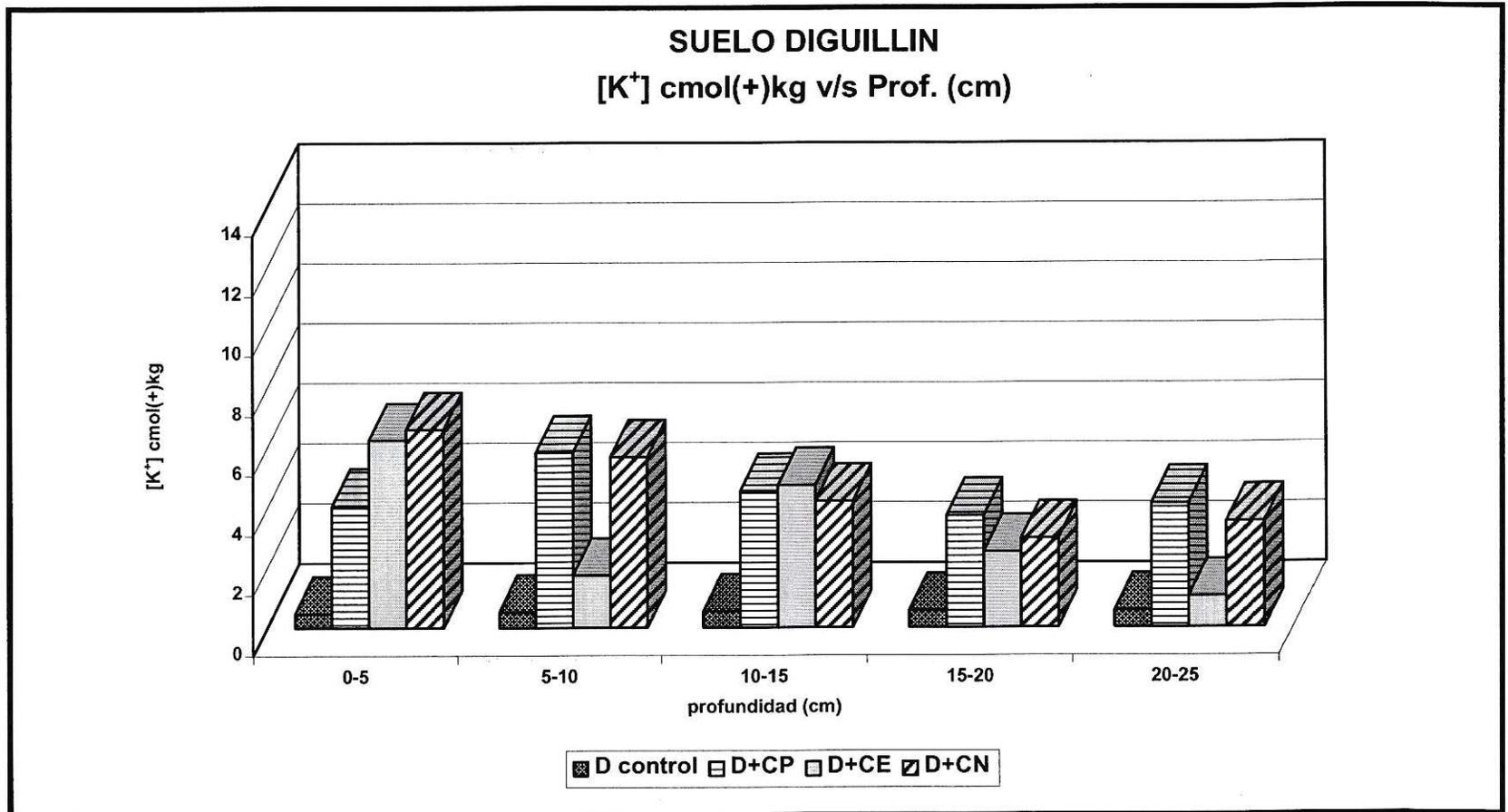


Figura 14: [K⁺] cmol(+)Kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

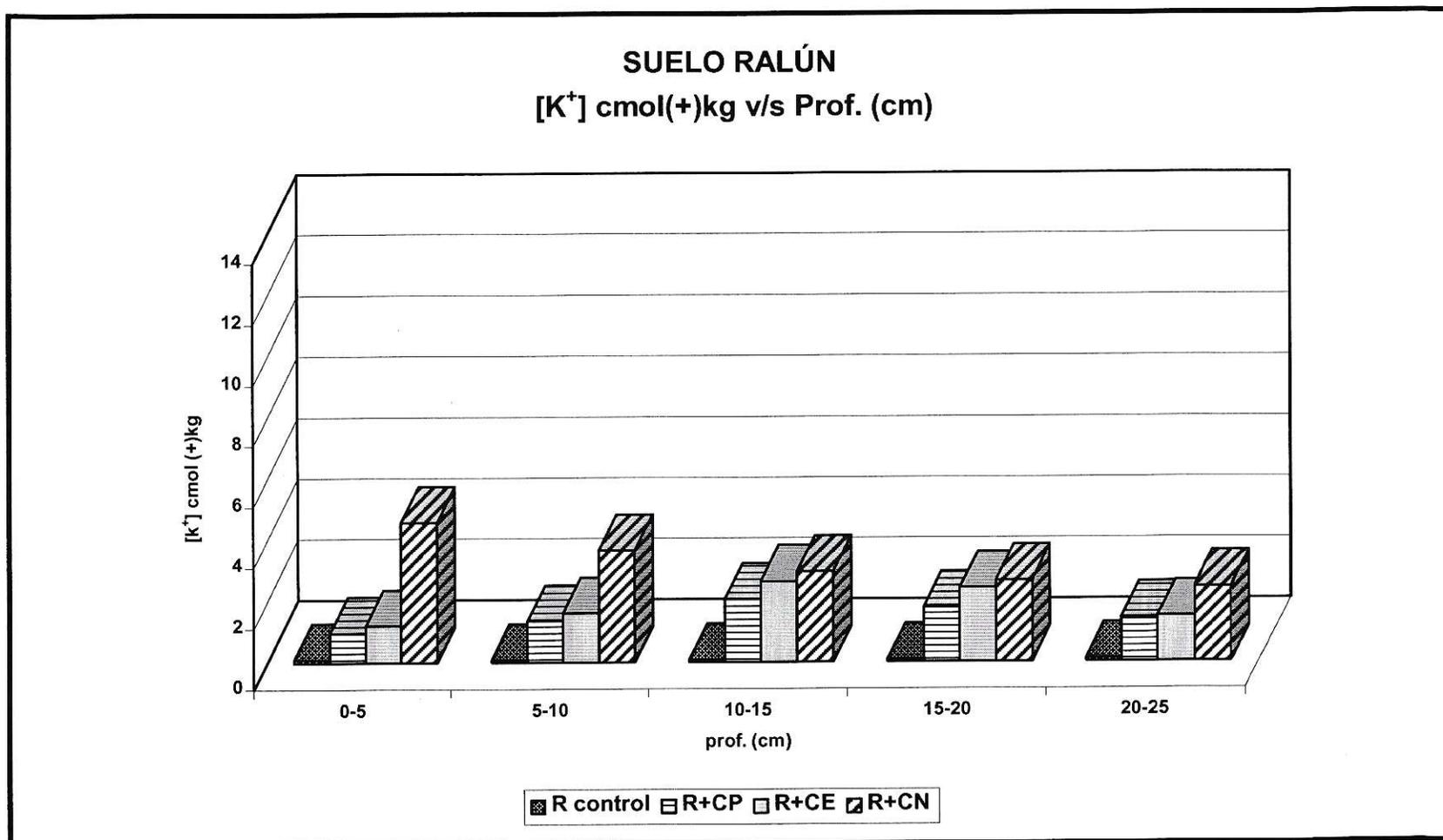


Figura 15: [K⁺] cmol(+)kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

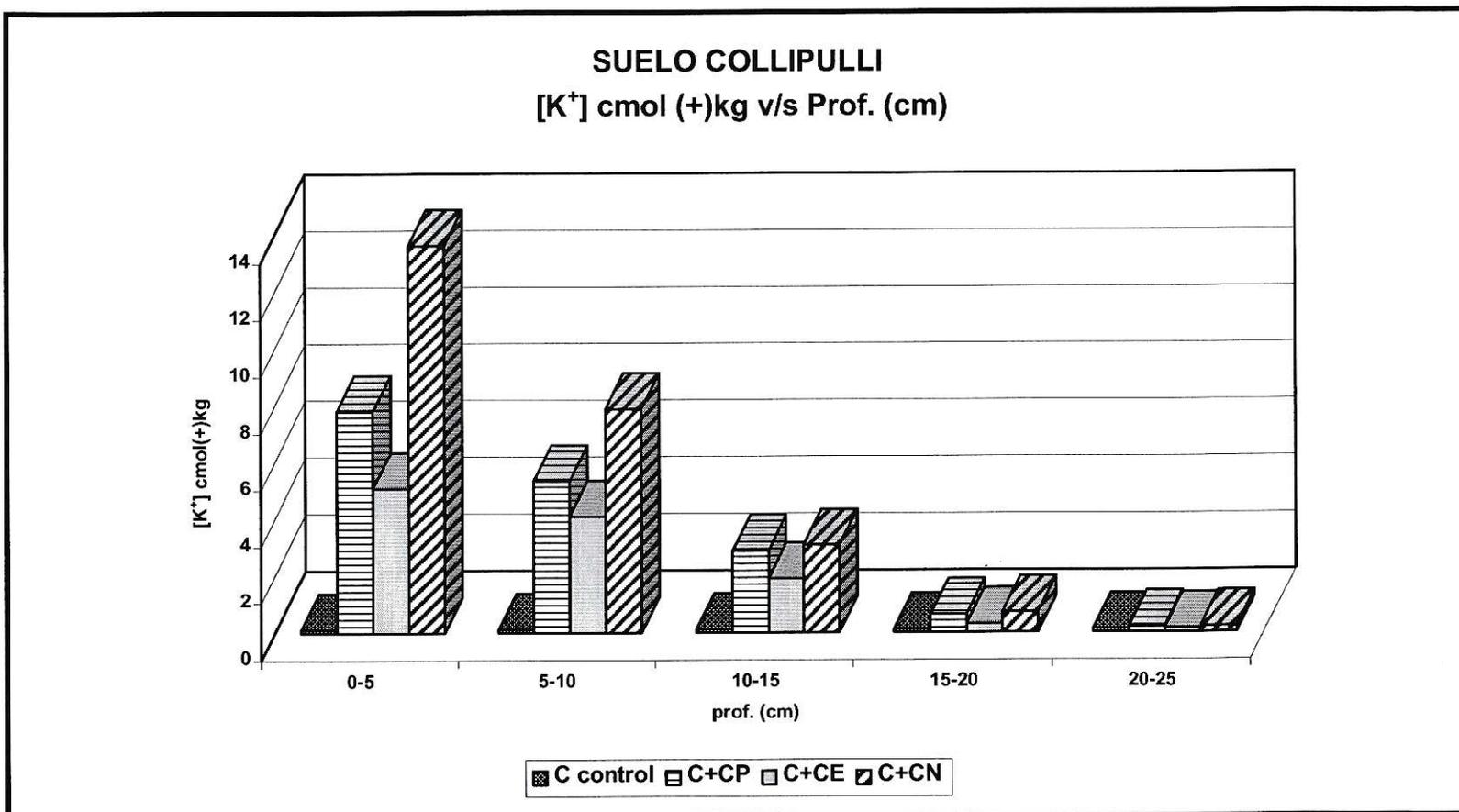


Figura 16: [K⁺] cmol(+) kg^{-1} en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm)

Los resultados indican que el suelo Diguillín posee un alto contenido de potasio intercambiable, mientras que el suelo Ralún y Collipulli presentan deficiencias de este catión. Por otra parte las cenizas presentan un alto contenido de K^+ ya que es muy abundante en los tejidos vegetales. La ceniza nativa es la que aporta más potasio y consecuentemente es la que provoca el mayor aumento en la concentración de este catión en el suelo, luego viene la ceniza pino y finalmente, la ceniza eucaliptus. Por lo tanto, una vez en contacto con el suelo se tiene un aumento de este catión, que finalmente, resulta beneficioso para el crecimiento de las plantas, debido a que es un nutriente esencial para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis. Algunos resultados similares obtuvo Mataix (1999) en análisis realizados a los seis meses de producido el incendio. En estudios realizados a los 11 meses de ocurrido el siniestro, Maycotte y col. (2002), determinó que el catión potasio se reduce en comparación con los suelos no quemados. Por lo tanto se puede suponer, que el aumento del K^+ es temporal.

