

“Interacciones entre propiedades físicas y composición mineralógica y granulométrica  
de suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada”

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,  
Área Ciencias del Suelo*

Emiliano Miguel Bressan

Ingeniero Agrónomo – UBA- 2006

Lugar de trabajo: Instituto de Suelos INTA Castelar



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano

Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

## COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

**Hector J. M. Morrás**

Ingeniero Agrónomo (UCSF)

Ms Sc. (Rijksuniversiteit Gent)

Dr. Ir. (Universite de Paris VII)

Consejero de Estudios

**Mario Guillermo Castiglioni**

Ingeniero Agrónomo (UBA)

M Sc. (UBA)

## JURADO DE TESIS

Director de tesis

**Hector J. M. Morrás**

Ingeniero Agrónomo (UCSF)

Ms Sc. (Rijksuniversiteit Gent)

Dr. Ir. (Universite de Paris VII)

JURADO

Dr. Perla A. Imbellone

JURADO

Dr. Cesar M. Rostagno

Fecha de defensa de la tesis: 27 de Septiembre de 2013

**Dedicatoria**

*A mis padres quienes me enseñaron y me enseñan día a día que en la vida nunca hay que bajar los brazos y siempre hay que seguir adelante en busca de nuestros sueños.*

## **Agradecimientos**

En primer lugar quisiera agradecer a mi director y amigo el Dr. Héctor J.M. Morrás por confiar en mí para poder realizar esta Maestría en Ciencias del Suelo y darme la oportunidad de seguir creciendo como profesional y pertenecer al Instituto de Suelos del INTA Castelar. Gracias a usted Héctor aprendí las cualidades y el esfuerzo que se requiere para ser un investigador para cualquier área de la ciencia en la Argentina. Debo agradecerle su total predisposición y consejos que me brindó durante la realización de la Maestría.

En segundo lugar a mi codirector y amigo el M. Sc. Ing. Agr. Mario Castiglioni por estar siempre al pie del cañón para lo que necesité y guiarme con su experiencia en las distintas etapas que fui recorriendo durante este proceso de aprendizaje.

En tercer lugar a todo el personal del Instituto de Suelos del INTA Castelar por hacerme sentir uno más desde el primer día y por ayudarme siempre en lo que necesitara.

Y por último a mi familia y amigos por bancarme los buenos y difíciles momentos que atravesé durante la realización de la Maestría.

## ÍNDICE GENERAL

### CAPITULO I

#### “Mineralogía, granulometría y propiedades físico-químicos y químicos de suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada”

I.1. Introducción.....	1
I.1.1. El material parental de los suelos pampeanos.....	1
I.1.2. La textura del material parental de los suelos pampeanos.....	2
I.1.3. Geomorfología y suelos de la Pampa Ondulada.....	4
I.1.4. Influencia de la composición mineralógica en propiedades físico-químicas de los suelos.....	6
I.1.4.1. Mineralogía de arcillas y propiedades físico-químicas.....	6
I.1.4.2. Relación de la mineralogía magnética con propiedades físicas y químicas de los suelos.....	7
I.2. Justificación de este trabajo.....	8
I.3. Hipótesis.....	8
I.4. Objetivos Específicos.....	8
I.5. Materiales y Métodos.....	9
I5.1. Caracterización y descripción de los perfiles estudiados.....	9
I.5.2. Descripción de los suelos estudiados.....	11
I.5.3. Determinaciones de laboratorio.....	21
I.5.4. Análisis Estadístico.....	23
I.6. Resultados y Discusión.....	23
I.6.1. Resultados de los Análisis Granulométricos.....	23
I.6.2. Resultados de los Análisis Mineralógicos.....	27
I.6.3. Resultados de la Susceptibilidad Magnética.....	32
I.6.4. Resultados de los Análisis Químicos y Físico-Químicos.....	34
I.6.5. Análisis Estadísticos.....	40
I.7. Conclusiones Parciales.....	48

### CAPITULO II

#### “Influencia de la cantidad y tipo de arcilla en propiedades físicas de los suelos ”

II.1. Introducción.....	50
II.1.1. Influencia de las arcillas en la capacidad de expansión-contracción de los suelos.....	50
II.1.2. Relación de las arcillas con los índices de Atterberg.....	51
II.1.3. Influencia de las arcillas en la retención de agua de los suelos.....	52
II.1.4. Influencia del contenido y composición de la fracción de arcilla en la porosidad y la dinámica hídrica de los suelos.....	53
II.2. Hipótesis.....	56
II.3. Objetivos Específicos.....	56
II.4. Materiales y métodos.....	56
II.5. Resultados y Discusión.....	60
II.5.1. Retención de agua.....	60
II.5.2. Porosidad y movimiento del agua.....	68
II.5.3. Índices de Atterberg.....	77
II.5.4. Coeficiente de Extensibilidad Lineal.....	82
II.5.5. Análisis Estadístico.....	86
II.6. Conclusiones Parciales.....	95
CONCLUSIONES FINALES.....	96
BIBLIOGRAFIA CITADA.....	99
APENDICE.....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1- Mapa de la Pampa Ondulada con sus subzonas geomorfológicas de acuerdo a Scoppa y Vargas Gil (1969).....	5
Figura N°2- Mapa de la Pampa Ondulada con sus subzonas geomorfológicas con la localización de los perfiles estudiados.....	10
Figura N° 3- Mapa de las unidades taxónomicas domintanes de la Pampa Ondulada con la localización de los perfiles estudiados.....	11
Figura N° 4- Mapa digital de elevaciones de la Pampa Ondulada con la localización de los perfiles estudiados.....	11
Figura N° 5- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Chivilcoy (Provincia de Buenos Aires) (Argiudol típico, Serie O'Higgins).....	12
Figura N° 6- Perfil de suelo descrito en las proximidades de San Pedro (Provincia de Buenos Aires) (Argiudol vértico, Serie Ramallo).....	13
Figura N°7- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Luján (Provincia de Buenos Aires) (Argiudol ácuico, Serie Lima).....	15
Figura N° 8 - Perfil de suelo descrito en las proximidades de Arminda (Provincia de Santa Fé) (Argiudol típico/vértico, Serie Peyrano).....	17
Figura N° 9- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Oliveros (Provincia de Santa Fé) (suelo transicional entre la serie Maciel (Argiudol típico) y la serie Ribera (Argialbol típico).....	19
Figura N° 10- Variación del contenido de arena (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	24
Figura N° 11- Variación del contenido de limo (%) con la profundidad en los suelos estudiados.....	25
Figura N° 12- Variación del contenido de arcilla (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	26
Figura N° 13 – Ubicación de las muestras de los horizontes BC en el triángulo textural para clasificar sedimentos eólicos (adaptado de Bidart, 1992).....	27
Figura N° 14- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte A1 de los suelos estudiados.....	28
Figura N° 15- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte Bt1 de los suelos estudiados.....	29
Figura N° 16- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte BC1 de los suelos estudiados.....	30
Figura N° 17- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte C de los suelos estudiados.....	31
Figura N° 18- Variación de la susceptibilidad magnética en alta y baja frecuencia (kHz) con la profundidad de los suelos analizados.....	33
Figura N° 19 -Variación del contenido de carbono orgánico (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	36
Figura N° 20- Variación del contenido de fósforo (ppm) con la profundidad en los suelos estudiados.....	37
Figura N° 21- Variación del contenido de potasio de intercambio (cmol/Kg) con la profundidad de los suelos estudiados.....	38
Figura N° 22- Variación del pH con la profundidad de los suelos estudiados.....	39
Figura N° 23- Variación del CIC Total (meq %) con la profundidad de los suelos estudiados.....	40
Figura N° 24- Componentes Principales de los horizontes A, AB y BA de los suelos estudiados.....	42

Figura N° 25- Componentes Principales de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados.....	44
Figura N° 26- Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.....	46
Figura N° 27 -Variación del contenido de agua de saturación (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	61
Figura N° 28- Variación del la humedad equivalente (HEq) con la profundidad de los suelos estudiados.....	62
Figura N° 29- Variación del la capacidad de campo (CC) con la profundidad de los suelos estudiados.....	63
Figura N° 30 -Variación del punto de marchitez permanente (PMP) con la profundidad de los suelos estudiados.....	64
Figura N° 31- Curvas de retención hídrica de los horizontes A, correspondientes a los suelos analizados.....	66
Figura N° 32- Curvas de retención hídrica de los horizontes BA/AB/E correspondientes a los suelos estudiados.....	66
Figura N° 33- Curvas de retención hídrica de los horizontes Bt correspondientes a los suelos estudiados.....	67
Figura N° 34- Variación del la densidad aparente (Dap) con la profundidad de los perfiles de Luján, Oliveros y Arminda.....	69
Figura N° 35- Variación del la densidad aparente (Dap) con la profundidad de los perfiles de Chivilcoy y San Pedro.....	69
Figura N° 36- Variación de la porosidad total (PT) con la profundidad en los suelos estudiados.....	70
Figura N° 37- Variación del porcentaje de macroporos con la profundidad de los suelos estudiados.....	71
Figura N° 38- Variación del porcentaje de mesoporos con la profundidad de los suelos estudiados.....	72
Figura N° 39- Variación del porcentaje de microporos con la profundidad de los suelos estudiados.....	73
Figura N° 40- Variación del la conductividad hidráulica saturada (Ks) con la profundidad de los suelos estudiados.....	76
Figura N° 41- Variación del límite líquido con la profundidad de los suelos estudiados.....	77
Figura N° 42- Variación del límite plástico con la profundidad de los suelos estudiados.....	79
Figura N° 43- Variación del índice plástico con la profundidad de los suelos estudiados.....	80
Figura N° 44- Correlación entre el indice plástico y el contenido de arcilla en los horizontes Bt de los suelos estudiados.....	82
Figura N° 45- Variación del COLE con la profundidad de los suelos estudiados.....	82
Figura N° 46- Correlación entre el COLE y el contenido de arcilla en los horizontes Bt de los suelos estudiados. ....	84
Figura N° 47- Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados.....	87
Figura N° 48- Componentes Principales de los horizontes Bt de los suelos estudiados.....	90
Figura N° 49- Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1- Espacio interfoliar en Å de reflexiones basales en pequeños ángulos (2°-15° 2θ/min).....	22
Tabla N° 2- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados.....	41
Tabla N° 3- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados.....	42
Tabla N° 4- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados.....	43
Tabla N° 5- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados.....	45
Tabla N° 6- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.....	46
Tabla N° 7- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.....	47
Tabla N° 8- Clasificación de poros por tamaño y función.....	58
Tabla N° 9- Capacidad de expansión-contracción citada por Thomas <i>et al.</i> 2000.....	60
Tabla N° 10- Porcentaje de macroporos en los horizontes de los suelos estudiados.....	71
Tabla N° 11- Porcentaje de mesoporos en los horizontes de los suelos estudiados.....	72
Tabla N° 12- Porcentaje de microporos en los horizontes de los suelos estudiados.....	74
Tabla N° 13- Variación de los Índices de Atterberg con la profundidad de los suelos estudiados.....	78
Tabla N° 14- Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes de los suelos estudiados y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas <i>et al.</i> 2000).....	83
Tabla N° 15- Valores de Extensibilidad Lineal de los suelos estudiados.....	85 y 86
Tabla N° 16- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados.....	86
Tabla N° 17- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados.....	88
Tabla N° 18- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados.....	89
Tabla N° 19- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados.....	91
Tabla N° 20- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.....	92
Tabla N° 21- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.....	94



**Declaración**

*Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.*

Emiliano Miguel Bressan

## Resumen

### “Interacciones entre propiedades físicas y composición mineralógica y granulométrica de suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada”

En la Pampa Ondulada se han descrito en las posiciones positivas del paisaje numerosas series de suelos, que presentan rasgos diferenciales originados a partir de composiciones texturales y mineralógicas distintas. Sin embargo, son escasos los trabajos que relacionen la composición mineralógica con las propiedades físicas y físico-químicas de perfiles completos de suelos.

En esta tesis se estudiaron algunos suelos Argiudoles de distintos sectores de la Pampa Ondulada localizados en Chivilcoy, Luján, San Pedro, Arminda y Oliveros. En todos sus horizontes se determinaron parámetros físicos, físico-químicos, mecánicos y mineralógicos.

Los resultados obtenidos evidencian el desarrollo de estos suelos a partir de distintos sedimentos loéssicos diferenciados en su granulometría y mineralogía. Además de la preponderante contribución de materiales volcánoclasticos provenientes del oeste, en algunos suelos existen aportes de las Sierras Pampeanas y/o de la cuenca del Paraná. La fracción arcilla de los suelos muestra un aumento de minerales interestratificados de illita/esmectita desde el oeste al este de la región, en tanto la mineralogía magnética presenta diferencias entre los suelos, atribuibles a la composición litogénica.

Las propiedades físicas relacionadas con la retención y dinámica del agua, mostraron ser dependientes del contenido de arcilla y de su composición mineralógica, diferenciándose así tres grupos: el suelo de Chivilcoy con la menor retención hídrica, el suelo de San Pedro con la mayor y los tres restantes con capacidades de retención intermedias. Por otro lado, los valores de retención son menores en los horizontes superficiales, máximos en los Bt e intermedios en los BC y C.

Las propiedades de expansión-contracción determinadas a través del COLE mostraron una alta correlación con el Índice plástico de Atterberg. El COLE y el Índice plástico mostraron altos coeficientes de correlación con la CIC, siendo este un parámetro que integra el contenido de materia orgánica, el contenido de arcilla y la mineralogía de ésta.

Finalmente, el criterio taxonómico de Extensibilidad lineal para clasificar el subgrupo vértico no resultó por sí solo definitorio, por lo que sería necesario profundizar el estudio de las propiedades físicas y los criterios de distinción entre los Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada.

*Palabras claves: Argiudoles, contenido de arcilla, mineralogía de arcillas, mineralogía magnética, composición litológica, propiedades físicas, COLE, índices de Atterberg,*

### Abstract

#### **“Interactions between physical properties and the mineralogical and granulometric composition of Rolling Pampa’s Argiudolls”**

Numerous soil Series have been described in the positive positions of the Rolling Pampa’s landscape, displaying different features mainly due to differences in their textural and mineralogical compositions. However, up to now few studies have related the physical and physical-chemical properties of complete soil profiles with their mineralogical composition.

This thesis analyzes several Argiudolls characterizing different sectors of the Rolling Pampa: three soils are located in the Province of Buenos Aires (Chivilcoy, Luján, San Pedro) and two in the Province of Santa Fe (Arminda and Oliveros). In all their horizons diverse physical, physical-chemical, mechanical and mineralogical parameters were determined.

The results obtained evidence that these soils have developed from loessic sediments differing in their granulometry and mineralogy. Apart from the prevailing contribution of volcanoclastic materials from Western sources, some soils show the contribution of the Sierras Pampeanas and/or the Paraná basin sediments. The soils parent material evidences an increase of interstratified illite/smectite clay minerals from West to East, whereas the magnetic mineralogy shows differences between the soils, attributed to their lithogenic composition.

The physical properties related to water retention and water dynamics proved to be dependent on clay contents and mineralogical composition, thus differentiating three groups: Chivilcoy soil retained less water, San Pedro soil retained more water, and the three remaining soils had intermediate retention capacities. In general terms, retention values are lower in surface horizons, whereas they are higher in Bt horizons and intermediate in BC and C horizons.

Expansion-contraction properties determined through COLE evidenced a high correlation with the Atterberg plastic index. Both COLE and the plastic index showed high rates of correlation with CEC –a parameter that integrates the organic matter content as well as clays content and mineralogy.

Finally, the taxonomic criterion of lineal extensibility to classify the vertic subgroup was not definite by its own, thus making it necessary to study in depth the physical properties and the distinction criterion between Typic and Vertic Argiudolls of the Rolling Pampa.

*Keywords: Argiudoll, clay content, clay mineralogy, magnetic mineralogy, lithologic composition, physical properties, COLE, Atterberg indexes.*

**ABREVIATURAS**

I/E: illita esmectita  
SM: susceptibilidad magnética  
LF: baja frecuencia  
HF: alta frecuencia  
CIC: capacidad de intercambio catiónico  
Ki: potasio intercambiable  
P: fósforo extractable  
CO: carbono orgánico  
HEq: humedad equivalente  
Dap: densidad aparente  
PT: porosidad total  
H<sub>2</sub>O sat: agua de saturación  
PMP: punto de marchitez permanente  
CC: capacidad de campo  
Ks: conductividad hidráulica saturada  
COLE: coeficiente de extensibilidad lineal  
CP<sub>1</sub>: eje componente principal 1  
CP<sub>2</sub>: eje componente principal 2

## Capítulo 1 “Mineralogía, granulometría y propiedades físico-químicas y químicas de suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada”

### **I.1. Introducción**

#### I.1.1.El material parental de los suelos pampeanos

Los suelos de la Región Pampeana se han desarrollado a partir de sedimentos loésicos del Pleistoceno tardío-Holoceno. Desde el punto de vista estratigráfico los sedimentos superficiales integran la Fm Buenos Aires que en el Pleistoceno superior cubrió, como un manto de 6-7 m de espesor, a la Fm Ensenada. Durante el Holoceno medio, bajo un clima árido, en algunos sectores de la planicie loésica se habrían depositado sedimentos eólicos “post-pampeanos”, en general denominados Fm. La Plata, resultantes de la erosión y redepósito de los materiales “pampeanos” (Nabel & Pereyra, 2000).

De acuerdo al modelo sedimentológico tradicional, estos materiales provendrían de las fuentes andinas, situadas al oeste y suroeste de la región, y del sector norte de la Patagonia extraandina. Una característica particular de estos sedimentos es su composición volcánoclastica: la mayor parte de los minerales derivan sin duda de rocas andesíticas y basálticas (Teruggi, 1957). El clima frío y ventoso, que seguramente prevaleció en la región durante la última glaciación, favoreció la deflación desde el piedemonte andino. También lluvias directas de ceniza, relacionadas al vulcanismo explosivo y a los vientos del oeste, contribuyeron a la formación de estos sedimentos pampeanos. El transporte primario de los materiales ha sido principalmente eólico, aunque habría actuado también un acercamiento por transporte fluvial de parte del material hacia las llanuras del sudoeste de La Pampa y Buenos Aires (Zárate & Blasi, 1993). Como consecuencia del transporte eólico, estos sedimentos habrían sufrido un proceso de selección granulométrica, con una depositación proximal de arenas y una distal de limos (Iriando & Kröhling, 1996). Esta diferenciación sedimentológica, junto a características geomorfológicas, constituyen la base de distinción entre las regiones de la Pampa Arenosa y la Pampa Ondulada, o también según conceptos de Iriando & Kröhling (1996) entre el “mar de arena pampeano” y la faja periférica de loess.

Como corolario de este modelo, con una fuente común de origen y sobre la base de algunos análisis puntuales, durante largo tiempo se consideró que –salvo los contenidos de vidrio volcánico– estos sedimentos superficiales eran mineralógicamente homogéneos (Imbellone & Teruggi, 1993), particularmente en lo concerniente a la composición de la fracción arcilla (Scoppa, 1976). La illita sería el mineral de arcilla predominante y aún el único en el material parental de los suelos pampeanos (González Bonorino, 1966). Se ha considerado así que la mineralogía de las arcillas de los suelos pampeanos es de una gran monotonía, la que se extendería también a los suelos de la región chaqueña (Scoppa, 1976; Camilión, 1993).

Sin embargo, algunos trabajos constataron diferenciaciones mineralógicas de las arcillas de sentido oeste-este, con un incremento progresivo de la esmectita hacia el este de la región. De manera coherente con el modelo sedimentológico mencionado, la diferenciación mineralógica observada por Stephan *et al.* (1977) en una transecta entre Córdoba y Santa Fe, fue considerada por dichos autores como debida a un mayor grado de alteración hacia el este, relacionada con el incremento de las precipitaciones en el mismo sentido. Iñiguez & Scoppa (1970), estudiando la mineralogía de las arcillas de los suelos zonales de la Pampa Ondulada, observan también algunas diferencias composicionales entre diversas series de suelos, pero que atribuyen a procesos

pedológicos de transformación e iluviación *in situ*, influidas por la distinta granulometría y edad de los materiales parentales.

En consecuencia, en esta perspectiva las diferencias taxonómicas existentes entre ciertos suelos de la región a nivel de subgrupo no se explicarían por su composición mineralógica. Así por ejemplo según Iñiguez & Scoppa (1970), la presencia de Argiudoles vérticos hacia el extremo noreste de la Pampa Ondulada, no estaría originada en diferencias mineralógicas sino en la granulometría mas fina de los suelos: las características vérticas aparecerían cuando el contenido de arcilla en los horizontes superiores excediera el 45%.

La concepción referida, y que puede denominarse el modelo de la “unicidad y homogeneidad”, constituye la base sobre la cual se asientan los estudios de suelos de la región pampeana en sus diversas subdisciplinas: física, fertilidad, manejo e incluso la aplicación de modelos diversos. Sin embargo, diversas contribuciones recientes a diferentes escalas espaciales y siguiendo una perspectiva diferente, muestran un panorama bastante mas complejo y que ha sido denominado el modelo de la “multiplicidad y la heterogeneidad” (Morrás, 2003). Diversos trabajos realizados por Morrás (1997; 1999), Zárate (2003) y Durán *et al.* (2011) sustentan este modelo sedimentológico basándose en las diferencias observadas en los resultados geoquímicos y mineralógicos de los suelos de esta región.

Así por ejemplo, estudios geoquímicos de la región pampeana realizados por Morrás (1996; 1999) y Morrás & Cruzate (2002) mostraron que variaciones en la distribución de fósforo y el potasio total reflejan diferencias de la composición mineralógica del material parental, derivadas de la confluencia de distintos aportes sedimentarios. Otros estudios geoquímicos más localizados, en suelos de la Pampa Ondulada (Morrás *et al.*, 1998) y en suelos de la región chaqueña en el norte de Santa Fe (Morrás, 1999), mostraron diferencias notorias en el contenido de diversos macro y micro elementos entre distintos perfiles. Además, estudios mineralógicos de la fracción arena, realizados entre otros por Bertoldi de Pomar (1969) en la provincia de Santa Fe, Morrás & Delaune (1985) en el norte de la misma provincia, Morrás (2003) en la Pampa Ondulada y sectores circundantes de la Pampa Arenosa y la Pampa Deprimida, Pereyra & Ferrer (1997) en sectores circundantes a la Sierras Australes y por Etchichury & Tofalo (2004) en el sector austral de la cuenca Chacoparanense para el conjunto de la región pampeana, ponen en evidencia diferencias composicionales entre diversos sectores de la región. Por su parte Zarate (2003) observó que registros del Pleistoceno-Holoceno tardío revelaron una secuencia eólica con una composición heterogenea como consecuencia del aporte de las tres zonas más importantes como son los Andes, las Sierras Pampeanas y la cuenca del río Paraná. Asimismo encontró que los aportes provenientes de los Andes son frecuentes en el sur de la Pampa Ondulada. En cambio en el norte de dicha región y en el este del Chaco observó mayor existencia de aportes provenientes de las otras dos fuentes. De la misma manera que los estudios geoquímicos, los resultados de estos trabajos indican que, además de los aportes sedimentarios provenientes de las fuentes del oeste, también existen aportes provenientes de las Sierras Pampeanas y de la cuenca del Paraná.

### I.1.2 La textura del material parental de los suelos pampeanos

Los materiales parentales de los suelos pampeanos son fundamentalmente sedimentos loésicos, incluyendo dentro de esta denominación tanto loess primarios como loess secundarios o redepositados (Teruggi, 1957). Desde el punto de vista de su composición granulométrica, Teruggi (1957) considera que la textura de los loess

argentinos es similar a los de Europa y América del Norte, clasificados éstos como “loess típicos”. Sin embargo, debido a la selección granulométrica como consecuencia del transporte eólico, estos materiales gradan desde arenas limosas en el oeste hasta limos loésicos en el este (Gonzalez Bonorino, 1966).

Bidart (1992) en un estudio específico de clasificación textural de sedimentos loésicos del sur de la Región Pampeana, incluyendo a aquellos descriptos por Teruggi (1957), concluye que los sedimentos eólicos del sur bonaerense tienen una textura más gruesa que los loess típicos del hemisferio norte, debiendo clasificarse en consecuencia como “loess arenosos”. En realidad, existen diversos criterios respecto al concepto de loess y calificativos (Bidart, 1992). En el ámbito local y en particular con referencia al material parental de los suelos pampeanos, se suelen usar indiscriminadamente diversos términos relacionados.

En un estudio sobre el material originario de Molisoles de las Sierras Australes, Pereyra & Ferrer (1997) establecen que el loess de esta región es predominantemente arenoso y bimodal. Los parámetros estadísticos muestran que los sedimentos de esta área se encuentran poco seleccionados y muestran una gran variabilidad granulométrica, que puede deberse a una mayor proximidad a las zonas de aporte, a una dinámica geomórfica más importante y a la interferencia producida por la zona serrana.

Gonzalez Uriarte & Muro (1998) estudiaron la granulometría de los suelos de la zona centro-occidental de la llanura bonaerense. En la Llanura Arenosa Occidental, ubicada hacia el norte del área estudiada, la familia textural es franca gruesa (clases: arenosa, areno-franca y franco-arenosa). Por el contrario, en la Llanura Norventánica ubicada al sur del área estudiada, la familia textural es franca fina (clases franca y franco limosa).

Por su parte, Morrás & Cruzate (2000-a) estudiaron la granulometría de 1362 muestras de horizontes C de suelos ubicados en la región comprendida entre los ríos Paraná y de la Plata al este, el meridiano 63°30' al oeste y entre los paralelos 32° y 35° de latitud Sur (N de Buenos Aires, S de Santa Fé y SE de Córdoba). En consonancia con los trabajos precedentes, la composición granulométrica de los horizontes C de los suelos del norte de la Región Pampeana varió entre límites muy amplios, desde muestras con predominancia de la fracción arcilla hasta otras con dominancia de la arena. La clasificación realizada de esta población según los límites y criterios propuestos por Bidart (1992), permitió separar los materiales en varias clases texturales: limos, loess arcilloso, loess típico, loess arenoso, arena limosa, areno limo arcillosa y arena.

De acuerdo a estos autores, hacia el este del río Salado, en la Pampa Ondulada, pueden observarse tres franjas sucesivas, la primera constituida por loess arenoso, la segunda correspondiente a loess típicos y la tercera en la que aparecen intercalados loess arcillosos, particularmente en la vecindad del eje fluvial Paraná-de la Plata. Los autores observaron asimismo que la franja de loess típico se ensancha de SE a NW, adquiriendo su mayor extensión (unos 180 Km de ancho) en el sur de Santa Fé y este de Córdoba.

### I.1.3. Geomorfología y suelos de la Pampa Ondulada

Scoppa & Vargas Gil (1969) observaron “que el material originario de la Pampa Ondulada es muy heterogéneo en la amplitud del área y que el relieve se presenta con grandes variaciones y en diversas formas”. Por lo tanto, atribuyeron fundamentalmente a las combinaciones de material parental y relieve las diferencias edáficas de la zona. Estas particularidades permitieron a dichos autores dividir la región en cinco subzonas

(Figura N° 1). Dada la ubicación de los suelos considerados en este trabajo (Figura N° 1) se referirán en particular las subzonas I y V que son descriptas por los autores de la manera siguiente:

“La subzona I comprende la parte proximal al río Paraná, dispuesta paralelamente a él desde la latitud del río Carcarañá, en la provincia de Santa Fé, por el norte y hasta el río Matanza por el sur. Hacia el este termina en la barranca del Paraná. Por el oeste sigue parte de la divisoria de aguas de los ríos Parana y Salado, haciéndose este límite cada vez menos preciso a medida que se remonta hacia el norte. Se caracteriza por el mayor potencial morfogenético de la zona, distinguiéndose abundantes variaciones topográficas, dibujadas por una red de drenaje definida, que concentra los cursos más importantes de la zona en estudio. La capa freática se presenta con un comportamiento normal, encontrándose más cerca de la superficie en las cotas menores. Los materiales originarios son loésicos de textura franco limosa a franco arcillo, limosa, casi homogéneos en toda el área. Las formas más comunes y características son las lomas. En divisorias de aguas y cotas mayores tienen un dorso plano convexo, se las aprecia en sentido regional, puesto que por su aspecto local serían directamente planicies. En las desembocaduras de los afluentes, las lomas lobulares, se muestran en planta como digitaciones alargadas o redondeadas, pero siempre convexas y con pendientes que llegan excepcionalmente al 4%. La diferencia de cotas permite un buen gradiente, por lo que sólo las áreas con interfluvios planos pueden tener problemas de estancamiento de aguas en pequeñas cubetas de decantación de forma circular y aproximadamente de 2,5 ha de superficie”.

La subzona V “comprende los alrededores de la ciudad de Chivilcoy, y se extiende desde el río Salado por el sur hasta la cañada La Salada por el este y norte. Por el oeste llega hasta la localidad de Alberti. Se trata de la porción distal del área de influencia eólica que afecta el sur del río Salado y la subzona III. Se caracteriza por dos aspectos resaltantes: el paisaje y los materiales parentales. El paisaje varía de sur a norte. En el sur, y marginando la subzona III, se presenta con suaves ondulaciones rítmicas de longitud de onda promedio 1200 m y 100 m de amplitud, que se van atenuando paulatinamente hacia el norte para asemejarse a las planicies de la subzona II. La gran planicie presenta de tanto en tanto abundantes cubetas de deflación, de forma circular y superficie media de 3 hectáreas. En la misma dirección varía la granulometría de los materiales; es decir, de franco arenoso hasta franco limoso gruesos (fracción limo dominante de 20 a 50 micrones). En relación a la granulometría varía la permeabilidad y, por ende, las condiciones de drenaje y la definición de la red de avenamiento. Todos los cursos desembocan en el río Salado. Están mejor definidos en el sudoeste; en cambio, en el este y nordeste, y antes de la definición incipiente de sus cursos, se vinculan a amplias depresiones plano-cóncavas. Estas también presentan pequeñas cubetas de deflación. La red de drenaje es indefinida y escasa en cursos. La capa freática está a + o - 5 m en la planicie y su comportamiento es normal al escaso relieve de la subzona, acercándose a la superficie al descender a las cañadas y al río Salado. No obstante las pequeñas diferencias topográficas y los desniveles escasos, se observa una variación importante de suelos”.

Si bien no se ha descripto ningún suelo localizado en la subzona II, se incluye la descripción de la misma dado que la geomorfología del sitio donde se muestreó el perfil que aquí denominamos Luján tiene rasgos transicionales hacia esta subzona II, de pendientes menos pronunciadas. Según Scoppa & Vargas Gil (1969) sus características son las siguientes: “La subzona II se ubica al norte del río Salado; su porción austral corresponde a los partidos de Lobos y Navarro, en este último llega hasta la margen izquierda de la cañada La Salada. Sigue por el norte la divisoria de



aguas de las cuencas de los ríos Paraná y Salado, terminando en la localidad de Chacabuco. Se caracteriza por la gran suavidad de la topografía. La diferencia de alturas entre la cota máxima (50 m s.n.m.) y la mínima es de apenas 30 m para una distancia horizontal de 60 kilómetros, lo que representa un escaso gradiente (0,5%), que determina un potencial morfogenético muy bajo. Los materiales originarios son loessoides de textura franco limosa, con pocas variaciones en toda el área. Los rasgos geomórficos son escasos, dominan las planicies con inclinación apenas insinuada. Las escasas lomitas son de pequeña extensión y escasa convexidad, y están ubicadas en la proximidad del río Salado. Las planicies no son continuas. Gran parte del agua pluvial se acumula en suaves depresiones planocóncavas de forma irregular y tamaño variable. Estas abundan en el norte y centro de la subzona como unidades aisladas, y hacia el sur se vinculan dando origen a las escasas vías de avenamiento que desembocan en el río Salado. No posee una red de drenaje definida. Los cursos son escasos y, en muchos de ellos, los cauces han sido canalizados. La capa freática se comporta en forma anormal, es decir que en la cotas mayores se encuentra muy cerca de la superficie y profundiza a medida que estas disminuyen, para luego normalizarse donde existe una mejor definición del drenaje, o sea en las proximidades del río Salado. La deficiente red de drenaje, el comportamiento de la capa freática y el escaso relieve, determinan en los suelos caracteres netamente hidromórficos. Las pequeñas variaciones topográficas y las diferentes condiciones de drenaje para cada nivel, rigen la distribución de los suelos en este paisaje suave”.

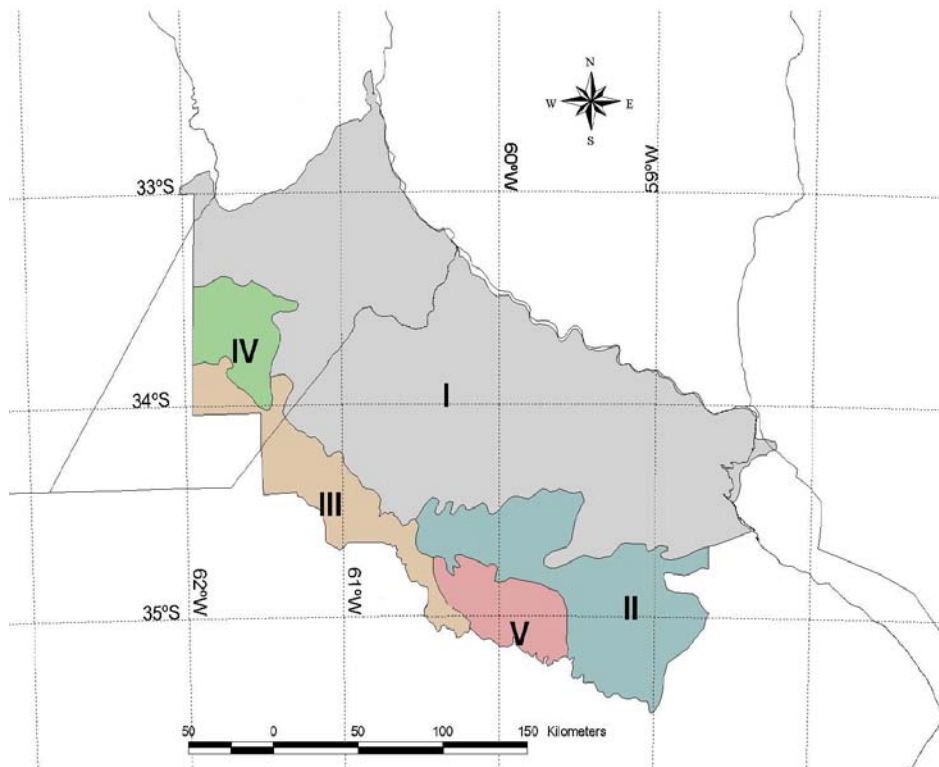


Figura N° 1- Mapa de la Pampa Ondulada con sus subzonas geomorfológicas, de acuerdo a Scoppa & Vargas Gil (1969).

A la descripción anterior puede agregarse a manera de síntesis la distinción mencionada por Moscatelli (1991) refiriéndose a la Pampa Ondulada alta: "El relieve es

ondulado en la provincia de Buenos Aires, no ofreciendo problemas de desagüe, ya que está drenada por arroyos y cursos bien definidos. Las pendientes en general aquí no alcanzan al 2% aunque hay sectores en que llegan al 5%. En la provincia de Santa Fe el relieve es algo más plano, con lomas extendidas que generalmente no alcanzan el 2% de pendiente. Existen allí buenas condiciones de drenaje superficial ya que están bien definidos los arroyos, ríos y cañadas que llevan sus aguas al Paraná”.

En cuanto a los suelos, en la Pampa Ondulada los Argiudoles típicos son los suelos que ocupan la mayor superficie y los más adecuados para la producción de cultivos. El epipedón mólico tiene en la actualidad aproximadamente un 3 % de materia orgánica, mientras que el horizonte argílico es profundo con un contenido de arcilla que oscila entre el 30 % hacia el oeste y el 50 % hacia el este, y el solum fácilmente alcanza los 120 cm de profundidad. Algunos nódulos de carbonato de calcio se encuentran con frecuencia en el horizonte BC y en los horizontes C (Durán *et al.*, 2011).

También los Argiudoles vérticos son comunes en los márgenes del eje río Paraná-río de la Plata, debido al alto contenido de minerales de arcilla expansibles en el material parental del suelo (Durán *et al.*, 2011).

Si bien se halla fuera del área de trabajo de esta Tesis, puede mencionarse que la parte sur de la Pampa Ondulada, transicional a la Pampa Deprimida, y conocida como la Pampa Ondulada Baja, presenta lomas planas con sedimentos ricos en minerales esmectíticos. En esta zona, los Argiudoles vérticos se hallan muy extendidos y los Hapluderts son frecuentes. Por otro lado, en las microdepresiones cóncavas aparecen los Argiudoles ácuicos y Argialboles (Durán *et al.*, 2011).

Como referencia comparativa puede mencionarse también que en la Pampa Mesopotámica del sur de la provincia de Entre Ríos existe un manto de loess y un paisaje ondulado en el sector occidental. Los Argiudoles típicos se encuentran cerca del río Paraná, los Argiudoles vérticos aparecen hacia el centro de la provincia, mientras que los Argiudoles ácuicos ocurren en las posiciones topográficas más bajas. La parte oriental de esta subregión es suavemente ondulada y cubierta por los sedimentos lacustres cuaternarios con alto contenido de esmectitas, siendo los suelos típicos Vertisoles oscuros y profundos.

Por lo tanto, en la Pampa Ondulada y en la Pampa Mesopotámica, Molisoles y Vertisoles se asocian en el paisaje junto con suelos intergradados como los Argiudoles vérticos. Este hecho se encuentra relacionado con la existencia en esta área de dos materiales parentales. Los Molisoles se desarrollaron sobre sedimentos loésicos de fuentes occidentales, mientras que los Vertisoles se desarrollaron sobre sedimentos arcillosos, principalmente derivados de la meteorización de los basaltos cretácicos que afloran en el norte de Argentina y Uruguay y el sur de Brasil. Por su parte los suelos intergradados se habrían desarrollado sobre materiales parentales constituidos por una mezcla de los dos sedimentos anteriores (Durán *et al.*, 2011).

#### I.1.4. Influencia de la composición mineralógica en propiedades físico-químicas de los suelos

##### I.1.4.1 Mineralogía de arcillas y propiedades físico-químicas

Las propiedades de la arcilla como intercambiador de cationes son bien conocidas, lo que constituye un elemento fundamental de la fertilidad de los suelos. Los valores de la CIC que encuentran su origen en sustituciones isomórficas, en las

superficies de tipo siloxano o bordes de ruptura, varían entre márgenes muy amplios según el tipo de arcilla y las condiciones del medio (Greenland & Mott, 1978).

La capacidad de intercambio catiónico es una función creciente de la superficie interna y externa de las partículas de los materiales presentes en el suelo, y por lo tanto se incrementa en la medida que disminuye el tamaño de las partículas (Jury *et al.*, 1991). Yule & Ritchie (1980) mencionan que la CIC integra en forma conjunta la actividad y la cantidad de arcilla presente en el suelo, mientras que Reeve *et al.* (1980) afirman que esta propiedad está fuertemente relacionada con el tipo de mineral de arcilla presente y que por lo tanto su cuantificación puede ser utilizada en la estimación de las arcillas que se encuentran en el suelo.

Las determinaciones directas de la capacidad de intercambio catiónico de la fracción arcilla de los suelos pampeanos son escasas. Morrás & Cruzate (2000-b) realizaron estimaciones indirectas de la CIC de la fracción arcilla de los suelos de una extensa porción de la Pampa Ondulada, a través de la relación entre la CIC total del suelo y el contenido total de arcilla. De este modo, mediante análisis estadísticos y aplicación de un SIG, pudo establecerse la existencia de sectores que se diferenciaban en la capacidad de intercambio catiónico de sus materiales, lo que tendría su origen en la existencia de diferencias mineralógicas entre los suelos del área.

#### I.1.4.2. Relación de la mineralogía magnética con propiedades físicas y químicas de los suelos

En los sedimentos loésicos del país se presentan diferentes minerales de hierro con propiedades magnéticas. Por otra parte, el Fe es un elemento cuyo estado de oxidación es un excelente indicador del microclima de un suelo. Consecuentemente, la detección de una fracción ferromagnética pedogénica, así como las fluctuaciones en la fracción ferromagnética detrítica, son excelentes indicadores de las variaciones ambientales acaecidas en el lapso de depositación y diagénesis del material de suelo.

En los materiales pampeanos, los minerales ferromagnéticos se encuentran en muy baja proporción y tamaños de grano muy pequeños. Debido a ello, es sumamente complejo detectarlos con técnicas microscópicas clásicas o difracción de rayos X. Por este motivo se utiliza un conjunto amplio de metodologías específicas y en particular la variación de la susceptibilidad magnética con frecuencia y temperatura. La medición de los parámetros de magnetismo provee información sobre la concentración, tamaño de grano, y mineralogía de la asociación del mineral magnético. En algunos casos, esta información puede reflejar cambios en la fuente de origen y en la composición del mineral detrítico, como así también en el balance entre componentes sedimentarios alóctonos y autóctonos, y en los cambios diagenéticos y pedogénicos (Mullins, 1977; Nabel *et al.*, 1999; Bartel, 2009).

Nabel *et al.* (1999), estudiando suelos y sedimentos del sur de la Pampa Ondulada, encontraron que diferencias en la mineralogía de la fracción de arcilla se correlacionaban con diferencias en los parámetros magnéticos, en particular con la susceptibilidad magnética. Posteriormente, en la misma área, estudios realizados por Morrás *et al.* (2004-a) permitieron confirmar esa interesante relación indirecta entre la mineralogía de arcillas y la susceptibilidad magnética. De esta manera, el mayor contenido de esmectita se relaciona con valores menores de susceptibilidad, en tanto una mayor proporción de illita se acompaña con valores mayores de susceptibilidad magnética. Recientemente Liu *et al.* (2010) estudiaron las propiedades magnéticas de dos suelos de la Pampa Ondulada de diferente composición mineralógica; el trabajo

permitió establecer que gran parte de la señal magnética de estos suelos es de origen litogénico -es decir relacionada con las características composicionales del material parental- en tanto una porción reducida de la señal es de origen pedogenético.