En el suelo **Diguillín** la concentración de K^+ intercambiable se incrementa a la categoría de muy alto contenido de este catión en el suelo, manteniéndose en esta categoría a lo largo de todas las secciones estudiadas.

En el suelo **Ralún** este incremento es más acentuado, ya que el suelo pasa de la categoría muy bajo a muy alto contenido de K^+ intercambiable en el suelo, y pese a que las concentraciones disminuyen en profundidad siguen estando siempre en niveles muy altos.

En el suelo **Collipulli**, también se registra un notable incremento en las concentraciones, pasando de una categoría de muy bajo a una de muy alto contenido de K^+ intercambiable. Sin embargo, a medida que se avanza en profundidad estos valores van descendiendo y ya en la última sección (20 a 25 cm de profundidad) el suelo presenta bajas concentraciones de este catión.

De los tres suelos es el Collipulli el que retiene mayores concentraciones de K^+ intercambiable, seguido por el Diguillín y por último, el Ralún.

C. CALCIO

Los valores de concentración de Ca^{+2} en $cmol(+)kg^{-1}$ obtenidos para las secciones de los horizontes superficiales de los suelos, se encuentran en la Tabla 10, mientras que el comportamiento de dicho catión se encuentra ilustrado en las Figuras 17-19.

Tabla 10: Concentración de Calcio ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas.

CALCIO ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	6,79	25,5	33,2	32,1	1,03	10,05	14,70	14,10	4,99	9,65	12,75	13,90
5-10	6,40	8,92	9,07	7,37	0,93	1,32	10,85	1,34	5,15	3,15	3,04	2,80
10-15	6,20	8,70	7,81	9,12	0,83	1,10	1,02	0,57	4,91	3,18	3,65	2,95
15-20	6,53	8,87	7,68	6,91	0,84	0,87	0,65	0,56	4,70	3,61	4,09	3,21
20-25	6,57	9,08	9,27	13,0	0,94	1,02	0,60	0,63	4,92	4,01	3,36	3,43

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

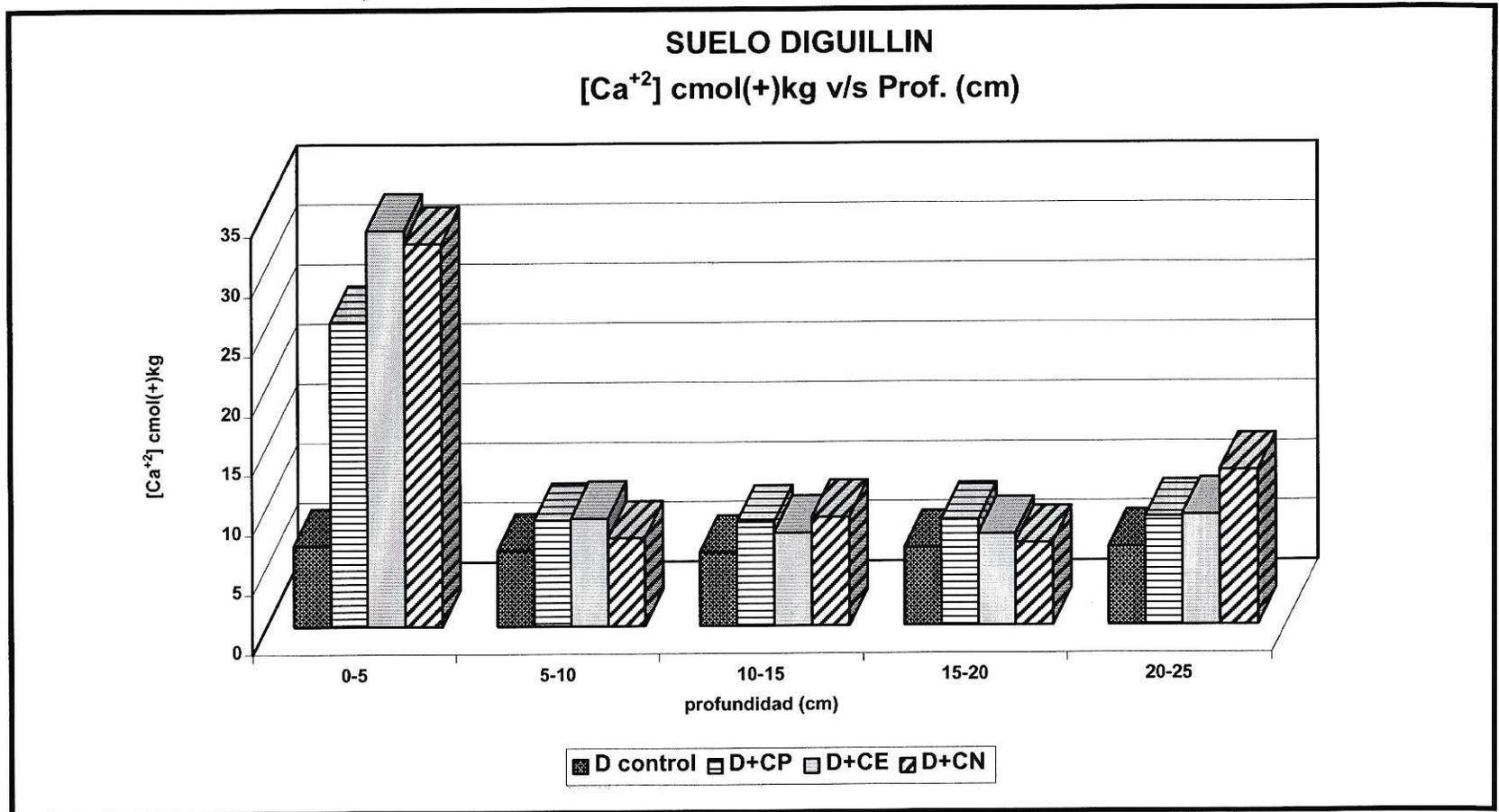


Figura 17: [Ca⁺²] cmol(+)/kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

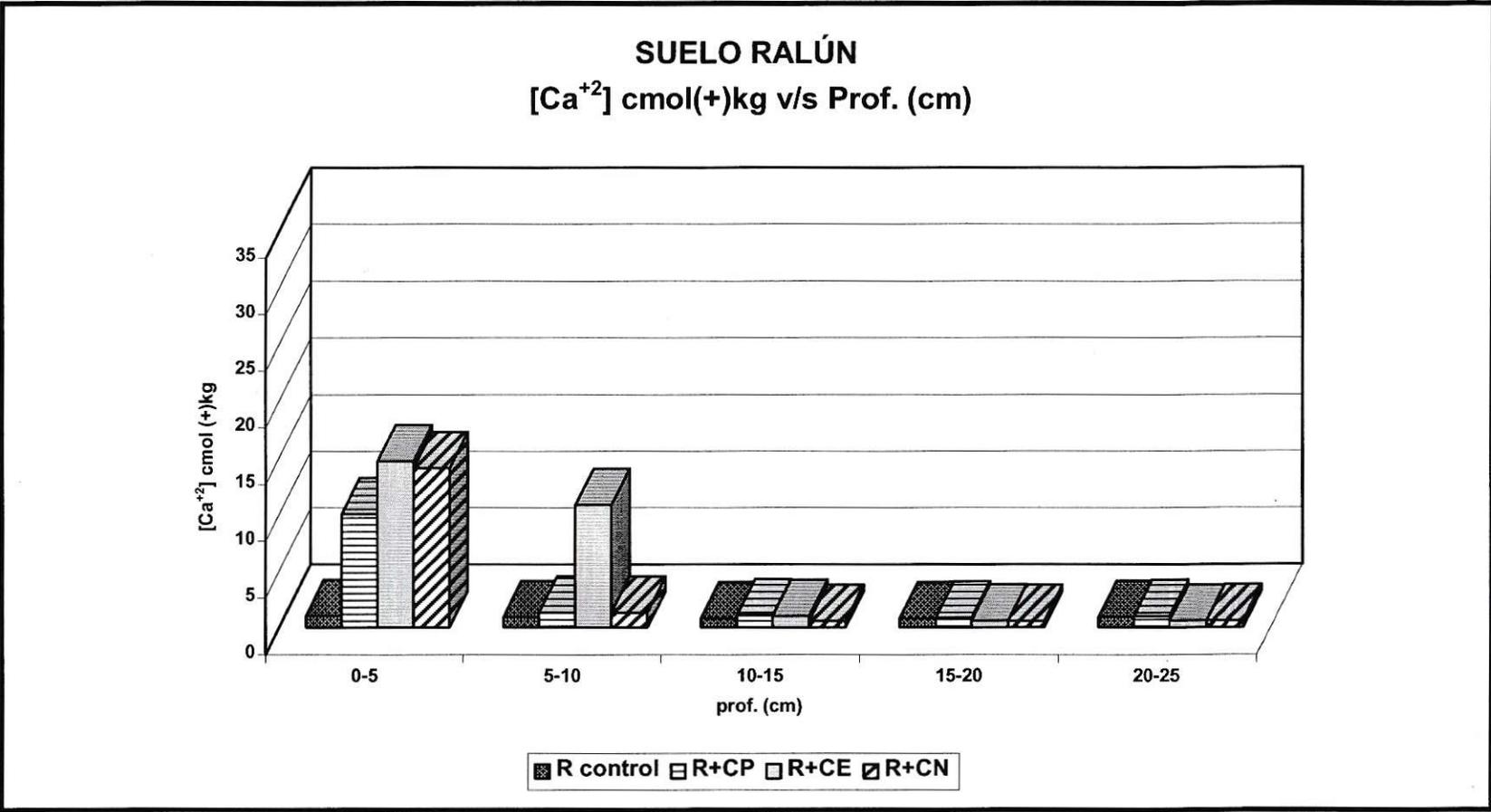


Figura 18: [Ca⁺²] cmol(+)kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

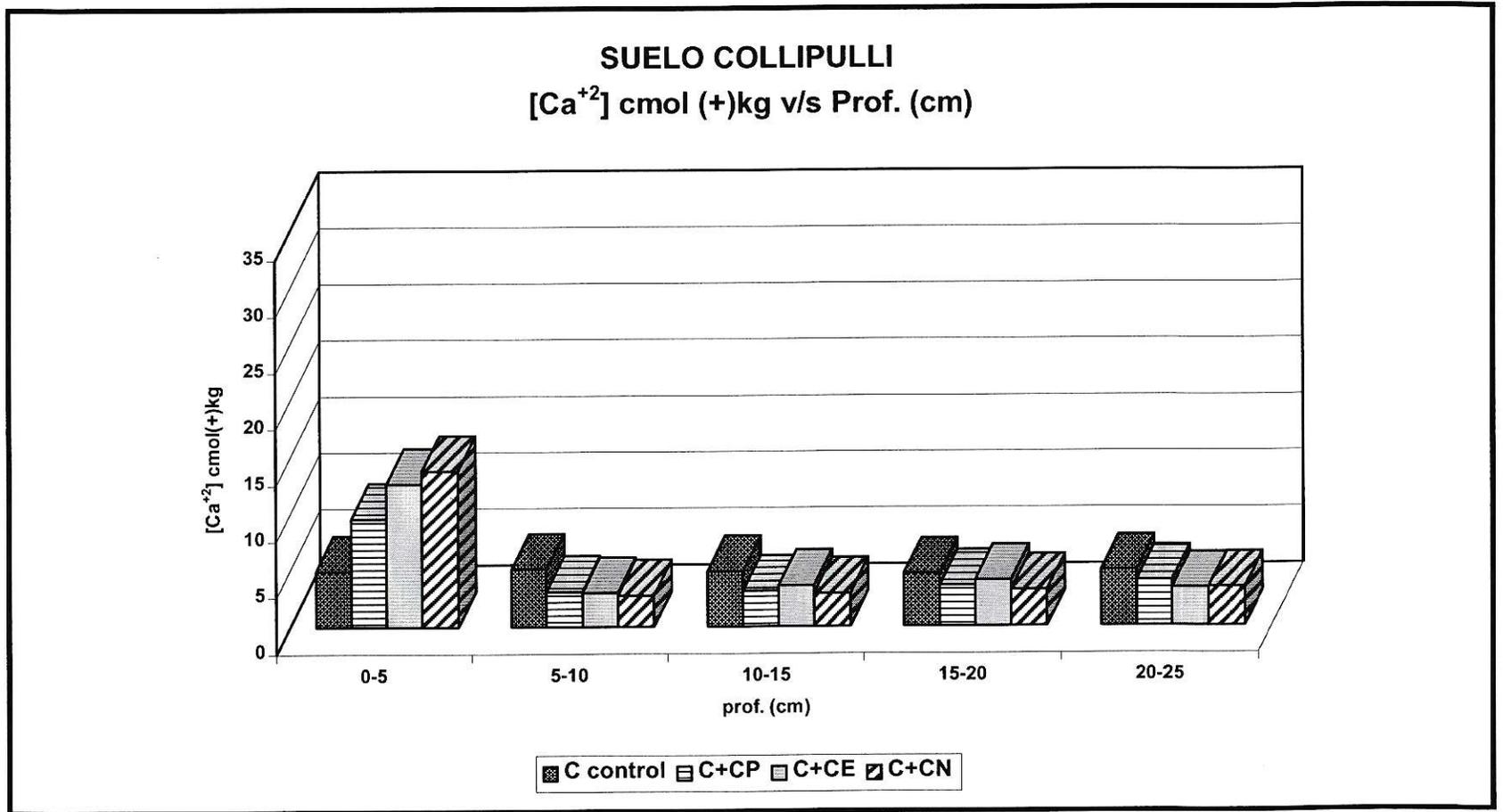


Figura 19: [Ca⁺²] cmol(+)/kg⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm)

En general, en los tres tipos de suelo se observa que la concentración de este catión en el suelo es el más alto en comparación con las otras bases intercambiables, alcanzando los valores más altos en los suelos con cenizas. Esta variación es tremendamente significativa en la primera sección, es decir, en los primeros cinco centímetros de suelo, luego decae registrando valores cercanos al control, probablemente por su fuerte adsorción y baja lixiviación tiende a quedarse en la primera sección. El estudio realizado por Mataix (1999), nombrado anteriormente, determinó que el calcio intercambiable aumenta considerablemente y que éste queda retenido en la parte superficial del suelo. Iglesias (1993) determinó que este catión además de ser el catión mayoritario en todos los perfiles de los suelos estudiados, aumentó tras el incendio, siendo este aumento mayor en superficie, debido al aporte masivo de los restos vegetales quemados y por ser el catión más retenido en el suelo.

La ceniza nativa es la que aporta más calcio, sin embargo al analizar los datos registrados en los suelos, se observa un aumento del contenido de éste catión en contacto con dicha ceniza y es muy similar al observado en el suelo con ceniza eucaliptus.

En el suelo **Diguillín** la concentración de Ca^{+2} intercambiable se incrementa a la categoría de medio a muy alto contenido de este catión en el suelo, descendiendo a lo largo de todas las secciones estudiadas.

En el suelo **Ralún** este incremento es más acentuado, ya que el suelo pasa de la categoría muy bajo a muy alto contenido de Ca^{+2} intercambiable en el suelo, las concentraciones disminuyen en profundidad.

En el suelo **Collipulli**, también se registra un notable incremento en las concentraciones, pasando de una categoría de bajo a una de muy alto contenido de Ca^{+2} intercambiable. Sin embargo, a medida que se avanza en profundidad estos valores van descendiendo.

De los tres suelos es el Diguillín el que retiene mayores concentraciones de Ca^{+2} intercambiable, seguido por el Collipulli y por último, el Ralún.

D. MAGNESIO

Los valores de concentración de Mg^{+2} en $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ obtenidos para las secciones de los horizontes superficiales de los suelos, se encuentran en la Tablas 11, mientras que el comportamiento de dicho catión se encuentra ilustrado en las Figuras 20-22.

Tabla 11: Concentración de Magnesio ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$) para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas.

MAGNESIO ($\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$)												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	0,75	13,36	9,07	9,53	0,00	4,27	5,64	4,46	1,54	4,11	3,16	3,89
5-10	0,74	0,97	1,07	0,54	0,00	1,08	2,93	0,51	1,61	1,11	1,01	0,73
10-15	0,71	0,88	0,97	0,62	0,00	0,22	0,19	0,04	1,53	1,09	1,18	0,93
15-20	0,78	0,98	1,00	0,49	0,00	0,11	0,05	0,04	1,50	1,18	1,28	1,08
20-25	0,80	0,94	1,20	2,16	0,00	0,12	0,03	0,04	1,54	1,28	1,12	1,15

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

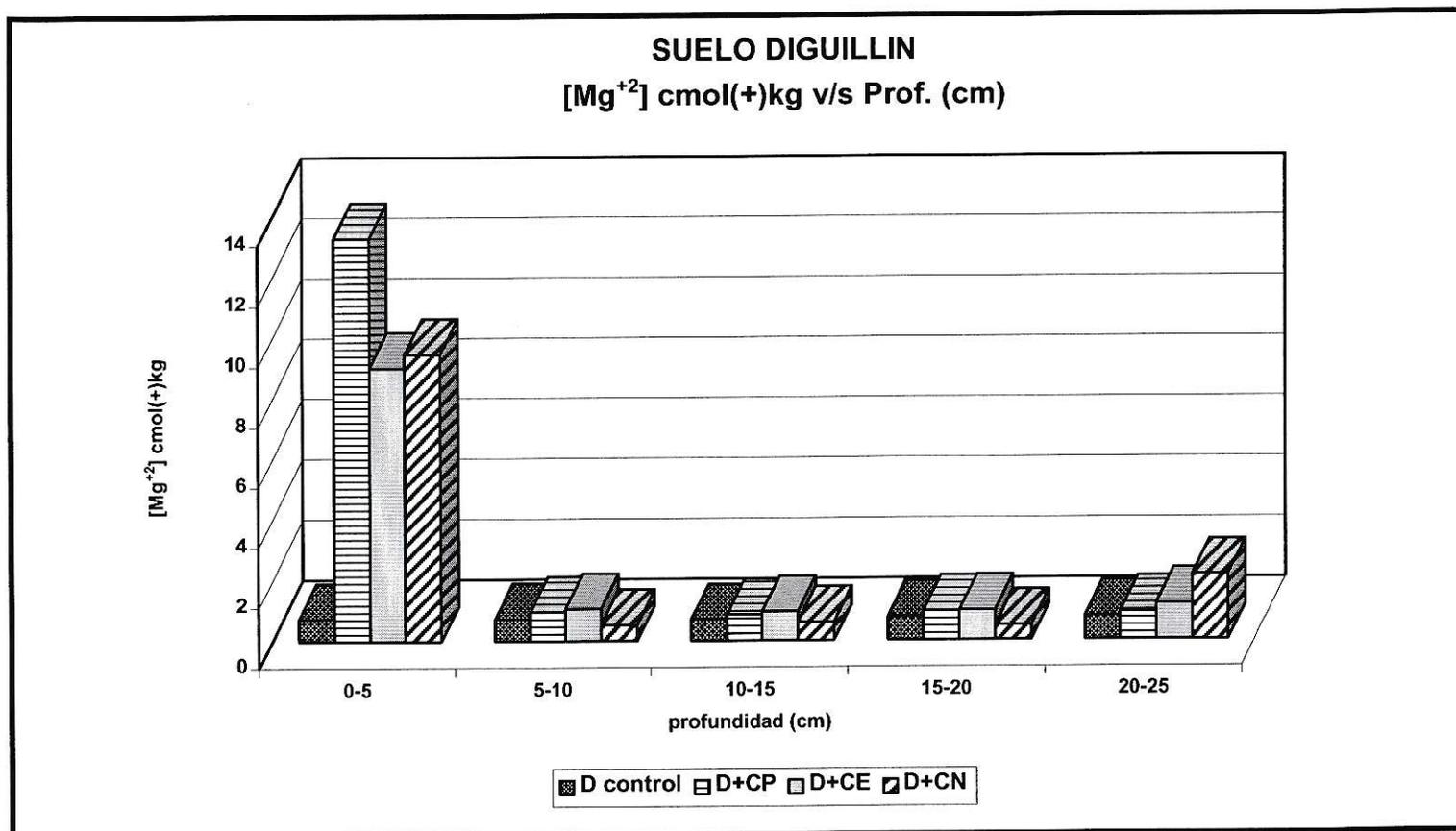


Figura 20: [Mg⁺²] cmol(+)kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

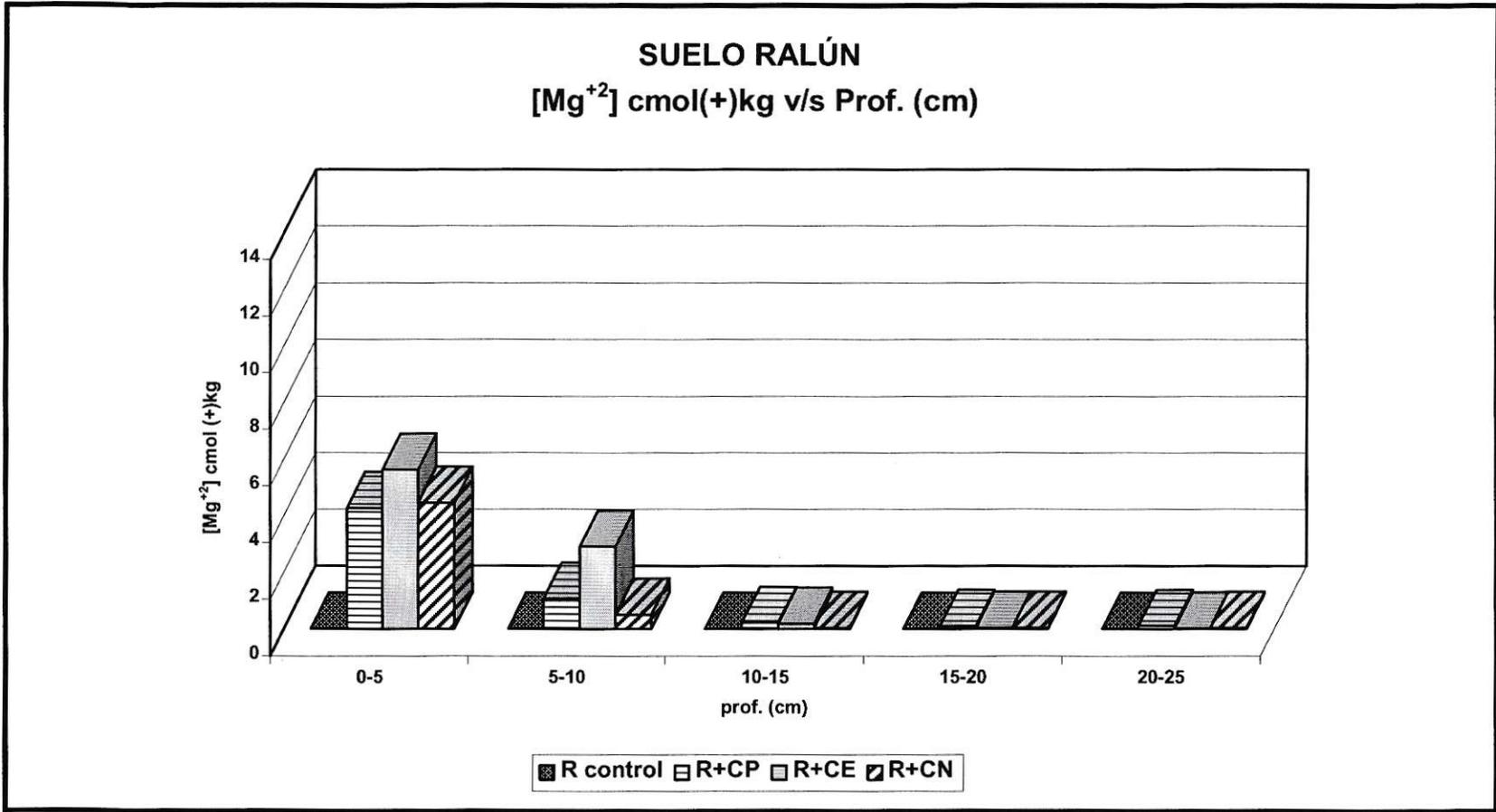


Figura 21: [Mg⁺²] cmol(+)kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

SUELO COLLIPULLI
[Mg⁺²] cmol (+)kg v/s Prof. (cm)