## **I.2. Justificación de este trabajo**

Además del rol de la materia orgánica en la fertilidad, diversas características físicas y fisicoquímicas de los suelos están condicionadas por la composición de sus fracciones inorgánicas. La mineralogía de las fracciones finas y gruesas del suelo influye sobre la estructura, la porosidad, los procesos de expansión-contracción y la dinámica del agua. Así también características fisicoquímicas fundamentales de los suelos como la capacidad de intercambio iónico, la proporción de las bases del complejo de cambio y el pH dependen en gran medida de su textura y de su composición mineralógica.

En la Pampa Ondulada, donde se concentra una alta proporción de la actividad agrícola-ganadera de Argentina, se han descripto en las posiciones positivas del paisaje numerosas series de suelos, las que presentan rasgos diferenciales en buena parte originados a partir de composiciones texturales y mineralógicas distintas. Sin embargo, hasta el presente los estudios de caracterización mineralógica de dichos suelos son notoriamente escasos. Del mismo modo tampoco se ha estudiado en forma detallada cuales son los atributos esenciales -físicos y químicos- que surgen de dichas diferencias composicionales.

## **I.3. Hipótesis**

-La granulometría y la mineralogía de los suelos de la Pampa Ondulada es heterogénea, y es función de diversos materiales parentales constituídos por aportes sedimentarios de origen diverso.

- Algunas propiedades químicas y físico-químicas de los suelos de la Pampa Ondulada están altamente relacionadas con su granulometría y la mineralogía.

## **I.4. Objetivos específicos**

1-Determinar la composición mineralógica de la fracción fina y de la fracción magnética de suelos representativos de distintos ámbitos de la Pampa Ondulada

2-Cuantificar algunos parámetros químicos y físico-químicos relevantes de los distintos suelos seleccionados

3-Establecer la relación existente entre la composición mineralógica y las propiedades químicas y físico-químicas de dichos suelos

## **I.5. Materiales y métodos**

### I.5.1. Caracterización y descripción de los perfiles estudiados:

Para llevar a cabo estos objetivos se seleccionaron y estudiaron perfiles de cinco suelos Argiudoles representativos de distintos subórdenes y localizados en distintos ambientes de la Pampa Ondulada en las provincias de Buenos Aires y Santa Fe, diferenciados en las características geomorfológicas y en los materiales parentales de sus suelos.

La zona donde se ubican los cinco perfiles estudiados presenta precipitaciones medias anuales que varían entre 900 y 1100 mm, con mayor incidencia en los meses de verano y menor en el invierno, en tanto la temperatura media anual varía entre 14 y 17 °C. Desde el punto de vista de la Taxonomía de Suelos (Keys of Soil Taxonomy, 2010) para la zona corresponden un un régimen de humedad Udico y un régimen de temperatura Térmico (Van Wambeke & Scoppa, 1976).

De acuerdo a su ubicación en las cartas de suelos de la República Argentina Chivilcoy (Chivilcoy 3560-15-4), Luján (Mercedes 3560-11-3) y San Pedro (Los Patricios 3360-34-1) (INTA, 1966-1967) los perfiles muestreados corresponderían a las siguientes series de suelos de la provincia de Buenos Aires: O'Higgins (Argiudol típico) (Partido de Chivilcoy 34°57'28,7''S 60°13'14,6''O, Lima (Argiudol ácuico) (Partido de Luján 34°32'39,3''S 59°18'38,4''O) y Ramallo (Argiudol vértico) (Partido de San Pedro 33°48'11,14''S 59°55'20,68''O).

Por su parte aquellas que corresponden a la Provincia de Santa Fe están ubicados en la carta de suelos Arroyo Seco (Acebal 3360-20-3) (INTA, 1983) y en el Mapa detallado de suelos de la Experimental Agropecuaria Oliveros (INTA, 1980). Los perfiles muestreados corresponderían respectivamente a las series: Peyrano (Argiudol vértico) (Comuna Arminda del departamento Rosario 33°14'43''S 60°56'15,9''O) y a un suelo transicional entre la Serie Maciel (Argiudol típico) y la Serie Ribera (Argialbol típico), (Comuna Oliveros del Departamento Iriondo 32°33'51'' S 60°51'57,1'' O)

Según las divisiones geomorfológicas descritas por Scoppa & Vargas Gil (1969) los perfiles de Luján, San Pedro, Arminda y Oliveros se encuentran en la subzona I y el perfil de Chivilcoy en la subzona V (Figura N° 2).

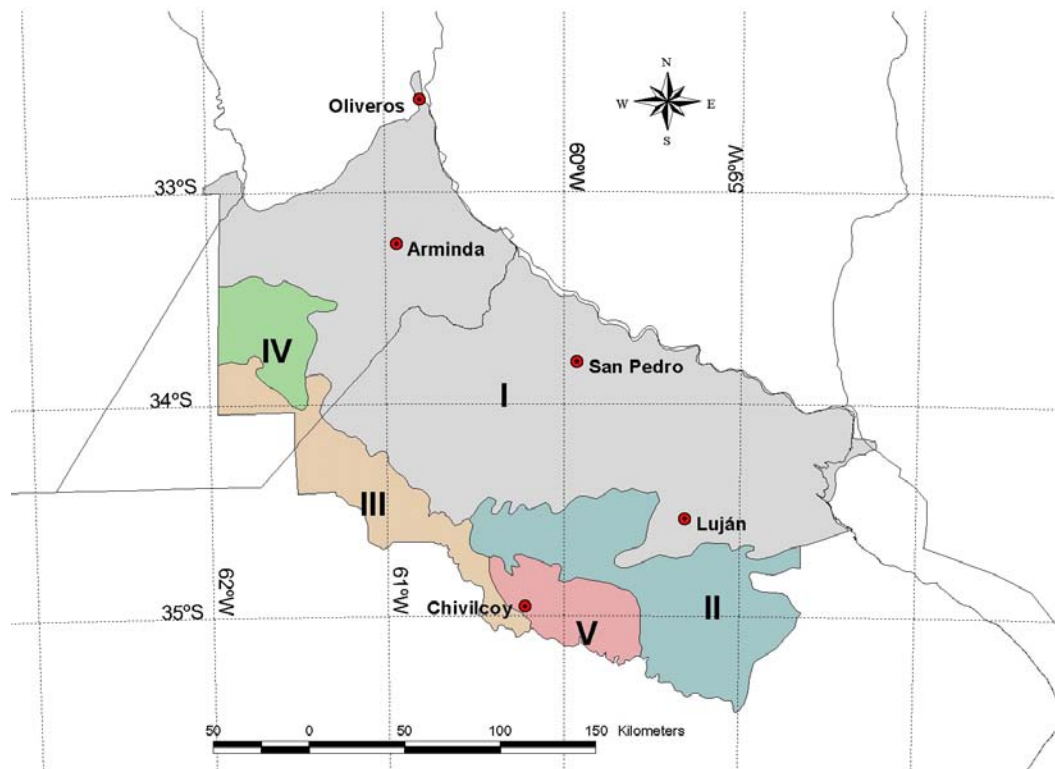


Figura N° 2- Mapa de la Pampa Ondulada con sus subzonas geomorfológicas con la localización de los perfiles estudiados

Los suelos de la Serie O'Higgins y Ramallo corresponden a las unidades taxonómicas dominantes en sus correspondientes unidades cartográficas y constituyen dos tipos de suelos claramente contrastantes dentro de la región estudiada. El suelo de la Serie Peyrano también corresponde a la serie de suelos dominante en su unidad cartográfica; debe mencionarse sin embargo que esta serie ha sido clasificada alternativamente como Argiudol vértico o Argiudol típico, existiendo mapas de suelos del sur de Santa Fe con estas distintas clasificaciones. La serie Lima caracteriza el borde de cubetas frecuentes en las lomas del NE de la prov. de Buenos Aires; este suelo es un Argiudol ácuico que ha sido poco estudiado y su interés radica en que sus horizontes superficiales reflejan características intrazonales (formación de un horizonte E), en tanto sus horizontes subsuperficiales contienen la información correspondiente a los suelos dominantes y materiales parentales que caracterizan su unidad cartográfica. Esta serie se encuentra distribuida en una amplia región como componente secundaria de distintas unidades cartográficas. Del mismo modo, el suelo localizado en Oliveros contiene un horizonte E, en este caso discontinuo; los horizontes superficiales del perfil aquí estudiado representan así distintas condiciones edáficas del área en que se encuentra, en tanto los horizontes subsuperficiales contienen la información mineralógica y sedimentológica que interesa también en este trabajo.

En la Figura N° 3 se observan las unidades taxonómicas dominantes de la región de la Pampa Ondulada y la localización de los perfiles que fueron estudiados para este trabajo de tesis. Por otra parte, la Figura N° 4 es el mapa digital de elevaciones de la región de la Pampa Ondulada con la localización de los perfiles estudiados.

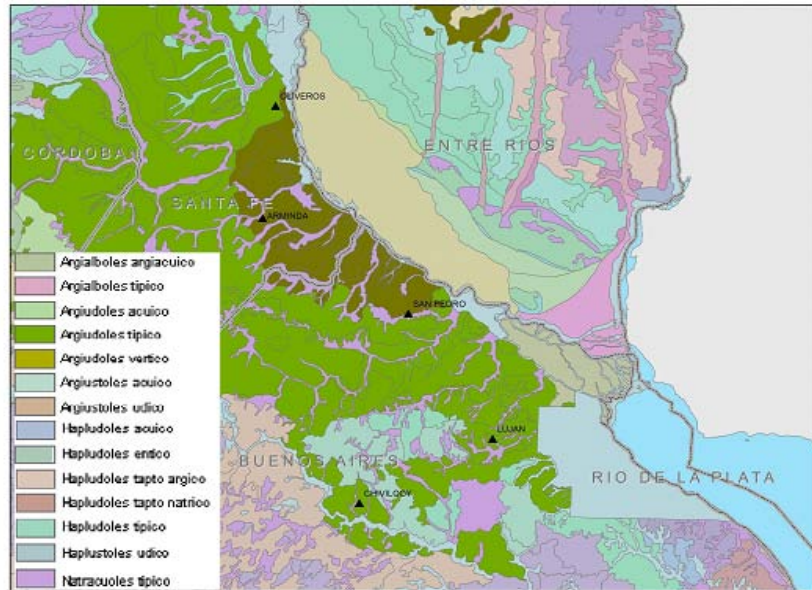


Figura N° 3- Mapa de las unidades taxónomicas dominantes de la Pampa Ondulada con la localización de los perfiles estudiados. (Fuente: Atlas de Suelos de la República Argentina, 1990).

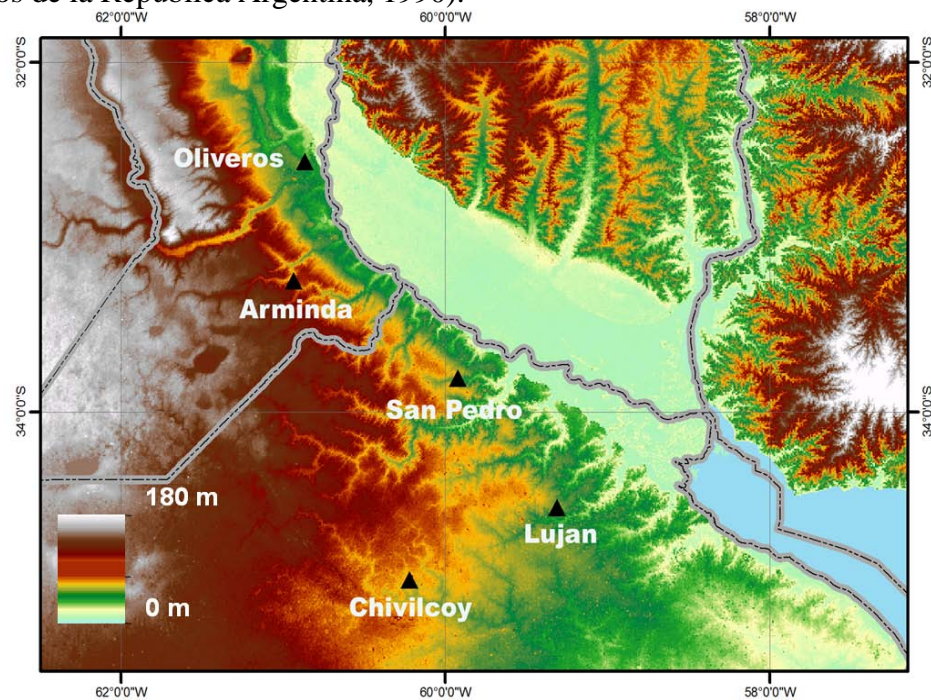


Figura N° 4- Mapa digital de elevaciones de la Pampa Ondulada con la localización de los perfiles estudiados. (Fuente: Shuttle Radar Topography Misión SMRT 90).

### I.5.2. Descripción de los suelos estudiados

A continuación se presenta la descripción de campo efectuada de cada uno de los perfiles estudiados según las normas del "Libro de Campaña para la descripción y muestro de suelos" (Schoeneberger *et al.*, 2002).

**CHIVILCOY** Argiudol típico

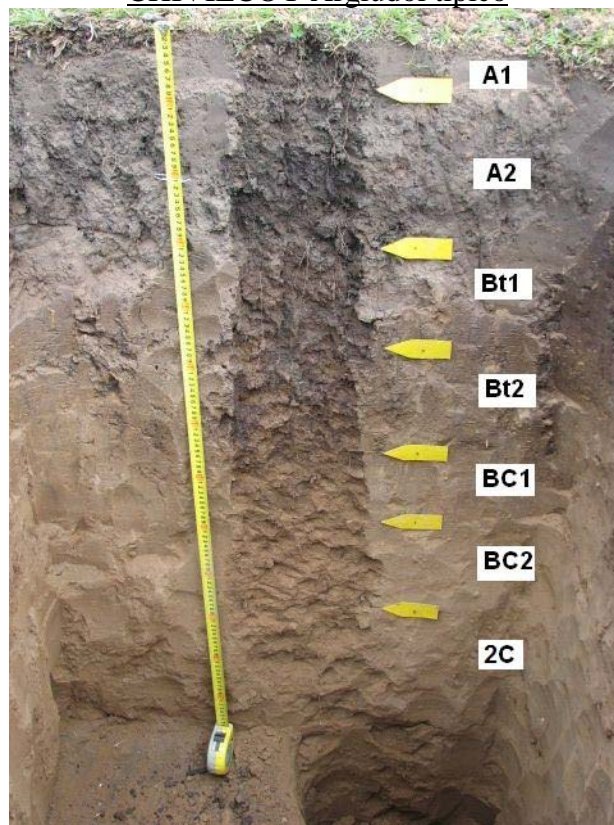


Figura N° 5- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Chivilcoy (Pcia. de Buenos Aires) (Argiudol típico, Serie O'Higgins)

**A1.** 0-9 cm. Bloques subangulares finos y medios (5-20 mm), fuerte. Textura franca. Consistencia en seco ligeramente duro a duro. Raíces abundantes, finas (1 mm) (cabellera de raíces). Color en seco 7.5 YR 3/2-(4/2)\*. Límite claro, plano.

**A2.** 9-30 cm. Bloques subangulares gruesos (5-7 cm), fuerte, con desarrollo vertical ligeramente mayor que horizontal. Textura franca. Consistencia en seco duro. Raíces comunes muy finas (<1mm). Poros finos (1 mm) comunes y medios (entre 2y 3 mm) comunes. Color en seco 7.5 YR 3/2-(4/2). Límite claro, plano.

**Bt1.** 30-47 cm. Bloques subangulares gruesos a muy gruesos, prismas gruesos (7 cm de largo), irregulares, fuerte. Textura franca. Consistencia en seco extremadamente duro. Revestimientos abundantes que tapizan muchas paredes, oscuros, arcillo-húmicos, delgados. Raíces finas (1mm) comunes. Poros finos (1 mm) comunes. Color en seco 7.5 YR 4/3-(4/4). Límite claro, plano

**Bt2.** 47-67 cm. Bloques angulares gruesos y muy gruesos (5-7 cm), fuerte, que se organizan en prismas gruesos muy débiles, muy poco evidentes. Textura franca. Consistencia en seco extremadamente duro. Revestimientos arcillo húmicos oscuros, discontinuos, pero que cubren gran parte de las paredes y contrastan con la matriz de color pardo (es característico del horizonte el contraste de colores). Raíces comunes a escasas, finas (1 mm) medias (2 mm y también de 4 mm). Poros finos (1 mm). Color en seco 7.5 YR 4/4-(5/4). Límite claro, plano a ligeramente ondulado.



BC1. 67-82 cm. Bloques subangulares gruesos y muy gruesos (5-10 cm) irregulares, achatados en sentido vertical (tendencia a oblado), moderado. Textura franca. Consistencia en seco duro. Revestimientos de arcilla pardos (diferentes a los del horizonte B2t) discontinuos (ocupan 1/3 de las superficies), escasos, muy delgados, y algunos oscuros, húmicos. Raíces escasas finas (1 mm). Poros finos (1 mm) comunes. Color en seco 7.5 YR 5/4-(6/4). Límite gradual, plano.

BC2. 82-101 cm. Bloques irregulares subangulares gruesos y muy gruesos (5-7 cm), débiles, a masiva (sin agregados), coherente. Textura franca. Revestimientos de arcilla delgados, muy escasos. Raíces muy escasas, medias (3-4 mm). Poros finos (1 mm) comunes. Se observan algunas manchas oscuras (de raíces humificadas, tubulares). Color en seco 7.5 YR 5/4-(6/4). Límite gradual, plano.

2C. 101-(150) cm. Sin estructura, coherente, masivo, compacto. Textura franco arenosa. Raíces muy escasas, medias (3-5 mm); manchas oscuras de raíces humificadas. Poros muy finos (<1mm) comunes a frecuentes. Color en seco 7.5 YR 5/4-(6/4).

\*Nota: Para todas las muestras color de la superficie de agregados. El segundo valor de intensidad/luminosidad corresponde a determinación en laboratorio.

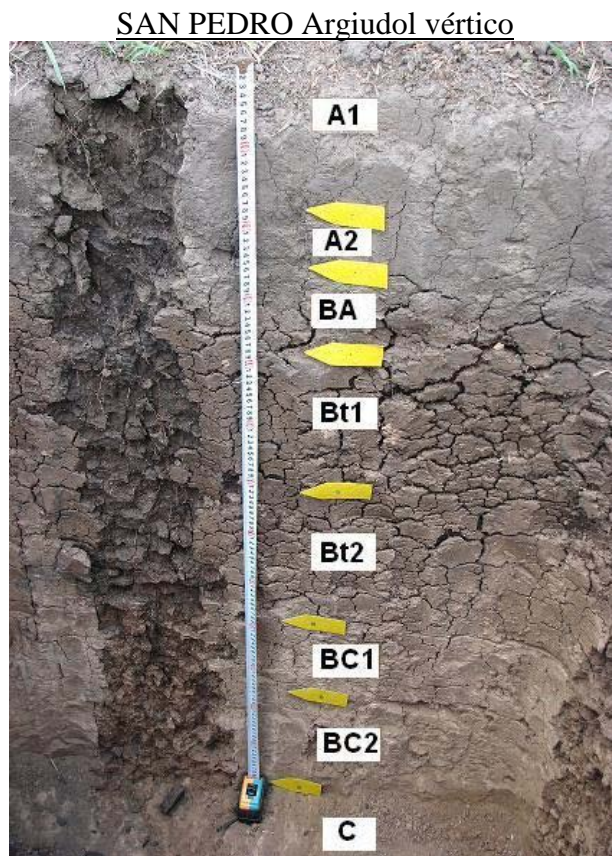


Figura N° 6- Perfil de suelo descrito en las proximidades de San Pedro (Pcia. de Buenos Aires) (Argiudol vértico, Serie Ramallo)

A1. 0-5 cm. Bloques subangulares finos (1 mm) moderados a débiles, con subestructura granular/migajosa fuerte. Textura franco arcillo limosa. Friable en húmedo. Raíces muy

finas (< 1 mm) comunes a abundantes. Color en seco 7,5 YR 4/2\*. Límite abrupto, plano.

A2. 5-25 cm. Bloques subangulares gruesos (5 cm) moderada a fuerte. Superficie de los agregados rugosa. Textura franco arcillo limosa. Friable en húmedo (algo menos friable que el A1). Consistencia en seco muy duro. Raíces muy finas (<1mm) intra-agregados, abundantes. Poros finos (1mm) comunes y medios (2-3 mm) pocos. Color en seco 7,5 YR 4/2. Límite abrupto, plano.

BA. 25-37 cm. Bloques subangulares con tendencia a angulares, gruesos (5 cm), desarrollo fuerte. Textura franco arcillo limosa. Consistencia en seco muy duro. Raíces comunes < 1 mm. Color en seco 7,5 YR 4/3. Límite abrupto, plano.

Bt1. 37-61 cm. Bloques angulares a ligeramente subangulares, gruesos, (2-4 cm), fuertes, que se organizan en prismas gruesos de unos 8 cm de largo, moderados a débiles. Los bloques más evidentes de 2-4 cm a su vez se subdividen en bloques más pequeños de 1 cm de diámetro, que serían los de menor tamaño del sistema estructural. Textura arcillo limosa. Firme en húmedo y plástico en mojado. Consistencia en seco muy duro. Revestimientos de arcilla y de arcilla y materia orgánica. Raicillas muy finas (< 1mm) comunes en poros entre agregados. Color en seco 7,5 YR 4/3. (El color de la matriz en el interior de agregados es heterogéneo, con chorreaduras negras en la superficie; el conjunto algo más claro que el horizonte BA). Límite claro (de unos 3 cm).

Bt2. 61-88 cm. Bloques angulares con ligera tendencia a subangulares, gruesos (2-4 cm), fuertes, que se organizan en prismas de unos 10 cm, débiles. También se siguen rompiendo en bloques angulares medianos (alrededor de 1 cm). Textura franco arcillo limosa. Consistencia en seco duro a muy duro. Revestimientos de arcilla. Revestimientos oscuros de materia orgánica y arcilla, comunes, ocupando ¼ de las superficies que contrastan fuertemente con la matriz de color pardo, en menor cantidad que en Bt1. Raicillas muy finas (< 1 mm) comunes, entre agregados. Color de la matriz en seco 7,5 YR 5/4. Color de la superficie de agregados en seco 7,5 YR 4/4 (algo menos oscuro que Bt1). Límite abrupto (1-2 cm) plano.

BC1. 88-105. Bloques claramente angulares, gruesos (2-4 cm) fuertes, que se organizan en prismas gruesos (de unos 8 cm) moderados. Bloques en cuña subhorizontal, ocasional. Textura franco limosa. Consistencia en seco dura. Revestimientos de arcilla abundantes y revestimientos negros de materia orgánica, escasos. La matriz es heterogénea, alternando sectores menos arcillosos y más amarillentos, similares al C, y otros sectores más arcillosos. Raicillas entre agregados comunes. Color en seco 7,5 YR 5/4; (color de los revestimientos húmicos 7,5 YR 4/2). Límite claro

BC2. 105-128 cm. Bloques con tendencia a subangulares, gruesos (unos 5 cm), irregulares, moderados. Textura franco limosa. En este horizonte disminuye notoriamente la proporción de revestimientos, por lo que el color de las caras de agregados ya se parece más a la matriz y al C (más amarillento). Aquí disminuye la proporción de raicillas, cuya proporción en el resto del perfil fue más o menos constante. Color en seco 7,5 YR 6/4-5/4. Límite plano, claro.

C. 128+. Bloques subangulares medianos débiles a masiva, coherente. Textura franco limosa. Resulta llamativo en este horizonte la abundancia de poros muy finos (0,5-1 mm) y finos (unos 2mm). Color en seco 7,5 YR 6/4.

\*Nota: para todas las muestras; color de la superficie de agregados.

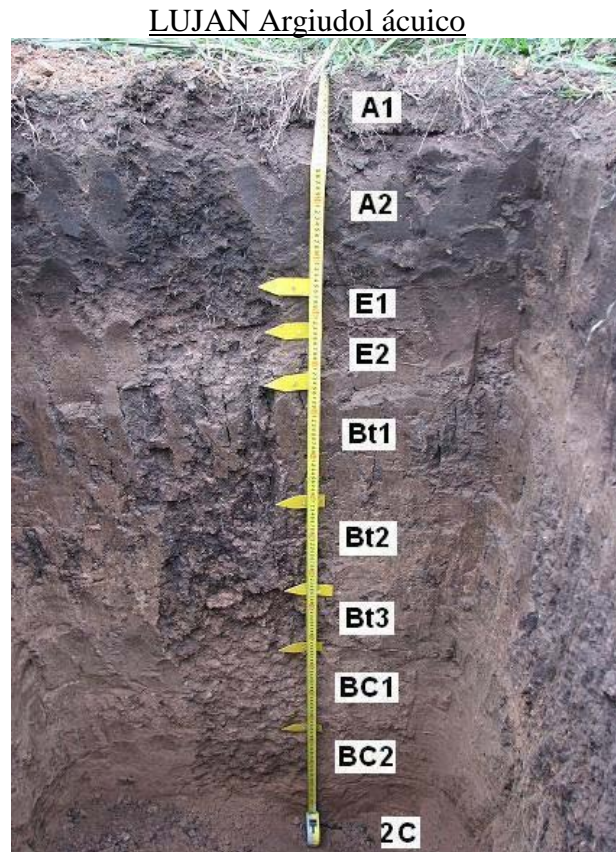


Figura N° 7- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Luján (Pcia. de Buenos Aires) (Argiudol ácuico, Serie Lima)

A1. 0-9 cm. Bloques subangulares finos (entre 5-10 mm) moderados, que rompen en agregados granulares y migajosos, finos (1-2 mm). Textura franco limosa. Consistencia en húmedo muy friable. Raíces muy abundantes, finas (1 mm) y gruesas (10 mm, de sorgo de alepo). Color en seco 7,5 YR 4/2-4/3\*. Límite abrupto (menor de 2 cm), plano a ligeramente ondulado.

A2. 9-35 cm. Bloques subangulares gruesos (5-10 cm), fuerte. Consistencia en húmedo friable. Raíces abundantes, en menor proporción que en A, muy finas (< 1mm). Color en seco 7,5 YR 4/2-4/3. Color en húmedo más oscuro que el A1. Límite claro, plano.

E1. 35-45 cm. Bloques subangulares, gruesos (aproximadamente 3 cm). Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable. Raíces abundantes muy finas (<1mm). Poroso. Color en seco 7,5 YR 5/3. Color en húmedo más claro, amarronado, que el A2. Límite abrupto, plano. (Este horizonte constituye la base del A2, degradada.)

E2. 45-55 cm. Bloques subangulares gruesos (aproximadamente 3 cm), se presentan redondeados pero con algunas aristas cortas angulares. Textura franco limosa. Raíces

comunes. Color en seco 7,5 YR 5/3. Límite abrupto, plano. (Este horizonte constituye la cabeza del Bt, degradada.)

Bt1. 55-82 cm. Prismas medianos y grandes (4-5 cm ancho por 14 cm largo), fuerte, que rompen en bloques angulares gruesos (3x5 cm). Textura franco arcillo limosa. Consistencia en seco muy duro. Revestimientos arcillo húmicos abundantes; disminución gradual hacia abajo de la cantidad de revestimientos; la matriz interna de los agregados presenta color similar a las caras externas. Raíces comunes en las fisuras interagregados. Nódulos de Mn finos (2 mm) comunes a abundantes, blandos. Color de la matriz en seco 7,5 YR 4/4-5/3; color de los recubrimientos en seco 7,5 YR 4/3. Límite inferior gradual (cerca de 12 cm).

Bt2. 82-105 cm. Prismas medianos (4 cm ancho por 12 cm largo), moderados a débiles, que rompen en bloques angulares gruesos (2x4 cm) fuertes. Textura franco arcillo limosa Consistencia en húmedo muy firme, en seco muy duro. Algunos nódulos pequeños (2-3 mm) de Mn. Revestimientos arcillo-húmicos en un 90% de las superficies; la matriz interna de los agregados presenta color diferente, más anaranjado que las caras externas; en conjunto el color es menos oscuro que el del Bt1. Color de la matriz en seco 7,5 YR 6/4; color de los recubrimientos en seco 7,5 YR 5/3-4/3. Límite claro (entre 2,5-7,5 cm, en promedio 5 cm)

Bt3. 105-125 cm. Bloques angulares a subangulares gruesos (2-3 x 6 cm), moderados a fuertes. Textura franco limosa. La textura de la matriz interna de los agregados es claramente menos arcillosa que en los Bt suprayacentes. Consistencia en húmedo firme, en seco ligeramente duro. Menor proporción de revestimientos arcillosos y menos humíferos que en los horizontes Bt suprayacentes. Raíces muy finas (diámetro menor a 0,5 mm). Poros finos frecuentes. Color en seco 7,5 YR 6/4. Límite claro.

BC1. 125-157 cm. Bloques subangulares gruesos (promedio 3 cm), moderados. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable. Algunos revestimientos delgados, en general relacionados con poros alargados. Nódulos y revestimientos de Mn, de mayor desarrollo que en los horizontes superiores (entre 3-5 mm), comunes, en general relacionados con poros racinarios. Raíces muy finas (diámetro menor a 0,5 mm), escasas. Color en seco 7,5 YR 7/4. Límite claro (entre 2,5-7,5 cm).

BC2. 157-185 cm. Bloques subangulares gruesos (2- 3 cm), débiles. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable. Algunos revestimientos de arcilla delgados. Nódulos y revestimientos de Mn, (entre 3-5 mm), comunes; algunos parecen ser el núcleo de nódulos algo arcillosos, redondeados, de 15 mm de diámetro (concreciones). Poroso, con poros iguales o menores a 1 mm. Color en seco 7,5 YR 7/4. Límite claro.

2C. 185-200+ cm. Horizonte en discontinuidad. Masivo; eventualmente bloques subangulares medios (promedio 2 cm), muy débiles. Ocasionales revestimientos arcillosos delgados. Algunas manchas ocasionales de reducción, color verdoso, pequeñas (3-5 mm), en poros de raíces. Rastros de carbonato de calcio pulverulento. Poros finos comunes. Color en seco 7,5 YR 6/4 (más rojizo y oscuro que el BC).

\*Nota: Para todas las muestras color de la superficie de agregados.

ARMINDA Argiudol típico/vértico

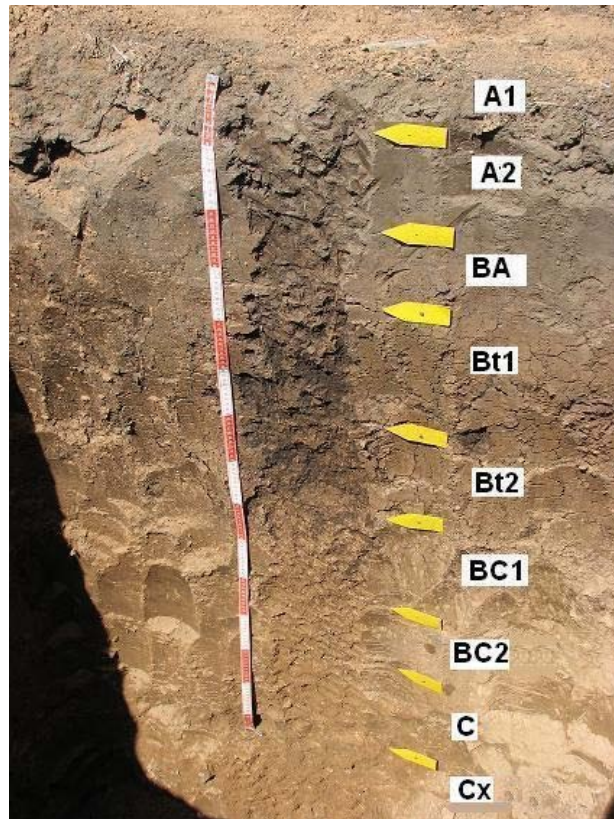


Figura N° 8- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Arminda (Pcia. de Santa Fé) (Argiudol típico/vértico, Serie Peyrano)

**A1.** 0-6 cm. Bloques subangulares medios y gruesos (promedio 25 mm) que rompen en bloques muy finos y en agregados migajosos, moderados. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable. Raíces escasas, muy finas (alrededor de 1 mm). Color en seco 7,5 YR 6/3\*. Límite abrupto (menor de 2 cm), plano a ligeramente ondulado.

**A2.** 6-20 cm. Bloques subangulares gruesos (alrededor de 5 cm), moderado a fuerte. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable a firme. Raíces escasas muy finas, (1mm) y finas (2 mm) escasas. Poros muy finos escasos (se observa poca porosidad). Color en húmedo 7.5 YR 2/2\*; color en seco 7,5 YR 6/3\*. Límite abrupto (menor a 2 cm), plano (horizonte húmedo).

**BA.** 20-33 cm. Bloques subangulares, transicionales a angulares, gruesos (aproximadamente 5 cm) moderado a fuerte, con caras más rugosas que las de los agregados del horizonte A. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo firme a ligeramente firme. Revestimientos abundantes que tapizan muchas paredes, oscuros, arcillo-húmicos, delgados. Raíces muy finas (<1mm) y finas (2mm), escasas. Poros muy finos, escasos (poca porosidad). Color de la superficie en húmedo 7.5 YR 3/3. (Matriz de color amarronado, color más próximo al Bt que contrasta con los revestimientos oscuros). Color en seco 7,5 YR 6/3-5/4. Se observan granos brillosos (micáceos?) muy finos. Límite abrupto, plano (horizonte húmedo).

**Bt1.** 33-58 cm. Prismas medios (5 x 10 cm) moderados a débiles, que rompen en bloques angulares gruesos (5 x 5 cm) fuertes, y éstos en bloques medios (de aprox. 2,5 cm de lado) fuertes. Algunos prismas se presentan inclinados y bloques acuñaados. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo firme. Consistencia en seco

extremadamente duro. Revestimientos abundantes, arcillo-húmicos, espesor medio, continuos. Raíces escasas, muy finas (<1mm). Color de la matriz en húmedo 7.5 YR 3/3 a 3/4. Color de los revestimientos 7,5 YR 2/1-2/2. Límite claro (entre 2 y 5 cm), plano. (Horizonte bastante húmedo, se ve brillo de humedad en la cara de los agregados).

Bt2. 58-80 cm. Bloques angulares gruesos (3 cm), fuerte, que rompen en bloques medianos. Textura franco arcillo-limosa. Revestimientos arcillo húmicos oscuros, continuos, menos abundantes que en Bt1, y revestimientos de arcilla de color marrón (el conjunto del horizonte se ve más amarronado que Bt1). Raíces muy finas muy escasas. Poros muy escasos a inexistentes, salvo los interpedales. Se ven algunos granos de limo-arena brillosos, probablemente micáceos. Color de la matriz en húmedo 7.5 YR 3/4. Color de los revestimientos 7,5 YR 2/1-2/2. Límite claro a abrupto, según los sectores.

BC1. 80-102 cm. (este horizonte podría ser también descrito como Bt3, pero el color amarillento de la matriz es más semejante a C). Bloques subangulares gruesos (>5 cm), moderados. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable. Revestimientos oscuros arcillo-húmicos, discontinuos, comunes. No se ven raíces. Algún pedotúbulo <1 cm; poros tubulares de aprox. 1 x 5 cm, raros. Color de la matriz en húmedo 7.5 YR 4/6. Color de los revestimientos 7,5 YR 3/3. Límite claro, plano (horizonte húmedo)

BC2. 102--121 cm. (eventualmente se podría describir como BC/C). Estructura en bloques subangulares gruesos (aprox. 3 cm), débiles. Textura franco limosa. Consistencia friable (ligeramente húmedo). Revestimientos de arcilla delgados, escasos. Raíces muy escasas, muy finas. Algunos pedotúbulos de 1 cm de diámetro con deyecciones oscuras. Color en húmedo 7.5 YR 4/6-5/6. Límite claro, plano.

C. 121-142. Sin estructura, masivo. Textura franco limosa. Raros revestimientos arcillosos muy delgados. Consistencia friable (ligeramente húmedo). Incremento de las raíces muy finas (0,5 mm) aunque escasas. Color en húmedo 10 YR 4/6-5/6. Límite claro, plano.

Cx. 142-152. El material se presenta endurecido, coherente. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable a firme. (características frágicas poco desarrolladas). Son llamativos pedotúbulos oscuros, de unos 5 mm de diámetro, cortos, comunes. Color en húmedo 10YR 4/6-5/6. Límite claro, plano.

Ck. 152-172. Masivo. Textura franco limosa. Consistencia en húmedo friable. Carbonatos en masa (reacción al HCl débil). Pedotúbulos oscuros, comunes. Poros finos ocasionales a comunes. Color en húmedo 10YR 4/6-5/6.

\*Nota: Para todas las muestras color de la superficie de agregados.

OLIVEROS transicional entre un Argiudol típico y un Argialbol típico

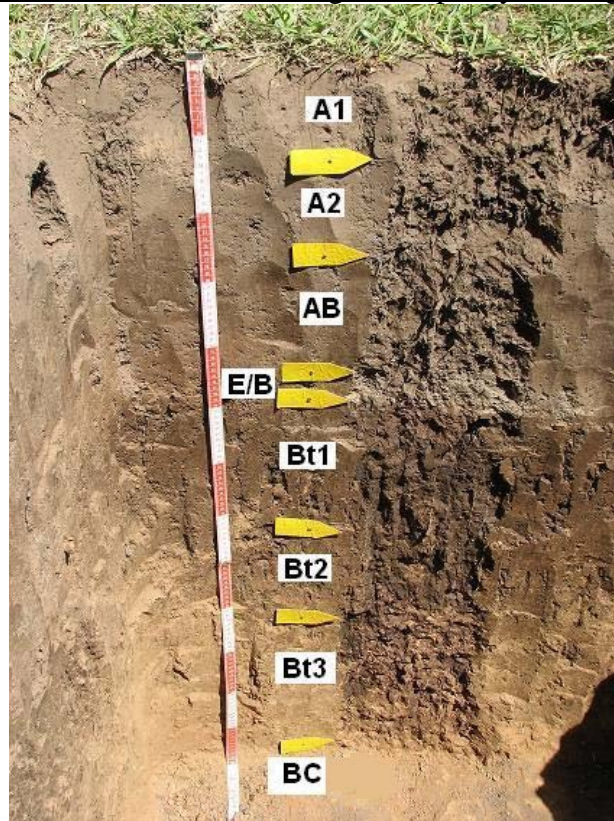


Figura N° 9- Perfil de suelo descrito en las proximidades de Oliveros (Pcia. de Santa Fé) (suelo transicional entre la serie Maciel (Argiudol típico) y la serie Ribera (Argialbol típico),

A1. 0-13 cm. bloques subangulares medios, (20 mm) fuertes, que rompen en bloques subangulares finos y muy finos, y en los primeros centímetros superficiales, en agregados migajosos. Raíces abundantes, medias (alrededor de 2 mm). Galerías de insectos, hormigueros; nidos de avispas. Poros biológicos finos (1-2 mm) abundantes y muy finos (0,5-1 mm) comunes. Consistencia en moderadamente húmedo, firme a friable. Límite claro (menor de 2,5 cm), plano. Color (moderadamente húmedo a seco) 7,5 YR 4/3\*.

A2. 13-26 cm. bloques subangulares gruesos (3-4 cm), fuerte; rompen en bloques subangulares medios. Consistencia en moderadamente húmedo, firme a friable. Raíces abundantes (entre 1-2 mm). Poros finos (1-2 mm) abundantes; poros tubulares de 5 mm comunes. Límite abrupto, ligeramente ondulado. Color (moderadamente húmedo a seco) 7,5 YR 4/3.

AB. 26-44 cm. Bloques subangulares gruesos (aproximadamente 7 cm), transicionales a prismas de 7x5 cm, irregulares, de superficie rugosa, con abundantes pellets fecales en las superficies. Raíces abundantes finas (1-2 mm) y ocasionales muy finas (0,5-1 mm). Poros finos y muy finos (0,5-2 mm) comunes; también poros de 2-3 mm (galerías de insectos). Consistencia en húmedo friable a firme. Color en ligeramente húmedo 7,5 YR ¾. Límite claro, ligeramente ondulado.

E/B. 44-50 cm. Horizonte discontinuo. Bloques subangulares medianos (en general, entre 1-2, cm; eventualmente hasta de 3 cm). Se desagregan fácilmente bajo presión en

bloques subangulares pequeños (menores a 1 cm) y hasta de pocos mm (2-3 mm). Raíces finas (menores a 1 mm), comunes. Poros finos, comunes. El material presenta color variegado, mezcla de materiales blanquecinos y materiales pardos. Color de los sectores más claros, en ligeramente húmedo 7,5 YR 5/3; en seco 7,5 YR 6/2. Límite abrupto, plano. En los sectores donde este horizonte eluvial discontinuo no se presenta, el límite se da entre los horizontes AB y Bt1.

Bt1. 50-74 cm. Estructura en prismas medianos (3-4 cm ancho por 10 cm largo), fuerte, que rompen en bloques angulares gruesos, 3-4x3 cm, fuertes; estos a su vez rompen en bloques medios, menores a 2 cm. Consistencia (con poca humedad) extremadamente firme. Textura arcillosa. Revestimientos arcillo-húmicos continuos. Raíces finas (1 mm) comunes a abundantes en las fisuras interagregados. Poros muy finos, escasos. Límite claro, plano. Color (ligeramente húmedo a seco) 7,5 YR 3/3-3/4.

Bt2. 74-94 cm. Estructura en prismas medianos débiles; bloques angulares gruesos, 2x3 y 2x2 cm, fuertes. Revestimientos arcillo-húmicos discontinuos, entre los que se aprecia la matriz de color pardo amarillento. Textura arcillosa. Consistencia (poco húmedo) extremadamente firme. Raíces finas (1 mm) en los poros fisurales interagregados. Escasos poros finos dentro de los agregados. Color de las paredes revestidas, en ligeramente húmedo 7,5 YR 3/4; color de la matriz, en seco, 7,5 YR 5/4-6/4. Límite claro (menor a 5 cm).

Bt3. 94-129 cm. Estructura en bloques angulares a subangulares medianos (2-3 cm), moderados a fuertes. Revestimientos arcillo-húmicos discontinuos, en menor proporción que en Bt2, entre los que se aprecia la matriz de color pardo amarillento (superficie de revestimientos y matriz en proporciones similares). Raíces finas comunes, menos abundantes que en Bt2, algunas se desarrollan en las fisuras interagregados y otras al interior de los mismos, penetrando la matriz. Poros finos comunes. Consistencia en ligeramente húmedo muy firme. Límite abrupto, plano a ligeramente ondulado. Color de las paredes revestidas, en ligeramente húmedo a seco 7,5 YR 3/4; color de la matriz, en seco, 7,5 YR 5/4-6/6.