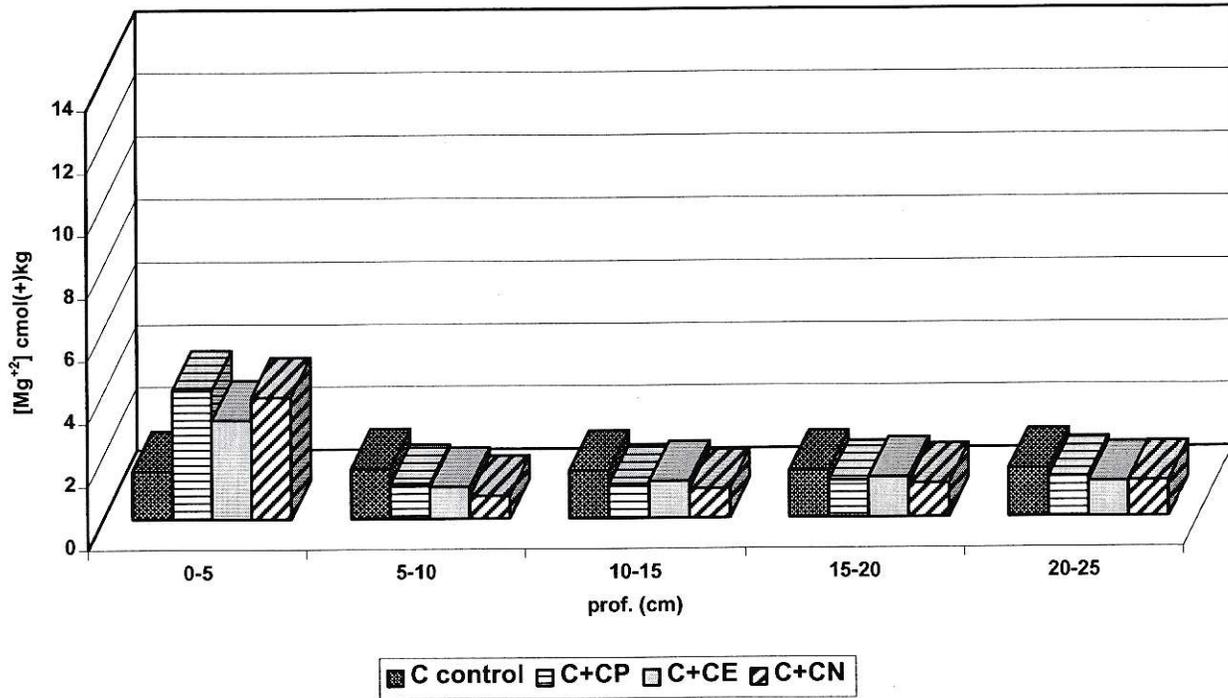


Figura 22: [Mg⁺²] cmol(+)/kg⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm)

En general, en los tres tipos de suelo se observa que la concentración de este catión en la primera sección del suelo es alta en comparación con las otras bases intercambiables, a pesar de no ser tan abundante como el calcio intercambiable. Esta variación es más significativa en la primera sección (es decir, en los primeros cinco centímetros de suelo), para luego decaer a valores cercanos al control, probablemente por su fuerte absorción y baja lixiviación permanece en la primera sección, al igual que el calcio. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Mataix (1999) y por Iglesias (1993).

De los valores registrados en el suelo **Diguillín** se observa que la concentración de esta base intercambiable en el suelo es la segunda más alta en comparación con las otras bases, el mayor aporte de Mg^{+2} al suelo fue por parte de la ceniza pino. El suelo pasa de la categoría media a muy alto contenido de Mg^{+2} intercambiable, quedando más retenido en la primera sección de la columna, luego comienza a decaer su concentración a valores cercanos al control.

En el suelo **Ralún**, el control no presenta concentraciones de Mg^{+2} intercambiable, el mayor aporte de este catión al suelo fue por parte de la ceniza eucaliptus y en general, queda más retenido en la primera sección de la columna, luego comienza a decaer su concentración. El aporte de las cenizas es muy importante para este suelo, porque contribuye al enriquecimiento del suelo en magnesio, el que pasa a la categoría de muy alto contenido del catión en el suelo.

En el suelo **Collipulli** el mayor aporte de Mg^{+2} al suelo fue por parte de la ceniza pino y el Mg^{+2} intercambiable queda más retenido en la primera sección de la columna, al igual que en los otros suelos. Las cenizas elevan el contenido de este catión hasta la categoría de muy alto contenido de magnesio intercambiable y queda retenido en la primera sección de la columna. En el suelo Collipulli el control presenta más Mg que los suelos tratados desde los 5 a 25 cm de profundidad. Este comportamiento es consecuencia del alto aporte de Ca de las cenizas y a una alta selectividad de este suelo por el Ca sobre el Mg. Así, por acción de masas el exceso de Ca produce pérdida de Mg. Este aspecto puede resultar muy importante desde el punto de vista agronómico ya que implica la pérdida de un nutriente fundamental.

De los tres suelos es el Diguillín el que retiene mayores concentraciones de Ca^{+2} intercambiable, seguido por el Collipulli y por último, el Ralún.

En general, se puede decir que las bases intercambiables registran el siguiente orden de sus concentraciones en los suelos: $Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+} > Na^{+}$.

4.2.5. MODIFICACIONES DE ALGUNAS ESPECIES SOLUBLES EN HNO₃ 4M EXTRACCION TOTAL: COBRE, ZINC Y PLOMO.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada metal.

A. COBRE

Los valores de concentración de cobre en mg kg⁻¹ obtenidos para las secciones de los horizontes superficiales de los suelo, se encuentran en la Tabla 12, mientras que el comportamiento de dicho catión se encuentra ilustrado en las Figuras 23-25.

Tabla 12: Concentración de Cobre (mg kg^{-1}) para las secciones de columnas de suelos D, R y C

con y sin tratamiento con cenizas.

COBRE (mg kg^{-1})												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	56	124	118	128	21	157	104	133	94	160	154	168
5-10	58	123	118	120	23	98	105	100	96	162	160	163
10-15	58	120	120	123	18	99	97	101	95	161	158	163
15-20	56	119	115	122	23	99	101	102	95	162	159	162
20-25	56	124	118	128	23	100	101	100	94	162	156	161

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

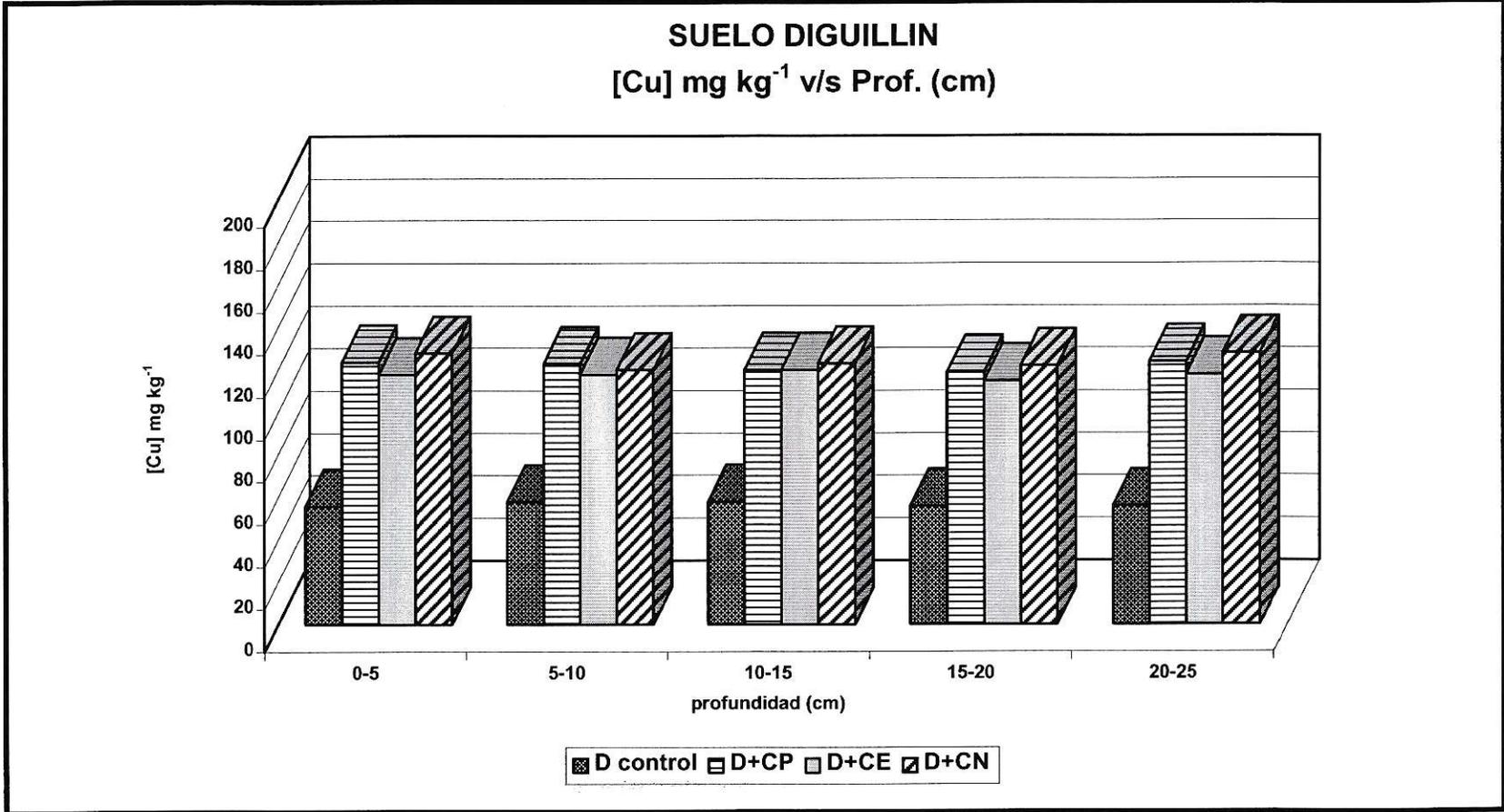


Figura 23: [Cu] mg kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

SUELO RALÚN
[Cu] mg kg⁻¹ v/s Prof. (cm)

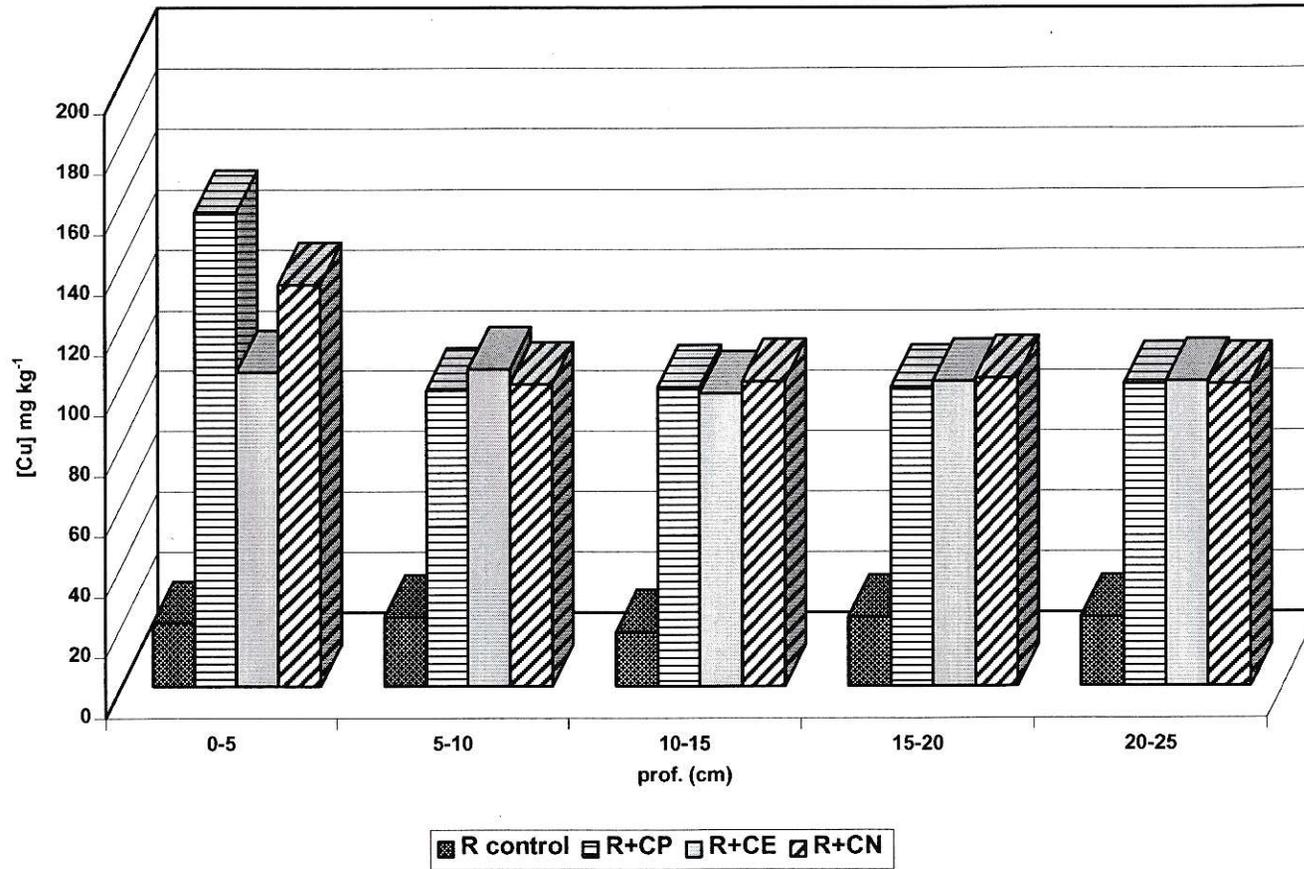


Figura 24: [Cu] mg kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

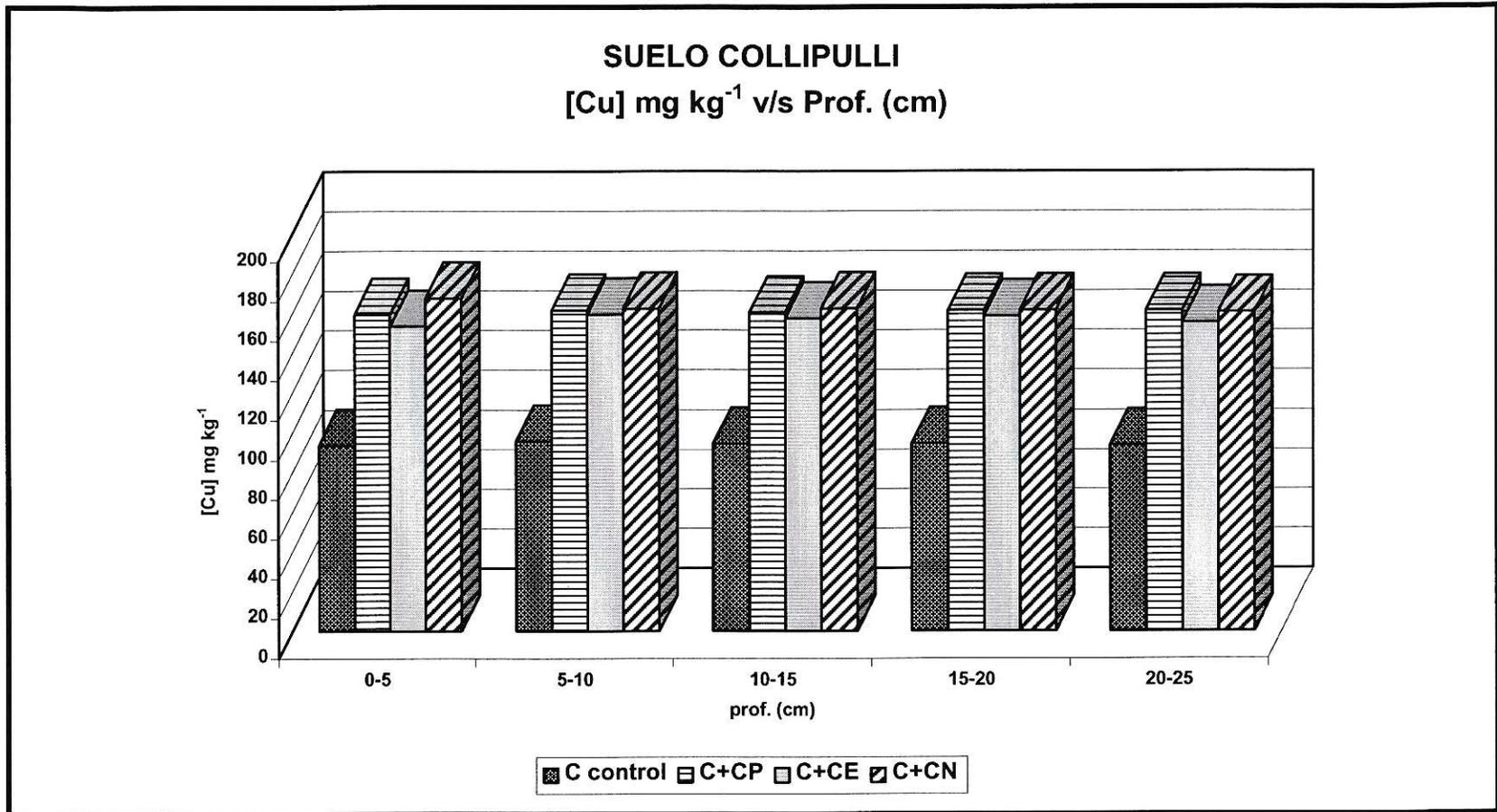


Figura 25: [Cu] mg kg⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm)

El cobre es un elemento que tiende a disminuir en situación de alcalinidad, sin embargo este elemento no se ajusta a una tendencia definida puesto a que es fuertemente adsorbido por la materia orgánica, es por ello, que a pesar del aumento del pH se observa un aumento de este metal en los suelos estudiados. Este aumento registrado en los tres suelos se debe a que el cobre que formaba parte del material vegetal incinerado es acumulado en las cenizas y luego es fuertemente adsorbido por el suelo. Lo que resulta ser perjudicial para los tres suelos, puesto que supera el límite de 100 mg kg^{-1} de Cu en suelos, a partir del cual se considera que se está frente a un contaminante.

De los valores registrados en el suelo **Diguillín** se observa que la concentración de cobre total en el suelo control es aproximadamente la mitad de lo registrado al agregar las cenizas, por lo tanto, el efecto que se tiene tras el incendio es el aumento en la concentración de cobre que se aprecia a lo largo de toda la columna de manera casi constante.

Para el suelo **Ralún** los valores en la concentración de cobre total en el control son más bajos que para el suelo Diguillín, no obstante el efecto de las cenizas es el mismo, se produce un aumento de la concentración de cobre, que es más significativo en los primeros 5 cm de profundidad de la columna y se mantienen altos a lo largo de toda la columna.

En el suelo **Collipulli** los valores de cobre total en el suelo control son los más altos de los tres suelos en estudio y el comportamiento que se tiene tras agregar las cenizas es el mismo que para los dos suelos antes mencionados.

B. ZINC

Los valores de concentración de cobre en mg kg^{-1} obtenidos para las secciones de los horizontes superficiales de los suelos, se encuentran en la Tabla 13, mientras que el comportamiento de dicho catión se encuentra ilustrado en las Figuras 26-28.

Tabla 13: Concentración de Zinc (mg kg^{-1}) para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas.

ZINC (mg kg^{-1})												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	162	135	156	172	228	199	119	324	69	158	124	180
5-10	165	142	199	138	230	145	179	150	69	157	150	120
10-15	163	151	139	140	231	147	166	141	68	134	141	129
15-20	163	119	178	131	230	153	183	135	68	131	125	133
20-25	163	149	160	151	233	153	149	147	69	129	172	137