BC. 129-154 cm. Bloques subangulares gruesos (promedio 6 cm), moderados. Algunas acumulaciones húmicas, muy escasas, opacas, pequeñas (2-3 mm). Raíces muy finas (diámetro menor a 0,5 mm), escasas. Poroso, con poros finos (menores a 1 mm) comunes. Consistencia en húmedo ligeramente firme a firme. Límite claro, plano. Color en ligeramente húmedo 10 YR 5/4-5/6

BCkb. 154-189 cm. Bloques subangulares medianos (2- 3 cm) y finos (1-2 cm), moderados a fuertes. Alrededor de 1/3 de los agregados tienen revestimientos arcillosos finos. Algunos nódulos calcáreos de alrededor de 1 cm. Algunas concentraciones de Mn, pequeñas (nodulitos de 1 mm y revestimientos delgados pequeños). Algunas raíces, ocasionales, finas y muy finas (menores a 1mm). Poros finos escasos. Consistencia en ligeramente húmedo friable a ligeramente firme. Color de la matriz en ligeramente húmedo 7,5 YR 5/4-5/6; color de los revestimientos 7,5 YR 4/6. Límite claro, plano.

Ckb. 189-200+ cm. Bloques subangulares medios (promedio 2 cm), débiles, a masivo. Nódulos de carbonato de 1-3 cm de diámetro, algunos redondeados y otros irregulares. Revestimientos de Mn, de 1 cm de diámetro, comunes, acompañados con algo de



arcilla. Pedotúbulos húmicos, opacos, de 50 mm de diámetro. Consistencia en ligeramente húmedo friable. Color en ligeramente húmedo 7,5 YR 5/4-5/6.

\*Nota: Para todas las muestras color de la superficie de agregados.

### I.5.3. Determinaciones de laboratorio

En las muestras de suelo obtenidas de los distintos horizontes de los cincoperfiles descritos se realizaron los siguientes análisis físicos, físico-químicos y mineralógicos:

#### Análisis Granulométrico:

Los análisis granulométricos de todos los horizontes de los cinco perfiles estudiados se llevaron a cabo según el método de la pipeta de Robinson (Gee & Bauder, 1986). Las fracciones arcilla total ( $< 2 \mu\text{m}$ ) y limo total (2-50  $\mu\text{m}$ ) fueron determinadas en suspensión de agua mediante la extracción de alícuotas con la pipeta de Robinson aplicando los principios de la ley de Stokes. La fracción arena fue obtenida por tamizado en seco, fraccionada en arena muy gruesa, gruesa, mediana, fina y muy fina según la escala del USDA.

#### Mineralogía de Arcillas:

Se tomaron 20 gramos de muestra total ( $< 2000 \mu\text{m}$ ) de cada horizonte y se le agregaron 10 ml de Peróxido de Hidrógeno para eliminar la materia orgánica, se lo trató en frío y luego en caliente. Luego se le agregaron 20 ml hexametáfosfato de sodio que actúa como dispersante, se lo llevó a un litro con agua destilada en probetas y se lo agitó manualmente. La fracción arcilla obtenida por sedimentación aplicando la Ley de Stokes fue saturada con Cloruro de Magnesio para obtener muestras homoiónicas. El análisis mineralógico de la fracción arcilla se realizó mediante difracción de rayos X con un equipo Panalytical X Pert Pro sobre muestras orientadas naturales, glicoladas y calcinadas a  $550^\circ \text{C}$  de cada uno de los horizontes de los perfiles estudiados.

La identificación de las arcillas se efectuó evaluando el comportamiento de las muestras en cada uno de los tests aplicados. Una síntesis de los criterios utilizados se presenta en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1- Espacio interfoliar en Å de reflexiones basales en pequeños ángulos (2°-15° 2θ/min) Fuente: Robert, 1975; Brindley & Brown, 1980

Minerales	Naturales	Glicolados	Calcinados 200-300 °C	Calcinados 550 °C
Esmectitas	15-16 Å	16,8-20 Å	10 Å	10 Å
Vermiculitas	14-15 Å	14-16,5 Å	10 Å	10 Å
Cloritas	14-15 Å	14-15 Å	14-15 Å	14-15 Å
Illitas	9,5-10,3 Å	9,5-10,3 Å	9,5-10,3 Å	9,5-10,3 Å
Caolinitas	7-7,2 Å			
Interestratificados illita-vermiculita, illita-esmectita	10-16 Å	10-16 Å	9-10 Å	9-10 Å

### Susceptibilidad Magnética:

Se realizó el estudio de los minerales magnéticos a través de la susceptibilidad magnética a alta y baja frecuencia, medida con un equipo Bartington MS2 con un sensor MS2B. Para este fin se tomaron muestras de cada perfil estudiado a intervalos de 10 cm de profundidad. Las muestras se midieron en masa específica (SI  $10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ) Esto se hizo tanto para baja como para alta frecuencia. Las frecuencias usadas por el sensor MS2B son 0.465 kHz (LF) y 4.65 kHz (HF)  $\pm 1\%$  y está calibrado para muestras de masa de 10 gramos.

Fuente: Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System

Fósforo extractable: se determinó el contenido de fósforo extractable mediante la técnica de Bray & Kurtz (1945).

Carbono oxidable: se determinó el contenido de carbono oxidable mediante la técnica de Walkley –Black (1934).

Materia orgánica: se determinó mediante la aplicación de un factor empírico de 1,724 considerando un contenido promedio del 58% de carbono en la materia orgánica del suelo (Read J. W., Ridgell R. H., 1921).

Entre las propiedades físico-químicas, se analizaron particularmente aquellas relacionadas con el complejo de cambio (CIC, bases de cambio, pH).

Capacidad de intercambio catiónico: se determinó la capacidad de intercambio catiónico del suelo total mediante saturación con acetato de amonio (Klute, 1986).

Determinación de cationes de cambio: se realizó la determinación de los cationes del complejo de intercambio del suelo total mediante las técnicas habituales por absorción atómica y fotometría de llama.

pH del suelo: se efectuaron las determinaciones de pH en agua (relación suelo:agua 1:2.5).

#### I.5.4. Análisis estadístico:

Se realizó el análisis de componentes principales con el propósito de tener una visión sintética de la información obtenida de los cinco perfiles. La finalidad del método es obtener una representación de los suelos en un espacio reducido (generalmente de dos dimensiones), cuyas dimensiones son las primeras componentes principales, lo que será posible si las mismas acumulan un porcentaje de varianza importante respecto al total. De este modo, este análisis ofrece resultados interesantes si las variables elegidas están suficientemente correlacionadas para que pueda ser posible reducir la dimensión y obtener una ganancia de significación. Este tratamiento permitiría descubrir grupos de suelos afines dentro de todos los estudiados y observar las combinaciones lineales entre todas las variables estudiadas.

El análisis de componentes principales incluyó las siguientes variables: contenido de fósforo, contenido de potasio de intercambio, pH, contenido de carbono orgánico, CIC total, porcentaje de arcilla, porcentaje de limo, porcentaje de arena y susceptibilidad magnética. Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa Infostat /P v1.1, 2002

### **I.6. Resultados y Discusión**

Los datos analíticos completos de diversas determinaciones aquí consideradas se presentan en las Tablas incluídas en el Apéndice. En los apartados siguientes todos o parte de esos datos se representan gráficamente, y para algunas determinaciones se acompañan también Tablas con los resultados obtenidos.

#### I.6.1. Resultados de los Análisis Granulométricos:

Los resultados de los análisis granulométricos realizados en los cinco perfiles de suelos estudiados de la Pampa Ondulada (ver Apéndice), fueron agrupados según el contenido de arena, limo y arcilla en distintos gráficos.

En la Figura N° 10 se puede observar como varía el contenido de arena según la profundidad en los cinco perfiles de suelo estudiados.

El primer grupo constituido por el suelo de Chivilcoy es el que presenta mayor contenido de arena en todos los horizontes, con valores que se incrementan con la profundidad y que oscilan entre un mínimo de 33% en el horizonte A<sub>1</sub> y un máximo de 55,9% en el horizonte C. Debe notarse que en los horizontes más profundos es mayor el contenido de arena respecto de los horizontes superiores lo cual estaría indicando la presencia de diferentes materiales parentales en dicho perfil.

El segundo grupo constituido por el suelo de Luján presenta contenidos de arena que oscilan entre 6,5% en el horizonte E<sub>2</sub> y 12,8 en el BC<sub>1</sub>.

El tercer grupo de suelos lo constituyen los perfiles de San Pedro, Arminda y Oliveros, que poseen los menores contenidos de arena, con valores relativamente similares entre ellos. Tanto en el perfil de Luján como en los de este tercer grupo, las variaciones del contenido de arena con la profundidad se encuentran entre límites más acotados que en el caso del suelo de Chivilcoy. Por otro lado, y salvo algunos incrementos notorios en horizontes intermedios en los perfiles de Luján y Arminda, los contenidos mayores de arena se presentan en los horizontes superficiales y en los más profundos.

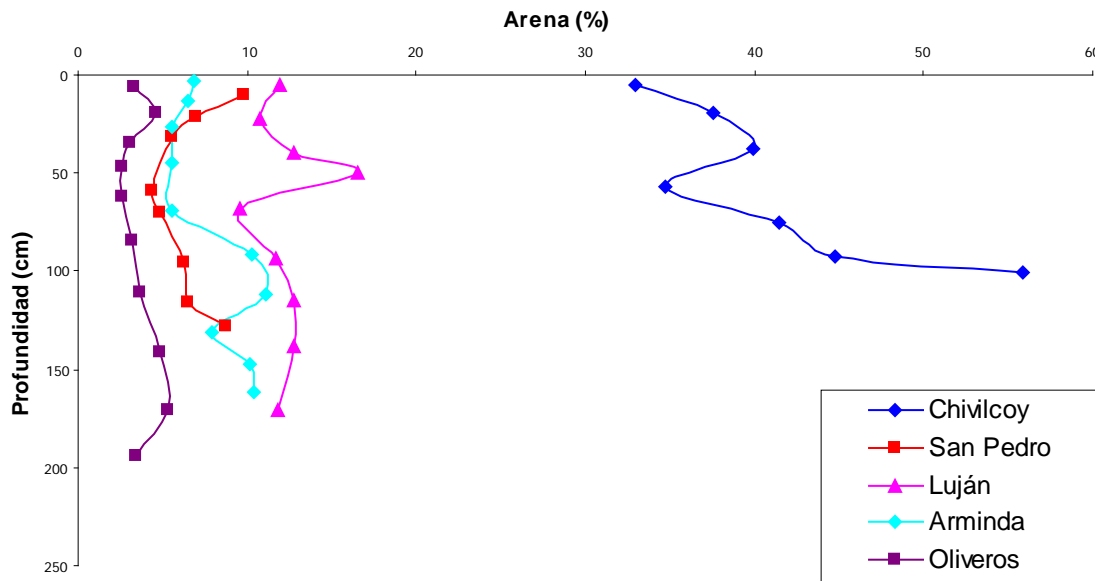


Figura N° 10- Variación del contenido de Arena (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

En la Figura N° 11 se puede observar como varia el contenido de limo en los suelos estudiados.

En la misma se puede constatar que el suelo de Chivilcoy es el que presenta el menor contenido de limo, con valores que oscilan entre 39 y 53%. El resto de los suelos presentan contenidos relativamente similares, particularmente en sus horizontes más profundos (entre 65 y 80%). A su vez, el suelo de San Pedro se diferencia de los restantes de este último grupo por presentar contenidos menores de limo en sus horizontes superficiales. Debe notarse también, que todos los suelos correspondientes a este grupo, presentan en esta fracción granulométrica un patrón de distribución similar con la profundidad, dada por una disminución clara del contenido de limo en los horizontes Bt. La única excepción al respecto es el horizonte Bt2 de Chivilcoy en el cual el contenido de limo aumenta lo que estaría indicando la presencia de un material parental distinto respecto del de los horizontes superficiales de dicho perfil.

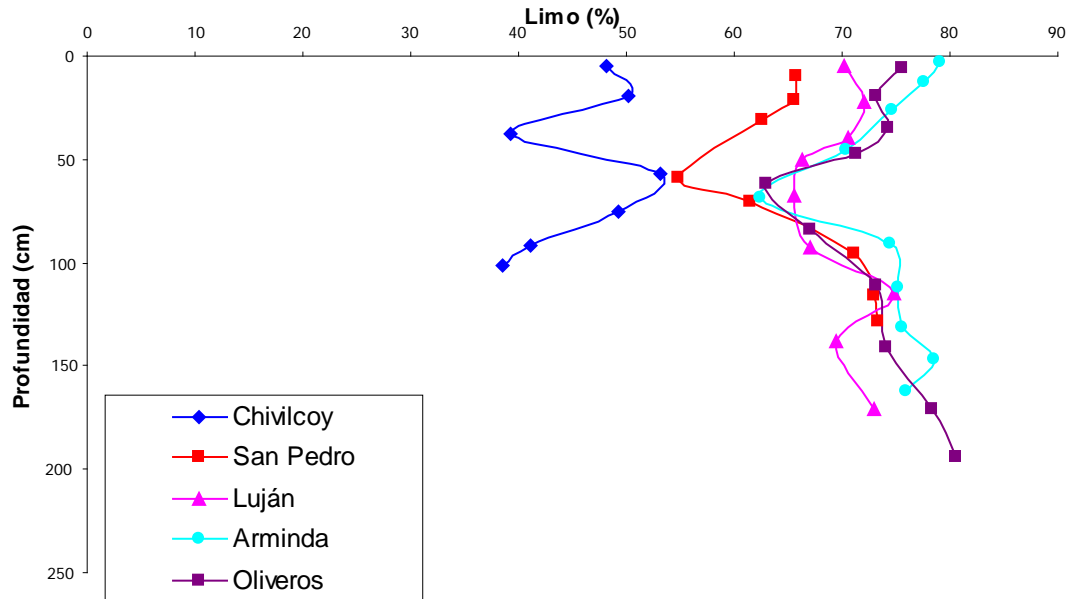


Figura N° 11- Variación del contenido de Limo (%) con la profundidad en los suelos estudiados.

En la Figura N° 12 se puede observar como varia el contenido de arcilla según la profundidad.

El suelo de Chivilcoy presenta los menores contenidos de arcilla respecto a los restantes. A pesar de ello, en todos los perfiles estudiados se observa claramente el incremento del contenido de arcilla en los horizontes Bt.

Tomando en cuenta los valores máximos de arcilla en los horizontes Bt de cada suelo, se observa la siguiente secuencia en el incremento del contenido de esta fracción granulométrica: Chivilcoy (20%) – Luján (25%) - Arminda (32%)- Oliveros (34%) – San Pedro (40%).

En los horizontes BC y C, de todos los suelos, ubicados entre 130 y 170 cm de profundidad, los contenidos de arcilla se aproximan a un valor del 17%, siendo el correspondiente a Oliveros el que manifiesta contenidos mayores.

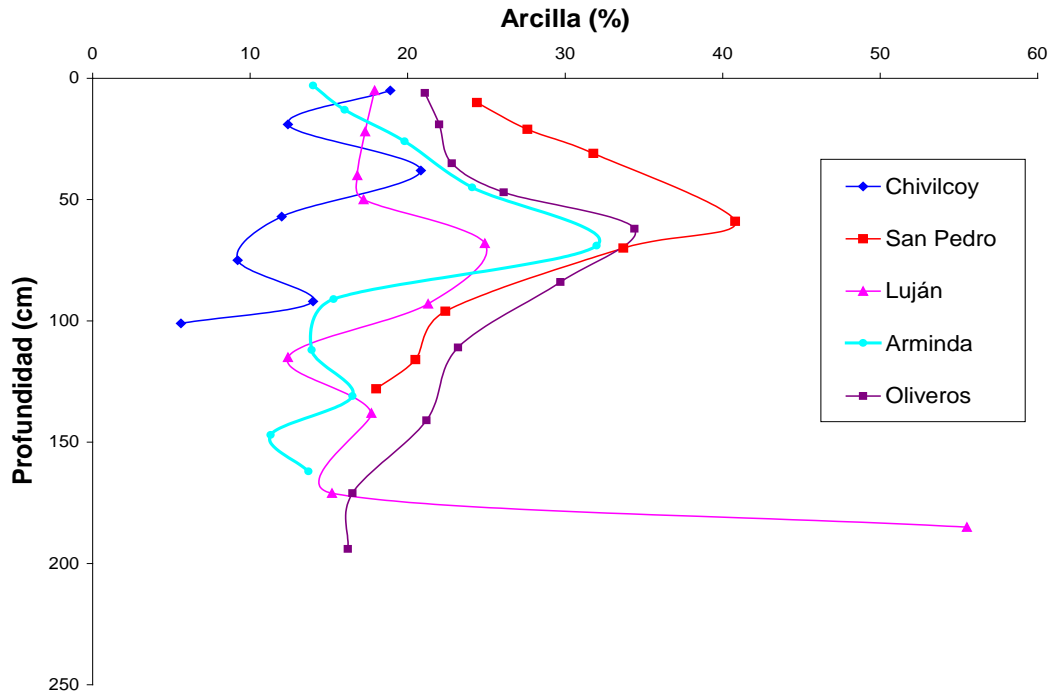


Figura N° 12- Variación del contenido de Arcilla (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

Por otro lado se utilizaron los horizontes BC de los distintos perfiles para clasificar los materiales del suelo de acuerdo a la clasificación textural de Bidart (1992) para sedimentos loéssicos (Figura N° 13). Conforme a esta clasificación el material originario del suelo de Chivilcoy corresponde a un loess arenoso en tanto el material originario de los suelos de Luján, San Pedro, Arminda y Oliveros corresponde a un loess típico. Estos resultados concuerdan con la zonación textural progresiva de los sedimentos loéssicos de la Pampa Ondulada con sentido SW a NE que fuera señalada por Morrás & Cruzate (2000-a). En este sentido, si bien Iriondo y Kröhling (1995) señalaran que el contacto entre el Mar de Arena (que estaría constituido por arena limo arcillosa) y la Faja de loess (con loess típico) es sorprendentemente estrecho, de solo 5-15 km de ancho, Morrás y Cruzate (2000-a) identificaron en la Pampa Ondulada una franja de loess arenoso cuyo ancho es de unos 60 km, la que se halla aquí representada por el perfil de Chivilcoy.

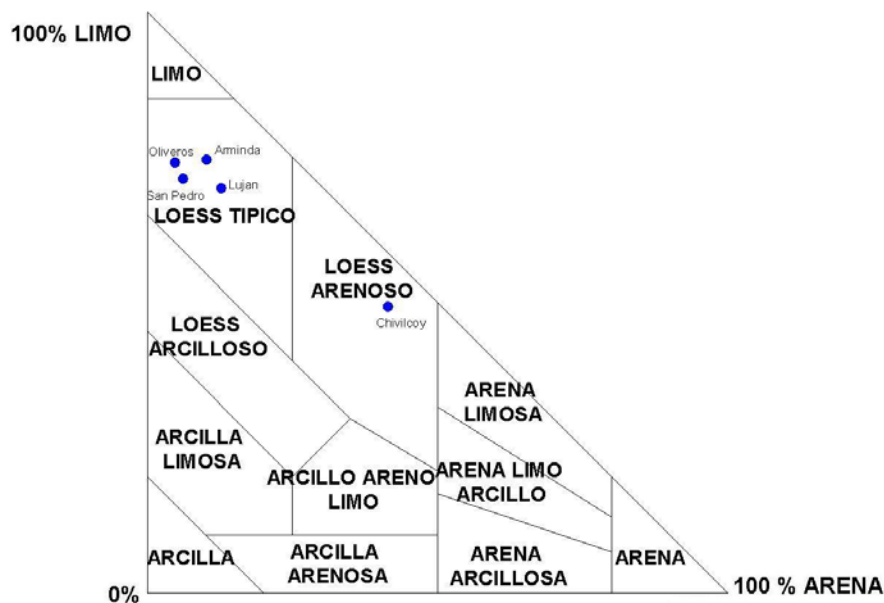


Figura N° 13 - Ubicación de los muestras de los horizontes BC en el triángulo textural para clasificar sedimentos eólicos (adaptado Bidart, 1992).

#### I.6.2. Resultados de los Análisis Mineralógicos

De los análisis mineralógicos efectuados en todos los horizontes de los cinco perfiles estudiados, se seleccionaron los horizontes A1, Bt1, BC1 y C, que expresan claramente las diferencias encontradas entre los mismos (Figuras N°14 A1, N° 15 Bt1, N° 16 BC1 y N° 17 C).

Los análisis por difracción de rayos x muestran que la fracción arcilla de todos los suelos estudiados está constituida por illita (I), interestratificados irregulares illita/ esmectita (I/E) y una cantidad reducida de caolinita (C). Si bien en todos los casos se identificaron las mismas especies minerales, sus proporciones varían entre los suelos estudiados.

En la Figura N° 14 se presentan los espectros de difracción de rayos x obtenidos sobre muestras de arcillas naturales (N-rojo), glicoladas (G-azul) y calcinadas (Q-verde) del horizonte A de los cinco perfiles.

De acuerdo a estos diagramas las muestras de Chivilcoy y Luján presentan una dominancia de illita representada por la reflexión a 10 Å y una escasa proporción de interestratificados illita/esmectita. En cambio, los diagramas de San Pedro, Arminda y Oliveros indican –además de la dominancia de illita- un incremento de la proporción de interestratificados illita/esmectita, particularmente en la muestra de San Pedro. Esto se puede observar en el mayor desplazamiento de las reflexiones de los minerales interestratificados illita/esmectita hacia los bajos ángulos en las muestras glicoladas y particularmente la disminución de los espacios interfoliares reflejados en el incremento en el pico de 10 Å de las muestras calcinadas.

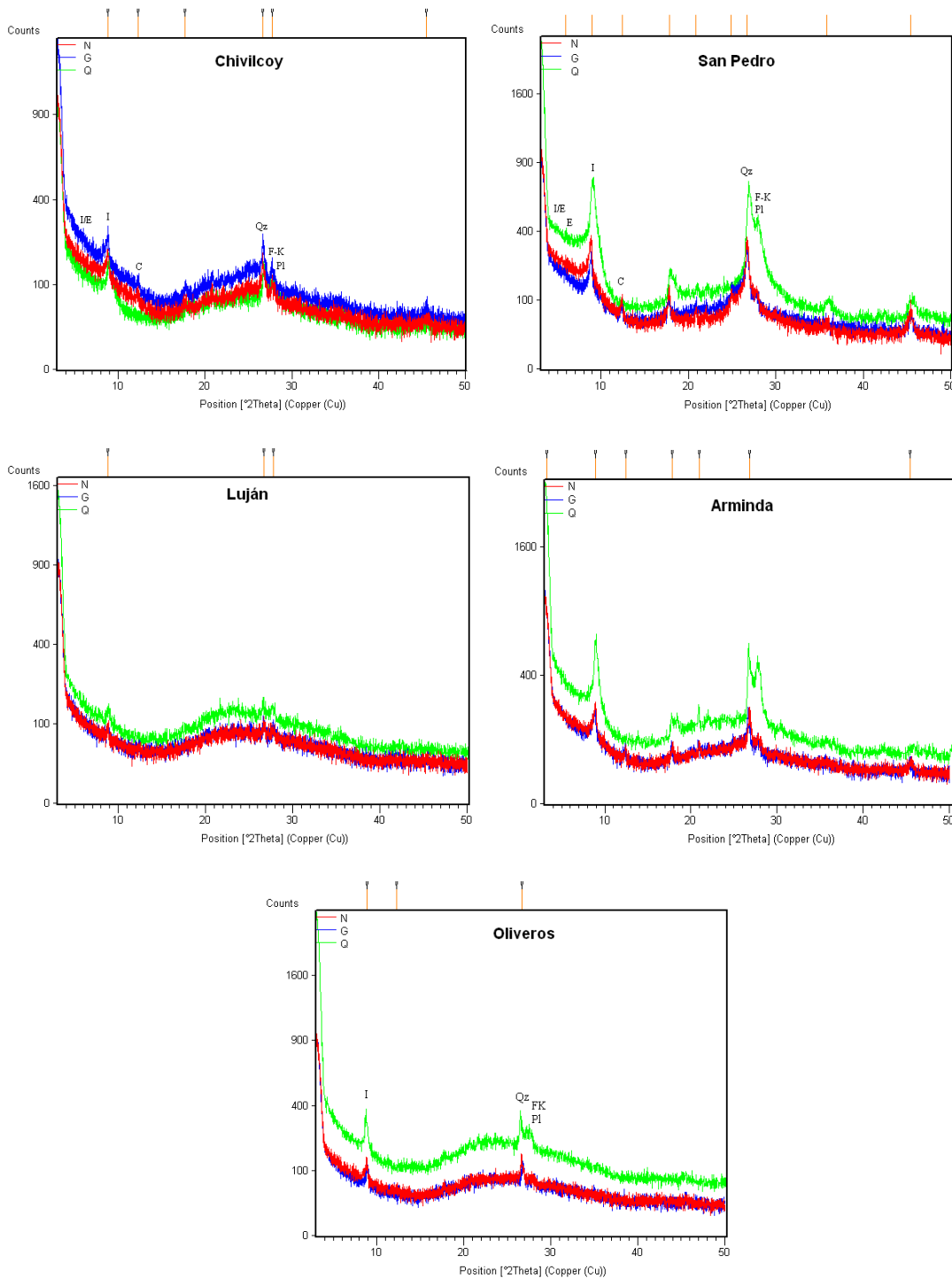


Figura N° 14 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte A1 de los suelos estudiados.

En la Figura N° 15 se presenta la difracción de rayos x sobre muestras de arcillas naturales(N), glicoladas (G) y calcinadas (Q) del horizonte Bt de los cinco perfiles.

Se puede observar en la misma, que además de la dominancia de illita en todas las muestras representada por la reflexión a 10 A, (indicado con la letra I) el horizonte Bt del perfil de San Pedro es el que tiene mayor proporción de interestratificados de illita/esmectita, seguido por los perfiles de Arminda y Oliveros. Por último se



encuentran los perfiles de Luján y Chivilcoy con menores proporciones de interestratificados I/E respecto de los otros perfiles.

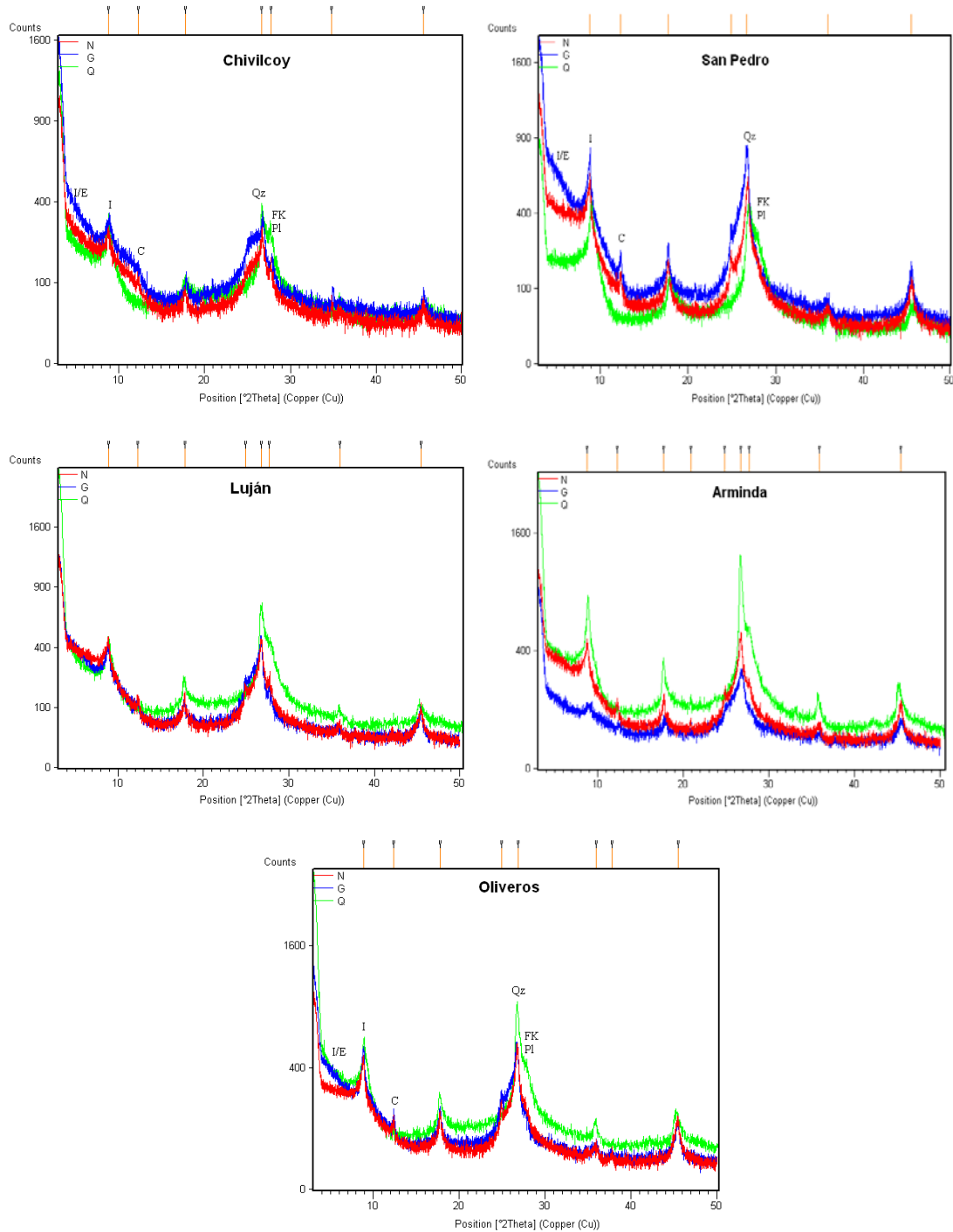


Figura N° 15- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte Bt de los suelos estudiados

En la Figura N° 16 se representa la difracción de rayos x de los distintos tratamientos efectuados sobre muestras de arcillas del horizonte BC de los cinco perfiles.

En la misma se puede observar que el horizonte BC del perfil de San Pedro es el que tiene mayor proporción de interestratificados de illita/esmectita seguido por los

perfiles de Arminda, Luján y Oliveros. En cambio el perfil de Chivilcoy fue el que presentó la menor proporción de dichas arcillas.

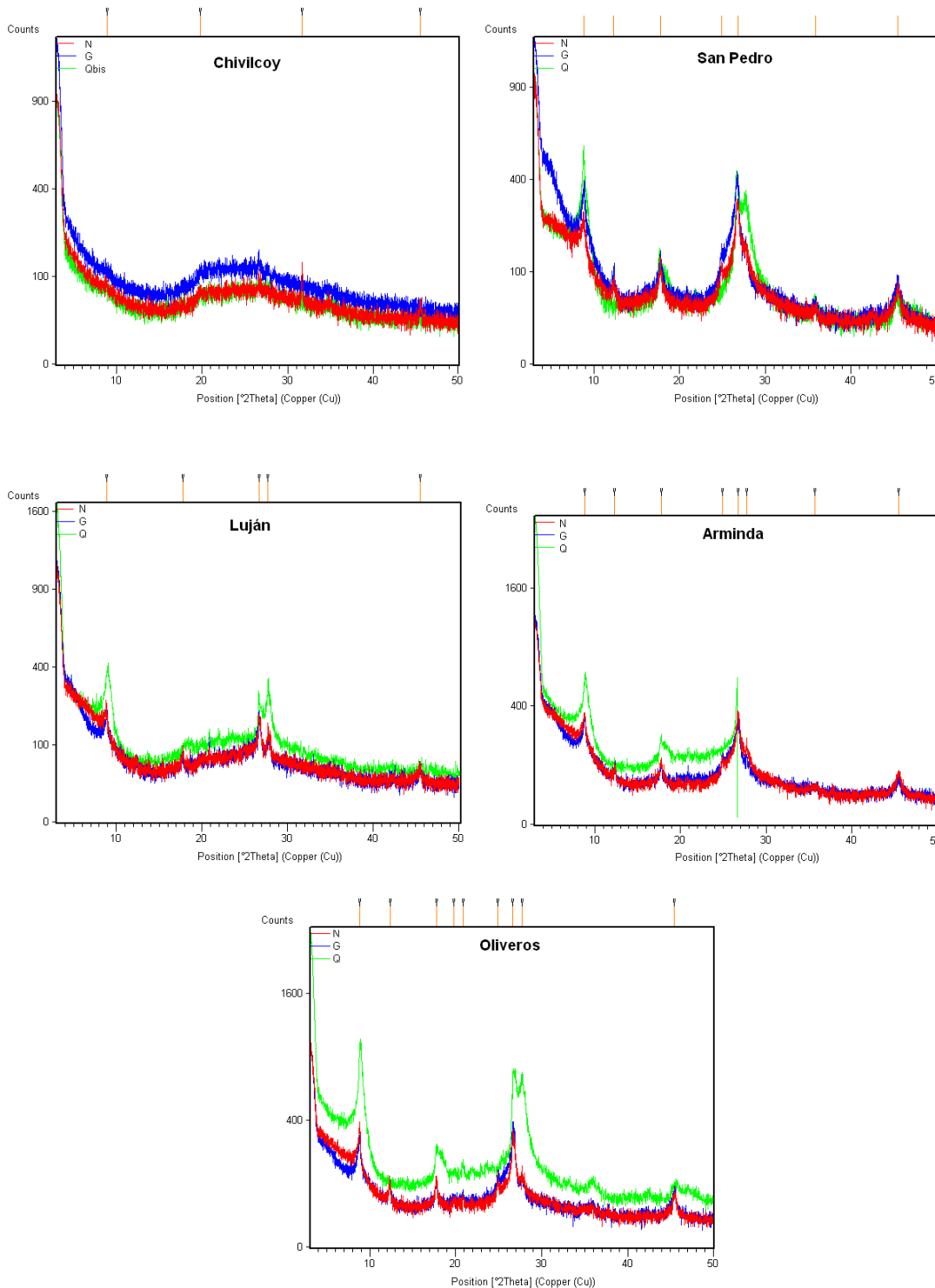


Figura N° 16- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte BC1 de los suelos estudiados.

En la Figura N° 17 se representa la difracción de rayos x sobre muestras de arcillas del horizonte C de los cinco perfiles.

En la misma se puede comprobar –en particular en las muestras calcinadas que evidencian una disminución del espacio interfoliar y un desarrollo intenso del pico de

10 Å.- que el horizonte C del perfil de San Pedro es el que tiene mayor proporción de interstratificados de illita/esmectita, seguido por los de Arminda y luego la muestra de Oliveros en menor medida. En cambio los de Chivilcoy y Luján tienen una menor proporción de interstratificados de illita/esmectita.

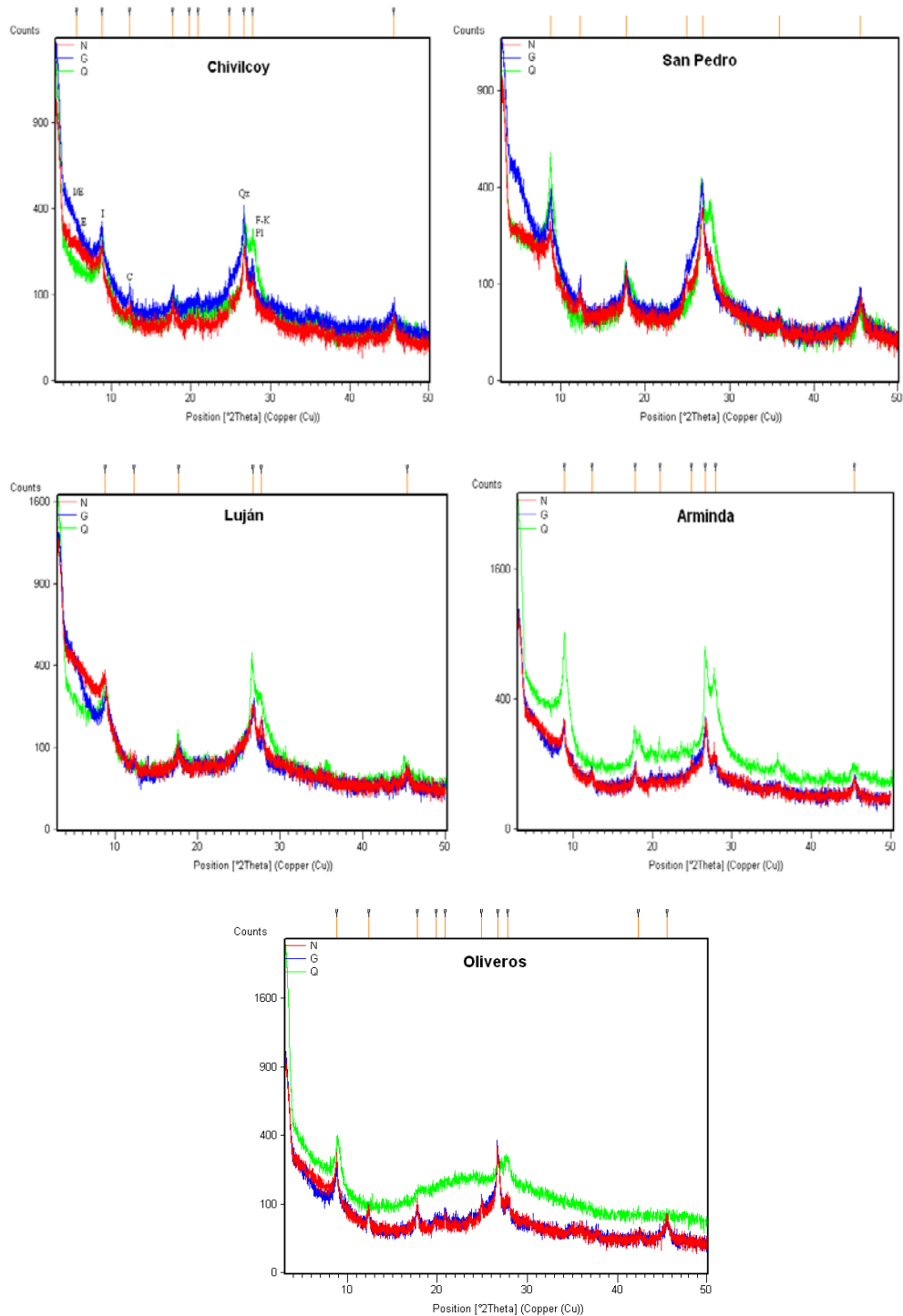


Figura N° 17- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas del horizonte C de los suelos estudiados.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto, se puede comprobar la existencia de un aumento en la proporción de minerales interstratificados illita/esmectita de carácter

expansible dentro de la Pampa Ondulada en dirección suroeste-noreste, hacia el eje fluvial constituido por los ríos Paraná y del Plata. De esta manera, el suelo de Chivilcoy que se ubica en el sector más alejado del río Paraná presenta la menor proporción de minerales expansibles, mientras que el correspondiente a San Pedro con la mayor proporción de estos minerales, se encuentra en el este, cercano a dichos ríos. Por su parte los perfiles de Luján, Arminda y Oliveros que presentan composiciones mineralógicas intermedias, reflejan situaciones geomorfológicas y sedimentológicas particulares dentro de la Pampa Ondulada. Así por ejemplo el suelo de Luján por la geomorfología y la textura de sus materiales presenta similitudes con el suelo de Chivilcoy. El suelo de Oliveros, si bien cercano al Río Paraná, pero aún más cercano al Río Carcarañá, conforme a los antecedentes arriba señalados presentaría en la constitución de su material parental sedimentos provenientes de las Sierras de Córdoba transportados por éste último. El suelo de Arminda se halla en un punto realmente transicional entre variaciones sedimentológicas de sentido este-oeste y norte-sur, lo que se reflejaría en diversos caracteres composicionales y de comportamiento de este suelo.

Estos resultados concuerdan con lo descripto por Iñiguez & Scoppa (1970) y Scoppa (1976) en trabajos realizados en el sector central de la Pampa Ondulada, en la Provincia de Buenos Aires, en donde encuentran un incremento de montmorillonita hacia el este, en dirección al Río Paraná. Por su parte Nabel *et al.* (1999), Morrás *et al.* (1998; 2002; 2004-b) y Castiglioni *et al.* (2005-b) estudiando suelos en el sur de la Pampa Ondulada cercanos al área metropolitana de Buenos Aires, encontraron que los Argiudoles típicos estarían caracterizados por la presencia de illita e interestratificados illita/esmectita, en tanto que los Argiudoles vérticos se desarrollarían sobre materiales con elevada proporción o directamente con dominancia de esmectitas. Esta variación espacial de sentido oeste-este se asemeja también a la descrita por Stephan *et al.* (1977) en el centro de Santa Fe y por Morrás *et al.* (1980; 1982), en el norte de esa provincia, en las que se observó la existencia de incrementos progresivos del contenido de interestratificados I/E y esmectitas, al mismo tiempo que una disminución correlativa de illitas desde el límite con Córdoba hacia el río Paraná. En los suelos correspondientes al presente trabajo no se encontró esmectita en proporciones detectables, pero si un aumento progresivo de interestratificados de illita/esmectita hacia el este de la Pampa Ondulada.

### I.6.3. Resultados de la susceptibilidad magnética (SM)

En la Figura Nº 18 se pueden apreciar los valores obtenidos de la medición de susceptibilidad magnética (SM) a baja y alta frecuencia de los cinco perfiles estudiados (ver Apéndice).

Considerando el conjunto de valores de susceptibilidad magnética específica obtenidos, resulta claro que el suelo de Chivilcoy situado en la posición más alejada del río Paraná presenta a lo largo de todo el perfil valores de SM marcadamente superiores a los demás suelos estudiados. Estos resultados conciben con el incremento de minerales pesados y de magnetita hacia el oeste señalado en otros trabajos como Etchichury *et al.* (1997) y Morrás (2003), así como con la granulometría más gruesa del suelo ubicado en Chivilcoy: la señal de SM refleja así los parámetros que integra, esto es el tipo, concentración y tamaño de grano de los minerales de la fracción magnética. En la Figura 11 se constata también que el suelo de Arminda presenta valores intermedios respecto a los demás, aunque la proporción de arena del mismo es similar a la de los restantes perfiles. En consecuencia, estos valores de SM sugieren que este suelo de Arminda se ha desarrollado a partir de un material parental con aportes

sedimentarios diferentes -al menos parcialmente- de los otros suelos estudiados del sector proximal al río Paraná.