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

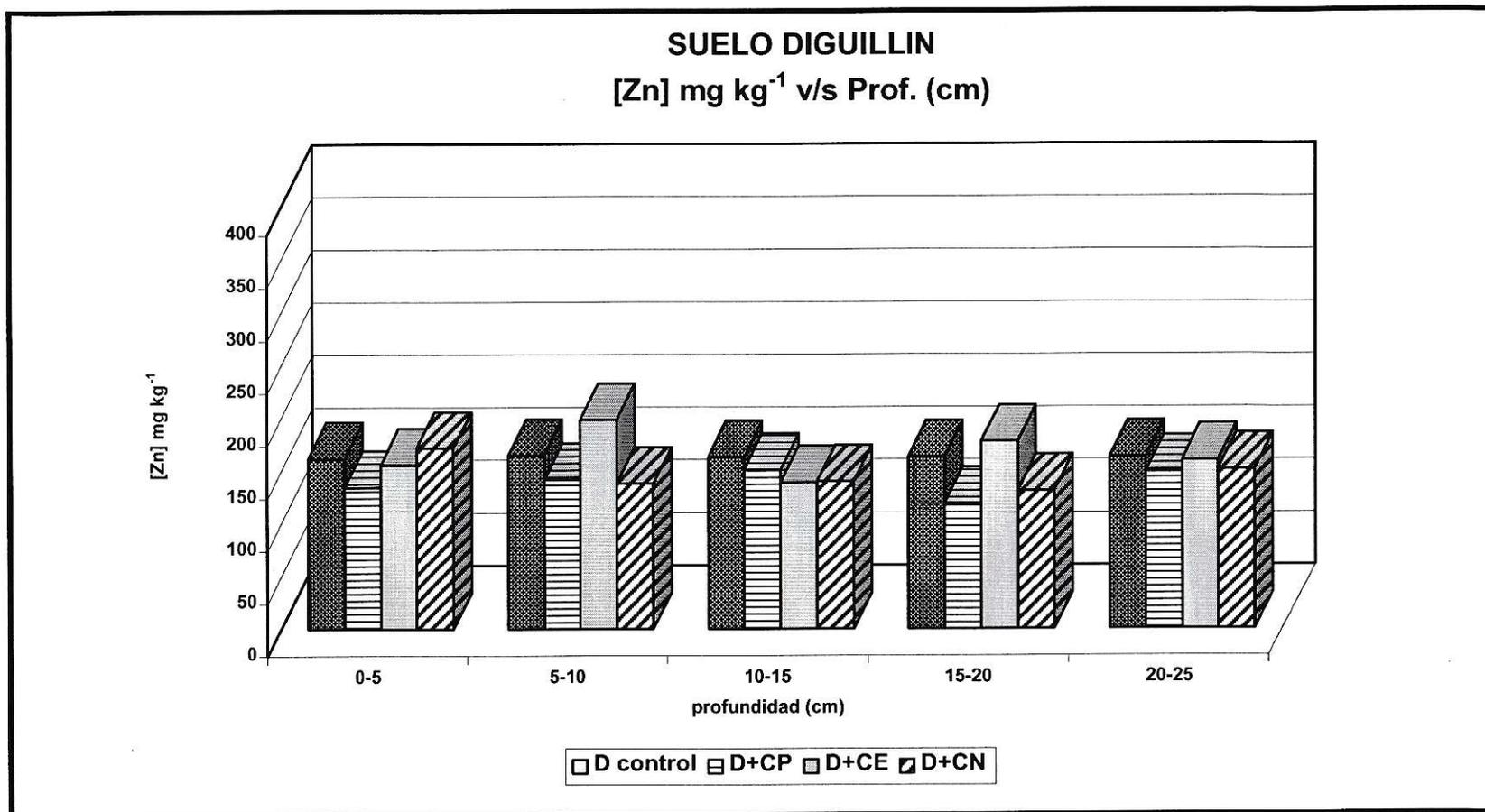


Figura 26: [Zn] mg kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

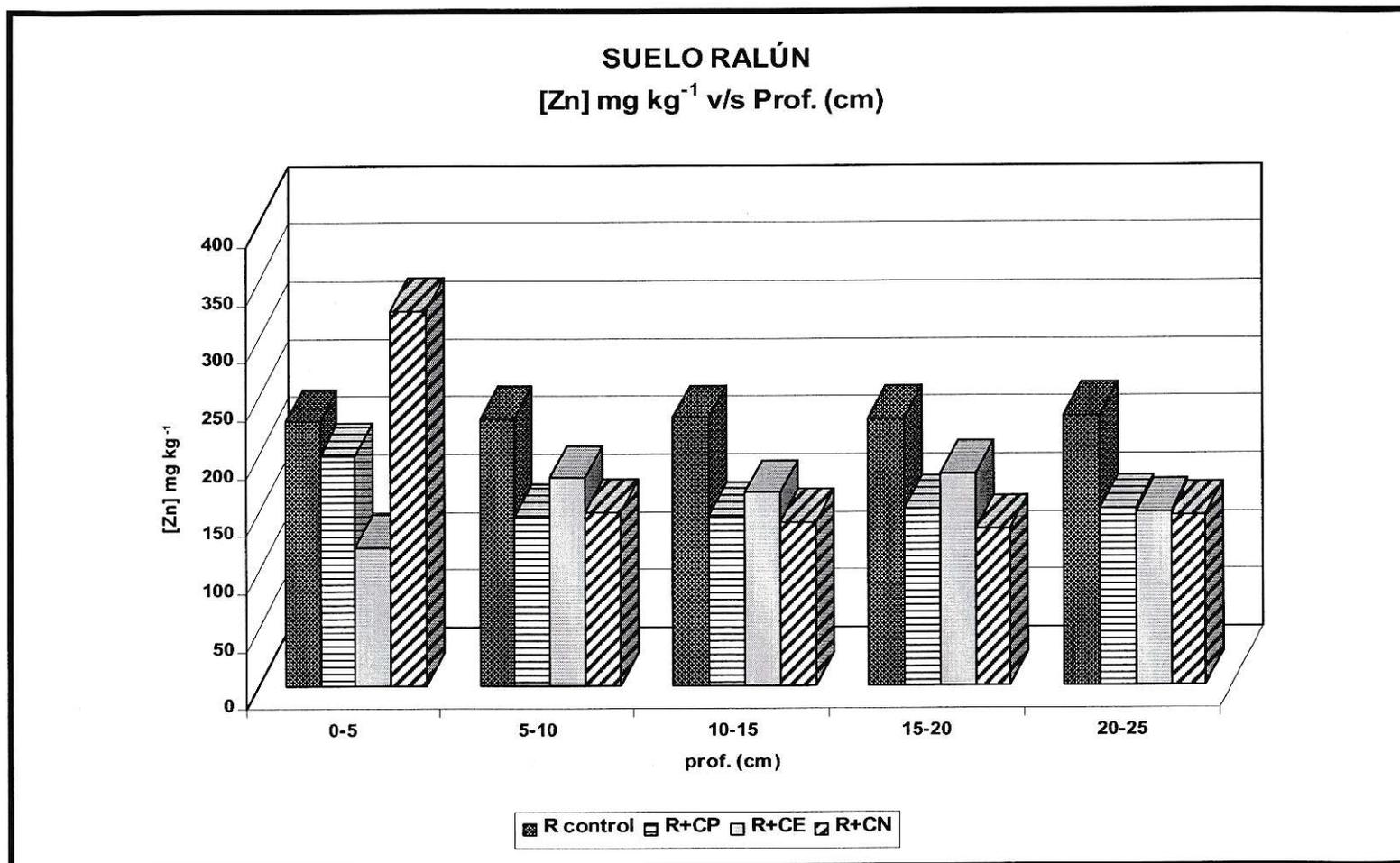


Figura 27: [Zn] mg kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

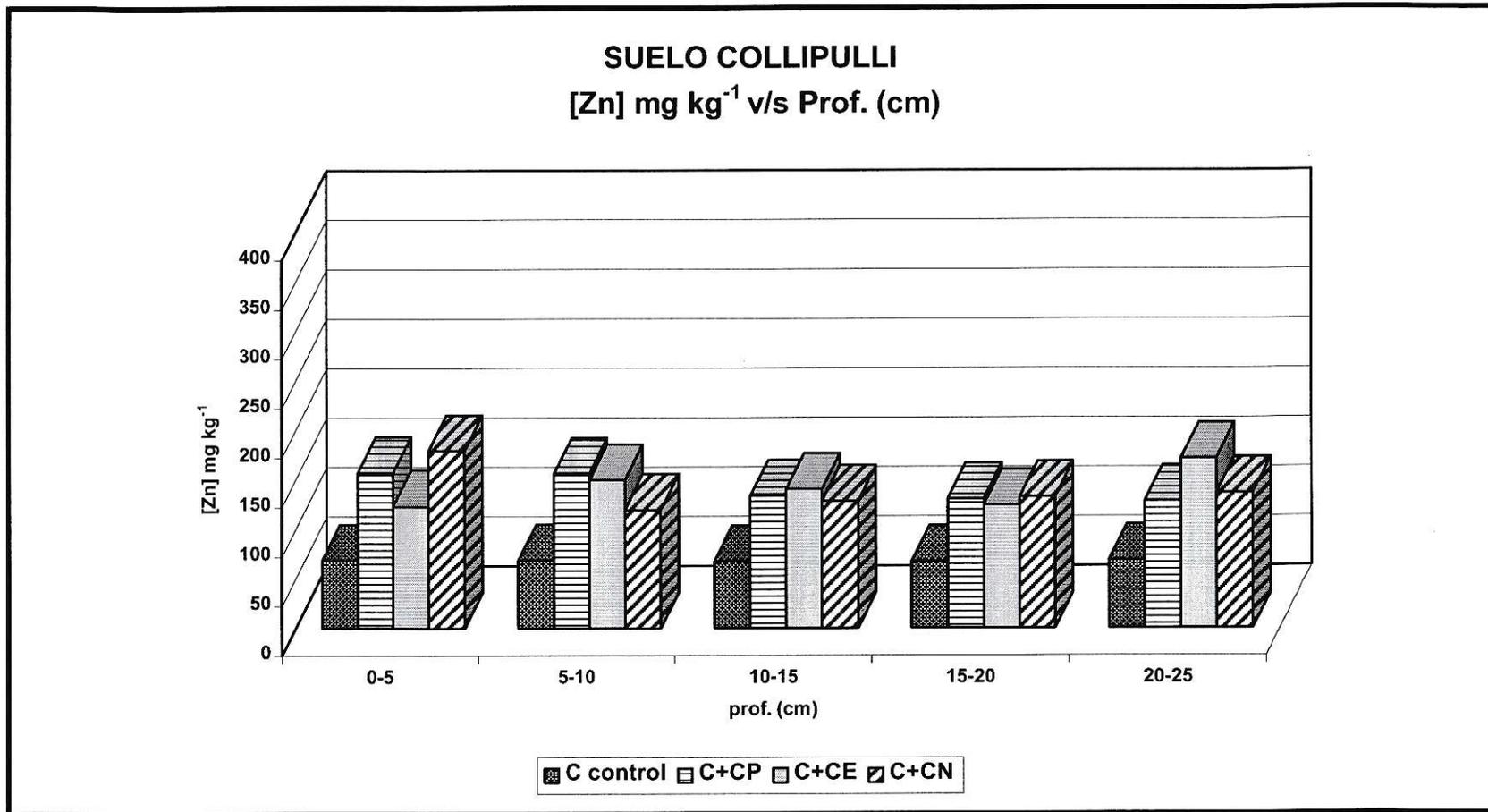


Figura 28: [Zn] mg kg⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad

Los suelos Andisoles presentan mayores concentraciones de zinc que el suelo Ultisol puesto que, el contenido de zinc en los suelos se encuentra fuertemente relacionado con la fracción orgánica (Alloway, 1990) y el suelo Collipulli es el suelo con menor contenido de zinc. Una vez que se agregan las cenizas, se produce la alcalinización del suelo y con ello, se observa, en general, una disminución del zinc en el suelo Diguillín y Ralún, a excepción de los suelos en contacto con ceniza nativa, puesto que esta ceniza registra un valor considerablemente mayor en su contenido de zinc que el que registran los suelos. Además en el suelo Collipulli ocurre un aumento de este micronutriente, luego de agregar las cenizas, el cual se observa a lo largo de todas las columnas.

De los valores registrados en el suelo **Diguillín** se observa que la concentración de zinc total en el suelo control es mayor a lo registrado al agregar las cenizas, salvo en el caso de la ceniza nativa, que es la contiene más Zn, al igual que el suelo **Ralún** en los primeros 5 cm de profundidad de las columnas. En el suelo **Collipulli** se observa lo contrario de lo ocurrido en los dos suelos Andisoles, en este suelo se observa un aumento en las concentraciones de zinc a lo largo de toda la columna, debido a que las tres cenizas registraron valores de zinc más altos que el suelo control..

C. PLOMO

Los valores de concentración de plomo en mg kg^{-1} obtenidos para todas las secciones en estudio de los tres tipos de suelo, se encuentran en la Tabla 14, mientras que el comportamiento de dicho catión se encuentra ilustrado en las figuras 29-31.

Tabla 14: Concentración de Plomo (mg kg^{-1}) para las secciones de columnas de suelos D, R y C con y sin tratamiento con cenizas.

PLOMO (mg kg^{-1})												
Muestra	SUELO DIGULLIN				SUELO RALUN				SUELO COLLIPULLI			
Prof. (cm)	Dcontrol	D+CP	D+CE	D+CN	Rcontrol	R+CP	R+CE	R+CN	Ccontrol	C+CP	C+CE	C+CN
0-5	0	0	6	0	0	0	19	0	0	0	4	4
5-10	0	7	7	7	0	0	7	0	0	0	0	0
10-15	0	0	13	0	0	0	0	6	0	0	0	0
15-20	0	12	15	7	0	3	10	0	0	2	1	6
20-25	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	6

D: Diguillín, C: Collipulli, R: Ralún, CP: ceniza de pino, CE: ceniza de eucaliptus, CN: ceniza de bosque nativo

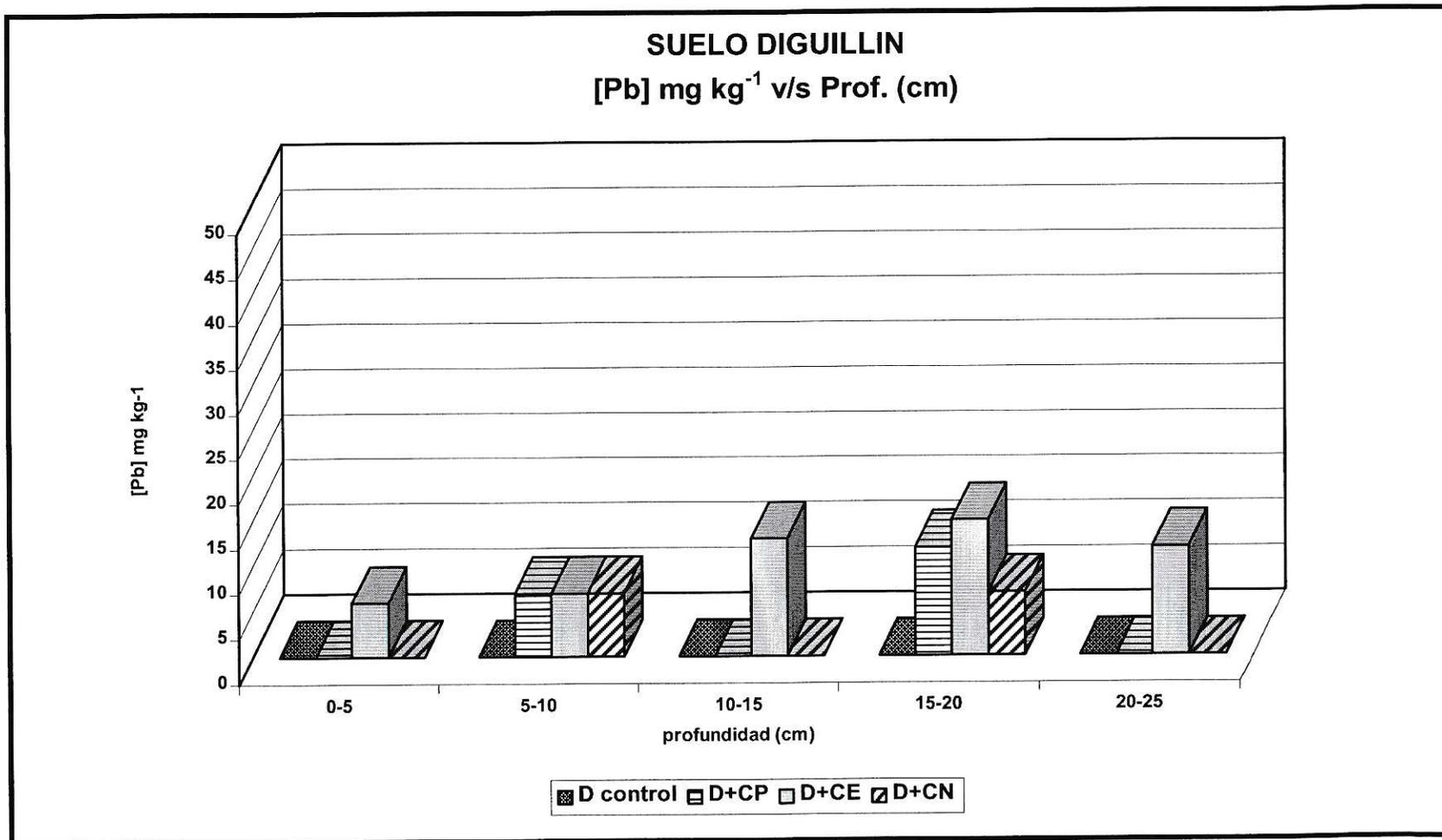


Figura 29: [Pb] mg kg⁻¹ en el suelo Diguillín v/s Profundidad (cm)

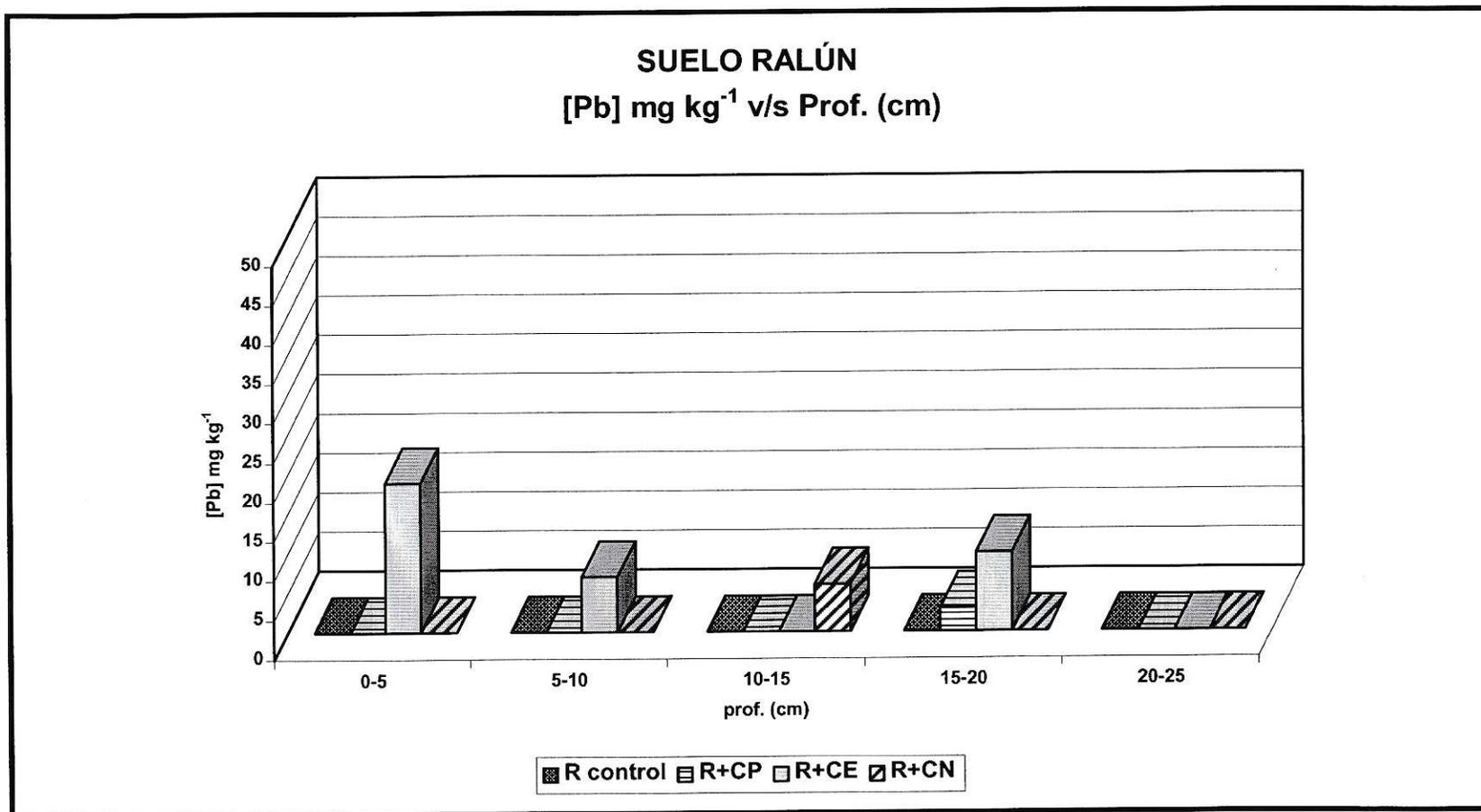


Figura 30: [Pb] mg kg⁻¹ en el suelo Ralún v/s Profundidad (cm)

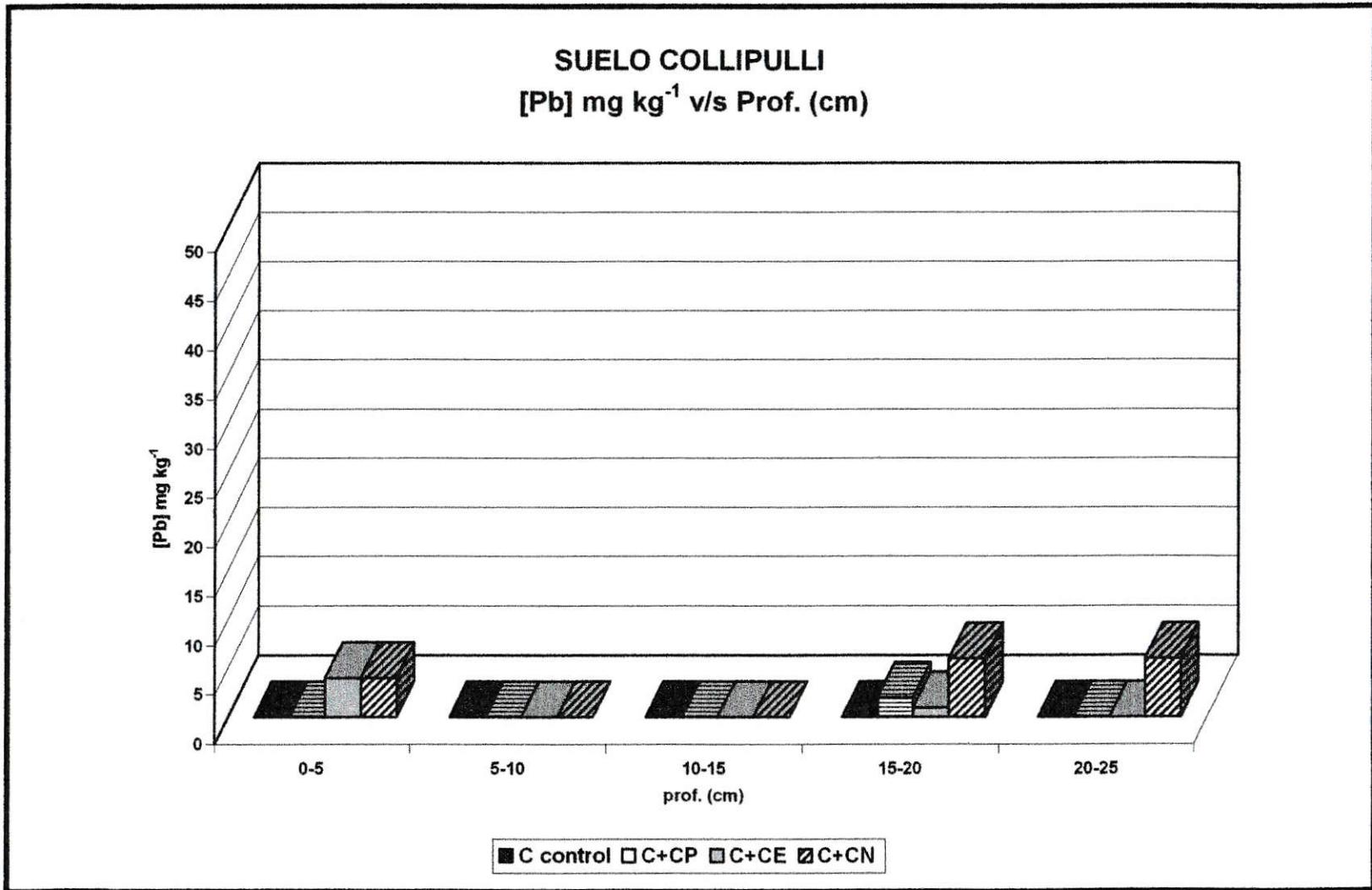


Figura 31: [Pb] mg kg⁻¹ en el suelo Collipulli v/s Profundidad (cm)

Tanto los dos suelos Andisoles como el suelo Ultisol, no registran concentraciones de plomo antes de entrar en contacto con las cenizas. Luego de esto, se observa un aumento en algunas partes de las columnas. El suelo Collipulli es el más afectado en este sentido, sin embargo en ninguno de los casos se tiene un aumento importante, en relación a la toxicidad de este metal en los suelos.

5. CONCLUSIONES

Los suelos en condiciones sin tratamiento, son suelos ligeramente ácidos con valores de conductividad eléctrica coherentes con el pH y el contenido de bases intercambiable. Los suelos Diguillín y Ralún al ser Andisoles, son suelos más jóvenes con un mayor contenido de carbono orgánico que el suelo Collipulli que es un Ultisol.

Las cenizas obtenidas de la quema de ramas y hojas secas, agregadas a los horizontes superficiales de los suelos Diguillín, Ralún y Collipulli, provocan variaciones en las propiedades físicas y químicas de éstos.

Las cenizas provocan un aumento del pH que se manifiesta principalmente en los primeros 5 cm de profundidad de las columnas estudiadas, este aumento provoca variaciones en el contenido de bases intercambiables y de metales, por lo tanto, con esto también varía la conductividad eléctrica de los suelos. En general, este parámetro no presenta un comportamiento diferenciado entre Andisol y Ultisol, lo mismo ocurre para la conductividad eléctrica. No obstante, estudios realizados en trabajos citados en este trabajo, mencionan el aumento del pH y la conductividad son momentáneos y el tiempo en que se manifiestan estos cambios dependen de la intensidad del incendio, la pendiente del terreno, el clima y otros.

Conjuntamente, las cenizas poseen un muy bajo contenido de carbono orgánico, lo que se traduce que en los primeros 5 cm de profundidad de las columnas con cenizas, los %CO son bajos. Dichas diferencias entre %CO de los suelos control con respecto a los suelos con cenizas, son más amplias en el caso de los Andisoles.

En general estos suelos poseen bajas concentraciones de sodio intercambiable y se produce un aumento con la incorporación de las cenizas, alcanzando altas concentraciones. Sin embargo para establecer si se esta frente a un riesgo de sodicidad de los suelos, se debe analizar según la RAS. Además se debe considerar la rápida lixiviación de este catión. Una situación similar es la que posee el potasio intercambiable, que tras la adición de las cenizas manifiesta un aumento en los suelos, lo que resultaría beneficioso para la vegetación posterior, pero este aumento según otros estudios es temporal, ya que es lavado rápidamente. Calcio y magnesio son cationes más retenidos en los suelos, el primero es más abundante que el segundo, por lo que su aumento de concentración debería mantenerse con el tiempo.

Los suelos estudiados, presentan bajas concentraciones de cobre, zinc y plomo. En el caso del cobre, se sabe que es un micronutriente que tiende a disminuir con el pH, pero que esta tendencia no siempre se manifiesta, debido a que es fuertemente retenido por la materia orgánica, en este estudio se observó un aumento por sobre lo que la literatura considera como límite de toxicidad, mas no se puede decir ciertamente si está como contaminante, debido a que además de la concentración se debe analizar la biodisponibilidad de éste. El

zinc disminuye con la alcalinización del suelo. El plomo, pese a aumentar en algunos casos no se tiene una situación contaminante.

Según todos los antecedentes obtenidos, tanto en este estudio como en otros que han sido mencionados, las cenizas finalmente provocan un efecto más perjudicial que beneficioso, ya que el aumento de nutrientes sólo es temporal, y al paso del tiempo prevalecen más los efectos negativos, como lo es la erosión. Por lo tanto, como efecto positivo se tiene la liberación de nutrientes, que en condiciones normales tardaría mucho más tiempo en ocurrir.

Se debe considerar que este estudio se acota al efecto de las cenizas en los suelos, sin considerar las otras variables que se tienen en los incendios forestales, como lo es, el aumento de temperatura del suelo, el oscurecimiento del mismo y la pérdida de sombra, entre otros.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilera M. E., *Materia Orgánica de Suelos Volcánicos de Chile, Estudios de sus Principales Características Físico-Químicas*, Tesis de Grado, Magíster en Química, Universidad de Chile, pp. 174, 1993.
2. Alloway B. J., *Heavy Metals in Soils*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
3. Besoain M., E. *Mineralogía de las Arcillas de Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de Chile*. In: *Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina*. Turrialba, C. R., 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. B1.1-17.
4. Birrel, K. S., *Some Properties of Volcanic Ash Soil*. In: *FAO-UNESCO. Meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash*, Tokio, 1964. FAO, 1964. *World Soil Resources Report No. 14*, pp. 89-91.
5. Buol, S.W. et al., *Génesis y Clasificación de Suelos*. 2ª Ed. México: Trillas, 417 p. 1990
6. Carrasco, P. y Millán, J., *Proyecto Suelos Forestales de la VIII región. Informe Final*. Chillán, Chile, 152 p., 1990.
7. Chacón, E. et al., *Contaminación y Depuración de Suelos*, Instituto Tecnológico, Gobierno de España, 1995.
8. Chichón L., *Especiación de Metales Pesados en Lodos de Aguas Residuales de Origen Urbano y Aplicación de Lodos Digeridos como Mejoradores de Suelo*, Ingeniería Ambiental de la Universidad de Málaga, 1995.
9. Donoso C., *Ecología Forestal: El Bosque y su Medioambiente*. 2a edición. Santiago, Chile. Universidad Austral de Chile. Editorial Universitaria. 1990.