Por otro lado, del análisis de las curvas de SM en función de la profundidad se desprende que hay una variación vertical similar de esta propiedad en los cinco suelos, con valores mínimos en los horizontes A, un incremento en los horizontes subsuperficiales y una posterior disminución progresiva de los valores en los horizontes BC y C. En el caso del suelo de Luján la disminución marcada de la SM en sus horizontes más profundos estaría reflejando la presencia de otro material sedimentario en discontinuidad, tal como fue observado en la descripción de campo. Por otro lado en sus horizontes superficiales se observa una disminución marcada de la SM, lo que podría resultar de procesos de alteración de los minerales magnéticos bajo condiciones reductiva, lo que estaría en relación con la características morfológicas de los horizontes y la localización del perfil en el paisaje.

En el suelo de Chivilcoy los valores máximos de SM se presentan en la parte superior del Bt, en tanto en los perfiles de Luján, Arminda, San Pedro y Oliveros los valores máximos se registran respectivamente en los horizontes E, A2 -BA y AB.

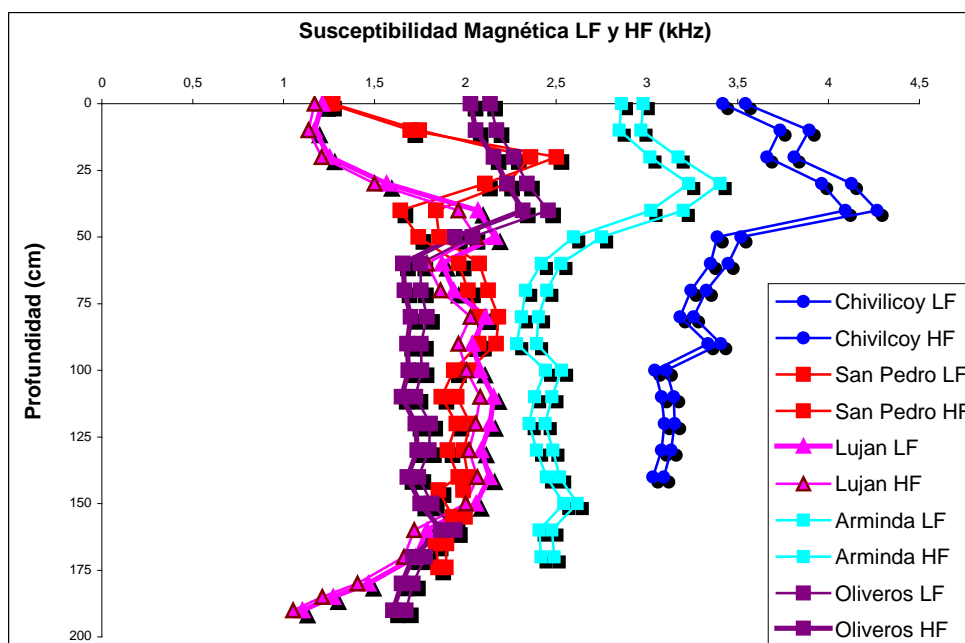


Figura N° 18 - Variación de la Susceptibilidad Magnética en alta y baja frecuencia (kHz) con la profundidad de los suelos analizados.

La susceptibilidad dependiente de la frecuencia, esto es la diferencia de valores entre las mediciones a alta y baja frecuencia expresada en porcentaje ( $SM_{df} = \frac{\Delta df}{df} \%$ ), presenta incrementos progresivos desde la base de los perfiles hasta valores máximos en los horizontes con mayor SM. En estos horizontes situados aproximadamente entre 25 y 50 cm de profundidad, este parámetro presenta el menor valor en el suelo de Chivilcoy ( $\Delta df=4\%$ ), valores intermedios en Luján ( $\Delta df=5\%$ ), Oliveros ( $\Delta df=6\%$ ), y Arminda ( $\Delta df=6\%$ ), y un valor máximo en San Pedro ( $\Delta df=11\%$ ).

Por un lado, este incremento de la SM hacia el tope del horizonte Bt es similar al observado en algunos otros suelos de la Pampa Ondulada (Morrás *et al.*, 2004-a; Liu *et al.*, 2010) y del sur de la Región Pampeana en las Provincias de Buenos Aires y La

Pampa (Bartel, 2009), aunque difiere de otros resultados obtenidos por Bartel *et al.* (2005) en la zona de La Plata. Por otro lado, y según se desprende de los resultados de la SM dependiente de la frecuencia, este incremento se correspondería con procesos de formación pedogénica de minerales superparamagnéticos o de dominio simple en ese nivel subsuperficial. Los resultados obtenidos, y considerando los valores extremos entre el suelo de Chivilcoy y el suelo de San Pedro, también parecen sugerir en una primera aproximación que la intensidad de este proceso de neoformación de minerales de hierro estaría en relación con el contenido de arcilla y la pluviometría, o en otros términos, con el comportamiento hídrico interno de los suelos. Esta interpretación se halla en línea con numerosos trabajos que indican una estrecha relación entre la formación de minerales ferrimagnéticos y las condiciones de óxido-reducción en los suelos. Distintos parámetros de los suelos que influyen en esas condiciones físico-químicas y procesos han sido considerados, así como distintos modelos de comportamiento magnético en relación a clima y suelo han sido propuestos, aunque por el momento los resultados e interpretaciones son divergentes (vg. Orgeira & Campagnucci, 2006; Orgeira *et al.*, 2008; Bartel, 2009).

#### I.6.4. Resultados de los Análisis Químicos y Físico-Químicos

De todos los parámetros químicos y físico-químicos evaluados, se seleccionaron cinco que se consideraron relevantes para caracterizar los diferentes suelos estudiados. Los parámetros elegidos fueron: contenido de carbono orgánico (CO), contenido de fósforo extractable (P), contenido de potasio de intercambio (Ki), pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC) (ver Apéndice).

El potasio de intercambio fue seleccionado dado que su contenido estaría en relación con características mineralógicas y granulométricas de los suelos. Zubillaga & Conti (1994) estudiaron el contenido de potasio intercambiable y no intercambiable en el horizonte superficial de diversos suelos de la Argentina, incluyendo dos Molisoles de la región Pampeana localizados en Ramallo y Marcos Juárez. Las autoras encontraron una relación directa entre el contenido de potasio intercambiable y el contenido y el tipo de arcilla, en tanto el potasio no intercambiable se hallaba relacionado también con la mineralogía de las otras fracciones granulométricas. Trabajos efectuados por Morrás (1999) sobre horizontes superficiales y subsuperficiales muestran que los suelos de la Pampa Ondulada en conjunto tienen contenidos de K total superiores a otras subregiones de la Pampa; por otro lado, la evaluación de los análisis de K intercambiable en horizontes C efectuados por Morrás & Cruzate (2002) permitieron distinguir dentro de la Pampa Ondulada sectores con contenidos diferenciados adjudicables a la diferente mineralogía y textura de los suelos.

El contenido de fósforo de los suelos depende de la composición del material parental y de los procesos pedogenéticos. En el caso de la Región Pampeana diversos trabajos establecieron diferencias en el contenido de fósforo total entre diversas áreas (Barreira & López Domínguez, 1970; Conti *et al.*, 1976). El análisis de datos obtenidos a principios del siglo XX sobre el contenido de P *cuasi*-total en suelos de la Región Pampeana permitió establecer una zonación relacionada con diferencias composicionales y de origen en los materiales parentales de los suelos (Morrás, 1999). Por otro lado, diversos autores han establecido diferencias en el contenido de fósforo asimilable en los horizontes superficiales de la región, permitiendo delimitar áreas con distinta fertilidad fosfórica. Así por ejemplo los datos procesados por Darwich (1983) permitieron establecer un incremento de esta fracción desde el este hacia el oeste de la región Pampeana. Estas variaciones espaciales del P asimilable tendrían su origen en

primer lugar en diferencias en el material parental y en segundo lugar en procesos pedogenéticos, en particular la acumulación de humus (Morrás, op.cit.).

El pH afecta a todas las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos (Brady & Weil, 2002), influyendo en la solubilidad de los iones de metálicos y la dispersión de las arcillas (Haynes & Naidu, 1998). Además regula varios procesos del suelo, incluyendo la solubilización y la formación de complejos, que afectan a la estabilidad de materia orgánica del suelo, mediante el control de la sorción y la desorción de carbono orgánico (van Bergen *et al.*, 1997). Por otro lado un estudio reciente confirmó que el pH del suelo tiene un marcado efecto en la regulación de la descomposición de la materia orgánica fresca, tales como las fracciones ligeras, sin embargo un efecto débil sobre la descomposición de materia orgánica en la fracción limo fino y fracciones de arcilla (Tonon *et al.*, 2010).

La capacidad de intercambio catiónico depende del contenido y tipo de humus y del contenido y tipo de arcilla. Goldberg *et al.* (1998) describen que la CIC está directamente relacionados con la estabilidad de los agregados del suelo y la dispersión de las arcillas. Es sabido que la adsorción de cationes aumenta cuando aumentan los contenidos de partículas finas, con el aumento de minerales de arcilla 2:1 (Martel *et al.*, 1978) y con el contenido de materia orgánica del suelo (Thompson *et al.*, 1989). Por otra parte varios autores también han atribuido una porción de la capacidad de intercambio catiónico de los suelos a las partículas de tamaño limo (Morrás, 1995; Thompson *et al.*, 1989). Asimismo se ha observado que la contribución de la fracción limo a la CIC es variable estando asociada a las diferencias granulométricas y mineralógicas de los distintos sedimentos a partir de los cuales se forman los suelos (Morrás & Cruzate, 2000-b; N. Peinemann *et al.*, 1998).

El carbono orgánico incrementa su estabilización en los suelos con el aumento del contenido de arcilla (Sollins *et al.*, 1996) y se lo relaciona con una mayor agregación de los suelos (Schulten & Leinweber, 2000). Por otra parte sus propiedades químicas determinan su carga y capacidad de complejamiento e influye en las tasas de descomposición que tiene diferentes efectos en la agregación de los suelos (Schulten & Leinweber, 2000).

Los resultados analíticos obtenidos correspondientes al contenido de carbono orgánico de los suelos estudiados se presentan en la Figura N° 19. En los horizontes superficiales, el perfil de Chivilcoy es el que presenta mayores contenidos de carbono orgánico (3,5%), seguido por el de Luján (3 %), por los de San Pedro y Oliveros (2,5 %) y finalmente por el de Arminda (2,2%).

A su vez, la variación en el contenido de CO con la profundidad es similar en los perfiles de Chivilcoy, Luján, Arminda y Oliveros. La excepción la constituye el horizonte Bt del suelo de San Pedro el cual presenta entre los 40 y 100 cm mayores contenidos de CO que los otros suelos a la misma profundidad. A partir del metro de profundidad todos los perfiles presentan similares contenidos de carbono orgánico.

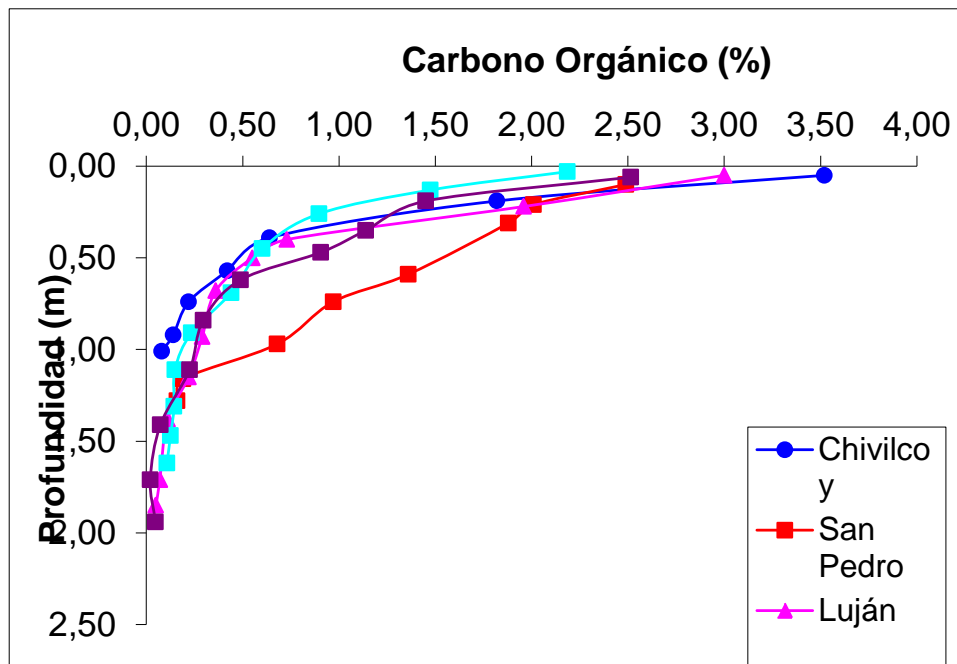


Figura N° 19 - Variación del contenido de Carbono Orgánico (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

Esta diferencia puede ser explicada si observamos los resultados granulométricos, los cuales muestran que el suelo de San Pedro tiene mayores contenidos de arcilla en todo el perfil respecto de los otros cuatro. El mayor contenido de arcilla genera un efecto protector del carbono orgánico, disminuyendo así la tasa de descomposición y generando una mayor acumulación en los distintos horizontes. Estos resultados coinciden con lo descrito por Alvarez & Lavado (1998), Burke *et al.* (1989) y Buschiazzo *et al.*, (1991) quienes indican que la distribución del tamaño de partícula puede regular el nivel de carbono orgánico independientemente del clima. Bronick & Lal (2005) y Six *et al.* (2000) observaron asimismo mayor agregación y elevados contenidos de carbono orgánico en suelos con arcillas de alta actividad como las esmectitas y otras arcillas 2:1, con altos valores de CIC y gran superficie específica. Dado que el área estudiada en el presente trabajo es en términos generales climáticamente homogénea, el mayor contenido de arcilla en San Pedro así como su mineralogía explicaría la mayor concentración de carbono en este suelo.

En la Figura N° 20 se observa la variación del contenido de fósforo extractable (P) con la profundidad. Como se sabe, esta fracción está constituida por diferentes aniones fosfóricos, en gran proporción adsorbidos sobre sitios de intercambio de arcilla y materia orgánica así como superficies sorbentes de oxi-hidróxidos.

Aunque los suelos estudiados no fueron recientemente cultivados los contenidos de esta fracción de P en los horizontes superficiales podrían estar relacionados con aportes desconocidos, antropogénicos o animales. Con la excepción de Luján, los contenidos de P asimilable en los horizontes A son elevados. Esto se correlacionaría con los resultados de Morrás (1999) referidos al P total en los suelos vírgenes de esta región, pero difieren de los referidos por Darwich (1983) en cuanto a que el P asimilable de toda esta zona sería deficitario.

Por lo anteriormente dicho, para la interpretación se consideran solamente los valores obtenidos por debajo de los 75 cm de profundidad, que reflejarían la concentración natural de esta fracción en el material parental de los suelos.



Estos datos muestran que el suelo de San Pedro es el más rico en esta fracción de P con valores que oscilan alrededor de  $50 \text{ mg Kg}^{-1}$ , en tanto los suelos de Luján y Chivilcoy son los más pobres, con un contenido que oscila en  $10 \text{ mg Kg}^{-1}$ . Los otros dos suelos presentan valores intermedios. Así, dado que el P asociado a la materia orgánica sería escaso en estos horizontes, los datos de los horizontes profundos indican una relación directa entre el P soluble y la textura; por otro lado los contenidos de P asimilable en los suelos de textura más fina como San Pedro son de medios a elevados.

No debe dejar de mencionarse el hecho que el suelo de Chivilcoy, si bien es el que presenta la granulometría más gruesa, no es el que tiene el menor nivel de P asimilable. Este resultado podría asociarse a lo observado por Morrás (1999) respecto al P cuasi-total en los horizontes subsuperficiales de los suelos pampeanos. Este autor identificó en el oeste de la Pampa Ondulada un sector (identificado como Fs) con un contenido de P cuasi-total superior al del este de la misma región; según el autor resulta llamativa la individualidad geoquímica de ese sector, que no sería posible explicar con la información mineralógica-sedimentológica actualmente disponible.

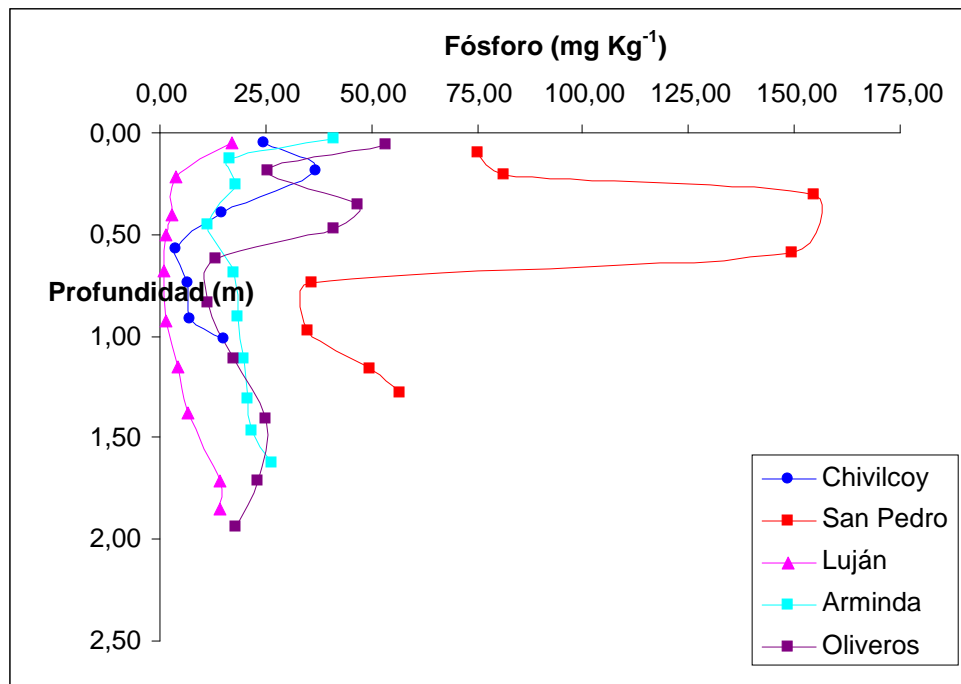


Figura N° 20- Variación del contenido de Fósforo extractable ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ) con la profundidad en los suelos estudiados

En la Figura N° 21 se observa la variación del contenido de Potasio de intercambio ( $K_i$ ) en función de la profundidad. En los horizontes superficiales todos los suelos presentan contenidos similares de potasio, que oscilan entre  $1,5$  y  $3 \text{ cmol/Kg}$ . En los horizontes B y C los valores del perfil de San Pedro se separan claramente del resto, alcanzando una proporción del  $10 \text{ cmol/Kg}$ . Los suelos de Arminda, Oliveros y Luján presentaron las menores contenidos de K de intercambio, manteniendo a lo largo de los perfiles valores que oscilan entre  $1$  y  $2 \text{ cmol/Kg}$ . Por su parte el suelo de Chivilcoy presentó tenores de K intermedios respecto a los dos grupos anteriores, con valores que oscilan entre  $3$  y  $4 \text{ cmol/Kg}$ . El contenido de K intercambiable expresado en porcentaje

de la CIC, en los suelos de Luján, Oliveros y Arminda oscila entre un 5-10%. En el suelo de Chivilcoy en los 50 cm superiores el valor está en alrededor de un 10% de la CIC, en tanto en la parte media e inferior del suelo el contenido oscila entre un 15 y 22% de la CIC. En el suelo de San Pedro en los 50 cm superiores el valor oscila alrededor de un 15% de la CIC en tanto en la parte inferior del suelo el contenido alcanza valores que oscilan alrededor del 30% de la CIC.

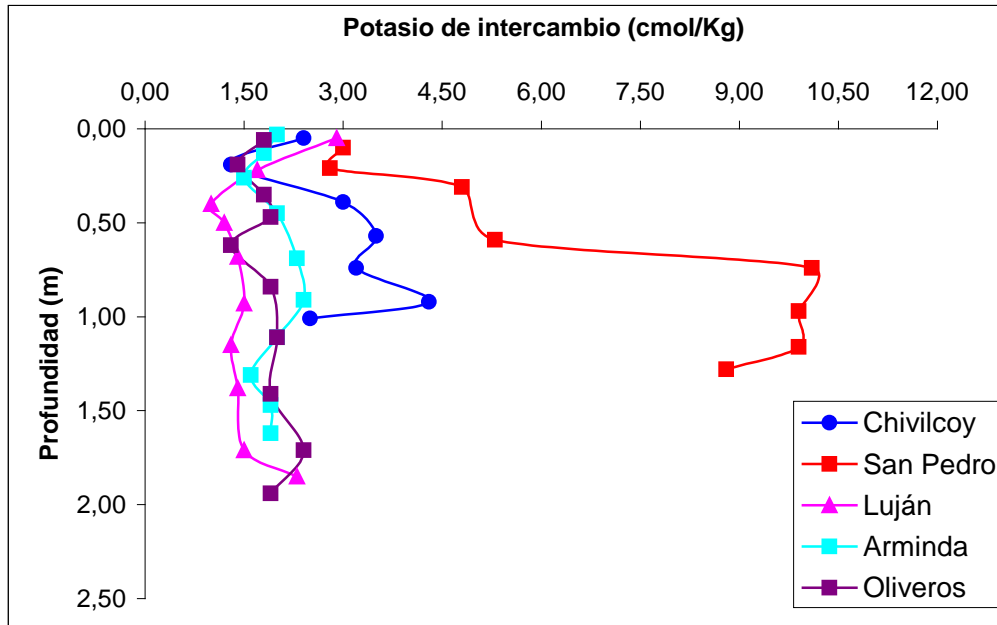


Figura N° 21- Variación del contenido de Potasio de intercambio (cmol/Kg) con la profundidad de los suelos estudiados

Debe señalarse que los resultados obtenidos de potasio intercambiable en valor absoluto y en relación a la CIC coinciden -con la excepción del perfil de San Pedro- en términos generales a los encontrados por Morrás & Cruzate (2002). Estos autores estudiando la distribución de los contenidos de potasio de intercambio encontraron que en la Pampa Ondulada los mayores contenidos se encontraban en los Argiudoles típicos situados en el centro y el oeste de la región, incluyendo tanto aquellos en los que predomina el limo como aquellos en los que la arena constituye una proporción considerable. Respecto al perfil de San Pedro, de acuerdo a los autores mencionados, este se encontraría en el área de Argiudoles vérticos vecinos al río Paraná en la que los contenidos de K intercambiable son más reducidos. En consecuencia, este antecedente sugiere también que los valores elevados de potasio intercambiable en este suelo podrían en parte provenir de aportes antropogénicos o animales, similar a lo ocurrido con el contenido de fósforo extractable de los horizontes superficiales.

La variación del pH con la profundidad en los suelos se presenta en la Figura N° 22. En los horizontes superficiales todos los suelos tienen valores similares de pH, estando estos dentro del intervalo 6 a 6,5. A medida que aumenta la profundidad, aparecen las diferencias entre pedones para esta propiedad. Puede así constatar que el perfil de San Pedro es el que tiene valores de pH más básicos (7,5 a 7,8), seguido por los de Chivilcoy, Arminda y Oliveros (7 a 7,20), siendo el de Luján el que presenta los valores más bajos (6,5 a 7). A su vez, este último es el que presenta menos variabilidad en el pH a lo largo de todos los horizontes. Cabe destacar que el perfil de Oliveros en los horizontes BC y C tiene un pH cercano a 8 con presencia de carbonatos de calcio,

en cambio el perfil de San Pedro registró un valor similar pero sin presencia de los mismos.

Dado que, con la excepción arriba mencionada, el conjunto de los horizontes estudiados no presentan acumulación de calcáreo, cabe interrogarse sobre el origen de estas diferencias de pH entre los suelos estudiados. Como se ha mencionado más arriba, el pH de un suelo integra una cantidad de propiedades composicionales, químicas y físico-químicas. A primera vista, y considerando los parámetros aquí seleccionados, las diferencias de pH entre los suelos estudiados parecen correlacionarse en primer lugar con los contenidos de K intercambiable: es así que en el suelo con mayor proporción de K el pH resulta el más elevado (San Pedro), en tanto el suelo con menor contenido de K presenta el pH más bajo (Lujan).

Las diferencias en la proporción de este catión monovalente en el complejo de intercambio y su manifestación en el pH de los suelos estudiados no son fáciles de explicar. Estas podrían estar relacionadas con diferencias mineralógicas y granulométricas en los materiales parentales de los suelos (por ejemplo mayores contenidos de micas y feldspatos junto con una menor lixiviación en el suelo de Chivilcoy), como en condiciones específicas durante los procesos de formación de los mismos (como por ejemplo una mayor lixiviación en el Argiudol ácuico de Luján). En el caso del suelo de San Pedro, el pH elevado podría interpretarse como una manifestación más de aportes químicos externos.

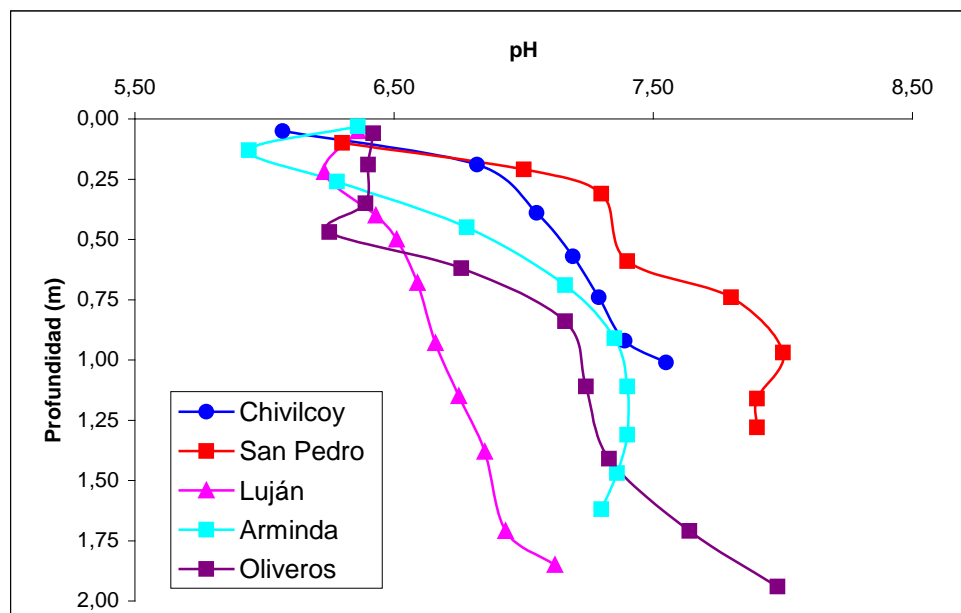


Figura N° 22- Variación del pH con la profundidad de los suelos estudiados

En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico, su variación con la profundidad se presenta en la Figura N° 23.

En los horizontes superficiales se observa que el suelo de Chivilcoy es el de mayor CIC ( $33 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), seguido por el de San Pedro ( $24 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), mientras que los de Oliveros ( $20 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), Arminda ( $19 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ) y Luján ( $20 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ) presentan los menores valores. Estos valores, además de la contribución de la fracción arcilla, están claramente influenciados por el contenido de materia orgánica.

En la parte superior de los horizontes Bt, donde se constata la máxima acumulación de arcilla además de una cierta proporción de MO, el suelo de San Pedro

es el que presenta una mayor CIC ( $36 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), en tanto los demás suelos presentan valores cercanos entre sí: Chivilcoy ( $30 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), Luján ( $30 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ), Arminda ( $29 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ) y Oliveros ( $27 \text{ cmol Kg}^{-1}$ ).

Por el contrario, en los horizontes Bt2, BC y C se observa una dispersión más notoria de los valores de CIC, que refleja más claramente las diferencias granulométricas y mineralógicas entre los suelos. Así por ejemplo, en relación con su textura gruesa, el suelo de Chivilcoy es claramente el de menor CIC. Por otro lado, si bien el suelo de Oliveros es el que presenta la mayor proporción de arcilla en esos horizontes, es el suelo de San Pedro –en el que los minerales I/E son más abundantes– el que presenta la mayor capacidad de intercambio catiónico. La CIC de los horizontes inferiores del suelo de Arminda aparece en relación con su contenido de arcilla. Finalmente se destaca el elevado valor de la CIC en el horizonte C de Luján, lo cual concuerda con el elevado contenido de arcilla en el mismo, y confirma analíticamente la discontinuidad observada a esa profundidad en el campo.

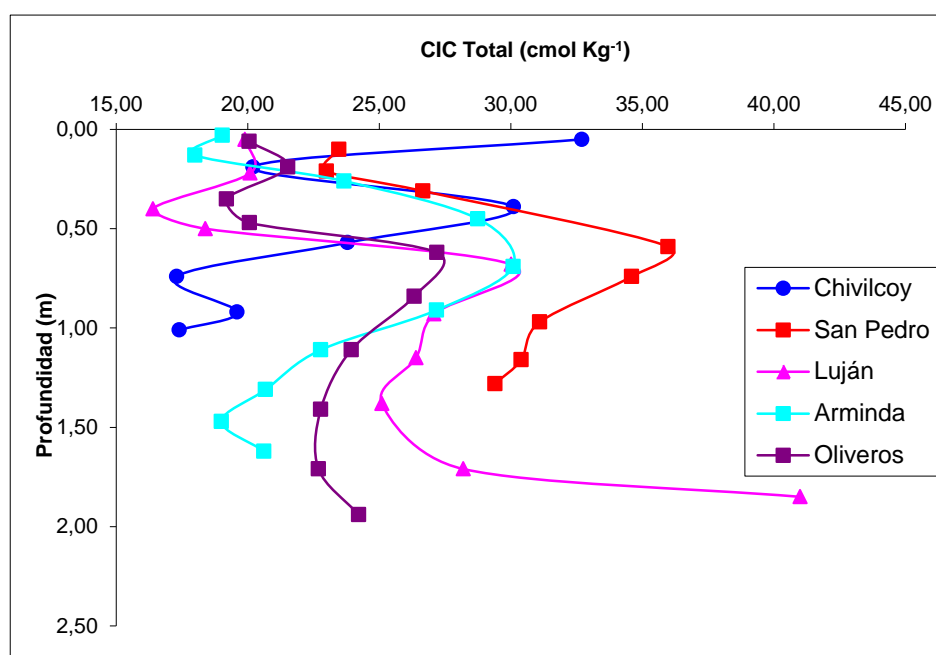


Figura N° 23- Variación del CIC Total ( $\text{cmol Kg}^{-1}$ ) con la profundidad de los suelos estudiados

### I.6.5. Análisis Estadísticos

Para poder realizar un mejor análisis de componentes principales de las variables estudiadas se las agrupó por horizontes: en el primer grupo se incluyeron los horizontes A, A2, AB y BA; en el segundo los horizontes Bt1 y en el tercero los horizontes BC y C.

#### Horizontes A, A2, AB y BA

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes A, A2, AB y BA, se observó que el eje 1 explica el 51 % de la variabilidad y el eje 2 el 25 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 76 % de la variabilidad total.

En la Tabla N° 2 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad esta principalmente representada por: el contenido de fósforo, el contenido de potasio, pH, CIC y el porcentaje de arcilla.

En el eje 2 la variabilidad esta principalmente representada por: Limo y Arena.

Por lo mencionado, los parámetros que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son los relacionados con el contenido de fósforo, con el contenido de potasio y con la granulometría.

Tabla N° 2- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Variabes	e1	e2	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>
Fósforo (ppm)	0,44***	0,11	0,00061	0,69
Potasio (meq %)	0,44***	0,01	0,00071	0,98
pH	0,44***	-0,07	0,00069	0,81
Carbono Orgánico (%)	0,19	0,31	0,31	0,24
CIC total (meq %)	0,4***	0,04	0,01	0,89
Arcilla (%)	0,4***	-0,06	0,01	0,82
Limo (%)	-0,11	-0,63***	0,59	0,00047
Arena (%)	-0,13	0,64***	0,51	0,00025
S. M. (Freq.Dep.%)	-0,2	0,28	0,28	0,3

En la Figura N° 24 se observa como quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes de este primer grupo y las variables estudiadas.

El eje 1 esta fuertemente condicionado por el contenido de arcilla de los horizontes, y por eso se ubican hacia el extremo derecho del gráfico el horizonte BA primero y posteriormente el A2, correspondientes al perfil de San Pedro. A su vez, los parámetros que anteriormente viéramos que estaban vinculados con el contenido de arcilla (pH, P, CIC y Ki), se encuentran desplazados en el mismo sentido que esta fracción granulométrica, mientras que el carbono orgánico, al menos en estos horizontes superficiales, tendría una afinidad menor con esta fracción. Esto mismo se corrobora al analizar los coeficientes de correlación de Pearson (Tabla N° 3), en donde se puede comprobar también que la arena y el limo no están vinculados significativamente con ninguno de estos elementos. Llama la atención la falta de correlación entre el contenido de CO con el P asimilable, dado que según numerosos trabajos, en los horizontes A además del contenido de este elemento en el material parental (fósforo inorgánico) juega también el contenido de P orgánico (Morrás, 1999). Esto corroboraría la existencia de posibles aportes fosforados no registrados de componentes orgánicos o inorgánicos en la superficie de estos suelos.

Por su parte, el eje 2 está determinado por el contenido de arena o de limo, y es por ello que el horizonte A2 del suelo de Chivilcoy está ubicado en la parte superior del gráfico. En cambio en la parte inferior la variable porcentaje de limo agrupo a los horizontes A y BA del perfil de Arminda, a los horizontes A2 y AB del perfil de Oliveros y al horizonte A2 del perfil de Luján.

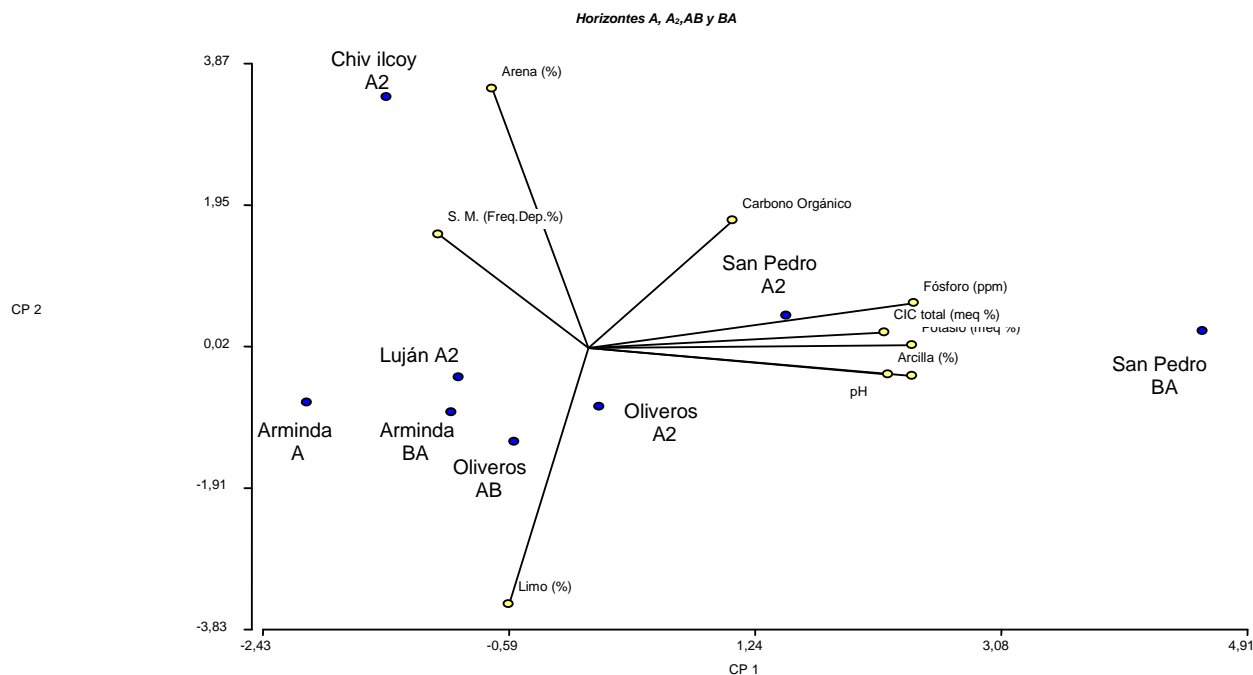


Figura N° 24- Componentes Principales de los horizontes A, AB y BA de los suelos estudiados.

Tabla N° 3- - Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes A, A<sub>2</sub>, AB y BA de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Correlacion de Pearson:  
coeficientes/probabilidades

Variables	P (ppm)	K (meq %)	pH	C O (%)	CIC (meq%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	S. M.
P (ppm)	1	0,00039	0,0043	0,35	0,03	0,03	0,4	0,81	0,63
K (meq %)	0,95 ***	1	0,01	0,25	0,03	0,08	0,74	0,56	0,36
pH	0,88 ***	0,85 ***	1	0,76	0,02	0,01	0,72	0,41	0,46
C O (%)	0,38	0,46	0,13	1	0,57	0,7	0,25	0,41	0,18
CIC (meq %)	0,75 **	0,75 **	0,8 **	0,24	1	0,05	0,57	0,67	0,67
Arcilla (%)	0,76 **	0,66 *	0,84 ***	0,17	0,72 **	1	0,61	0,38	0,41
Limo (%)	-0,34	-0,14	-0,15	-0,46	-0,24	-0,22	1	0,01	0,46
Arena (%)	-0,1	-0,24	-0,34	0,34	-0,18	-0,36	-0,83 **	1	0,22
S. M.	-0,2	-0,37	-0,31	-0,52	-0,18	-0,34	-0,31	0,49	1

En síntesis entre estos horizontes podemos distinguir tres grupos: uno compuesto por el horizonte A2 de Chivilcoy, otro compuesto por los horizontes BA y A de San Pedro y por último el formado por los horizontes A y BA de Arminda, AB y A2 de Oliveros y A2 de Luján.

En el primero, su variable más importante es el contenido de arena, estando el suelo correspondiente desarrollado sobre un loess arenoso. El segundo grupo está determinado por el mayor contenido de arcilla, y por lo tanto por el mayor valor de las variables asociadas a esta fracción granulométrica. Por su parte, el tercer grupo ocupa una posición intermedia respecto al contenido de arcilla pero con contenidos de limo superiores al de Chivilcoy, y por lo tanto más desplazado hacia abajo en el gráfico. En este último grupo, y dependiendo de su localización, se podrá observar una diferente expresión de las distintas propiedades químicas y físico-químicas analizadas.

### Horizontes Bt1

Conforme a los autovalores del análisis de componentes principales, correspondientes a las variables estudiadas de los horizontes Bt1, se observó que el eje 1 explica el 53 % de la variabilidad y el eje 2 el 32 %. De esta manera se eligió utilizar estos 2 ejes, los cuales explican el 86 % de la variabilidad.

En la Tabla N° 4 se representan los autovectores del análisis de componentes principales de los horizontes Bt1 de las variables estudiadas.

En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad está principalmente representada por: el contenido de fósforo, el contenido de potasio el contenido carbono orgánico CIC total y el porcentaje de arcilla. En el eje 2 la variabilidad está principalmente representada por: el porcentaje de arena, la susceptibilidad magnética y el porcentaje de limo.

Tabla N° 4- - Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

VARIABLES	e1	e2	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>
Fósforo (ppm)	0,44***	-0,13	0,0015	0,66
Potasio (meq %)	0,44***	0,07	0,0018	0,82
pH	0,32	-0,0011	0,13	1
Carbono Orgánico (%)	0,44***	0,02	0,0012	0,96
CIC total (meq %)	0,39**	0,08	0,03	0,79
Arcilla (%)	0,34*	-0,31	0,1	0,28
Limo (%)	-0,22	-0,48**	0,34	0,05
Arena (%)	0,01	0,58***	0,98	0,00027
S. M. (Freq.Dep.%)	-0,02	0,56***	0,92	0,004

En la Figura N° 25 se observa como quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes Bt1 y las variables estudiadas.

De la misma manera que se observara en los horizontes superficiales, en este gráfico se puede comprobar como está condicionado el eje 1 por el contenido de arcilla y los parámetros asociados a esta fracción granulométrica. En este caso el carbono orgánico se encuentra también fuertemente vinculado al contenido de arcilla como ya se viera al analizar la Figura N° 19. A su vez, y de la misma forma que en los horizontes

superficiales el eje 2 esta condicionado por el contenido de arena o limo, y es por eso que el horizonte Bt1 correspondiente a Chivilcoy se encuentra desplazado en la parte superior del gráfico mientras que los restantes correspondientes a los otros sitios se ubican en una posición inferior.