10. Egawa, T., Mineralogical Properties of Volcanic Ash Soil in Japan. In: FAO-UNESCO. Meeting on the classification and correlation of soils from volcanic ash, Tokio, 1964. FAO, 1964. World Soil Resources Report No. 14, pp. 89-91.
11. Escudey, M. et al., Impacto Sobre Suelos Volcánicos de Cenizas Generadas en Incendios Forestales de Plantaciones de Pino. Facultad de Química y Biología, Universidad de Santiago. Chile. 2003.
12. Estadísticas del Medio ambiente, 1998-2002, CONAF.
13. Carta Mundial de los Suelos, FAO, 1982.
14. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. CONAF, CONAMA, 1997.
15. Fassbender, H. W. y Bornemisza E., Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina, 1987, 2ª Edición. Cap. 10.
16. Iglesias, T. Efectos de los Incendios Forestales Sobre las Propiedades del suelo en un Pinar de Repoblación (*Pinus Pinaster*), en Arenas de San Pedro. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Depto. de Edafología. Facultad de Farmacia. 1993.
17. Keys to Soil Taxonomy, 2003, 9ª Edición, Cap 6, 15.
18. Malagon, D., Mineralogía de Suelos; sus Relaciones con Génesis, Fertilidad y Clasificación de Suelos. Bogotá, Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, subdirección de agrología. 1975, v.XI, No.1.
19. Martini, J. A. Mineralogía de las Arcillas, Limo y Arenas en seis suelos de Panamá. Turrialba 19(2):199-207. 1969.

20. Mataix, J. Alteraciones Físicas, Químicas y Biológicas en Suelos Afectados por Incendios Forestales. Contribución a su Conservación y Regeneración. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. 1999.
21. Maycotte, C. et al., Radiación Fotosintéticamente Activa y Propiedades Físicas y Químicas en Suelos Forestales Con y Sin Incendio. *Madera y Bosques* 8(2): 39-55. 2002.
22. Pritchett, W. Suelos Forestales. Propiedades, conservación y mejoramiento. 1º Edición, Editorial Limusa, S.A. de C.V., 1990.
23. Prusty, B. et al., Metal Contamination Due to Mining and Milling Activities at the Zawar Zinc Mine, Rajasthan, India. Contamination of Stream Sediments. *Chemical Geology* 112, 275-291.
24. Rodríguez, D., Incendios Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Mundi-Prensa, México. 1ª Edición en Español, pp.41-54, 1996.
25. Romig D., Harris R., Mcsweeney K. *Journal of Soil and Water Conservation* 5(3): pp. 229–236, 1995.
26. Saazawka, M.A., Métodos de Análisis de Suelos, INIA, Serie La Platina No. 16, Chile, 1991.
27. Swindale, L. D., Propiedades de los Suelos de Cenizas Volcánicas. In: Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina, Turrialba, Costa Rica, 1969. Turrialba, IICA, 1969. pp. B10.1-9.
28. Tosso J., Suelos Volcánicos de Chile, 1ª Ed., INIA, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile, 1985.
29. <http://www.turistel.cl>

ANEXO 1: CARACTERISTICAS DE LAS SERIES DIGUILLIN, RALUN Y COLLIPULLI

SERIE DIGUILLÍN

SÍMBOLO	: DG
FAMILIA	: Arrayán
SERIE	: Diguillín
CLASIFICACIÓN	: Medial, thermic, Typic Dystrandept
UBICACIÓN	: a 1200 m al sur de Pueblo Seco
FISIOGRAFIA	: Depresión intermedia
TOPOGRAFIA	: Plana a suavemente ondulada
DRENAJE	: Bueno
TEMPERATURA DEL SUELO	: Media anual 15,5°C; verano 19,3°C
PLUVIOMETRIA	: Anual 1.200 – 1.500 mm; otoño 300 – 400 mm; invierno 500 – 700 mm; primavera 200 – 250 mm; verano 70 – 100 mm.
REGIMEN DE HUMEDAD	: Xérico
REGIMEN DE TEMPERATURA	: Térmico
MATERIAL PARENTAL	: Cenizas volcánicas modernas

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MORFOLÓGICAS DEL PERFIL

Horizonte Ap (prof. 0 – 17 cm): Pardo grisáceo muy oscuro en húmedo y pardo grisáceo oscuro en seco; franco; plástico y adhesivo; friable en húmedo y blando en seco. Raíces finas abundantes y medias comunes; poros finos y muy finos, abundantes.

Horizonte A (prof. 17 – 44 cm): Pardo muy oscuro en húmedo y pardo grisáceo oscuro en seco; franco limosa; plástico y adhesivo; muy friable en húmedo y suelto en seco; estructura granular fina y media. Raíces finas, abundantes; poros medios, finos y muy finos; comunes.

SERIE RALÚN

SÍMBOLO	: RLN
FAMILIA	: Ralún
SERIE	: Ralún
CLASIFICACION	: Mesic, Umbric Vitrandept
UBICACIÓN	: a 10,5 Km al oriente de Ensenada, camino a Ralún
FISIOGRAFIA	: Cordillera Andina. Altura 600 a 1400 m.s.n.m.
TOPOGRAFIA	: Pendientes complejas de 10 – 20%
DRENAJE	: Excesivo
TEMPERATURA DEL SUELO	: Media anual 10 - 11°C; media julio 7 - 8°C; máxima media enero 18 – 20°C
PLUVIOMETRIA	: Anual 4.000 – 5.000 mm; otoño 1.000 – 1.200 mm; invierno 1.500 mm; primavera 1.000 – 1.300 mm; verano 400 - 500 mm.
REGIMEN DE HUMEDAD	: Údico
REGIMEN DE TEMPERATURA	: Mésico
MATERIAL PARENTAL	: Cenizas y arenas volcánicas recientes

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MORFOLÓGICAS DEL PERFIL

Horizonte A (prof. 0 – 20 cm): Negro en húmedo; arenoso franco gruesa; no plástico y no adhesivo; muy friable en húmedo y blando en seco; estructura de grano simple. Raíces finas y medias, muy abundantes.

Horizonte AB (prof. 20 – 59 cm): Negro en húmedo; franco arenosa; no plástico y no adhesivo; muy friable en húmedo y suelto en seco; estructura granular media, débil. Raíces finas y medias, abundantes. (Mella y Kühne, 1985).

SERIE COLLIPULLI

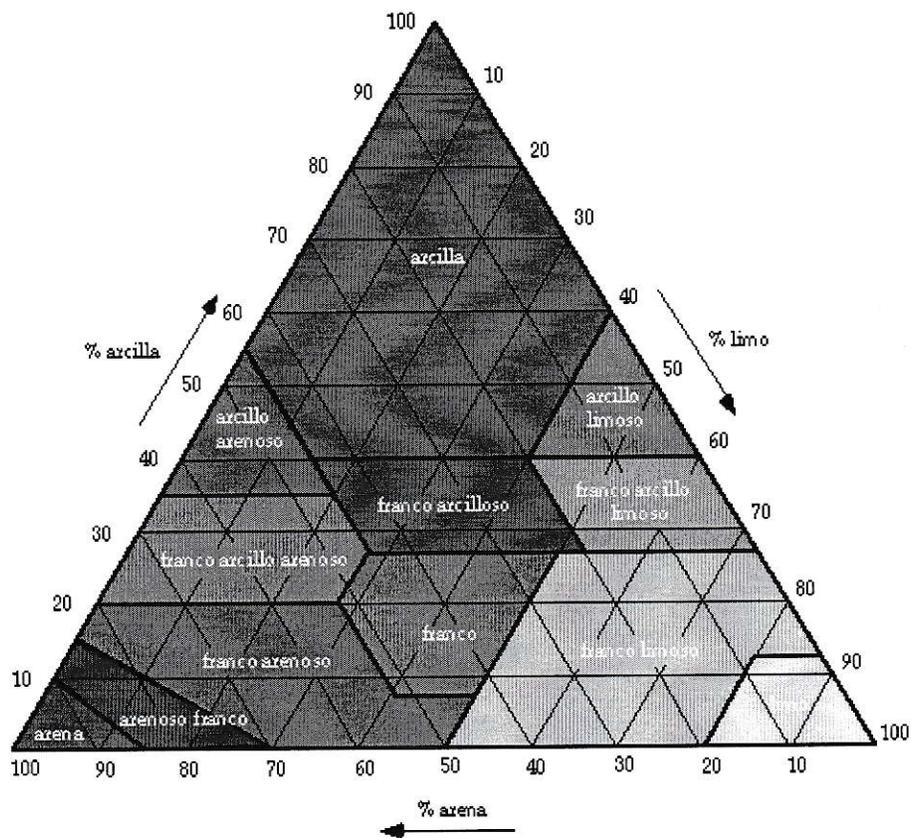
SÍMBOLO	: CLL
FAMILIA	: Collipulli
SERIE	: Collipulli
CLASIFICACION	: Fine, mesic, Xeric Paleumult
UBICACIÓN	: a 2 Km al norte de Collipulli camino a San Agustín y a 1,5 Km al oeste de la Carretera Panamericana
FISIOGRAFIA	: Depresión intermedia
TOPOGRAFIA	: Lomajes ondulados, con pendientes complejas de 3 – 4%
DRENAJE	: Bueno
TEMPERATURA DEL SUELO	: Media anual 15,8°C; verano 19,7°C
PLUVIOMETRIA	: Anual 1.200 – 1.500 mm; otoño 400 mm; invierno 500 – 700 mm; primavera 200 – 250 mm; verano 70 – 100 mm.
REGIMEN DE HUMEDAD	: Xérico
REGIMEN DE TEMPERATURA	: Térmico
MATERIAL PARENTAL	: Cenizas volcánicas antiguas

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MORFOLÓGICAS DEL PERFIL

Horizonte Ap (prof. 0 – 14 cm): Pardo rojizo oscuro en húmedo; arcillo limosa; plástico y adhesivo; friable en húmedo y ligeramente duro en seco; estructura de bloques subangulares medios, moderados. Raíces finas abundantes; poros finos abundantes y buena actividad biológica.

Horizonte Bt1 (prof. 14 – 50 cm): Pardo rojizo oscuro en húmedo; arcillosa; muy plástico y muy adhesivo; firme en húmedo y duro en seco; estructura de bloques subangulares medios, firmes. Raíces finas escasas; poros finos y abundantes.

ANEXO 2: CLASES TEXTURALES DE LOS SUELOS



ANEXO 3: INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS, LABORATORIO INIA

pH en agua suspensión 1:2,5 determinación potenciométrica	menor o igual a 4.5	Extremadamente ácido
	4.6 - 5.0	Muy Fuertemente ácido
	5.1 - 5.5	Fuertemente ácido
	5.6 - 5.9	Moderadamente ácido
	6.0 - 6.5	Ligeramente ácido
	6.6 - 7.3	Neutro
	7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino
	7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino
	8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino
Na ⁺ intercambiable cmol (+)/Kg Acetato de amonio 1,0 M determinación EAA	menor o igual a 0.15	Muy bajo
	0.16 - 0.20	Bajo
	0.21 - 0.30	Medio
	0.31 - 0.40	Alto
	igual o mayor a 0.41	Muy alto
K ⁺ intercambiable cmol (+)/Kg Acetato de amonio 1,0 M determinación EAA	menor o igual a 0.12	Muy bajo
	0.13 - 0.25	Bajo
	0.26 - 0.51	Medio
	0.52 - 0.64	Alto
	igual o mayor a 0.65	Muy alto
Ca ⁺² intercambiable cmol (+)/Kg Acetato de amonio 1,0 M determinación EAA	menor o igual a 2.0	Muy bajo
	2.01 - 5.00	Bajo
	5.01 - 9.00	Medio
	9.01 - 14.00	Alto
	igual o mayor a 14.1	Muy alto
Mg ⁺² intercambiable cmol (+)/Kg Acetato de amonio 1,0 M determinación EAA	menor o igual a 0.25	Muy bajo
	0.26 - 0.50	Bajo
	0.51 - 1.00	Medio
	1.01 - 1.80	Alto
	igual o mayor a 1.81	Muy alto
Suma bases intercambio cmol (+)/Kg	menor o igual a 3.00	Muy bajo
	3.01 - 6.00	Bajo
	6.01 - 10.00	Medio
	10.01 - 14.00	Alto
	igual o mayor a 14.01	Muy alto