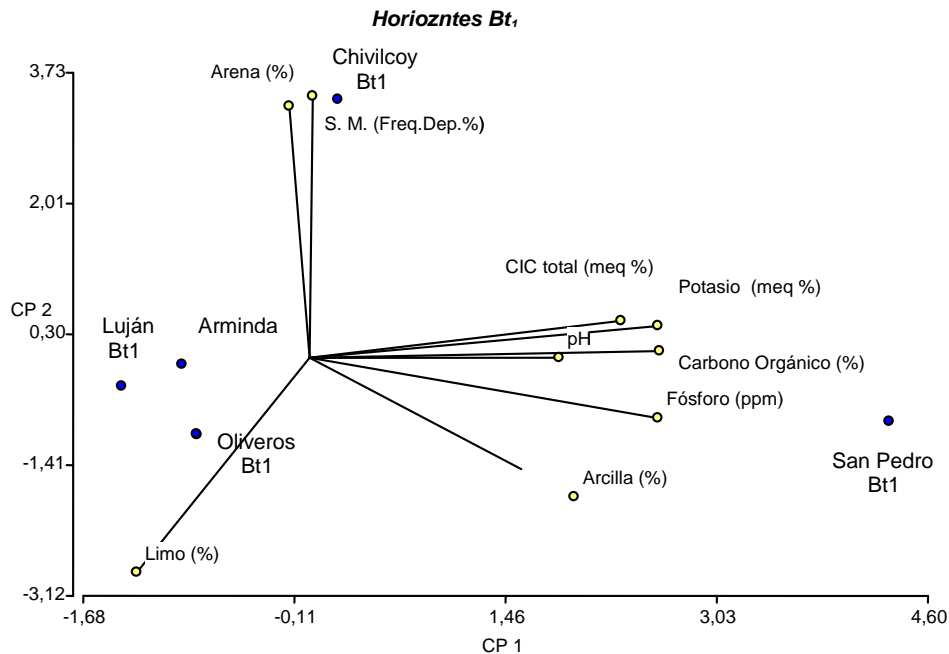


Figura N° 25- Componentes Principales de los horizontes Bt de los suelos estudiados

En la Tabla N° 5 se representa los coeficientes de correlación Pearson para las variables estudiadas en los horizontes Bt<sub>1</sub>. De distinta manera a lo ocurrido con los horizontes superficiales, en los Bt<sub>1</sub> se ve una fuerte vinculación del contenido de arcilla con el contenido de carbono. A su vez no se ven correlaciones significativas entre esta fracción granulométrica y el contenido de potasio, la CIC y el pH, pero si con el fósforo. Como se discutió más arriba, la ausencia de correlación estadística entre la CIC y el porcentaje de arcilla, estaría indicando la participación del tipo de arcilla –variable no cuantificada- en el valor de la CIC de estos horizontes.

Estos análisis estadísticos confirman la correlación entre % de arcilla y % de P extractable descriptos para estos horizontes con anterioridad. Estos resultados parecerían sugerir también el interés de considerar también los horizontes subsuperficiales para la evaluación de la fertilidad fosfórica de los suelos de esta región, dado que según los mapas de distribución del P asimilable de Darwich (1983) y de Sainz Rozas *et. al.* (2012) en los horizontes A, toda la Pampa Ondulada se encontraría incluida en un sector de baja disponibilidad de P asimilable. Como se discutió más arriba, y de manera distinta a lo sucedido superficialmente, en estos horizontes subsuperficiales se pudo comprobar una fuerte asociación entre el contenido de arena y la susceptibilidad magnética. Esta correlación demuestra el origen litogenico de gran parte de la señal magnética y su relación con el tamaño de grano de las partículas magnéticas en los sedimentos loésicos pampeanos.



Tabla N° 5 - Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Correlacion de Pearson:  
coeficientes\probabilidades

VARIABLES	P (ppm)	K (meq %)	pH	C O (%)	CIC(meq %)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	S. M.
P (ppm)	1	0,01	0,1	0,01	0,07	0,06	0,62	0,69	0,61
K (meq %)	0,93***	1	0,06	0,01	0,06	0,26	0,31	0,81	0,89
pH	0,73*	0,8*	1	0,25	0,59	0,5	0,62	0,94	0,92
C O (%)	0,92***	0,92***	0,56	1	0,01	0,1	0,35	0,99	0,95
CIC(meq %)	0,78*	0,8*	0,28	0,91***	1	0,21	0,28	0,8	0,88
Arcilla (%)	0,79*	0,55	0,34	0,73*	0,59	1	0,94	0,3	0,26
Limo (%)	-0,26	-0,5	-0,26	-0,46	-0,53	-0,04	1	0,04	0,14
Arena (%)	-0,21	0,13	0,04	0,0036	0,13	-0,51	0,84**	1	0,02
S. M.	-0,27	0,07	0,06	0,03	0,08	-0,55	-0,68	0,88**	1

En síntesis entre los horizontes Bt1 podemos distinguir tres grupos: el grupo 1 compuesto por el horizonte Bt1 de Chivilcoy, el grupo 2 compuesto por el horizonte Bt1 de San Pedro y el grupo 3 compuesto por los horizontes Bt1 de Luján, Bt1 de Arminda y Bt1 Oliveros.

En el grupo 1 las variables más significativas que explican la variabilidad son el porcentaje de arena, el porcentaje de limo y la susceptibilidad magnética. En cambio en el grupo 2 las variables más significativas que explican la variabilidad son: contenido de fósforo, contenido de potasio, contenido de carbono orgánico, CIC total y porcentaje de arcilla. A diferencia del grupo 1 el grupo 3 tiene mayor porcentaje de limo, menor porcentaje de arena y una menor susceptibilidad magnética.

### Horizontes BC y C

De acuerdo a los autovalores del análisis de componentes principales correspondientes a las variables estudiadas de los horizontes BC y C, se observó que el eje 1 explica el 61 % de la variabilidad y el eje 2 el 24 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales estarían explicando el 85 % de la variabilidad.

En la Tabla N° 6 se representan los autovectores del análisis de componentes principales de los horizontes BC y C de acuerdo las variables estudiadas.

En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad está principalmente representada por: el porcentaje de arcilla, CIC total, el porcentaje de arena, la susceptibilidad magnética, el porcentaje de limo, el contenido de fósforo y contenido de potasio. En el eje 2 la variabilidad esta principalmente representada por el contenido de potasio (0,46) y pH (0,46) ( $p < 0,1$ ).

Tabla N° 6 - Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Variables	e1	e2	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>
Fósforo (ppm)	0,33**	0,26	0,02	0,35
Potasio (meq %)	0,3**	0,46*	0,05	0,06
pH	0,25	0,46*	0,13	0,07
Carbono Orgánico (%)	0,22	0,36	0,19	0,18
CIC total (meq %)	0,39***	0,02	0,00097	0,94
Arcilla (%)	0,4***	-0,18	0,00075	0,54
Limo (%)	0,34**	-0,38	0,02	0,15
Arena (%)	-	0,33	0,01	0,22
S. M. (LF%)	-	0,36***	0,01	0,3

En la Figura N° 26 de componentes principales se observa como quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes BC y C y las variables estudiadas.

En el mismo se puede observar como en la parte superior del eje 1 se agrupan los horizontes BC1 y C del perfil de Chivilcoy en relación con el mayor porcentaje de arena y valor de susceptibilidad magnética. Por su parte en la parte inferior a mayores porcentajes de limo y arcilla, mayores contenidos de fósforo y potasio y mayor CIC total se agrupan los horizontes BC y C del perfil de Arminda, el horizonte BC1 de Luján y el horizonte C del perfil de Oliveros. En cambio en el eje 2 podemos observar que a mayores contenidos de potasio y mayor valor de pH se agrupan los horizontes BC1 y C del perfil de San Pedro

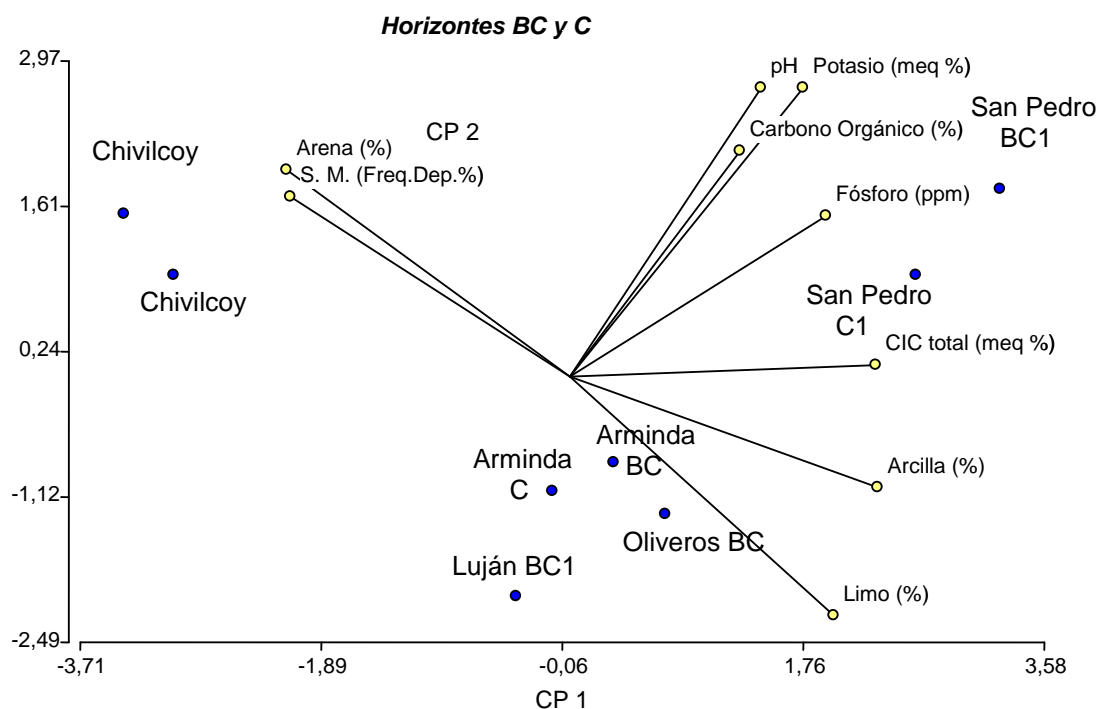


Figura N° 26- Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.

En la Tabla N° 7 se representa los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes BC y C. De acuerdo a su análisis surge que las variables mas vinculadas entre si son: porcentaje de arena y porcentaje de limo, porcentaje de arena y porcentaje de arcilla, susceptibilidad magnética y porcentaje de arena, susceptibilidad magnética y porcentaje de limo, susceptibilidad magnética y porcentaje arcilla y porcentaje de arcilla y CIC total.

Tabla N° 7- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC y C de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Correlacion de Pearson:  
coeficientes\probabilidades

Variables	P (ppm)	K (meq %)	pH	C O (%)	CIC (meq %)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	S. M.
P (ppm)	1	0,02	0,02	0,51	0,07	0,18	0,29	0,25	0,16
K (meq %)	0,81**	1	0,02	0,05	0,06	0,21	0,7	0,53	0,44
pH	0,81**	0,81**	1	0,23	0,29	0,48	0,75	0,66	0,53
C O (%)	0,27	0,72**	0,48	1	0,14	0,22	0,8	0,6	0,84
CIC (meq %)	0,67*	0,69*	0,43	0,57	1	0,01	0,07	0,03	0,03
Arcilla (%)	0,52	0,5	0,3	0,49	0,86***	1	0,01	0,00078	0,005
Limo (%)	0,43	0,16	0,14	0,11	0,68*	0,87**	1	0,0000026	0,004
Arena (%)	-0,46	-0,26	-0,19	-0,22	-0,75**	-0,93***	-0,99***	1	0,002
S. M.	-0,55	-0,32	-0,26	-0,09	-0,76**	-0,87***	-0,88***	0,9***	1

De esta manera podemos distinguir tres grupos de horizontes BC y C. El grupo uno compuesto por el perfil de Chivilcoy, el grupo 2 compuesto por el perfil San Pedro y el grupo 3 compuesto por los perfiles de Arminda, Luján y Oliveros. En el grupo 1 las variables más significativas que explican la variabilidad son el porcentaje de arena, el porcentaje de limo y la susceptibilidad magnética. El grupo 3 que está en el mismo eje 1 que el grupo 1, se diferencia de este por presentar diferentes valores de las mismas tres variables. En cambio en el grupo 2 correspondiente a las muestras de San Pedro, las variables más significativas que explican la variabilidad son el contenido de potasio y pH. Estos resultados estadísticos estarían corroborando que ciertas variables como la susceptibilidad magnética y el contenido de arena estan asociadas a los distintos sedimentos loessicos a partir de los cuales se formaron estos suelos.

## 1.7. CONCLUSIONES PARCIALES

*Si bien diversos autores determinaron que los suelos de la Pampa Ondulada se formaron sobre distintos aportes sedimentarios con diferentes características, son pocos los estudios que se realizaron sobre perfiles de suelo completos intentando enlazar composición con propiedades edáficas. En consecuencia, el primer capítulo de este estudio ha tenido la finalidad de establecer algunas características composicionales de Argiudoles de diferentes ámbitos de la Pampa Ondulada, las que estarían explicando buena parte de sus diferencias de comportamiento físico y físico-químico de los suelos.*

*Los resultados obtenidos sugieren la existencia de diferentes materiales parentales a partir de los cuales se formaron estos suelos. Es así que -en consonancia con los antecedentes conocidos del relevamiento cartográfico- los suelos aquí estudiados de la Pampa Ondulada se ubican en dos franjas paralelas de materiales texturalmente diferentes: una situada al oeste y suroeste, en posición distal respecto al río Paraná, con materiales parentales arenosos y otra hacia el centro-este con materiales limosos. Debe notarse que no se incluyen en este trabajo suelos más próximos al río Paraná, los que de acuerdo a los antecedentes conformarían una tercer franja con materiales de textura más fina, con mayor abundancia de esmectitas.*

*El suelo de Chivilcoy se sitúa sobre la primer franja, presentando una textura gruesa, conformado a partir de sedimentos loessicos arenosos. En el mismo se observó una dominancia de illita, baja proporción de minerales de arcillas interestratificadas illita/esmectita y elevados valores de susceptibilidad magnética. Esta composición reflejaría una dominancia de aportes volcánico-lásticos característicos del típico loess pampeano procedente del sur-oeste.*

*En cambio, y desde el punto de vista granulométrico, los suelos de Luján, San Pedro, Arminda y Oliveros se sitúan todos en la segunda franja, conformada a partir de sedimentos loessicos típicos. Sin embargo, estos suelos presentan entre sí diferencias mineralógicas que se relacionarían con la influencia de distintos aportes sedimentarios. Por la mayor proporción de minerales expansibles y menor susceptibilidad magnética, el suelo de San Pedro tendría un mayor aporte de minerales de la cuenca del Paraná. El suelo de Luján, tanto por la granulometría en la que la arena es relativamente elevada, la baja proporción de minerales expansibles y una susceptibilidad magnética intermedia parecería estar constituido por una mezcla de aportes de las fuentes del oeste y del este, con dominancia de los primeros. En los suelos localizados en la provincia de Santa Fe (Arminda y Oliveros), a los aportes sedimentarios anteriores se les habrían sumado sedimentos provenientes de las Sierras de Córdoba, probablemente acercados a la región por el río Carcarañá. Sin embargo, en el caso del suelo de Arminda, la mayor susceptibilidad magnética parecería sugerir una mayor proporción de aportes volcánico-lásticos que en el suelo de Oliveros. En conjunto, estos resultados acuerdan con la zonación de los sedimentos loessicos de la Pampa Norte realizada por Morrás (2003) en base a la mineralogía de arenas.*

*Los resultados de los análisis de potasio demostraron que todos los perfiles con la excepción del de San Pedro tienen valores similares a los encontrados en la zona por otros autores. El contenido relativamente elevado de potasio intercambiable en el perfil de Chivilcoy estaría relacionado con la mayor proporción de illita aquí establecida, así como probablemente un mayor contenido de feldespatos potásicos, también provenientes de las fuentes del oeste. En el caso de San Pedro el contenido elevado del potasio intercambiable muy por encima del encontrado en la zona se debería a algún enriquecimiento antrópico o animal.*

*Por su parte los análisis de fósforo asimilable considerando los valores encontrados en los horizontes profundos y que reflejarían la concentración natural de esta fracción, en el material parental de los suelos, están relacionados con el contenido de arcilla de los perfiles. Estos datos muestran que el suelo de San Pedro con mayor contenido de arcilla presentó los mayores valores en esta fracción de fósforo y el suelo de Chivilcoy es el que presentó los menores valores. En cambio los otros tres perfiles presentaron valores intermedios aunque el suelo de Luján, de granulometría relativamente gruesa, presentó valores similares a los de Chivilcoy.*

*Además de las variaciones mineralógicas espaciales que se expresan con un incremento de los minerales interestratificados I/E hacia el eje río Paraná-río de la Plata, los suelos presentan un gradiente vertical, con incrementos de los minerales expansibles hacia la base de los perfiles. Por otro lado, además de las diferencias de susceptibilidad magnética entre los distintos suelos, se observaron variaciones verticales de SM y SMdf indicando neoformación de minerales ferrimagnéticos hacia el tope del Bt, que sería más intensa hacia el este de la región.*

*En cuanto a la capacidad de intercambio catiónico, en los horizontes superficiales además de la contribución de la fracción arcilla resulta importante la influencia del contenido de materia orgánica. Por el contrario, en los horizontes Bt<sub>2</sub>, BC y C se observa una dispersión más notoria de los valores de CIC, que refleja más claramente las diferencias granulométricas y mineralógicas entre los suelos. Así por ejemplo, el suelo de Chivilcoy es claramente el de menor CIC. Por otro lado, si bien el suelo de Oliveros es el que presenta la mayor proporción de arcilla en esos horizontes, es el suelo de San Pedro –en el que los minerales I/E son más abundantes– el que presenta la mayor capacidad de intercambio catiónico.*

*Estos resultados muestran en consecuencia variaciones composicionales espaciales en la región y verticales en los perfiles las que resultan de interés para la interpretación de los procesos de génesis de estos suelos, así como del comportamiento físico y químico diferencial de los mismos.*

## Capítulo 2 “Influencia de la cantidad y tipo de arcilla en propiedades físicas de los suelos ”

### **II.1. Introducción**

#### II.1.1. Influencia de las arcillas en la capacidad de expansión-contracción de los suelos

Diversos autores han investigado las relaciones entre la capacidad de expansión de los suelos y diferentes propiedades.

Parker *et al.* (1977) mencionan que los cambios de volumen del suelo son gobernados por factores tales como: mineralogía de arcillas, tipo de cationes adsorbidos, agentes cementantes, estructura y densidad del suelo, stress e historia de stress, etc.

Por su parte, Rawls & Brakensiek (1990) detallaron que la capacidad de intercambio de la arcilla es un indicador de su capacidad de expansión-contracción. Un extenso número de investigadores (Yule & Ritchie, 1980; De Jong *et al.* 1992) corroboraron esto al observar una estrecha relación entre la capacidad de intercambio catiónico y el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE). Sin embargo, Thomas *et al.* (2000) y Gray & Allbrook (2002) encontraron que estas dos propiedades no estaban significativamente relacionadas en los suelos por ellos estudiados. Thomas *et al.* (2000), si bien reconocen que el COLE puede ser predicho a partir de una combinación de propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo, mencionan que no hay un único método de carácter universal que analice y estime el potencial de contracción y expansión en forma ajustada. Estos últimos autores recomiendan establecer un protocolo que integre estas propiedades, para luego desarrollar un modelo que pueda ser extrapolado a aquellos suelos que provengan de materiales parentales iguales o similares.

A partir de sus experiencias con suelos de diferentes mineralogías y contenidos de arcilla de Nueva Zelanda, Gray & Allbrook (2002) señalan que tener en cuenta el porcentaje de arcilla para predecir el COLE es importante dentro de cada grupo mineralógico, pero si se trabaja con suelos que poseen materiales parentales distintos sería más conveniente tener en consideración aspectos que estén relacionados con esas diferencias. En este sentido mencionan un trabajo de Ross (1978), el cual analizó distintos suelos de Canadá que poseían micas, caolinitas y montmorillonitas. Este último autor encontró que el grado de ajuste entre el contenido de arcilla y el COLE aumentaba en la medida que uno de los grupos mineralógicos (montmorillonita) era retirado de la relación.

A su vez Gray & Allbrook (2002), lo mismo que Ross (1978), encuentran una mejor correlación entre la superficie específica y el COLE respecto a la alcanzada entre este y el contenido de arcilla, lo cual estos autores lo atribuyen a la influencia directa que tiene la superficie específica sobre la cantidad de agua que puede ser absorbida o desorbida en el proceso de expansión-contracción. Es sabido a su vez la estrecha relación existente entre los minerales de arcilla presentes en el suelo y la superficie específica de dichos materiales (Jury *et al.* 1991; Gaiser *et al.* 2000).

Seed *et al.* (1963), sugiriendo que los elementos responsables de la expansión de los suelos eran el contenido de arcilla y su mineralogía, desarrollaron una ecuación predictiva en la que incluyeron el porcentaje de arcilla y un índice de actividad (similar al número de actividad), presumiendo que este índice era una expresión de la expansibilidad de la fracción arcilla. Sin embargo, Parker *et al.* (1977), trabajando con diferentes ecuaciones predictivas de cambio de volumen sobre suelos de Virginia con distinta mineralogía de arcillas, no encontraron que la ecuación desarrollada por Seed *et*

*al.* (1963) tuviera un alto poder de estimación, teniendo mejor comportamiento la que incluía el índice de plasticidad.

Thomas *et al.* (2000), analizando 12 horizontes Bt, con contenidos de arcilla que variaban entre el 36,3% y el 69,3%, con clases de expansión- contracción desde moderada a muy alta y con distinta mineralogía de arcillas, encontraron que los parámetros que mejor correlacionaban con el COLE eran el índice de plasticidad y el límite líquido, teniendo un comportamiento intermedio la CIC y el contenido de minerales 2:1 en las arcillas, mientras que la relación entre el contenido de arcilla y COLE era la más baja.

### II.1.2. Relación de las arcillas con los índices de Atterberg

El límite líquido es dependiente de los constituyentes minerales del suelo, de la intensidad de las cargas superficiales, del espesor de la lámina de agua retenida y de la relación área superficial/volumen de las partículas. Aquellos minerales que tienen la mayor carga superficial y se presentan como muy finas partículas tendrán una mayor proporción de agua retenida en forma viscosa, y por lo tanto mayor será su límite líquido (Means & Parcher 1965).

Thomas *et al.* (2000) encontraron coeficientes de correlación de 0,52, 0,63 y 0,53 entre el índice de plasticidad y el contenido de arcilla, la capacidad de intercambio catiónico y la cantidad de minerales 2:1, respectivamente. Estos mismos parámetros correlacionaron con el límite líquido de la siguiente manera: 0,61, 0,42, 0,725\* (siendo\*: significativo al 0,05). A su vez Hammel *et al.* (1983) y Farrar & Coleman (1967) encontraron una alta relación entre la superficie específica y los límites líquido y plástico de distintos suelos con diferentes contenidos de arcilla y mineralogías contrastantes. Estos autores establecieron una función predictiva de la superficie específica de los constituyentes del suelo, a partir del conocimiento de dichos límites, resultando la misma un buen estimador de los minerales de arcilla presentes.

La plasticidad es definida como la propiedad del material que permite su deformación en forma rápida, sin ruptura, sin cambio de volumen y sin capacidad elástica para volver a su estado inicial. Este mecanismo es el resultado de la adición de agua al suelo, provocando una disminución en la cohesión entre las partículas de arcilla. En un determinado punto, el aumento en el contenido de agua de la mezcla disminuye la cohesión entre las partículas de tal forma que la pasta no puede retener su forma fluyendo como un líquido. Nuevos incrementos en el contenido de agua logran que las partículas se dispersen en una suspensión (Means & Parcher, 1965).

Esta propiedad se debe a la carga eléctrica de las partículas y a la naturaleza bipolar de la molécula de agua, que hacen que se formen tres estratos: uno con moléculas de agua fuertemente adheridas a las partículas del suelo, otro donde el agua se presenta más viscosa, y otro donde esta cualidad se va perdiendo en la medida que las moléculas de agua se van alejando de la partícula. Con bastante agua presente, las partículas del suelo pueden deslizarse fácilmente unas sobre otras sin retorno a su posición original, sin cambiar el volumen y sin modificar el grado de cohesión. A medida que se evapora el agua, la capa menos viscosa empieza a disminuir en importancia y por lo tanto aumenta el grado de cohesión entre las partículas (Means & Parcher, 1965).

### II.1.3. Influencia de las arcillas en la retención de agua de los suelos

El conocimiento de las propiedades hidráulicas de los suelos es de gran importancia en la agricultura moderna, ya que influyen en el crecimiento de las plantas, la aireación del suelo, su temperatura, drenaje, riego y traficabilidad (Puckett *et al.* 1985). A su vez, la determinación de la relación contenido de agua/tensión es importante cuando se usan ciertos modelos de simulación, como por ejemplo de transporte y comportamiento de pesticidas en el suelo, de percolación de nitratos y de estimación de la conductividad hidráulica no saturada (Hartmann, 2003).

La dependencia de la retención de agua de distintos parámetros del suelo es compleja, estando ligada la importancia relativa de éstos al rango de potencial mátrico involucrado, y dentro de un mismo potencial mátrico dicha importancia variará en función del tipo de suelo analizado (Pachepsky *et al.* 1996).

La geometría irregular de poros, su discontinuidad y las variaciones en textura y mineralogía son las principales características de los suelos que influyen en su capacidad de retención de agua (Rawls *et al.* 1991). La cantidad de agua retenida a altos potenciales (mayores a -10kPA) depende fundamentalmente de la densidad aparente, la porosidad y la estructura, mientras que cuando los potenciales de agua son menores a -150 kPa, aquellos parámetros que afectan la superficie específica son más importantes, como por ejemplo la textura, el contenido de materia orgánica y la mineralogía de las arcillas (Rawls *et al.* 1991).

Estos últimos autores señalan que mayores contenidos de carbono orgánico provocan aumentos en el contenido de agua en todos los potenciales agua considerados, mientras que incrementos en la densidad aparente provocan menores contenidos de agua a partir de potenciales superiores a -33 kPa.

Baumer & Brasher (1982) mencionan que con porcentajes de arcilla en el suelo superiores al 10 %, la mineralogía de estas es una variable a tener en cuenta en la predicción de la retención de agua. Mientras que las estructuras 2:1 de los silicatos, especialmente montmorillonita, tienen el mayor efecto, aquellas del tipo 1:1 (caolinita) tienen una influencia menor.

La superficie específica y la carga eléctrica de los minerales de arcilla influyen en la retención de agua del suelo, siendo que cuando ambas aumentan, mayor es la cantidad de agua que puede ser retenida por dichos minerales (Ochiston, 1954). Kutilek (1973) y Gupta *et al.* (1983) mencionan también a la capacidad de intercambio catiónico como un factor a ser tomando en cuenta en la estimación de la capacidad de retención de agua de un suelo.

Cuando un agregado se seca su volumen disminuye originando grietas y la subsidencia del suelo, mientras que cuando se humedece se hincha, cerrándose las grietas y volviendo el suelo a su posición original. Dada la influencia de estos cambios de volumen en las características hidráulicas de los suelos, una manera de caracterizarlos es a través de la determinación de la curva de contracción de agregados. McGarry & Malafant (1987) presentaron un modelo en el cual se pueden medir tres zonas de contracción, cuya forma está relacionada con la naturaleza y cantidad de las arcillas presentes (Allbrook, 1992). Recientemente Castiglioni *et al.* (2004a; 2005) aplicaron este modelo al estudio de Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada con diferencias mineralógicas conocidas. Estos autores encontraron correlaciones significativas entre diversos parámetros de las curvas de contracción con la CIC y la humedad equivalente, propiedades estas que integran tanto la cantidad como el tipo de arcillas presente.



Dado que las determinaciones en laboratorio de parámetros relacionados con la porosidad como la curva de contracción o la curva de retención de agua son costosas y llevan tiempo, se han tratado de estimar algunos puntos de la misma a partir de funciones de transferencia que contengan propiedades del suelo comúnmente determinadas en laboratorio. Así por ejemplo Gaiser *et al.* (2000), Tomasella & Donet (1998), Damiano *et al.* (1996) y Pecorari *et al.* (1988), desarrollaron funciones de transferencia para la estimación del contenido de agua a capacidad de campo y en marchitez permanente, a partir de parámetros de fácil determinación como el porcentaje de arcilla, limo, carbono orgánico y CIC del suelo.

En la Argentina, Pecorari *et al.* (1988) y Damiano *et al.* (1996) desarrollaron funciones utilizando datos de Argiudoles y Hapludoles de la Pradera Pampeana. Pecorari *et al.* (1988) a su vez hicieron una diferenciación en sus fórmulas de acuerdo a si estas correspondían a horizontes profundos o superficiales.

Damiano & Taboada (2000) compararon diversas funciones predictivas de la capacidad de agua disponible para las plantas de los suelos pampeanos, representando espacialmente dicha capacidad en un mapa a escala 1:500.000. Los resultados obtenidos variaron según las funciones de edafotransferencia utilizadas: ninguno de los métodos fue adecuado para el conjunto de la región, aunque cada uno de ellos se ajustó mejor a ciertas áreas y tipos de suelos. Los valores estimados de capacidad de agua disponible oscilaron entre 28 mm en suelos del oeste pampeano (donde la capa arable sería responsable de un 50 % de la retención) y 180 mm en el centro-este (donde la capa arable sería responsable de sólo un 20 % de la misma).

Williams *et al.* (1983), mencionan que los modelos predictivos desarrollados a partir de bases de datos con diferente textura de suelo, pero sin tener en cuenta la composición mineralógica de las arcillas, muestran resultados contradictorios cuando quieren ser validados con resultados obtenidos en suelos con baja y alta actividad de arcillas. Estos autores recomiendan para el desarrollo de ecuaciones de transferencia, que los programas de investigación contemplen la separación de éstas tanto por grupos de tamaño de partícula como por mineralogía de arcillas.

#### II.1.4. Influencia del contenido y composición de la fracción de arcilla en la porosidad y la dinámica hídrica de los suelos

Numerosas investigaciones en transporte de agua e intercambio de gases (Beven & German, 1982), han demostrado que la estructura del suelo debe ser vista como un espacio anisotrópico que le permite exhibir diferentes propiedades en diferentes direcciones del espacio.

Esto se manifiesta claramente en suelos de mediano a alto contenido de arcilla, los cuales al secarse se contraen formando fisuras verticales que se constituyen en pasos rápidos del agua infiltrada, zonas de alta aireación del suelo y lugares para la penetración profunda de las raíces de las plantas (Dexter, 1998). Estas grietas de desecación también pueden conducir el agua gravimétrica lejos del alcance de dichas raíces, junto con los pesticidas y fertilizantes aplicados en la superficie del suelo (Perillo *et al.* 1999).

La presencia de estas grietas provoca además un desuniforme patrón de distribución de la humedad del suelo, ya que el humedecimiento y el secado del mismo se producen preferentemente a través de las paredes de los agregados que separan dichas fisuras, o donde estas terminan (Van Stiphout *et al.*, 1987).

Cuando estos suelos de mediano a alto contenido de arcilla se humedecen, se expanden y las fisuras de desecación se cierran, produciéndose una reducción en la

conductividad hidráulica de dichos suelos. Respecto a esto hay algunas interpretaciones contrastantes: para el caso de los vertisoles, Dasog & Shashidhara (1993) concluyen que estas fisuras continúan siendo sitios de paso preferencial aún luego de su cierre, mientras que para Favre *et al.* (1997), opinan que en este tipo de suelos, ante la llegada del agua el cierre de fisuras es rápido, siendo nula su posterior contribución.

Con el avance tecnológico se ha incrementado el uso de modelos matemáticos de flujo de agua y movimiento de solutos, cuya utilidad potencial va desde estimar el movimiento en el suelo de nitratos, pesticidas y otros agroquímicos hasta conocer la cantidad de agua que penetra y permanece en el suelo, lo que permite a su vez estimar el rendimiento de los cultivos o la lámina de agua de riego necesaria para su desarrollo (Rawls *et al.* 1991). Sin embargo, la aplicación de estos modelos esta condicionada por el conocimiento de parámetros hidráulicos básicos (Vereecken, 1995). Como una alternativa a su medición directa, existen métodos indirectos, los que toman en cuenta propiedades del suelo fácilmente disponibles o medibles (Vereecken, 1995).

Con el objetivo de determinar el flujo del agua a través del suelo, la mayoría de los modelos de simulación consideran al mismo como un medio poroso homogéneo, adoptando por lo tanto el trabajo de Darcy en sus distintas formas matemáticas, sin contemplar el movimiento preferencial del agua y solutos a través de los macroporos (Morari & Knisel, 1997). Es más evidente aún el desajuste en los resultados obtenidos, cuando se quieren aplicar estos modelos en aquellos suelos que poseen arcillas expandibles y en los cuales al simularse el flujo de agua por los mismos, se toma como referencia la velocidad de flujo en la matriz del suelo (movimiento lento), sin considerar el movimiento rápido del agua por las grietas que se encuentran erráticamente diseminadas en el espacio (Morari & Knisel, 1997). Lin *et al.* (1996), trabajando con vertisoles con un 70 % de arcilla y una estructura de bloques angulares, encontraron que el patrón de flujo de agua en profundidad no era uniforme y que la distancia a la que llegaba la misma era 11 veces mayor a la estimada por el modelo de infiltración de Green & Ampt (1911), que toma en cuenta la porosidad total como parámetro predictivo de la transmisión de agua.

Bouma (1991) señala la importancia de desarrollar funciones de transferencia, ya que ellas relacionan características de los suelos fáciles de medir y en algunos casos disponibles en las bases de datos, con propiedades más complejas. Son muchos los autores que sostienen que si bien es importante el conocimiento de las propiedades hidráulicas de los suelos, medir estas consume mucho tiempo y dinero, por lo que hay una necesidad de poder predecirlas a través de la obtención rutinaria de datos de fácil medición (Rawls *et al.*, 1991; Puckett *et al.*, 1985). En este sentido, Anderson & Bouma (1977a,b) pudieron comprobar que el diferente comportamiento en el movimiento de solutos de distintos horizontes de similar textura estaba relacionado con la diferente morfología de dichos horizontes.

Rawls & Brakensiek (1990) también mencionan que una alternativa a la medición directa del flujo de agua en el suelo, es su estimación a través de propiedades edáficas fáciles de obtener como la textura, la densidad aparente, la materia orgánica y la mineralogía de arcillas. Si bien estos autores reconocen la importancia de este último atributo, al presentar en su trabajo los distintos estimadores de los parámetros utilizados en los modelos de Brooks Corey (1964), Campbell (1974) y Van Genuchten (1980) se observa que no se tomó en cuenta al mismo. En el caso de disponer la información señalan que, para el cálculo de la porosidad, se puede utilizar un algoritmo que incluye la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

Ogden *et al.* (1999), mencionan que no todos los macroporos participan del movimiento preferencial del agua (Shipitalo *et al.*, 1990). Es por ello que cuando se

estudia el movimiento hídrico y de solutos en suelos estructurados con macroporos es necesario expresar la continuidad y efectividad de los mismos.

En aquellos suelos que se expanden y contraen esta evaluación y predicción es extremadamente difícil (Bouma, 1991), debido a la continua destrucción y formación de macroporos. Una caracterización dinámica sobrevendrá al combinar una serie de condiciones estáticas conjuntamente con la comprensión del proceso global de cambio de volumen del suelo con la variación de su contenido hídrico, construyendo las curvas características de contracción-expansión (Yule & Ritchie, 1980).

En los suelos de la región pampeana es escasa la información que vincula la mineralogía con las características hídricas. Estudios de la conductividad hidráulica de suelos halomórficos del norte de Santa Fe realizados por Morrás & Candiotti (1981) y por Morrás (1983), mostraron remarcables diferencias de permeabilidad que, además de la influencia fundamental de las variaciones de salinidad, sodicidad y textura, pudieron además atribuirse a las diferencias de composición mineralógica de la fracción arcilla.

Castiglioni *et al.* (2005) estudiaron las vinculaciones entre la velocidad del movimiento del agua edáfica y algunas propiedades relacionadas con la composición mineralógica de la fracción arcilla de algunos Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada. En dicho trabajo se analizó el comportamiento de los horizontes A, BA, Bt y BC/C de suelos con diferente cantidad y calidad de arcillas, ubicados en el Centro de Investigaciones Agropecuarias del INTA Castelar (Pcia. de Bs.As.). En el mismo se determinaron las siguientes propiedades: coeficiente de extensibilidad lineal, humedad equivalente, número de actividad, porosidad, tasa de desecación, difusividad y conductividad hidráulica insaturada (Kh). En los horizontes A y BA el movimiento del agua estuvo relacionado fundamentalmente con la porosidad estructural y con propiedades asociadas como el contenido de carbono y la relación carbono/arcilla. En los horizontes Bt dicho movimiento se vio afectado por el contenido de arcilla, pero fue mayor el grado de vinculación obtenido con propiedades derivadas de la mineralogía de las mismas. En los horizontes BC/C la tasa de desecación del suelo respondió al contenido de arcilla, mientras que la difusividad y la Kh insaturada estuvo influenciada por su calidad. Al analizar en forma conjunta a los horizontes BC/C y Bt, la tasa de desecación siguió respondiendo a las diferencias en el contenido de arcilla, mientras que la difusividad y la Kh insaturada correlacionaron mejor con el efecto logrado en forma conjunta por el tipo y cantidad de arcilla. Al incluir en esta regresión a los horizontes superficiales, se vio que se alteraba en forma negativa su grado de ajuste.

Estos resultados muestran que los algoritmos utilizados para predecir parámetros de funciones que estiman el movimiento del agua edáfica, mejorarían su nivel de predicción si se incluyera en los mismos propiedades del suelo que tengan en cuenta las diferencias en su actividad biológica, así como la composición mineralógica de la fracción de arcilla.

## **II.2. Hipótesis**

La granulometría de los suelos y la mineralogía de su fracción arcilla regulan en diverso grado distintas propiedades físicas de los suelos de la Pampa Ondulada

## **II.3. Objetivos Específicos**

- Cuantificar y analizar el comportamiento de diversas propiedades físicas de distintos suelos representativos de la Pampa Ondulada
- Establecer el grado de vinculación entre el contenido de arcilla y su composición mineralógica con el comportamiento físico de suelos representativos de distintos ámbitos de la Pampa Ondulada

## **II.4. Materiales y métodos**

Se trabajó sobre los cinco perfiles de suelo de la Pampa Ondulada que ya fueron descritos en el Capítulo anterior. La caracterización física de los suelos se efectuó mediante diferentes técnicas para evaluar la porosidad, la retención de agua, la conductividad hidráulica y la capacidad de expansión-contracción, con el fin de poder discriminar que propiedades están más relacionadas con el contenido de arcilla y cuales con el tipo de arcilla.

Los métodos de análisis físicos utilizados se mencionan a continuación. En algunos casos los análisis se realizaron sobre cada uno de los horizontes descritos en el campo, en tanto para otras determinaciones se seleccionaron los horizontes más representativos de cada perfil. En la discusión de los resultados de cada determinación se especifican las muestras que fueron analizadas.

### Humedad Equivalente

Se pesaron 30 gramos de muestra tamizada a 2 mm. Se colocó la muestra en cajas metálicas especiales con papel de filtro y una malla para no perder material, dejándolos en agua durante 24 hs. Luego se dejó escurrir el exceso de agua por 20 minutos. Posteriormente se procedió a centrifugar la muestra por 40 minutos a una velocidad de 2400 rpm, para luego pesarlas en húmedo. Por último se las llevo a estufa a 105 ° C durante 24 hs, siendo luego pesadas y obteniéndose el peso seco. De esta manera con los pesos húmedo y seco se calcula el agua retenida y la humedad equivalente (Briggs & Mc Lane, 1907).

### Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Estas determinaciones se efectuaron sobre muestras no disturbadas para capacidad de campo y muestras tamizadas por 2 mm para el punto de marchitez permanente. A este efecto, en cada uno de los cinco perfiles se tomaron cuatro muestras de suelo por horizonte con cilindros de 5 cm de diámetro, 3 cm de altura y 1-2 mm espesor. Para determinar la capacidad de campo (33 KPa) y el punto de marchitez permanente (1500 KPa) se utilizó la determinación de retención de agua mediante la extracción por placas de presión (ollas de Richards, 1948).

### Agua de Saturación

De acuerdo a la metodología de Richards (1949a) y Reitemeier & Fireman (1944), se utilizó el porcentaje de saturación de la pasta saturada preparada para medir conductividad eléctrica, con la finalidad de determinar el agua de saturación.

### Conductividad hidráulica saturada

Se tomaron cinco muestras por horizonte con cilindros de 7,5 cm de diámetro y 5,5 cm de altura para la determinación de la conductividad hidráulica saturada, siguiendo la metodología propuesta por Klute & Dirksen (1986).

### Densidad aparente

Se tomaron dos muestras con cilindro de 225 cm<sup>3</sup> en cada uno de los horizontes de los suelos analizados. En el laboratorio las muestras se pesaron y se pusieron a secar en estufa a 105°C, determinándose su peso seco. Con esta información se calculó la densidad aparente, al relacionar el peso seco del suelo con el volumen del cilindro utilizado (Blake & Hartge, 1986-b).

### Porosidad total

La porosidad total (St) se determinó a partir de la densidad aparente ( $p_b$ ), y utilizando el número 2,65 ( $p_p$ ) como valor de densidad de partícula, mediante la siguiente fórmula (Danielson & Sutherland, 1986):

$$St = (1 - p_b/p_p)$$

### Curvas de retención de agua

Para esta determinación se tomaron tres muestras por horizonte con cilindros metálicos de 4,6 cm de diámetro y 5 cm de altura, siendo las presiones aplicadas en la mesa de tensión y olla de presión las siguientes (en kPa): 0; 1; 3; 6; 10; 15; 100; 280 y 1500.

### Distribución por tamaño de poro

Utilizando los resultados obtenidos de las muestras utilizadas para la determinación de las curvas de retención hídrica, se pudo establecer la distribución de poros por tamaño (Danielson & Sutherland 1986). Teniendo en cuenta que los primeros poros en drenar son los más grandes, luego aquellos un poco más pequeños y así sucesivamente, se puede estimar el rango de tamaño de poros involucrado en cada etapa, a partir de la presión negativa ejercida sobre la muestra y aplicando la ecuación de capilaridad de Laplace (Bear, 1972). Conociendo el volumen de agua removida entre las distintas presiones aplicadas, se puede determinar el volumen que ocupa cada categoría por tamaño de poros.

Una importante cuestión asociada con la caracterización de los poros es la falta de una terminología estándar relacionada con su clasificación en distintos intervalos de tamaño (Danielson & Sutherland 1986). En el presente trabajo se adoptó la clasificación por tamaño de poros (Tabla N° 8) similar a la mencionada por Greenland (1977).

Tabla N° 8 - Clasificación de poros por tamaño y función.

Tamaño de poro	Función desempeñada
Mayor a 50 $\mu\text{m}$	Poros de transmisión (Macroporos)
Entre 0,2 y 50 $\mu\text{m}$	Poros de retención de agua disponible (Mesoporos)
Menores a 0.2 $\mu\text{m}$	Poros de retención de agua no disponible (Microporos)

Teniendo en cuenta esta clasificación se procedió entonces a comparar entre horizontes el volumen ocupado por cada una de dichas fracciones.

### Índices de Atterberg

En 1911 Atterberg dividió el rango cohesivo del suelo desde el estado sólido al líquido en cinco subestados y estableció límites arbitrarios para estas divisiones, en términos de contenido de agua.

Con la finalidad de evaluar estas propiedades en cada uno de los horizontes de los suelos analizados, se determinaron: el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad.

### Límite líquido

Es el contenido de agua del suelo por encima del cual la pasta formada fluye como un líquido viscoso y por debajo del cual la mezcla es plástica (Means & Parcher 1965).

Para su determinación se trabajó con muestra de suelo tamizada por tamiz de 300 micrones, a la cual se le agregó agua formando una pasta, dejándola reposar por varias horas. Pasado ese tiempo, se colocó la mezcla con una espátula en la copa del dispositivo diseñado por A. Casagrande (1932). Una vez distribuida la pasta en dicho recipiente, se le hizo una hendidura con una herramienta especialmente diseñada, e inmediatamente se procedió a accionar la manivela que logra la elevación de la copa hasta una altura de 1 cm y su posterior caída contra la base del aparato. Este movimiento provoca que el surco abierto comience a cerrarse, debiéndose continuar con el mismo hasta que media pulgada a lo largo del surco se cierre. Una vez ocurrido esto, se tomó una muestra de la pasta, para determinar su contenido hídrico, y se anotó el número de vueltas dado a la manivela. Se considera que el límite líquido es el contenido de humedad del suelo cuando el surco se cierra a las 25 vueltas de manivela.

Para cada horizonte de suelo analizado, este procedimiento se repitió al menos con seis contenidos de humedad diferentes. Con la información así obtenida se confeccionó un gráfico, figurando el contenido hídrico de la pasta en ordenadas mientras que en abscisas, en escala logarítmica, se ubicó el número de vueltas a la cual se cerró la hendidura. A los puntos así graficados se ajustó una recta de regresión (llamada línea de flujo) y cuya expresión matemática servirá para determinar el límite líquido.

### Límite plástico

Atterberg define el límite plástico como el contenido de agua al cual, una muestra de suelo cuando es amasada en la palma de la mano formando un rollo de 3 mm

de diámetro comienza a fraccionarse (Means & Parcher 1965). Para determinar dicho límite se trabajó con tres repeticiones por horizonte.

### Índice plástico

Es la diferencia en el contenido de humedad del suelo entre el límite líquido y el límite plástico. Se utilizaron los siguientes intervalos de IP: (0) no plástico, (1-5) poco plástico, (5-10) baja plasticidad, (10-20) plasticidad media, (20-40) alta plasticidad y (mayor a 40) plasticidad muy alta (Márquez, 1985).

### Coefficiente de extensividad lineal (COLE)

En el presente trabajo se determinaron las curvas de contracción de cada horizonte utilizando entre 30 y 40 agregados de 3 a 10 cm<sup>3</sup> de volumen, obtenidos del muestreo a campo. Estos agregados se humedecieron por capilaridad al ser colocados sobre un papel de filtro, alimentado a su vez con agua, mediante el uso de un algodón sumergido en agua destilada. Luego de 24 hs los agregados fueron retirados del dispositivo y se dejaron secar al aire durante distinto tiempo, para provocar en ellos diferentes contenidos hídricos. Después de este desecamiento parcial, y habiendo pesado los agregados para poder determinar su contenido de humedad, estos se colocaron en un recipiente con kerosene durante 24 hs.

Una vez saturados y retirados del recipiente se los secó superficialmente con un papel absorbente, para eliminar la película superficial de kerosene, y así evitar que esta sea contabilizada en los cálculos de volumen de los agregados. Posteriormente y aplicando el principio de Arquímedes, se determinó su volumen, sumergiéndolos en un recipiente con kerosene dispuesto sobre una balanza. Por último los agregados se secaron en estufa a 105 °C y se pesaron.

Estos volúmenes fueron utilizados en la ecuación para determinar el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), el cual es un valor que marca la fracción de cambio en la dimensión de los agregados al pasar de un estado seco a otro húmedo. Puede ser usado para hacer inferencias acerca de la capacidad de un suelo a contraerse y expandirse, como de la mineralogía de las arcillas presentes en el mismo (USDA, 1996).

Para su determinación se usó la siguiente ecuación (Grossman *et al.* 1968):

$$\text{COLE}_{\text{std}}: (V_{30}/V_d)^{1/3} - 1$$

siendo:

$V_{30}$  : volumen ocupado por los agregados con un contenido de humedad correspondiente a un potencial mátrico de 30kPa

$V_d$  : volumen ocupado por los agregados secados a estufa a 105° .

Los datos requeridos para su resolución (COLE) surgieron de las curvas de contracción obtenidas con agregados y de las curvas características de agua de cada horizonte de suelo estudiado.

Se utilizó la clasificación del Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas *et al.* 2000) para categorizar a los materiales que componen los horizontes estudiados de

acuerdo a su capacidad de expansión-contracción. Dichas categorías se detallan en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9 - Capacidad de expansión-contracción citada por Thomas *et al.* 2000

<i>Valoración del coeficiente de extensibilidad lineal</i>	
<i>Extensibilidad</i>	<i>Cole (cm /cm)</i>
Baja (B)	< 0,03
Media (M)	0,03-0,06
Alta (A)	0,06-0,09
Muy Alta (MA)	> 0,09

### Extensibilidad lineal

Se determinó el valor de extensibilidad lineal de los cinco perfiles a través de la multiplicación de los valores obtenidos de COLE en cada horizonte por el espesor en cm de cada uno de ellos (Keys to Soil Taxonomy, 2010).

### Análisis Estadístico:

A fin de evaluar la interrelación entre las propiedades físicas estudiadas en los suelos seleccionados de la Pampa Ondulada, se realizó un análisis de componentes principales. Este incluyó las siguientes variables: agua de saturación, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad equivalente, conductividad hidráulica saturada, índice plástico, coeficiente de extensibilidad lineal, densidad aparente, porosidad total, macroporos, mesoporos y microporos. Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el programa Infostat /P v1.1, 2002.

## **II.5. Resultados y Discusión**

### II.5.1. Retención de agua

#### Agua de saturación

En la Figura N° 27 se presenta la variación del contenido de agua de saturación a medida que aumenta la profundidad en los cinco perfiles estudiados. En los horizontes superficiales se observa que el perfil de Chivilcoy es el de menor contenido de agua de saturación (40,2 %). Por otro lado los perfiles de Arminda (51,8 %), Luján (53,1 %), Oliveros (54,4%) y San Pedro (56,7%) tienen contenidos de agua de saturación similares. En los perfiles de Luján y Oliveros se aprecia una disminución notoria de los valores a nivel de los horizontes eluviados E y E/B, respectivamente.

Entre los horizontes Bt, el de San Pedro es el que presentó mayor contenido de agua de saturación (75,2 %), muy por encima del resto de los otros cuatro suelos (40 a 50 %). Dicha diferencia se sigue manteniendo a medida que aumenta la profundidad. En los horizontes BC y C la disminución de los valores es marcada, destacándose sin embargo el nuevo incremento que se observa en los horizontes más profundos de los suelos de Luján y Oliveros.



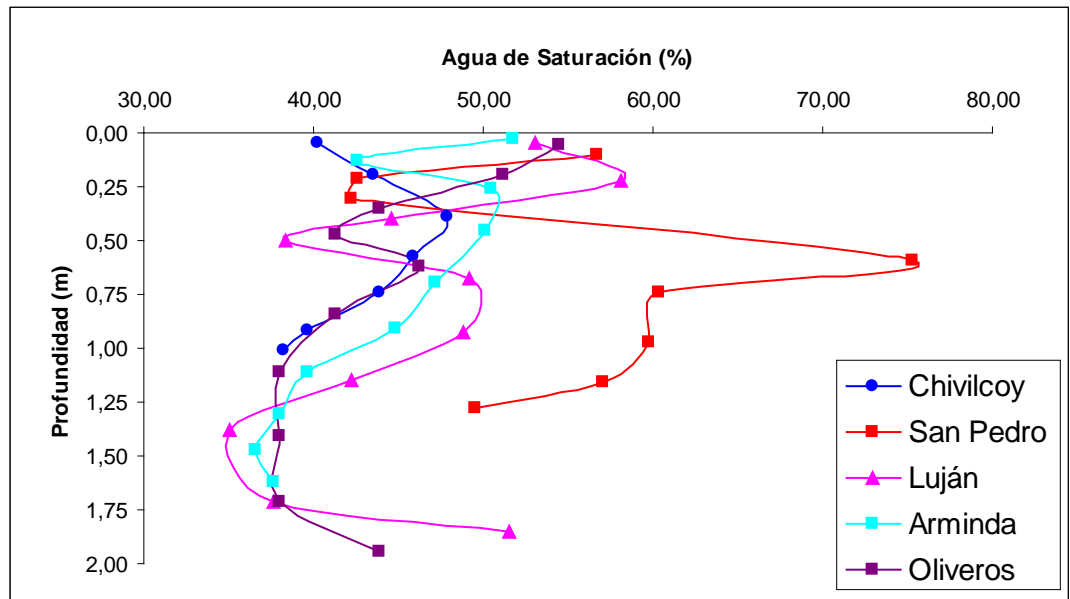


Figura N° 27- Variación del contenido de agua de saturación (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

#### Humedad equivalente (HEq)

En la Figura N° 28 se puede observar cómo varía la humedad equivalente a través de los distintos horizontes de los suelos estudiados.

En la misma se puede visualizar que en los horizontes superficiales los mayores valores de humedad equivalente se presentan en los suelos correspondientes a San Pedro (27%), Oliveros (26,3%) y Arminda (25,8%). Por su parte el correspondiente a Chivilcoy se ubica en valores intermedios (23,1%), mientras que el de Luján es el de menor valor (19,7%).

En los horizontes Bt y BC, de la misma manera que lo sucedido con el agua de saturación, los valores de humedad equivalente correspondientes al suelo de San Pedro son máximos (41,64%), mientras que los de Chivilcoy son los menores (20,6%). Entre ambos extremos se presentan los valores de los restantes suelos. Finalmente, en profundidad Oliveros presenta valores de humedad equivalente superiores al resto de los perfiles.

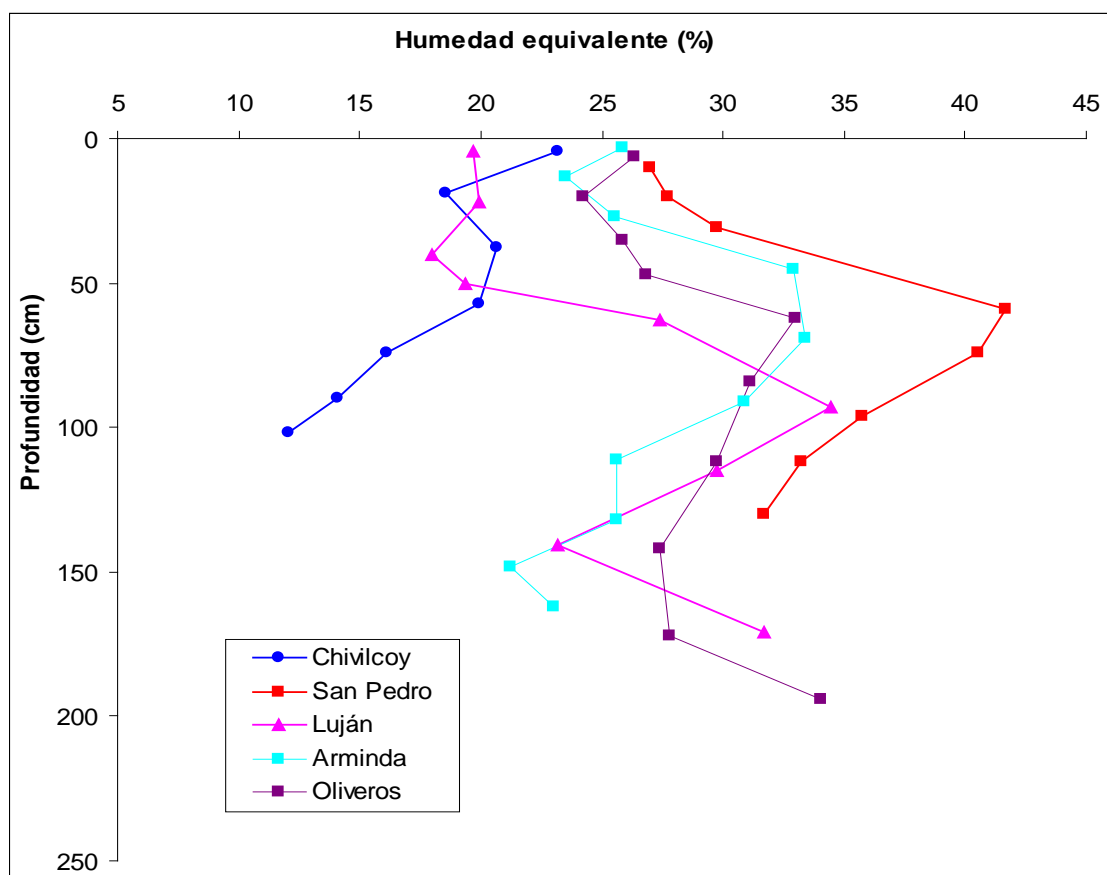


Figura N° 28 - Variación de la humedad equivalente (HEq) con la profundidad de los suelos estudiados.

### Capacidad de campo (CC)

La variación de la capacidad de campo en horizontes seleccionados de los perfiles estudiados se puede observar en la Figura N°29.

De su análisis se desprende que en los horizontes superficiales los cinco perfiles presentan valores similares de capacidad de campo que oscilan entre el 30 y 35 %.

En los horizontes Bt, entre 40 y 65 cm de profundidad, los suelos de Oliveros y San Pedro presentan la mayor retención de agua (48,2% y 46,6 % respectivamente). El suelo de Chivilcoy muestra el valor más reducido de CC, en tanto Arminda y Lujan tienen valores intermedios. En profundidad resulta llamativo que el perfil de Arminda presenta el valor más reducido de CC (26,1%) –de todos modos en consonancia con la disminución observada en la humedad equivalente- en tanto el resto de los perfiles presentan valores similares que oscilan entre 37 y 42 %.

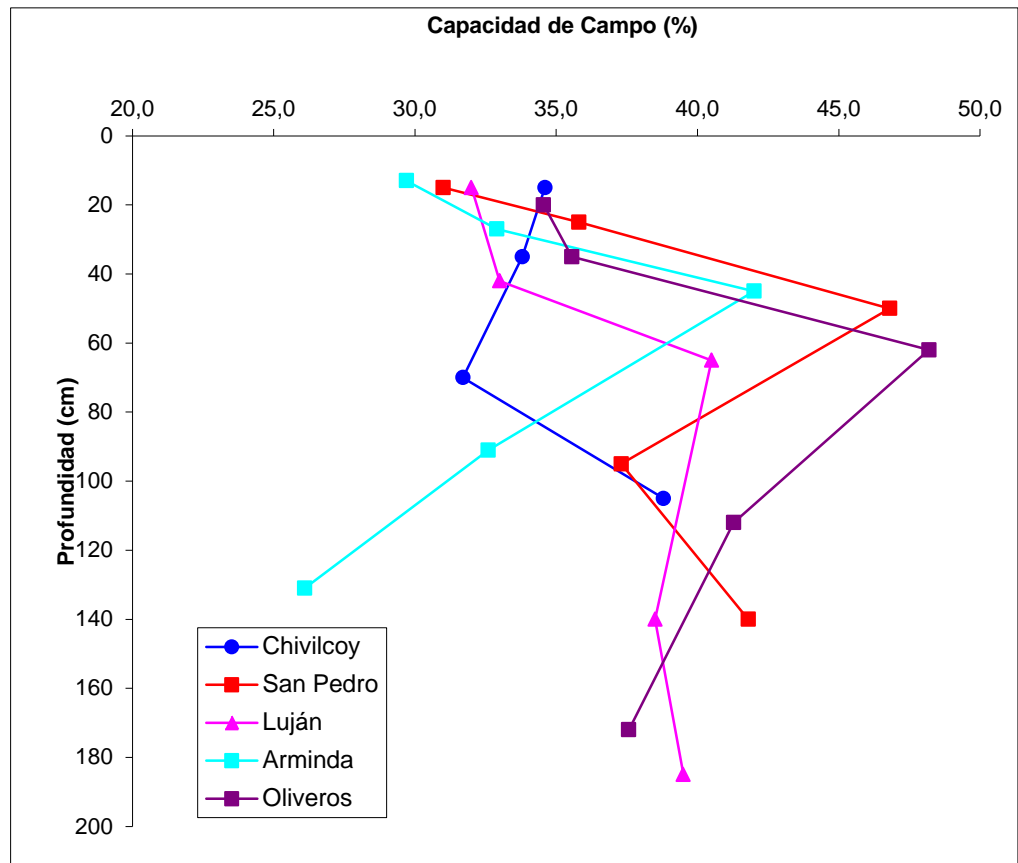


Figura N° 29 - Variación de la capacidad de campo (CC) con la profundidad de los suelos estudiados.

#### Punto de marchitez permanente (PMP)

La variación del punto de marchitez permanente con la profundidad en los 5 perfiles estudiados puede observarse en la Figura N° 30. En los primeros centímetros de los suelos el punto de marchitez permanente es similar en 4 de los perfiles con valores que oscilan entre 13-14% diferenciándose en cambio el perfil de San Pedro con un valor mayor (17,3 %). En los horizontes Bt, entre 40 y 65 cm de profundidad, San Pedro, Arminda y Oliveros presentan la mayor retención de agua en el PMP (alrededor de 30%), mientras que Chivilcoy presenta el menor valor (15,4%) y el suelo de Luján un valor intermedio (alrededor de 20%). En profundidad Chivilcoy tiene una capacidad de retención de agua en el PMP de sólo 9%, Arminda y Oliveros presentan valores intermedios, en tanto la retención de agua del suelo de Luján se incrementa equiparándose a la de San Pedro (entre 21 y 25%).

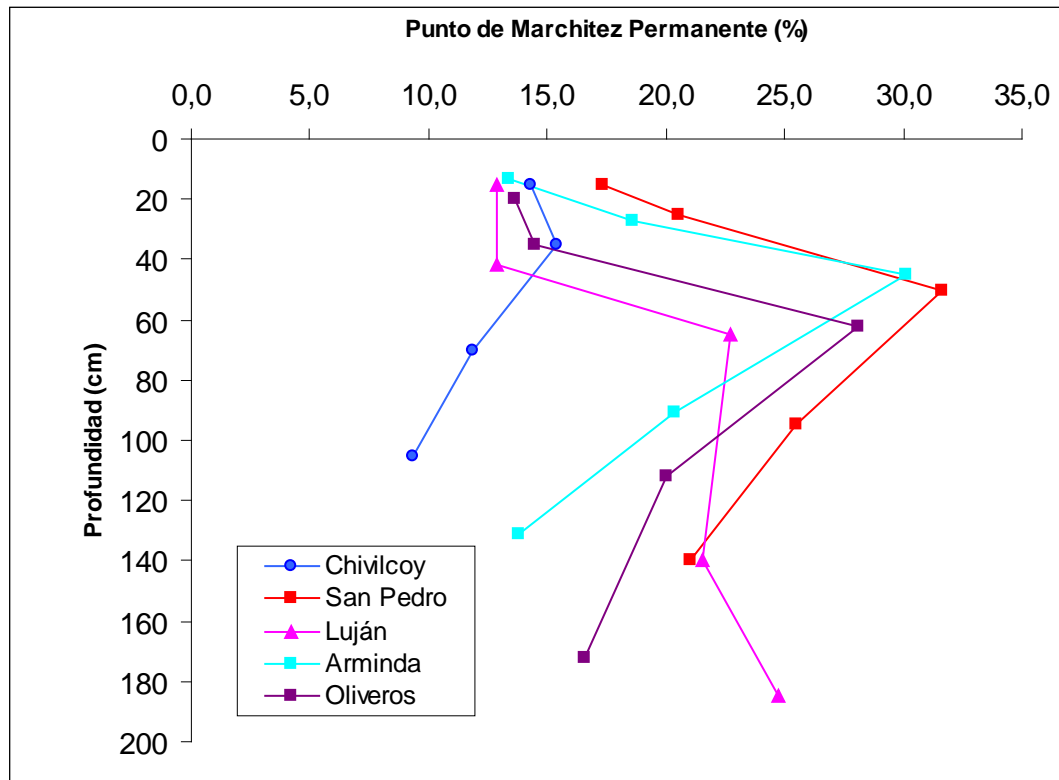


Figura N° 30 - Variación del punto de marchitez permanente (PMP) con la profundidad de los suelos estudiados.

En síntesis, los parámetros analizados muestran diferencias marcadas en la capacidad de retención hídrica tanto entre los distintos suelos como dentro de cada uno de los perfiles estudiados.

De esta manera, y observando las variaciones en profundidad de los valores de retención hídrica, resulta evidente que el suelo de Chivilcoy es el que menor retención hídrica posee, el suelo de San Pedro es el que retiene más agua, en tanto los tres restantes suelos presentan capacidades de retención intermedia. También en términos generales, los valores de retención son menores en los horizontes superficiales, máximos en los Bt e intermedios en los horizontes BC y C.

Sin embargo, la correspondencia no es estricta comparando los distintos puntos de retención de agua y técnicas empleadas. En este sentido, debe notarse que la diferenciación entre los mencionados tres grupos de suelos aparece más evidente tomando en cuenta los valores de humedad equivalente y del punto de marchitez permanente, sobre todo en los horizontes subsuperficiales. Cabe recordar que ambas metodologías se llevan a cabo sobre muestras de suelo molidas y tamizadas.

Para la determinación de la capacidad de campo, en este trabajo se han utilizado muestras no disturbadas tomadas con cilindro, siendo el procedimiento más habitual el de usar agregados individuales no disturbados. De acuerdo a lo mencionado, el procedimiento utilizado en el presente estudio para la determinación del contenido de agua a capacidad de campo incluiría la porosidad interagregados y en consecuencia y se ajustaría mejor al comportamiento natural del suelo. Sin embargo es posible que algunos valores demasiado bajos que aparecieron (por ejemplo en los horizontes profundos de Arminda) pudieran deberse al efecto de borde con los cilindros en este tipo de muestras utilizadas.

Por otro lado suele considerarse que el dato de humedad equivalente es similar o muy cercano al de capacidad de campo. No obstante, el procedimiento de la HEq implica una succión equivalente a 100 KPa (Baize, 2000): por este motivo en los suelos de texturas gruesas la HEq daría valores menores que la C.C., mientras que en texturas finas sucedería lo contrario (Ratto, 2000). Sin embargo, los valores aquí obtenidos por el método de HEq han sido sistemáticamente inferiores entre un 5 y 15% a los obtenidos a 33 KPa con la olla de Richards, tanto con texturas finas como gruesas. En consecuencia, dado que la H Eq reflejaría mejor que la determinación de la CC el efecto del contenido y tipo de arcilla en la retención de agua al utilizar mayores succiones y no estar influenciada por la porosidad interagregados, en este trabajo parecería ser más apropiado tomar en cuenta los resultados del primer procedimiento. Por otro lado la determinación de la humedad equivalente es de gran interés dado su facilidad operativa, lo que permite la obtención de un mayor número de datos y la construcción de curvas más completas como las que aquí se presentan.

La determinación del agua de saturación de por sí tiene un componente de subjetividad relacionado con el criterio del operador. Sin embargo, resulta interesante notar en el suelo de San Pedro valores claramente elevados de retención de agua hasta el punto de saturación, que reflejarían una mayor capacidad de expansión en concordancia con la composición de la arcilla caracterizada por una mayor proporción de minerales I/E. También puede notarse que el horizonte superficial del perfil de Chivilcoy presenta valores de retención de agua elevados a pesar de ser el suelo de textura más gruesa, en lo cual estará influyendo su elevado contenido de materia orgánica. A su vez, el incremento en los parámetros de retención de agua que presentan los horizontes más profundos del perfil de Luján y en menor medida el de Oliveros, con valores similares o aún superiores a los de sus correspondientes horizontes Bt, se corresponden con los incrementos de arcilla y las discontinuidades descriptas en el campo.

#### Curvas de retención hídrica por horizonte

En la Figura N° 31 se puede observar como varía la retención de agua en los horizontes A de los cinco perfiles de suelo estudiados. A tensiones de presión iniciales muy bajas (0 a 10 cm) se observa que el suelo de Chivilcoy es el de mayor retención de agua, luego le siguen los suelos de San Pedro y Oliveros y por último aparecen con los valores de retención más bajos los suelos de Luján y Arminda. A partir del valor de tensión de 30 cm se observa una tendencia que se mantendrá hasta valores muy elevados. El suelo de San Pedro es el que presenta valores levemente mayores de contenido de agua a lo largo de las tensiones superiores a 30 cm. Luego le siguen en orden decreciente los perfiles de Chivilcoy, Oliveros, Luján y Arminda.

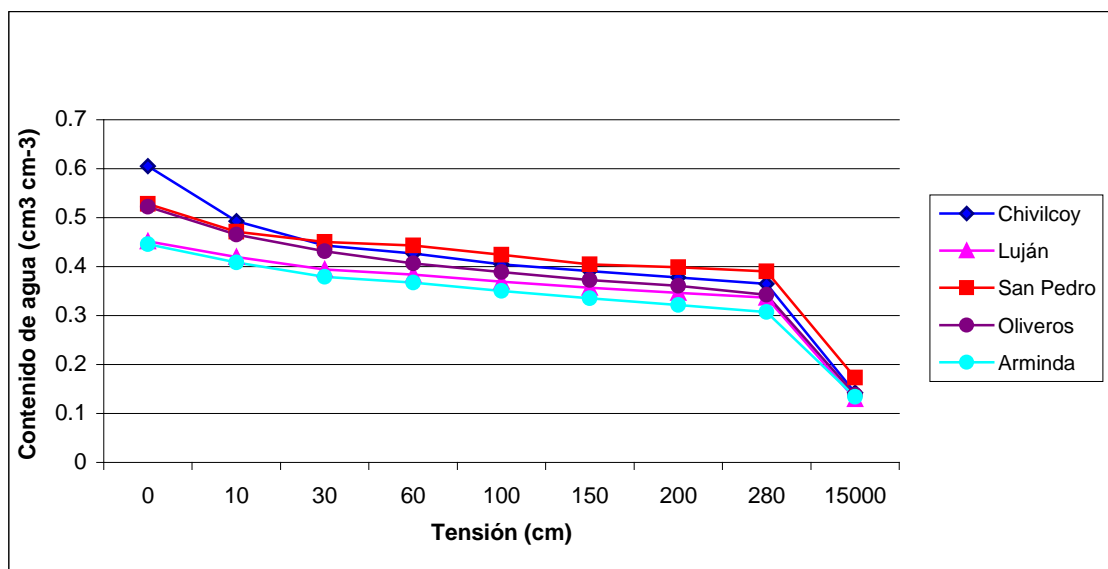


Figura N° 31- Curvas de retención hídrica de los horizontes A, correspondientes a los suelos analizados

En la Figura N° 32 se puede observar como varía la retención de agua en los horizontes transicionales cercanos a la superficie (BA/AB/E) de cuatro de los perfiles de suelo estudiados. Desde tensiones de presión muy bajas hasta las más elevadas se observa una misma tendencia, donde el suelo de San Pedro es el que presenta los mayores valores de contenido de agua (0,6 a 0,45). Con valores intermedios se observa únicamente al suelo de Oliveros hasta el valor de 30 cm de tensión, en tanto los suelos de Arminda y Luján presentan los valores más bajos (0,43 a 0,3). Por encima del valor de tensión de 30 cm, Arminda aumenta su contenido de agua igualando los valores de Oliveros, en cambio el suelo de Luján sigue manteniendo los menores valores de retención. Dichas similitudes se mantienen hasta llegar a valores de tensión de 15000 cm, donde el suelo de San Pedro sigue presentando valores de contenido de agua levemente superiores al resto de los suelos. En orden decreciente le siguen Arminda, luego Oliveros y por último el suelo de Luján.

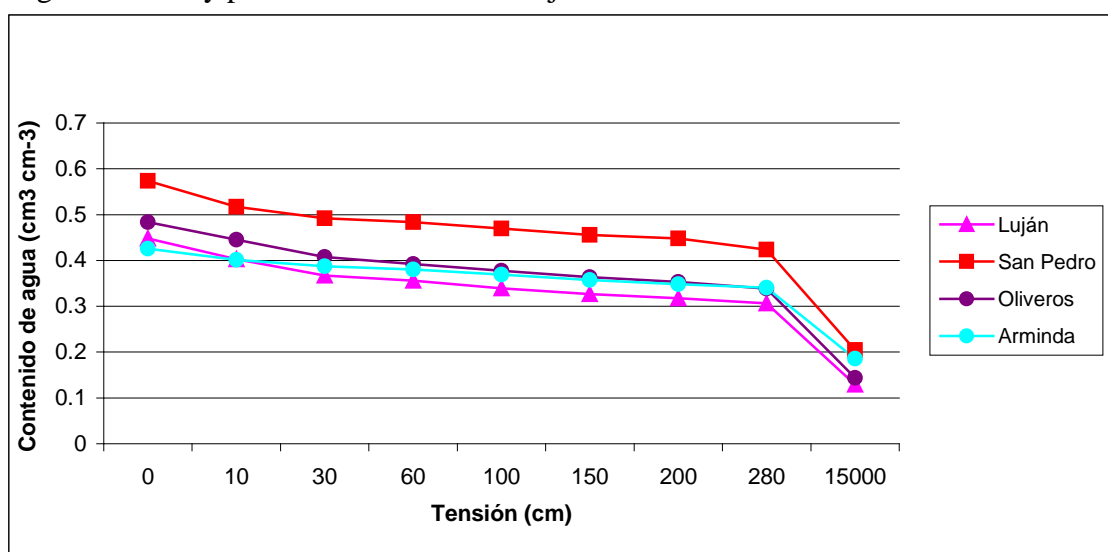


Figura N° 32 - Curvas de retención hídrica de los horizontes BA/AB/E correspondientes a los suelos estudiados.

En la Figura N° 33 se puede observar como varía la retención de agua en los horizontes Bt<sub>2</sub> de los cinco suelos estudiados, incluyendo aquí también el Bt<sub>3</sub> de Oliveros. El horizonte de San Pedro es el que presentó los mayores contenidos de agua (0,75 a 0,6) a lo largo de las distintas tensiones. Las muestras de Arminda, Oliveros y Luján se ubicaron en valores intermedios (0,6 a 0,45), salvo el Bt<sub>2</sub> de Luján que a tensiones muy bajas tuvo contenidos similares al Bt<sub>2</sub> de San Pedro. Por su parte, el Bt<sub>2</sub> de Chivilcoy y el Bt<sub>3</sub> de Oliveros tuvieron el menor contenido de agua (0,5 a 0,35) a lo largo de las distintas tensiones.

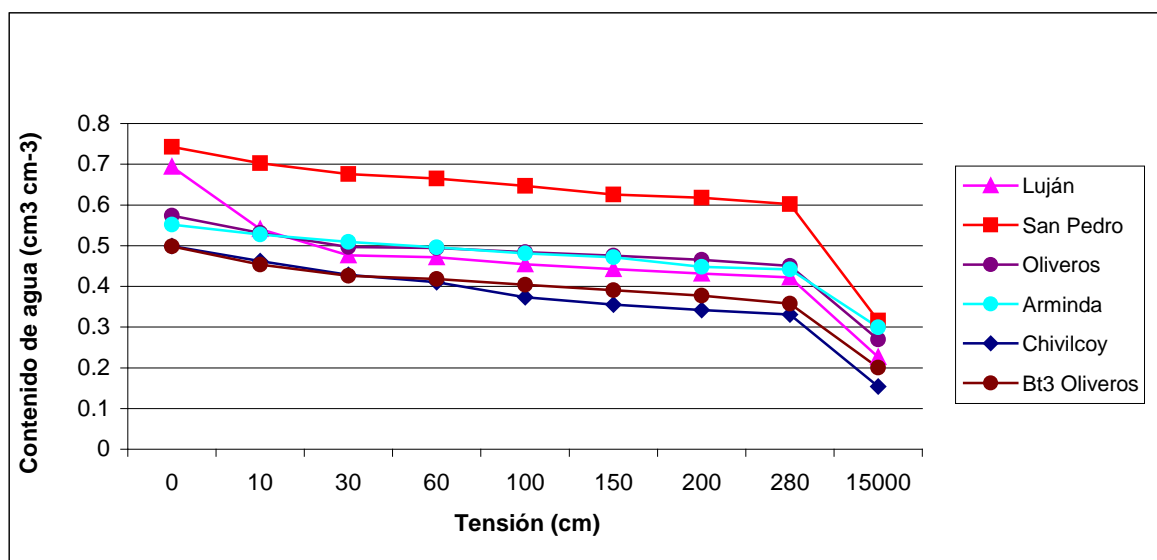


Figura N° 33 - Curvas de retención hídrica de los horizontes Bt correspondientes a los suelos estudiados.

Buscando la vinculación de estos resultados con otros parámetros edáficos, se pudo constatar una buena correlación entre el contenido de arcilla y la retención de agua en los horizontes BC y C (0,89 para la relación PMP / arcilla y 0,92 para la relación HEq / arcilla). Por el contrario para los horizontes A esta vinculación no fue significativa. Sin embargo, se pudo determinar una mejor correlación entre la CIC con el contenido de agua en el PMP, tanto para los horizontes BC y C (0,96 para la relación PMP / CIC) como para los superficiales (0,91 para la relación PMP / CIC). Estos resultados reflejan la importancia de la arcilla en la retención de agua a estas dos tensiones en los horizontes más profundos, mientras que en los superficiales lo sería el contenido de materia orgánica,

En síntesis, los datos obtenidos muestran que la retención de agua en los horizontes superficiales estudiados, además de estar relacionada con el contenido de arcilla, se encuentra muy influenciada por el contenido de materia orgánica. Estos resultados corroboran lo indicado por Rawls *et al.* (2003), en cuanto a que la retención de agua en los suelos de textura gruesa es substancialmente más sensible al aumento del contenido de carbono orgánico que en los suelos de textura fina.

Por otro lado, los datos obtenidos de retención de agua en los horizontes Bt, BC y C estarían indicando que ésta estaría condicionada no sólo por el contenido de arcilla, sino –como podrá constatarse más adelante- también por la composición mineralógica y la fábrica de la arcilla. En este sentido, comparando suelos con diferente proporción de minerales interestratificados de illita/ esmectita Dontsova *et al.* (2004) indican una mayor retención de agua en los suelos con mayor proporción de estos minerales, como

consecuencia de una mayor superficie específica generada por las partículas de los mismos. Por su parte Bruand & Tessier (2000) definieron a la fábrica de arcilla como la distribución espacial de las partículas de arcilla, observando que la retención de agua varía entre los distintos suelos en relación con las variaciones de su fábrica. Esta última está vinculada con la capacidad de intercambio catiónico, el tamaño de las partículas elementales y la historia de stress hídrico de la arcilla. Para la mayoría de los horizontes de los suelos moderadamente bien drenados, estos autores encontraron que la fábrica de arcilla parece estar relacionada con la superficie externa de las partículas de arcilla y con la densidad de carga eléctrica en esa superficie.

### II.5.2. Porosidad y movimiento del agua

#### Densidad Aparente (Dap)

Los resultados de densidad aparente de los distintos horizontes de los cinco perfiles estudiados se pueden observar en la Figura N° 34 (Perfiles de Luján, Oliveros y Arminda) y Figura N° 35 (Perfiles de Chivilcoy y San Pedro).

En Luján y Oliveros, que se asemejan por presentar un horizonte E, la variación en profundidad de esta propiedad presenta una tendencia similar: valores menores en el horizonte superficial (entre 1,2 y 1,3 g cm<sup>-3</sup>), incremento marcado en los horizontes Bt (1,40 a 1,46 g cm<sup>-3</sup>), y disminución marcada a mayor profundidad, salvo en la base del suelo de Oliveros. Los valores de Dap del perfil de Arminda mostraron una variación similar a lo mencionado anteriormente, con la diferencia de que la Dap correspondiente a los 40 cm de profundidad fue similar a la del horizonte superficial. Por su parte, y de manera llamativa, los suelos de San Pedro y Chivilcoy presentaron valores máximos en el horizonte superficial, una disminución abrupta en el horizonte siguiente (a los 30 cm), en el Bt un ligero incremento pero con valores inferiores a los de superficie, y finalmente una disminución de la Dap en profundidad.

En síntesis, si bien es claro que todos los suelos presentan una disminución de la densidad aparente hacia la parte inferior del perfil (horizontes BC y C) (con la salvedad del horizonte más profundo de Oliveros), el comportamiento de los horizontes A y Bt es diferente de acuerdo al suelo analizado.



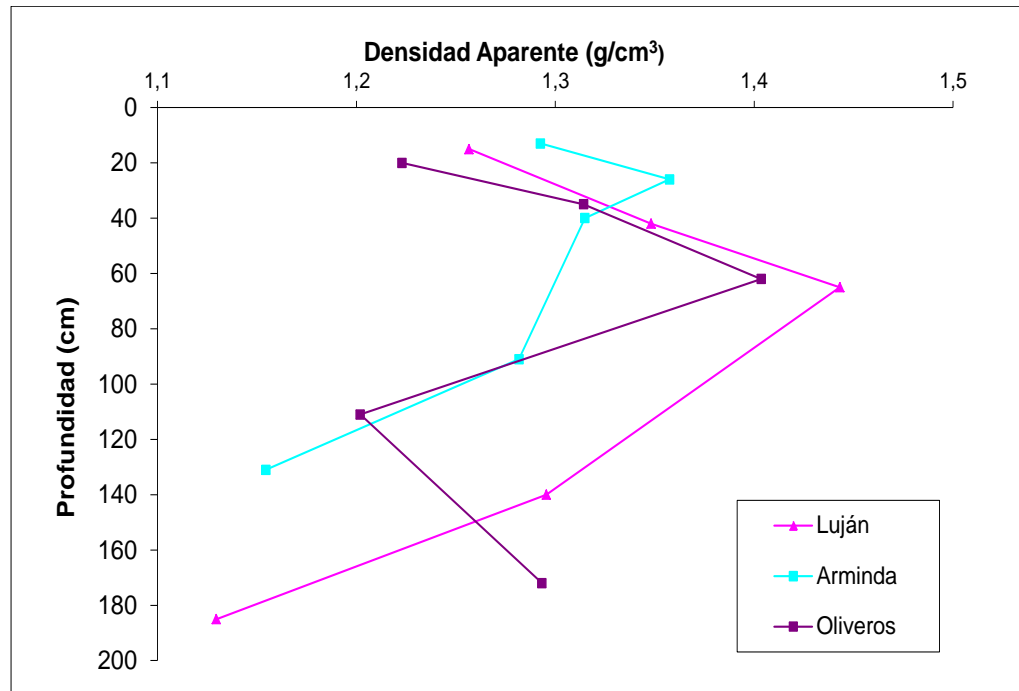


Figura N° 34- Variación de la densidad aparente (Dap) con la profundidad de los perfiles de Luján, Oliveros y Arminda.

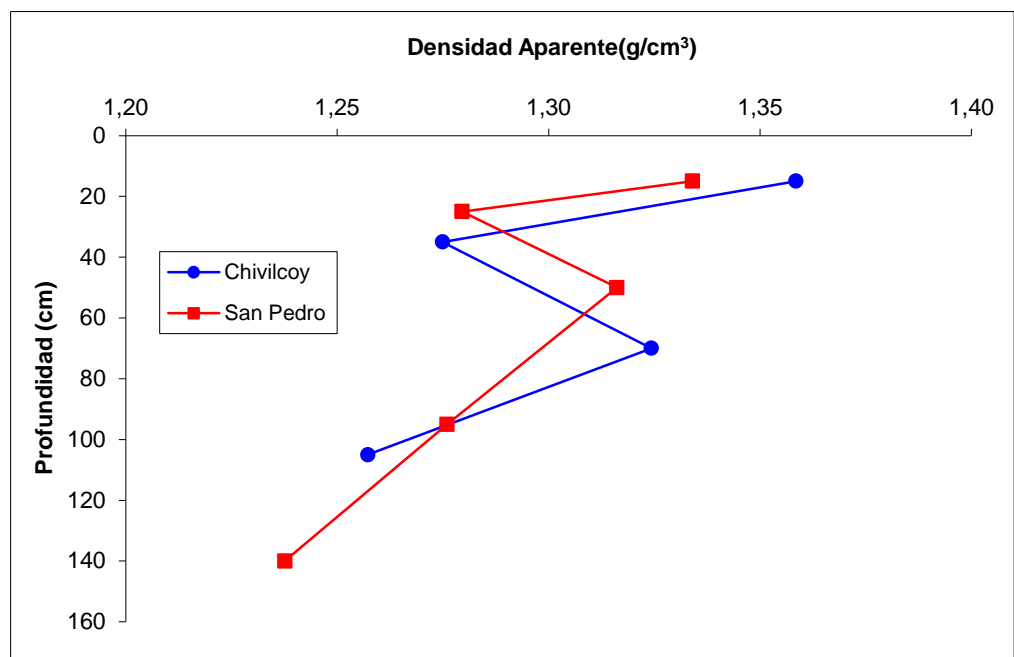


Figura N° 35- Variación de la densidad aparente con la profundidad de los perfiles de Chivilcoy y San Pedro.

### Porosidad Total (PT)

La porosidad total, obtenida a partir de la densidad aparente, presenta desde ya valores y tendencias inversos a las referidas más arriba. De estos resultados podría resaltarse que los dos suelos más contrastantes por su granulometría y morfología (San Pedro y Chivilcoy), presentan valores y tendencias en profundidad muy parecidas entre sí, con una porosidad total que oscila alrededor del 50% en los horizontes A y Bt

(Figura N° 36). Por el contrario los dos suelos con horizontes eluviales (Luján y Oliveros), revelan una disminución marcada de la porosidad en el techo del Bt, entre 60 y 70 cm de profundidad.

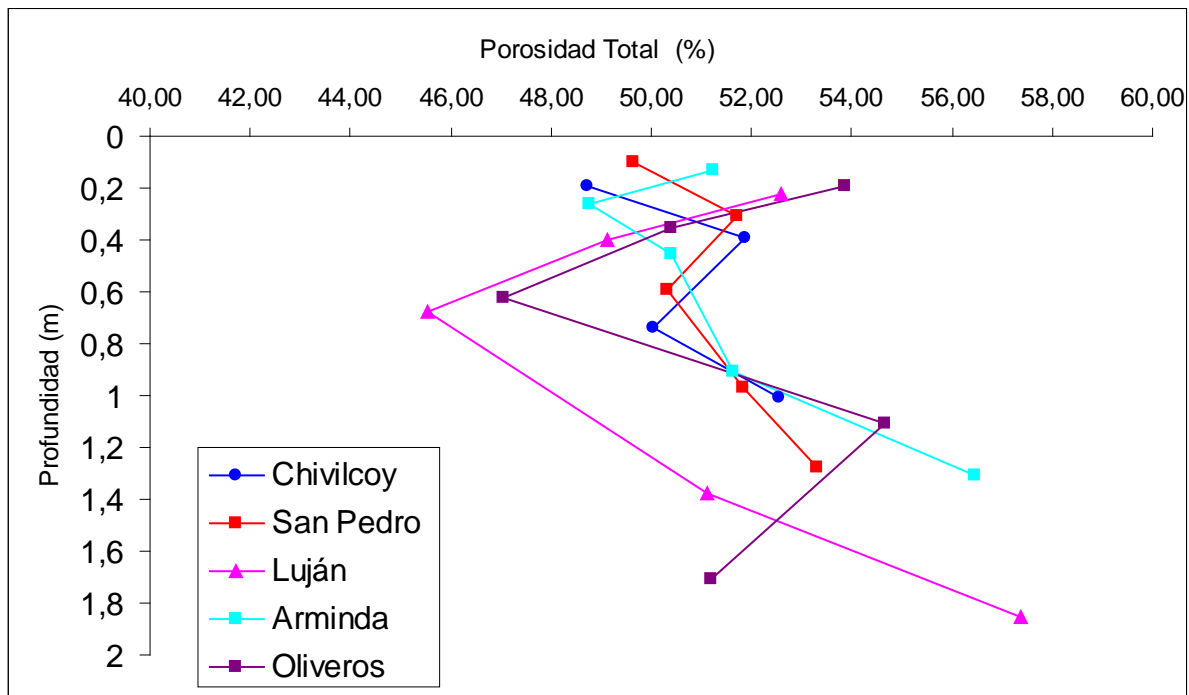


Figura N° 36 - Variación de la porosidad total con la profundidad en los suelos estudiados.

### Distribución del tamaño de poros

Respecto al porcentaje de macroporos (Figura N° 37 y Tabla N° 10), y con la salvedad del perfil de Chivilcoy, resulta notorio que los suelos presentan variaciones verticales similares. En este sentido los valores máximos corresponden a los horizontes A (alrededor del 20%), mínimos en los horizontes Bt (inferiores a 8%), e intermedios, salvo en el BC de Arminda, en los horizontes BC y C.

El suelo correspondiente a Chivilcoy presentó una variación vertical del porcentaje de macroporos inversa a la de los otros suelos, con valores máximos en los horizontes Bt y mínimos en los A y BC. Esto hace presuponer que en este suelo de textura gruesa, el incremento de arcilla en el Bt ha favorecido la estructuración y el incremento de poros de mayor tamaño, sin descartar el efecto de una intensa actividad biológica en ese nivel.

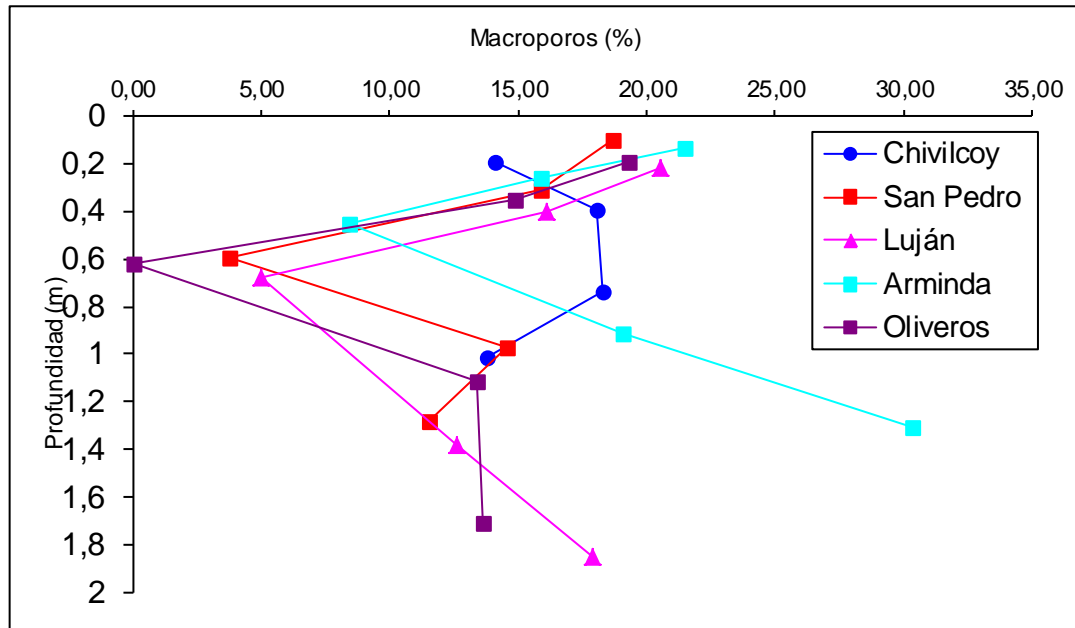


Figura N° 37- Variación del porcentaje de macroporos con la profundidad de los suelos estudiados.

Tabla N° 10 – Porcentaje de macroporos en los horizontes de los suelos estudiados.

<i>Chivilcoy</i>			
<i>Horizontes</i>	<i>Macroporos</i>		
A2 (9 a 30 cm)	14,1		
Bt1 (30 a 47 cm)	18,0		
BC1 (67 a 82 cm)	18,3		
2C (101 cm a +)	13,8		
<i>San Pedro</i>		<i>Luján</i>	
<i>Horizontes</i>	<i>Macroporos</i>	<i>Horizontes</i>	<i>Macroporos</i>
A2 (8-18 cm)	18,6	A2 (9 a 35 cm)	20,5
BA (25-37 cm)	15,9	E1 (35 a 45 cm)	16,1
Bt1 (37-61 cm)	3,7	Bt1 (55 a 82 cm)	5,0
BC1 (88-105 cm)	14,6	BC1 (125 a 157 cm)	12,6
C (128 cm a +)	11,5	2C (185 cm a +)	17,9
<i>Arminda</i>		<i>Oliveros</i>	
<i>Horizontes</i>	<i>Macroporos</i>	<i>Horizontes</i>	<i>Macroporos</i>
A2 (6 a 20 cm)	21,5	A2 (13 a 26 cm)	19,3
BA (20 a 33 cm)	15,9	AB (26 a 44 cm)	14,9
Bt1 (33 a 58 cm)	8,4	Bt1 (50 a 74 cm)	0,0
BC1 (80 a 102 cm)	19,1	Bt3 (94 a 129 cm)	13,4
C1 (121 a 142 cm)	30,3	BCKb (154 a 189 cm)	13,6

Respecto al porcentaje de mesoporos (Figura N° 38 y Tabla N° 11), y con la salvedad de los notorios incrementos en los horizontes BC de los suelos de Chivilcoy y San Pedro, es evidente su baja variación con la profundidad en cada uno de los suelos analizados. Por otra parte, se observa que estos se separan en dos grupos en función de

la proporción de mesoporos: Arminda y San Pedro presentan porcentajes que oscilan entre 12 y 15%, mientras que en los otros tres suelos dicho valor está alrededor del 20%.

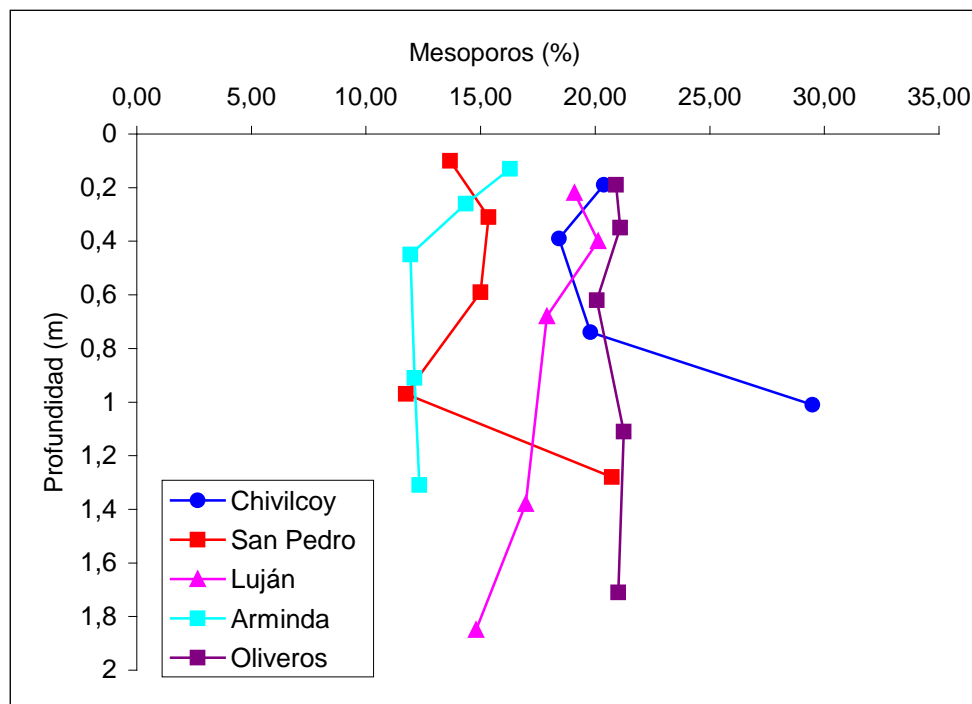


Figura N° 38 - Variación del porcentaje de mesoporos con la profundidad de los suelos estudiados.

Tabla N° 11 – Porcentaje de mesoporos en los horizontes de los suelos estudiados.

<i>Chivilcoy</i>			
<i>Horizontes</i>	<i>Mesoporos</i>		
A2 (9 a 30 cm)	20,4		
Bt1 (30 a 47 cm)	18,4		
BC1 (67 a 82 cm)	19,8		
2C (101 cm a +)	29,5		
<i>San Pedro</i>		<i>Luján</i>	
<i>Horizontes</i>	<i>Mesoporos</i>	<i>Horizontes</i>	<i>Mesoporos</i>
A2 (8-18 cm)	13,7	A2 (9 a 35 cm)	19,1
BA (25-37 cm)	15,4	E1 (35 a 45 cm)	20,1
Bt1 (37-61 cm)	15,0	Bt1 (55 a 82 cm)	17,9
BC1 (88-105 cm)	11,7	BC1 (125 a 157 cm)	17,0
C (128 cm a +)	20,7	2C (185 cm a +)	14,8
<i>Arminda</i>		<i>Oliveros</i>	
<i>Horizontes</i>	<i>Mesoporos</i>	<i>Horizontes</i>	<i>Mesoporos</i>
A2 (6 a 20 cm)	16,3	A2 (13 a 26 cm)	20,9
BA (20 a 33 cm)	14,4	AB (26 a 44 cm)	21,1
Bt1 (33 a 58 cm)	11,9	Bt1 (50 a 74 cm)	20,0
BC1 (80 a 102 cm)	12,1	Bt3 (94 a 129 cm)	21,2
C1 (121 a 142 cm)	12,3	BCKb (154 a 189 cm)	21,0

La distribución vertical de microporos (Figura N° 39 y Tabla N° 12), es similar en los distintos suelos, y en general de sentido inverso a la distribución vertical de los macroporos. Así, esta propiedad obtiene mayores valores en los horizontes Bt, siendo estos máximos en San Pedro, Arminda y Oliveros, intermedio en Luján y mínimo en Chivilcoy. En este último suelo debe notarse que su horizonte Bt ha presentado al mismo tiempo incrementos tanto en los macro como en los microporos. Finalmente, el incremento en la microporosidad del horizonte C de Luján es coincidente con el aumento de arcilla a esa profundidad.

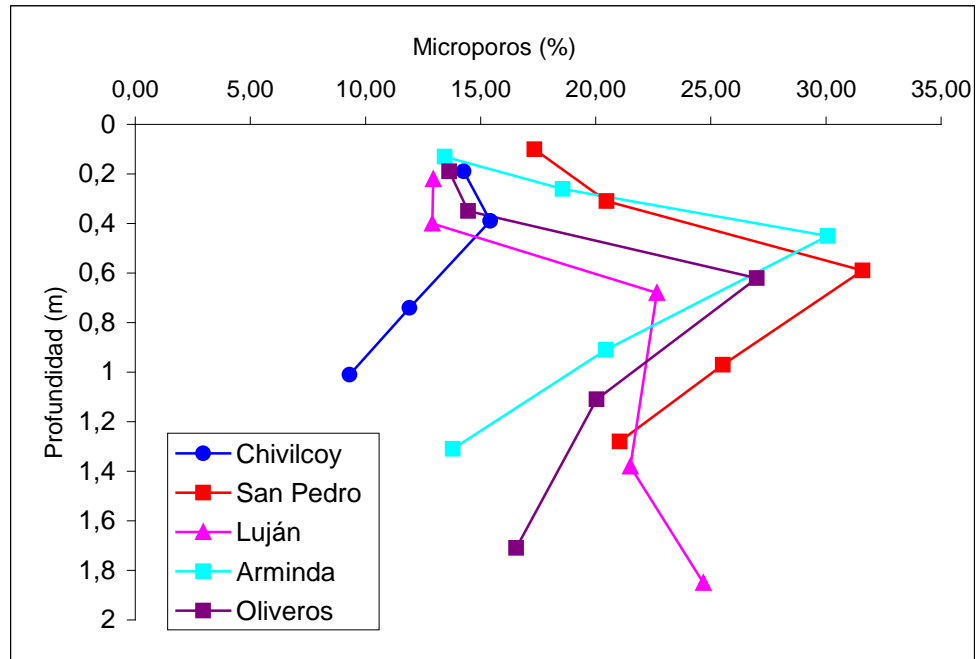


Figura N° 39 - Variación del porcentaje de microporos con la profundidad de los suelos estudiados.

Tabla N° 12 – Porcentaje de microporos en los horizontes de los suelos estudiados.

<b>Chivilcoy</b>			
<b>Horizontes</b>	<b>Microporos</b>		
A2 (9 a 30 cm)	14,3		
Bt1 (30 a 47 cm)	15,4		
BC1 (67 a 82 cm)	11,9		
2C (101 cm a +)	9,3		
<b>San Pedro</b>		<b>Luján</b>	
<b>Horizontes</b>	<b>Microporos</b>	<b>Horizontes</b>	<b>Microporos</b>
A2 (8-18 cm)	17,3	A1 (9 a 35 cm)	12,9
BA (25-37 cm)	20,5	E1 (35 a 45 cm)	12,9
Bt1 (37-61 cm)	31,6	Bt1 (55 a 82 cm)	22,7
BC1 (88-105 cm)	25,5	BC1 (125 a 157 cm)	21,5
C (128 cm a +)	21,0	2C (185 cm a +)	24,7
<b>Arminda</b>		<b>Oliveros</b>	
<b>Horizontes</b>	<b>Microporos</b>	<b>Horizontes</b>	<b>Microporos</b>
A2 (6 a 20 cm)	13,4	A2 (13 a 26 cm)	13,6
BA (20 a 33 cm)	18,6	AB (26 a 44 cm)	14,5
Bt1 (33 a 58 cm)	30,1	Bt1 (50 a 74 cm)	27,0
BC1 (80 a 102 cm)	20,4	Bt3 (94 a 129 cm)	20,0
C1(121 a 142 cm)	13,8	BCKb (154 a 189 cm)	16,55

El sistema de poros de los suelos se organiza jerárquicamente, con poros primarios que se forman entre los granos texturales y poros secundarios ubicados entre los distintos tamaños de agregados. Por otra parte están los macroporos desarrollados a partir de la fauna edáfica o de las raíces de las plantas, que pueden atravesar el interior de los agregados, como también aquellos conformados a partir de la desecación del suelo (Ehlers *et al.*, 1995, Kutilek 2004, Lipiec *et al.*, 2006b). En los horizontes superficiales, el grado de desarrollo de la porosidad y macroporosidad esta muy condicionado a la intensidad de la actividad biológica, lo mismo que al grado de densificación del suelo a partir del paso de rodados, animales, etc. En este sentido, es llamativa la menor proporción de macroporos del horizonte A del suelo de textura mas gruesa (Chivilcoy) respecto a lo sucedido en el Bt del mismo suelo, coincidiendo esto con la menor porosidad total del horizonte superficial. Podría especularse que este resultado es consecuencia de un efecto de pisoteo de bovinos presentes en el sitio de muestreo.

Por otro lado, si bien la distribución por tamaño de poros en función de la profundidad en los horizontes Bt, BC y C presenta tendencias similares en en los distintos perfiles, las diferencias en los valores absolutos entre suelos podría explicarse por las diferencias en la granulometría y mineralogía de arcillas que poseen los mismos.

En primer lugar, resulta claro que la menor proporción de microporos en el suelo de Chivilcoy, se relaciona con su textura más gruesa. En los otros suelos sin embargo, la mineralogía de la fracción arcilla pareciera incidir en el volumen de microporos formados. Así por ejemplo, la elevada microporosidad en el Bt del suelo de San Pedro se explicaría por una combinación de su mayor porcentaje de arcilla como por su mayor proporción de arcillas de tipo I/E. El rol del tipo de arcilla puede comprobarse en sus

horizontes inferiores, dado que a esa profundidad este suelo sigue teniendo la máxima microporosidad, pese a presentar menor porcentaje de arcilla que el suelo de Oliveros.

En el caso de los tres suelos de textura similar en el Bt (Arminda, Oliveros y Luján), el rol de la mineralogía de arcilla en la microporosidad parece ser también evidente. Así, si bien el horizonte argílico de Oliveros presenta un contenido mayor de arcilla que el Bt de Arminda, la microporosidad de este último es mayor que la del primero. Esto se explicaría por una proporción algo mayor de interestratificados I/E en el suelo de Arminda respecto al de Oliveros. A su vez, el horizonte argílico del suelo de Luján es el que presenta la menor microporsidad de estos tres suelos de textura fina, lo que se explica tanto por su menor contenido de arcilla como de interestratificados I/E.

Estudiando distintos Argiudoles de la Pampa Ondulada, Castiglioni (2005) encontró que la cantidad y el tipo de arcilla, eran los parámetros que más influían sobre la distribución de poros en los horizontes Bt, BC y C de esos suelos. A su vez, el mismo autor pudo determinar que el contenido de agua en marchitez permanente, era el punto de la curva de retención hídrica que más estaba afectado por el tipo de arcilla, mientras que la porosidad de los horizontes superficiales estaba más vinculada con la relación carbono/arcilla. Estas relaciones entre características físicas y composicionales se repiten también en los Argiudoles estudiados en el presente trabajo.

#### Conductividad Hidráulica Saturada (Ks)

En la figura N° 40 se grafican los resultados de conductividad hidráulica saturada (Ks) de los principales horizontes de los cinco perfiles estudiados.

Se pudo comprobar que en los horizontes superficiales, salvo el del suelo correspondiente a San Pedro, los valores oscilaron entre 2,5 y 6 cm h<sup>-1</sup>. De acuerdo a la clasificación del Soil Survey Division Staff (1993) los mismos corresponden a una permeabilidad moderada, mientras que el de San Pedro mostró una Ks lenta.

Respecto a como varía esta propiedad con la profundidad, en términos generales y salvo el suelo de Chivilcoy, se pudo constatar que esta disminuye en los horizontes transicionales superiores y en los horizontes Bt a niveles de permeabilidad lenta a muy lenta. Posteriormente la conductividad hidráulica saturada vuelve a aumentar en los horizontes BC y C a niveles de permeabilidad moderadamente elevada a elevada.

El suelo de Chivilcoy, en consonancia con su mayor proporción de arena y macroporos y de una menor variación en profundidad en el porcentaje de estos respecto a los otros suelos analizados, muestra un incremento progresivo de la conductividad hidráulica saturada con la profundidad, siendo los valores de Ks entre medios a moderadamente altos.

En el caso del suelo de Luján, se destaca la alta conductividad hidráulica del horizonte E, así como el incremento notorio en la base del perfil. El resultado correspondiente al horizonte E, si bien se corresponde con el incremento de la fracción arena, esto no se refleja en el porcentaje de macroporos. Por el contrario, la alta permeabilidad del horizonte C se vincula con la elevada porosidad total y proporción de macroporos hallados en este horizonte a pesar de su textura relativamente fina.

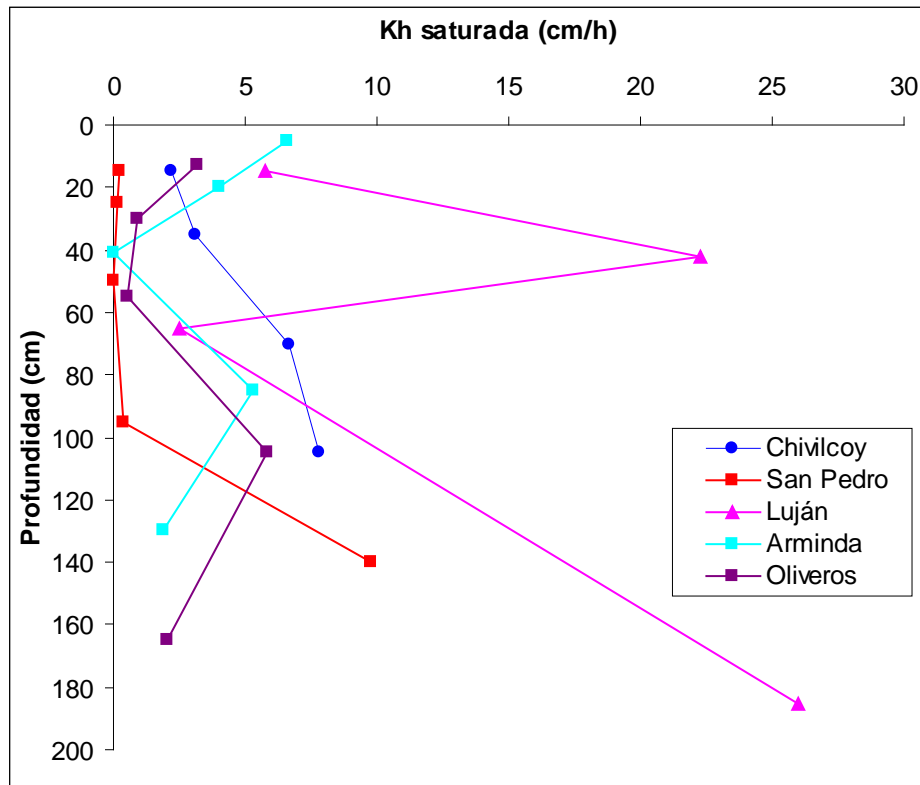


Figura N° 40 - Variación de la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) con la profundidad de los suelos estudiados.

De la misma manera que lo ocurrido en el presente trabajo con los suelos de San Pedro, Arminda y Oliveros, Castiglioni *et al.* (2007) también comprobaron en distintos Argiudoles, una menor diferenciación en los valores de conductividad hidráulica saturada en los horizontes argílicos, respecto a los horizontes más superficiales y más profundos. Dichos autores comentan la falta de grietas de desecación en los Bt por encima de un porcentaje de saturación del 50%. Es por ello que estos autores explican que al ser determinada la  $K_s$  sobre suelos totalmente expandidos y confinados, el movimiento de agua se da únicamente a través de la matriz edáfica, no habiendo diferencias en ese sentido entre los distintos suelos analizados. A su vez, Castiglioni *et al.* (2005) pudieron constatar que las diferencias en la capacidad de expansión/contracción edáfica, debidas al efecto de la distinta mineralogía de arcillas, se daba fundamentalmente en el proceso de contracción y a bajos contenidos hídricos. Por lo señalado, el movimiento de agua en estos horizontes tendría que ser diferente fundamentalmente a valores bajos de humedad edáfica. Asimismo, Castiglioni *et al.* (2007) vincularon la mayor variabilidad en el movimiento de agua de los horizontes superficiales de distintos Argiudoles a las diferencias en la actividad biológica de los mismos, mientras que la variación ocurrida en los horizontes más profundos la asignaron a las diferencias debidas al distinto tipo y contenido de arcillas presentes en los suelos analizados.



### II.5.3. Índices de Atterberg

#### Límite líquido

En la Figura N° 41 y en la Tabla N° 13 se observa como varía el límite líquido en los distintos horizontes de los cinco perfiles estudiados. En términos generales, y con la excepción del horizonte C del suelo de Luján, los restantes suelos muestran una distribución vertical de esta propiedad caracterizada por valores menores en los horizontes A y E, máximos en los Bt e intermedios en los BC y C.

De manera equivalente a las diferencias constatadas en los parámetros de retención de agua, el suelo de San Pedro es el que presenta los mayores valores de límite líquido, en tanto que el suelo de Chivilcoy presenta los valores más bajos. Debe notarse que en el horizonte C de este perfil no pudo realizarse esta determinación dado su textura arenosa. Los suelos de Luján, Oliveros y Arminda integran un grupo con características intermedias respecto a los anteriores.

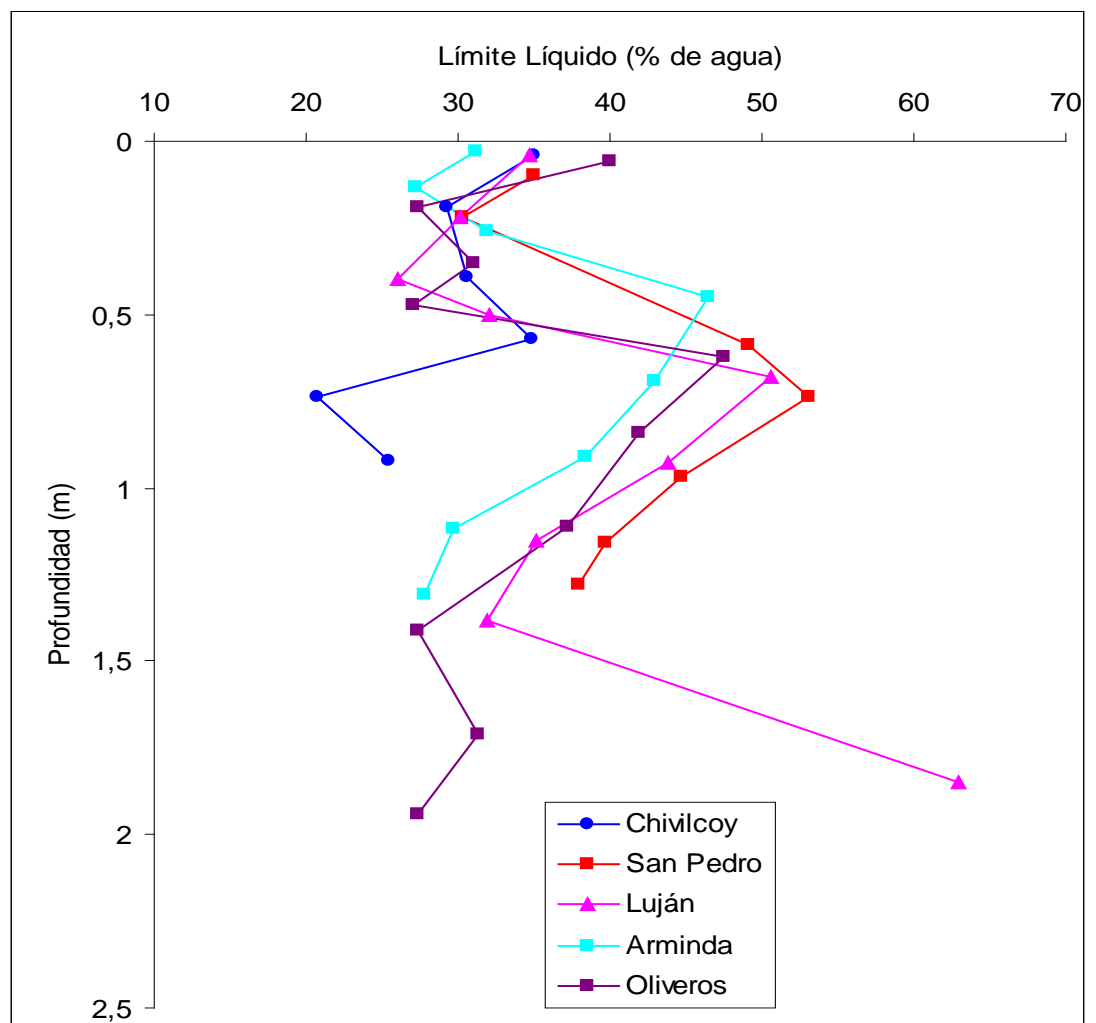


Figura N° 41 - Variación del límite líquido con la profundidad de los suelos estudiados.

Tabla N° 13 - Variación de los Índices de Atterberg con la profundidad de los suelos estudiados.

<i>Perfil Chivilcoy</i>	<i>Límite Líquido (% de agua)</i>	<i>Límite Plástico (% de agua)</i>	<i>Índice Plástico (% de agua)</i>
A1	35	27,6	7,4
A2	29,2	22	7,2
Bt1	30,6	19,0	11,5
Bt2	34,8	23,3	11,5
BC1	20,7	17,4	3,3
BC2	25,4	19,7	5,7
<i>Perfil Luján</i>			
A1	34,7	27,2	7,5
A2	30,0	22,7	7,3
E1	26,0	18,3	7,7
E2	32,0	14,5	17,5
Bt1	50,6	22,7	27,9
Bt2	43,9	23,5	20,3
Bt3	35,2	22,9	12,3
BC1	31,9	26,0	5,9
BC2	34,0	25,2	8,8
2C	63,0	33,5	29,4
<i>Perfil San Pedro</i>			
A1	35,0	26	9
A2	30,3	20,3	10,0
Bt1	49,1	26,6	22,6
Bt2	53,0	27,3	25,7
BC1	44,8	23,4	21,4
BC2	39,7	21,9	17,8
C	38,0	23,0	15,0
<i>Perfil Arminda</i>			
A1	31,2	26,8	4,4
A2	27,2	23,5	3,7
BA	31,8	20,0	11,8
Bt1	46,5	27,0	19,6
Bt2	42,9	25,7	17,3
BC1	38,3	24,4	13,9
BC2	29,7	22,1	7,6
C	27,8	21,7	6,1
<i>Perfil Oliveros</i>			
A1	40,0	29,2	10,8
AB	31,0	24,2	6,8
E/B	27,0	23,5	3,5
Bt1	47,6	28,4	19,1
Bt2	41,9	25,6	16,3
Bt3	37,2	24,1	13,1
BC1	27,4	22,8	4,6
BCkb	31,3	23,2	8,1
Ckb	27,4	24,0	3,4

### Límite plástico

Los valores de este parámetro (Figura N° 42 y Tabla N° 13) en los horizontes superficiales, y haciendo abstracción del suelo de San Pedro, se presentan agrupados entre los valores de 27 y 29 %. En los primeros horizontes subsuperficiales, los suelos de Chivilcoy y Luján presentan los valores menores lo cual se condice con sus características texturales. Por su parte los tres suelos de textura más fina (San Pedro, Arminda y Oliveros) presentan un incremento del límite plástico en los horizontes Bt y finalmente una disminución en profundidad. El suelo de Luján presenta en el horizonte en discontinuidad 2C incrementos del límite plástico que se correlacionan con los datos de granulometría, retención de agua y microporosidad.

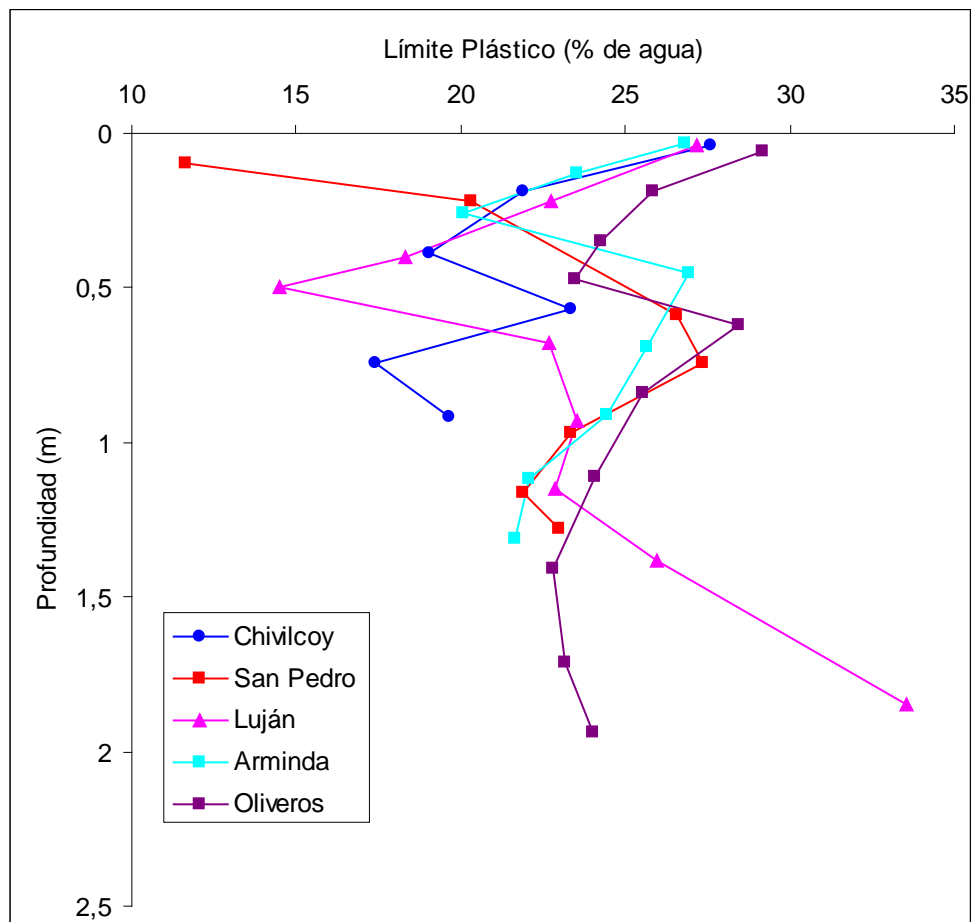


Figura N° 42 - Variación del límite plástico con la profundidad de los suelos estudiados.

### Índice plástico

En cuanto al índice plástico, y tal como puede constatarse en la Figura N° 43 y en la Tabla N° 13, todos los suelos presentan un incremento de esta propiedad en los horizontes BA y Bt. Específicamente el perfil de San Pedro es el que presenta los valores más elevados de todos los perfiles de suelo estudiados. De esta manera y con la excepción del horizonte C (con un índice de plasticidad media), los otros horizontes de este suelo se encuentran en la categoría alta de plasticidad (IP 20-40).

Contrariamente, el suelo de Chivilcoy es el que presenta el menor índice plástico, con el horizonte BC<sub>1</sub> en la categoría de poco plástico, el horizonte A con baja plasticidad y el Bt con plasticidad media. Dado el alto porcentaje de arena del horizonte C de este suelo, esta propiedad no pudo determinarse en el mismo.

Por su parte los suelos de Luján, Oliveros y Arminda presentan valores intermedios entre Chivilcoy y San Pedro. En los horizontes A y E estos tres suelos son poco plásticos (IP 1-5), los horizontes BA y Bt de Arminda y Oliveros tienen plasticidad media (IP 10-20) y el Bt de Luján alta plasticidad (IP 20-40), en tanto en los horizontes BC los valores disminuyen y se corresponden con una baja plasticidad. En el caso del perfil de Luján debe resaltarse la diferencia entre sus horizontes, y en particular el incremento que se observa en el horizonte profundo en discontinuidad.

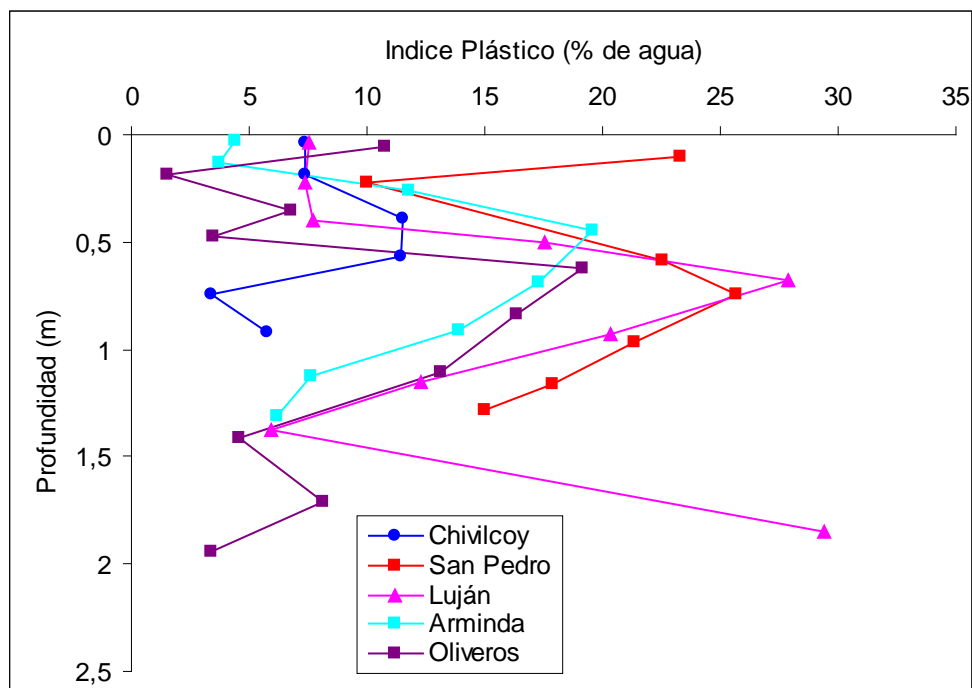


Figura N° 43 - Variación del índice plástico con la profundidad de los suelos estudiados.

De acuerdo a lo observado, los índices de Atterberg nos estarían indicando que los suelos de granulometría más fina, con mayor retención de agua y con mayor microporosidad, serían los suelos con mayor plasticidad. En este sentido queda claramente diferenciado el perfil de Chivilcoy del resto de los otros perfiles, dado que a mayor presencia de arena se reducen los límites de Atterberg porque dichas partículas no interactúan electroquímicamente con el agua.

Por otro lado, en los perfiles de textura más fina se observan diferencias en los horizontes más arcillosos, que indican que otros factores además del contenido de arcilla expresan la plasticidad en los suelos. Así por ejemplo, si se comparan tres horizontes Bt (Bt2 de San Pedro, Bt1 de Oliveros y Bt2 de Arminda) situados a la misma profundidad (muestras tomadas entre 60 y 70 cm de profundidad) y con similar proporción de arcilla (entre 32 y 34%; ver Figura N°12) puede constatarse que los valores del Índice Plástico son respectivamente de 25,7, 19,1 y 17,3. Estas diferencias pueden atribuirse a la mayor proporción de minerales interstratificados expansibles de arcilla en el suelo de San Pedro respecto a los otros dos suelos estudiados.

Esta diferenciación en el comportamiento mecánico de los diferentes minerales de arcilla es explicado por la mayor incorporación de agua en el espacio interfoliar y por la doble capa eléctrica difusa que presentan las arcillas esmectíticas (Wersin *et al.*, 2004; Schmitz, 2006), que es mas gruesa que en la illita y en la caolinita, explicando así el incremento en los límites de Atterberg (Abdullah *et al.*, 1999; Bultel, 2001; Grabowska-Olzewska, 2003).

En cambio, si comparamos el horizonte Bt de San Pedro con el mismo horizonte de Luján, observamos que éste tiene un índice plástico de 28 % con sólo 25 % de arcilla, y una menor presencia de minerales interestratificados I/E respecto a San Pedro. Estos resultados son difíciles de explicar sólo en base a estos datos. En este sentido parecería importante considerar tal como lo han propuesto Beroya *et al.* (2009) no solamente los contenidos de arcilla sino también el tipo de unión con las partículas de limo. Según estos autores los índices de Atterberg y otras propiedades físicas de los suelos están condicionados por el tipo mineralógico de las arcillas y la forma en que las mismas revisten y se adhieren a las partículas de limo. Sin embargo el análisis de esta interrelación y tipo de unión requieren otras metodologías y exceden este trabajo.

En los horizontes A, BC y C se observaron altos coeficientes de correlación entre la CIC y el índice plástico (coeficiente de correlación para el horizonte A 0,86; coeficiente de correlación para los horizontes BC y C 0,94) y entre el contenido de arcilla y el índice plástico (coeficiente de correlación 0,82 para los horizontes BC y C) Estos datos explican así como afecta la plasticidad el contenido de arcilla y su composición mineralógica, expresada a partir de la CIC, en los horizontes mas profundos. En los horizontes superficiales el alto coeficiente de correlación obtenido entre el índice plástico y la CIC da una idea de que el contenido de materia orgánica influye en los valores de esta propiedad.

En el mismo sentido podría quizás interpretarse la falta de correlación entre el índice plástico y el contenido de arcilla en los horizontes Bt1, en particular afectada por el resultado correspondiente a Luján. (Figura N° 44). En estos horizontes la composición es más compleja que en los horizontes superficiales y que en los profundos, dado que además de granulometrías más diferenciadas entre los horizontes (por ejemplo en las relaciones arcilla/limo y los posibles efectos de adhesión citados más arriba), en esta primera parte de los horizontes Bt los contenidos de materia orgánica son relativamente elevados, todo lo cual afectaría la plasticidad de manera no lineal.

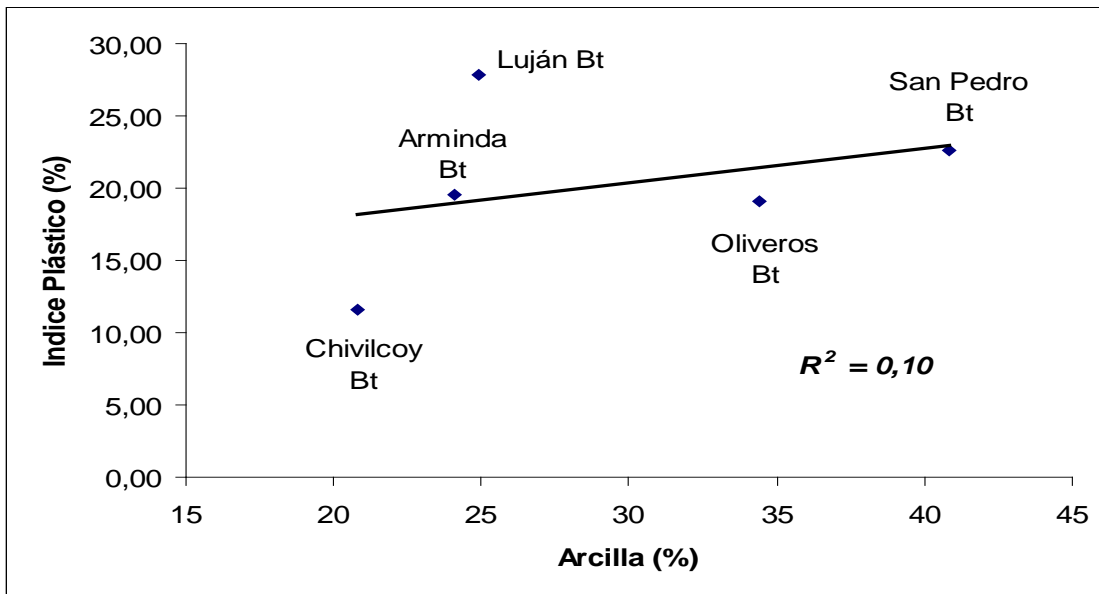


Figura N° 44 - Correlación entre el Índice Plástico y el contenido de arcilla en los horizontes Bt de los suelos estudiados.

#### II.5.4. Coeficiente de Extensibilidad Lineal (COLE)

El coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), es un parámetro que permite caracterizar la magnitud del proceso de expansión-contracción del suelo y expresa su capacidad de cambiar de volumen.

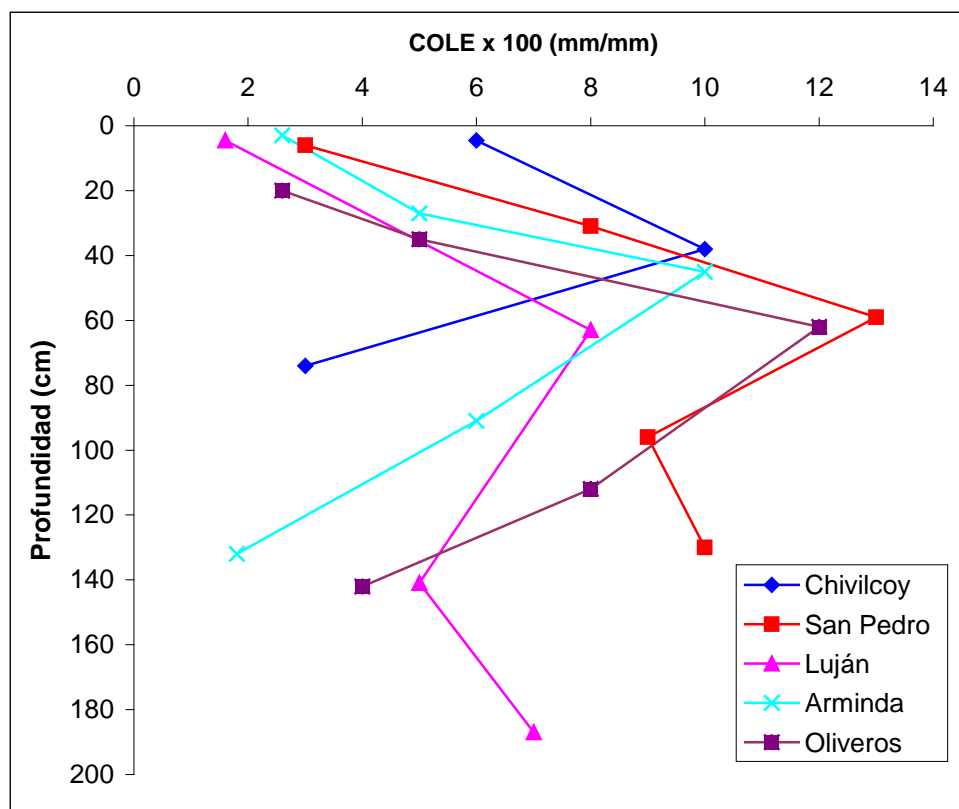


Figura N° 45 - Variación del COLE con la profundidad de los suelos estudiados.

De acuerdo a lo observado en la Figura N°45 y la Tabla N° 14, el horizonte A del perfil de Chivilcoy presentó un valor de COLE mayor a 3, expresando una capacidad de expansión-contracción media, mientras que los restantes horizontes A tuvieron valores menores a 3, y por lo tanto una capacidad de cambio de volumen baja.

Tabla N° 14 - Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes de los suelos estudiados y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas *et al.* 2000).

Perfil	Horizonte	Cole*100 (cm/cm)	Clase de expansión-contracción
<i>Chivilcoy</i>	A1	6	MEDIA
<i>San Pedro</i>	A1	3	BAJA
<i>Luján</i>	A1	1,6	BAJA
<i>Armindá</i>	A1	2,6	BAJA
<i>Oliveros</i>	A2	2,6	BAJA
<i>San Pedro</i>	BA	8	ALTA
<i>Armindá</i>	BA	5	MEDIA
<i>Oliveros</i>	AB	5	MEDIA
<i>Chivilcoy</i>	Bt1	10	MUY ALTA
<i>San Pedro</i>	Bt1	13	MUY ALTA
<i>Luján</i>	Bt1	8	ALTA
<i>Armindá</i>	Bt1	10	MUY ALTA
<i>Oliveros</i>	Bt1	12	MUY ALTA
<i>Chivilcoy</i>	BC1	3	BAJA
<i>San Pedro</i>	BC1	9	ALTA
<i>Luján</i>	BC1	5	MEDIA
<i>Armindá</i>	BC1	6	MEDIA
<i>Oliveros</i>	BC1	4	MEDIA
<i>San Pedro</i>	C	10	MUY ALTA
<i>Luján</i>	2C	7	ALTA
<i>Armindá</i>	C	1,8	BAJA

Esta propiedad claramente presentó los valores más altos en los horizontes Bt de todos los perfiles. En el Bt de Luján el COLE fue 8, expresando así una extensibilidad alta, mientras que en los restantes Bt, con valores superiores a 9, la categoría obtenida fue muy alta. En esta categoría podrían además diferenciarse dos grupos, uno conformado por los suelos de San Pedro y Oliveros, con valores más elevados en esta propiedad, y otro que agruparía a Armindá y Chivilcoy con valores algo menores.

En los horizontes BC se observó un descenso en los valores de COLE en todos los perfiles, presentando el de San Pedro una capacidad de expansión-contracción alta, los de Luján, Armindá y Oliveros se situaron en una categoría media, en tanto el BC de Chivilcoy se ubicó en la clase de baja expansión. Finalmente debe notarse el incremento en el valor de COLE en el horizonte 2C de Luján, que se correlaciona con otros parámetros evaluados, y corrobora su carácter de horizonte en discontinuidad.

La correlación entre el contenido de arcilla y el COLE (Figura N° 46) en los horizontes Bt sigue un patrón lineal colocándose en los valores más altos los perfiles

con mayor contenido de arcilla y presencia de arcillas interestratificadas de illita-esmectita.

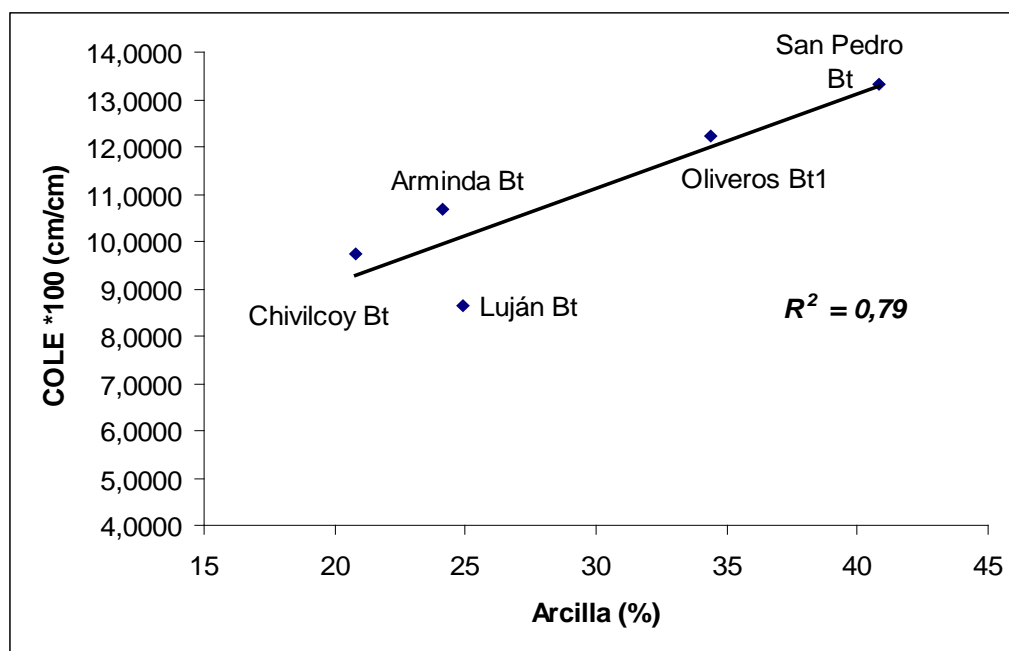


Figura N° 46 - Correlación entre el COLE y el contenido de arcilla en los horizontes Bt de los suelos estudiados.

En los horizontes BC y C se observaron altos coeficientes de correlación entre la CIC y el COLE (coeficiente de correlación 0,93) y entre el contenido de arcilla y el COLE (coeficiente de correlación 0,75). Este mayor grado de vinculación mostrado por la CIC, que expresa en forma conjunta el efecto del contenido y las características de la arcilla, respecto a tomar únicamente en consideración el porcentaje de esta fracción, corrobora la importancia de la mineralogía de arcillas en los procesos de expansión y contracción de los suelos.

Estos resultados coinciden con lo descrito por Williams *et al.* (1996), quienes demostraron que la combinación de la mineralogía de las esmectitas y un alto contenido de arcilla son lo que generan valores elevados de COLE. También Yerima *et al.* (1989) y Coulombe *et al.* (1996) indican que el COLE está más fuertemente correlacionado con arcillas finas como las esmectitas, que tienen mayor área de superficie específica y mayor porosidad interparticular, que con arcillas más gruesas como las illitas. En este sentido, Castiglioni (2005) determinó para horizontes Bt de diferentes Argiudoles de la Pampa Ondulada, que el efecto de la mineralogía de arcillas sobre el proceso de contracción del suelo se daba fundamentalmente a contenidos bajos de agua, mientras que la cantidad de arcilla tendría mayor relevancia a contenidos hídricos cercanos a saturación. El COLE se determina a partir del cambio de volumen del suelo entre los contenidos de humedad edáfica de capacidad de campo y suelo seco. Es por ello que en esta determinación cobra mucha importancia el tipo de arcilla presente.

Por otro lado teniendo en cuenta algunas diferencias puntuales particularmente en los horizontes superficiales, pudo constatare una buena correlación general entre los valores de COLE y el Índice de Plasticidad de los suelos analizados. Así tomando por ejemplo los horizontes subsuperficiales BC<sub>1</sub>, los suelos de San Pedro y Arminda presentan índices plásticos y valores de COLE más elevados, en tanto para ambos parámetros en Luján, Oliveros Chivilcoy los valores son más bajos.



Extensibilidad Lineal del suelo

La extensibilidad lineal es una variable utilizada para la caracterización de las propiedades de expansión-contracción de los suelos (Holmgreen, 1968). El COLE no indica orientación por lo que puede ser usado para estimar al espacio de grietas verticales (Grossman *et al.*, 1968). En cambio el cálculo de la extensibilidad lineal asume la misma extensibilidad a lo largo de los ejes horizontal y vertical (Grossman *et al.*, 1968)

Esta propiedad se utiliza como criterio de clasificación de suelos. Así, según lo que establece la Taxonomía de Suelos (Keys to Soil Taxonomy, 2010) existen dos criterios para definir los subgrupos vérticos: 1- el desarrollo de grietas y caras de fricción, con ciertas características que en la Taxonomía se detallan, o 2-una extensibilidad lineal de 6 cm o más entre la superficie del suelo y una profundidad de 100 cm.

Resulta interesante constatar que el suelo de San Pedro clasificado como Argiudol vértico, además de diversas características de campo y analíticas aquí consideradas, presenta el máximo valor de extensibilidad lineal de los suelos estudiados (Tabla N° 15). En cuanto al suelo de Arminda correspondiente a la Serie Peyrano, que en las cartas de suelos se ha clasificado alternativamente como Argiudol vértico o Argiudol típico, cumple también el requisito de extensibilidad lineal para integrar un subgrupo vértico, aunque en el perfil estudiado no se han observado rasgos morfológicos de campo propios de este subgrupo.

Sin embargo, y como puede constatar en la Tabla N° 15 resulta también interesante notar que este criterio para integrar un subgrupo vértico, también lo cumplen los perfiles de Oliveros y Chivilcoy que no fueron clasificados como tales.

Tabla N° 15 - Valores de Extensibilidad Lineal de los suelos estudiados.

Perfil	Horizonte	Cole	Espesor del Horizonte	Extensibilidad Lineal	Hasta el metro
<i>Chivilcoy</i>	A1	0,065	30	1,942	6,04
	Bt1	0,097	17	1,657	
	Bt2	0,056	20	1,125	
	BC1	0,030	15	0,450	
	BC2	0,046	19	0,867	
<i>San Pedro</i>	A	0,036	25	0,895	9,56
	BA	0,078	12	0,935	
	Bt1	0,133	24	3,200	
	Bt2	0,110	27	2,973	
	BC1	0,092	17	1,557	
<i>Luján</i>	A	0,016	35	0,572	5,39
	E1	0,057	20	1,133	
	Bt1	0,086	23	1,988	
	Bt2	0,074	23	1,701	
<i>Arminda</i>	A1	0,026	20	0,518	8,30
	BA	0,041	13	0,528	
	Bt1	0,107	25	2,671	
	Bt2	0,142	22	3,121	
	BC1	0,066	22	1,462	

<b>Oliveros</b>	<b>A1</b>	<b>0,026</b>	<b>26</b>	<b>0,678</b>	<b>6,94</b>
	<b>BA</b>	<b>0,049</b>	<b>18</b>	<b>0,886</b>	
	<b>E/B</b>	<b>0,056</b>	<b>6</b>	<b>0,338</b>	
	<b>Bt1</b>	<b>0,122</b>	<b>24</b>	<b>2,931</b>	
	<b>Bt2</b>	<b>0,105</b>	<b>20</b>	<b>2,108</b>	

### II.5.5. Análisis Estadístico

Para poder realizar un mejor análisis de componentes principales de las variables estudiadas se las agrupó por horizontes: en el primer grupo se incluyeron los horizontes A, A2, AB y BA; en el segundo los horizontes Bt1 y en el tercero los horizontes BC y C.

#### Horizontes A, A2, AB y BA

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes A, A2, AB y BA, se observó que el eje 1 explica el 44 % de la variabilidad y el eje 2 el 22 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 66 % de la variabilidad total.

En la Tabla N° 16 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad esta principalmente representada por: el contenido de agua en el punto de marchitez permanente y el porcentaje de microporos; el COLE y el índice plástico, como también por la humedad equivalente y el porcentaje de macroporos.

En el eje 2 la variabilidad esta principalmente representada por: el contenido de agua a capacidad de campo y el porcentaje de mesoporos, como también por el porcentaje de macroporos.

Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la retención hídrica, la distribución de poros, el COLE y la plasticidad.

Tabla N° 16- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Variabes	e1	e2	CP 1	CP 2
PMP (%)	0,41***	-0,16	0,00052	0,54
CC (%)	0,17	0,47**	0,33	0,03
H E (%)	0,28*	-0,18	0,08	0,47
H2O <sub>sat</sub>	-0,16	-0,37	0,39	0,12
Kh	0,12	-0,23	0,51	0,35
Índice Plástico (%)	0,35**	-0,12	0,02	0,65
COLE (cm/cm)	0,36**	0,32	0,01	0,18
Dap	0,24	0,02	0,15	0,95
Porosidad Total (%)	-0,24	-0,02	0,16	0,95
Macroporos (%)	-0,3*	-0,39*	0,06	0,09
Mesoporos (%)	-0,25	0,49**	0,14	0,02
Microporos (%)	0,41***	-0,17	0,00061	0,52

En la Figura N° 47 de componentes principales se observa como quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes A, A2, AB y BA y las variables estudiadas.

En el eje 1 las propiedades contenido de agua en el punto de marchitez permanente (PMP), porcentaje de microporos, COLE, índice plástico y humedad equivalente agrupan en sus mayores valores a los horizontes BA del perfil de Arminda y A1 y BA del perfil de San Pedro. En cambio, en los menores valores de dichas variables, se agrupan los horizontes A2 de Oliveros, A2 de Luján y A de Arminda.

La ubicación en el gráfico del horizonte BA de San Pedro está relacionada con sus mayores valores de índice plástico y COLE respecto a los restantes horizontes. Por su parte, la disposición en el eje 2 del horizonte A2 del perfil de Chivilcoy y AB correspondiente a Oliveros, están mas condicionados por sus mayores valores de contenido de agua a capacidad de campo y porcentaje de mesoporos, respecto al horizonte A1 de San Pedro, con mayor cantidad de macroporos, contenido de agua bajo suelo saturado y conductividad hidráulica saturada.

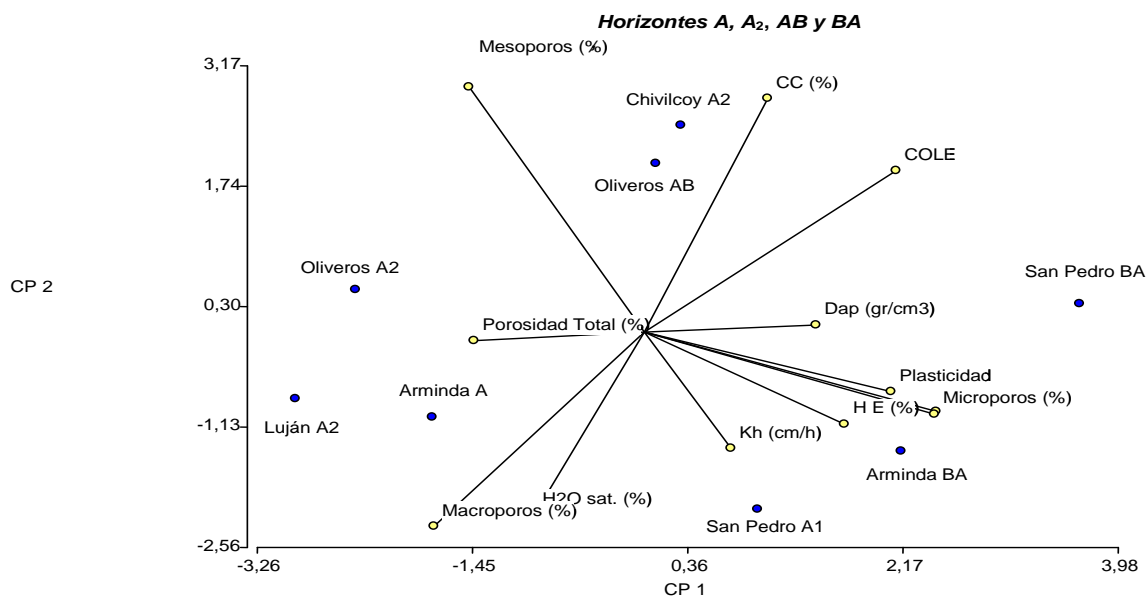


Figura N° 47- Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados.

Por lo tanto se pueden distinguir cuatro grupos de horizontes, de acuerdo a su relación con las variables estudiadas: Uno compuesto por los horizontes A1 y BA de San Pedro y por el BA de Arminda, otro por el horizonte A2 de Oliveros, A2 de Luján y A de Arminda, el conformado por el A2 de Chivilcoy y AB de Oliveros y por último el correspondiente al A1 de San Pedro.

En la Tabla N° 17 se presentan los coeficientes de correlación Pearson para las variables estudiadas en los horizontes A, A2, AB y BA. De acuerdo a su análisis, surge que las propiedades más vinculadas entre sí son: índice plástico con contenido de agua en el punto de marchitez permanente y con porcentaje de microporos y porcentaje de macroporos con COLE. Con menor significancia estadística se ubican: índice plástico con humedad equivalente y COLE con capacidad de campo. Por último un tercer grupo de variables que se encuentran más débilmente correlacionadas entre si sons: el COLE con agua de saturación, con el índice plástico, con el punto de marchitez permanente y con el porcentaje de microporos.

Tabla N° 17- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*).

Debe tenerse en cuenta que los valores de Microporosidad se derivan de los valores de PMP, lo que explica  $r=1$  entre ambos parámetros; idem respecto a Porosidad Total y Dap.

Correlacion de Pearson:  
coeficientes/probabilidades

	PMP (%)	CC (%)	HEq (%)	H2Osat (%)	Kh (cm/h)	Plast.	COLE	Dap	PT (%)	Macro	Meso	Micro
PMP (%)	1	0,5	0,03	0,74	0,42	0,01	0,09	0,4	0,41	0,27	0,05	1,5E-12
CC (%)	0,28	1	0,64	0,33	0,74	0,53	0,06	0,88	0,86	0,03	0,23	0,52
H E (%)	0,76**	0,2	1	0,71	0,9	0,05	0,4	0,85	0,9	0,77	0,16	0,03
H2O sat. (%)	-0,14	-0,4	-0,15	1	0,75	0,79	0,08	0,67	0,65	0,27	0,69	0,76
Kh (cm/h)	0,34	-0,14	0,05	0,13	1	0,78	0,78	0,28	0,31	0,71	0,32	0,42
Indice Plástico (%)	0,87***	0,26	0,7**	-0,11	-0,12	1	0,08	0,79	0,8	0,51	0,11	0,01
COLE (cm/cm)	0,63*	0,69**	0,34	-0,65*	-0,12	0,65*	1	0,32	0,32	0,01	0,86	0,1
Dap (gr/cm3)	0,35	-0,07	-0,08	-0,18	0,44	0,11	0,41	1	1,8E-08	0,11	0,38	0,41
PT	-0,34	0,07	0,05	0,19	-0,41	-0,11	-0,4	-1***	1	0,12	0,38	0,41
Macro (%)	-0,45	-	0,75**	-0,12	0,44	-0,16	-0,28	0,81***	-0,6	0,6	1	0,72
Mesos (%)	-0,71	0,48	-0,55	-0,17	-0,41	-0,6	-0,08	-0,36	0,36	-0,15	1	0,05
Micros (%)	1***	0,27	0,76**	-0,13	0,33	0,87***	0,63*	0,34	-0,34	-0,43	-	0,72**

Como vemos, y pese a que en estos horizontes el contenido de arcilla no es tan elevado, el COLE y el índice plástico se vincularon significativamente con gran cantidad de las propiedades físicas edáficas analizadas en el presente estudio. A su vez, y como ya se analizara previamente, estos dos atributos del suelo (COLE e índice plástico) están influenciados por la acción del contenido de arcilla, la mineralogía de las mismas y por el contenido de materia orgánica.

De esta manera, los cuatro grupos de horizontes se dispusieron sobre el eje 1, dependiendo de la magnitud en importancia del índice plástico y el COLE, los que favorecerían a su vez la formación de estructuras mas densificadas y con mayor porcentaje de microporos.

### Horizontes Bt1

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondientes a las variables estudiadas de los horizontes Bt1, se observó que el eje 1 explica el 61 % de la variabilidad y el eje 2 el 19 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 80 % de la variabilidad.

En la Tabla N° 18 se representan los autovectores del análisis de componentes principales de los horizontes Bt1 de acuerdo a las variables estudiadas.

En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad esta principalmente representada por: porcentaje de microporos; contenido de agua en el punto de marchitez permanente, conductividad hidráulica saturada, porcentaje de macroporos y humedad equivalente, como también por el contenido de agua a capacidad de campo, COLE y el índice plástico. En el eje 2 la variabilidad esta principalmente representada por: densidad aparente y porosidad total.

Tabla N° 18 - Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

VARIABLES	e1	e2	CP <sub>1</sub>	CP <sub>2</sub>
PMP (%)	0,35**	0,16	0,01	0,64
CC (%)	0,29*	0,1	0,06	0,78
H E (%)	0,3**	0,31	0,04	0,35
H <sub>2</sub> O sat. (%)	0,26	0,2	0,12	0,56
Kh (cm/h)	-0,33**	0,01	0,02	0,98
Índice Plástico (%)	0,28*	-0,36	0,08	0,27
COLE (cm/cm)	0,29*	0,23	0,06	0,5
Dap (gr/cm <sup>3</sup> )	0,22	-0,52*	0,2	0,06
Porosidad Total (%)	-0,22	0,53*	0,22	0,05
Macroporos (%)	-0,32**	0,18	0,02	0,61
Mesoporos (%)	-0,2	-0,16	0,25	0,64
Microporos (%)	0,34***	0,18	0,01	0,6

En la figura N° 48 se observa como quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes Bt y las variables estudiadas.

En el mismo podemos observar que los horizontes Bt1 del perfil de San Pedro, Arminda y Oliveros se encuentran agrupados sobre el eje 1 a mayores valores de las variables microporos, contenido de agua en el punto de marchitez permanente (PMP), humedad equivalente, contenido de agua en capacidad de campo y en saturación, COLE y el índice de plasticidad. En cambio, el Bt1 Chivilcoy se dispone también sobre este eje 1, pero en los menores valores de estas mismas propiedades, al mismo tiempo que en los mayores de: porcentaje de macroporos y mesoporos y conductividad hidráulica saturada.

Por su parte, en el eje 2 el horizonte Bt1 de Luján se ubica junto a los mayores valores de densidad aparente y también del índice de plasticidad.

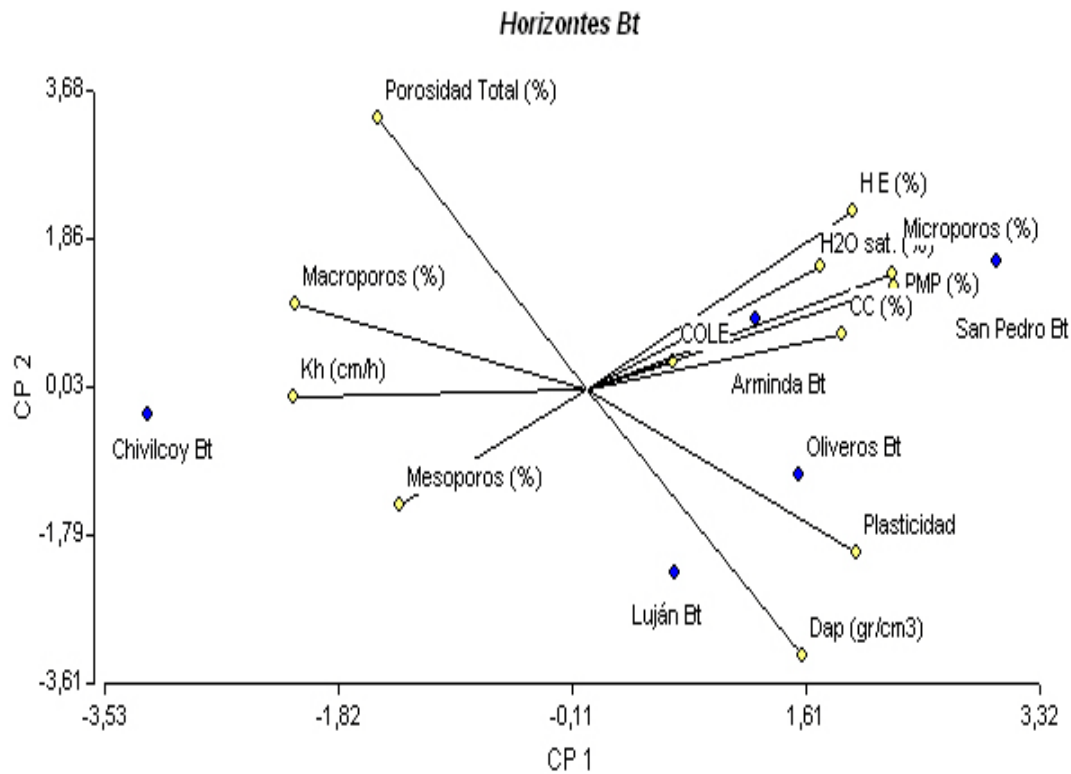


Figura N° 48- Componentes Principales de los horizontes Bt de los suelos estudiados.

De la misma manera que lo observado en los horizontes superficiales se puede comprobar como el COLE y el índice de plasticidad son las propiedades que ordenan la ubicación de los restantes atributos edáficos. En este caso dicho comportamiento se da con mayor intensidad dado que la variabilidad aportada por el CP<sub>2</sub> respecto al CP<sub>1</sub> es mucho menor que en los horizontes superficiales. Como mayor expresión de esta tensión se encuentra el horizonte Bt de San Pedro, con mayor porcentaje de microporos, mayor contenido de humedad a capacidad de campo, saturación, punto de marchitez permanente y humedad equivalente, como también mayor plasticidad y COLE. En el otro extremo se encuentra el Bt de Chivilcoy con mayor porosidad total, porcentaje de macro y mesoporos y mayor conductividad hidráulica saturada.

En la tabla N° 19 se presentan los coeficientes de correlación Pearson para las variables estudiadas en los horizontes Bt1.

Tabla N° 19- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt1 de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Correlacion de Pearson:  
coeficientes/probabilidades

	PMP (%)	CC (%)	HEq (%)	H2O <sub>sat</sub> (%)	Kh (cm/h)	Plast.	COLE	Dap	PT (%)	Macro	Meso	Micro
PMP (%)	1	0,04	0,01	0,21	0,05	0,25	0,09	0,48	0,5	0,06	0,21	8,5E-06
CC (%)	0,84**	1	0,03	0,47	0,27	0,48	0,13	0,48	0,5	0,02	0,89	0,05
HE (%)	0,91***	0,86**	1	0,13	0,22	0,49	0,09	0,81	0,85	0,13	0,43	0,01
H2O <sub>sat</sub> (%)	0,6	0,37	0,69	1	0,16	0,27	0,09	0,7	0,74	0,45	0,25	0,18
Kh (cm/h)	-0,81**	-0,54	-0,58	-0,65	1	0,11	0,05	0,25	0,26	0,15	0,12	0,05
Indice Plástico (%)	0,56	0,36	0,36	0,54	-0,71	1	0,49	0,02	0,02	0,12	0,32	0,25
COLE (cm/cm)	0,75*	0,68	0,75*	0,75*	-0,81**	0,36	1	0,67	0,69	0,21	0,46	0,1
Dap (gr/cm <sup>3</sup> )	0,37	0,37	0,13	0,21	-0,56	0,89**	0,23	1	7,1E-07	0,09	0,81	0,51
Porosidad Total (%)	-0,35	-0,35	-0,1	-0,18	0,55	-0,88**	-0,21	-1***	1	0,1	0,82	0,54
Macro (%)	-0,79**	0,89**	-0,7	-0,39	0,66	-0,71	-0,59	0,75*	0,73	1	0,79	0,08
Meso (%)	-0,6	-0,07	-0,4	-0,56	0,71	-0,49	-0,38	-0,12	0,12	0,14	1	0,17
Micros (%)	1***	0,81**	0,91***	0,63	-0,8**	0,56	0,73*	0,34	-0,32	-0,76*	-0,64	1

De acuerdo a su análisis se puede comprobar que la variable con mayor vinculación con las restantes propiedades es el COLE, el cual se relaciona positivamente con los contenidos de agua a distintas tensiones mátricas y negativamente con la permeabilidad de los distintos horizontes.

### Horizontes BC y C

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes BC y C, se observa que el eje 1 explica el 48 % de la variabilidad, mientras que el eje 2 el 29 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 77 % de la variabilidad.

En la tabla N° 20 se presentan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad esta principalmente representada por: el punto de marchitez permanente, porcentaje de microporos, índice plástico, COLE y humedad equivalente, como también con el contenido de agua a saturación. En cambio, en el eje 2 la variabilidad esta principalmente representada por: porcentaje de macroporos densidad aparente, porosidad total y contenido de agua a capacidad de campo, como también con el porcentaje de mesoporos.

Tabla N° 20- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

VARIABLES	e1	e2	CP 1	CP 2
PMP (%)	0,4***	0,01	0,00011	0,98
CC (%)	0,16	-0,41**	0,35	0,03
H E (%)	0,37***	0,19	0,0028	0,38
H2O sat. (%)	0,32**	0,06	0,03	0,78
Kh (cm/h)	0,02	-0,22	0,91	0,31
Indice Plástico (%)	0,4***	0,12	0,00025	0,58
COLE (cm/cm)	0,4***	-0,03	0,00034	0,88
Dap (gr/cm3)	0,09	-0,44**	0,62	0,01
Porosidad Total (%)	-0,08	0,43**	0,67	0,02
Macroporos (%)	-0,16	0,48***	0,36	0,0032
Mesoporos (%)	-0,24	-0,34*	0,15	0,08
Microporos (%)	0,4***	0,01	0,0001	0,97

En la figura N° 49 de componentes principales se observa como quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes BC y C y las variables estudiadas.

De la misma manera que para los Bt, el índice de plasticidad y el COLE ordenan la disposición del contenido de agua para suelo saturado, la humedad equivalente y el porcentaje de microporos, siendo los horizontes BC y C del suelo de San Pedro los que se ubican en los mayores valores de estas propiedades. A su vez el BC de Arminda lo hace en una posición menos extrema, los BC de Oliveros y Luján en un sector intermedio, siendo el C de Chivilcoy el que presenta un menor valor en estas propiedades. En este grupo de horizontes, y de manera diferente a lo sucedido con los Bt, la variabilidad aportada por el CP<sub>2</sub> es más importante, ubicándose a lo largo de dicho eje la macro y mesoporosidad, la porosidad total, la dap, la conductividad hidráulica saturada y el contenido de agua a capacidad de campo. Sobre dicho eje se ubican los horizontes C de Arminda, con alto porcentaje de macroporos y porosidad total, y BC de Luján y BCkb de Oliveros, claramente influenciados por los valores altos de las variables densidad aparente y contenido de agua a capacidad de campo.



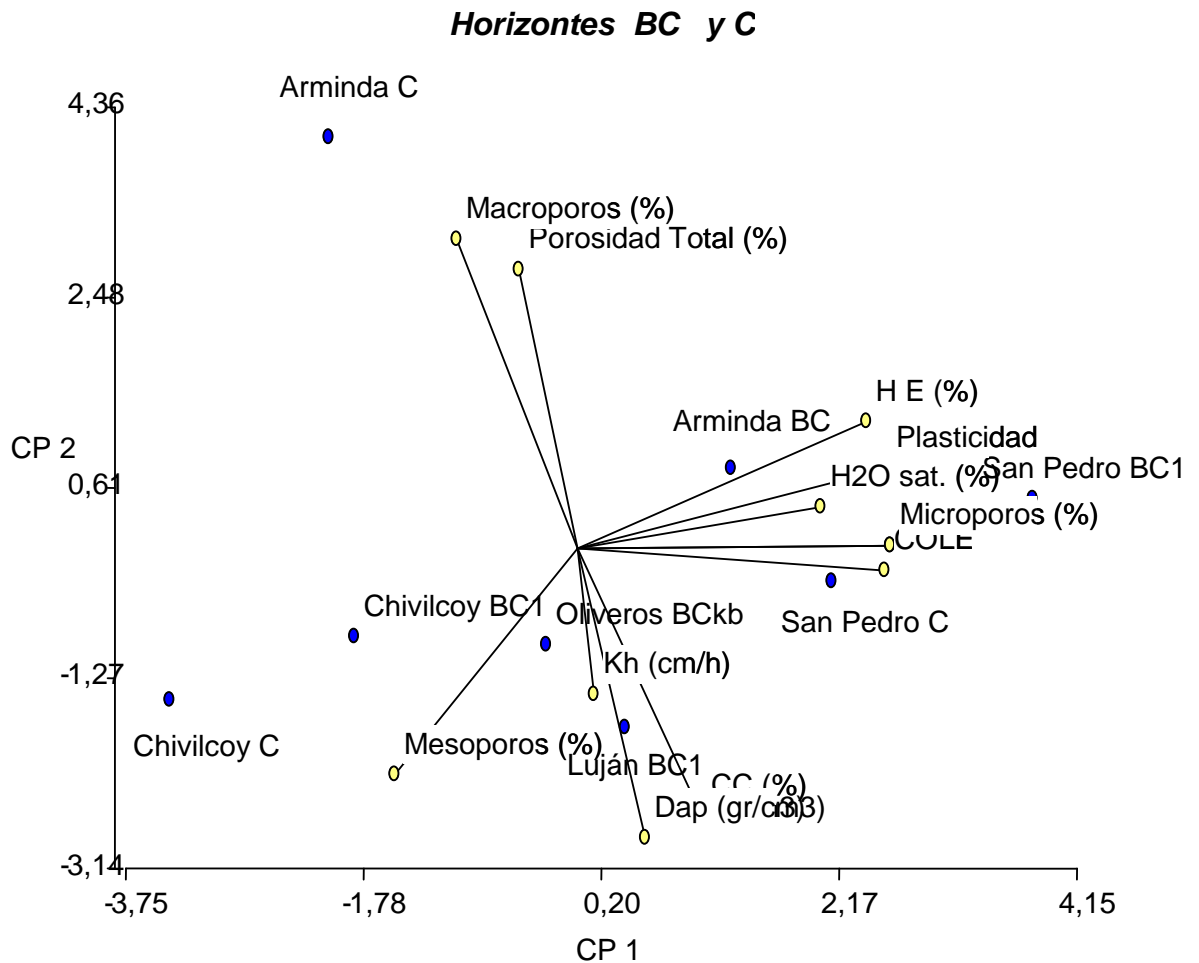


Figura N° 49- Componentes Principales de los horizontes BC y C de los suelos estudiados.

Por lo tanto, de los horizontes que aparecen aquí, los que conformarían los extremos en cuanto a estar influenciados por la cantidad y calidad de arcillas serían por un lado los horizontes BC de Arminda y San Pedro y el C de San Pedro (con mayor valor de COLE e índice plástico) y por otro lado los BC y C correspondientes a Chivilcoy (con menor valor de estas propiedades).

En la tabla N° 21 se representa los coeficientes de correlación Pearson para las variables estudiadas en los horizontes BC y C. De su lectura surge que las variables con mayores coeficientes de correlación son: porcentaje de macroporos con capacidad de campo; índice plástico con humedad equivalente, con porcentaje de microporos, con punto de marchitez permanente y con agua de saturación; el COLE se correlaciona con punto de marchitez permanente, con porcentaje de microporos con índice plástico y con humedad equivalente; correlación alta se da también entre humedad equivalente con punto de marchitez permanente

Tabla N° 21- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC y C de los suelos estudiados. ( $p < 0,1$  \*;  $p < 0,05$  \*\*;  $p < 0,01$  \*\*\*)

Correlacion de Pearson:  
coeficientes\probabilidades

	PMP (%)	CC (%)	HE (%)	H2O sat.(%)	Kh (cm/h)	Plast.	COLE	Dap	PT (%)	Macro	Meso	Micro
PMP (%)	1	0,4	0,01	0,12	0,52	0,004	0,0033	0,68	0,74	0,43	0,1	0
CC (%)	0,34	1	0,81	0,63	0,52	0,61	0,23	0,26	0,32	2E-04	0,19	0,41
HE (%)	0,87***	0,1	1	0,1	0,73	0,0006	0,01	0,74	0,72	0,93	0,05	0,01
H2O sat. (%)	0,59	0,2	0,62*	1	0,29	0,01	0,05	0,78	0,81	0,63	0,36	0,12
Kh (cm/h)	0,27	0,27	-0,14	-0,43	1	0,61	0,91	0,5	0,56	0,47	0,96	0,52
Indice Plástico (%)	0,88***	0,21	0,94***	0,84***	-0,22	1	0,0038	0,97	0,99	0,68	0,1	0,0039
COLE (cm/cm)	0,89***	0,47	0,83***	0,7**	0,05	0,88***	1	0,68	0,73	0,28	0,3	0,0032
Dap (gr/cm3)	0,17	0,45	-0,14	0,12	0,28	0,02	0,18	1	4E-08	0,06	0,61	0,68
Porosidad Total (%)	-0,14	-0,4	0,15	-0,1	-0,25	0,01	-0,15	-1***	1	0,08	0,62	0,74
Macro (%)	-0,33	-0,96***	-0,03	-0,2	-0,3	-0,17	-0,44	-0,69**	0,65**	1	0,21	0,43
Meso (%)	-0,63*	0,52	-0,71**	-0,37	-0,02	-0,63*	-0,42	0,22	-0,21	-0,49	1	0,1
Micro (%)	1***	0,34	0,87***	0,6	0,27	0,88***	0,89***	0,17	-0,14	-0,33	-0,63*	1

## II.6. CONCLUSIONES PARCIALES

*En los suelos estudiados de la Pampa Ondulada, formados a partir de sedimentos loésicos con diferente granulometría y mineralogía, se observaron variaciones en diversas propiedades físicas, algunas de las cuales se pudo comprobar que están relacionadas con la proporción de arcilla y con la proporción de minerales expansibles de tipo illita/esmectita.*

*La retención del agua es una propiedad física que está directamente relacionada con el contenido de arcilla. Esta asociación se vió claramente dentro del grupo de horizontes con bajo contenido de carbono (Bt, BC y C). En este sentido se constató una alta correlación entre la humedad equivalente y el punto de marchitez permanente con el porcentaje de esta fracción en dichos horizontes. Respecto a los horizontes superficiales, también se pudo constatar que los mayores valores de retención de agua correspondían a los suelos con mayor proporción de arcilla, como el de San Pedro y el de Oliveros. Sin embargo el perfil de Chivilcoy, pese a su textura más arenosa, presentó una elevada retención de agua debido probablemente a su mayor contenido de materia orgánica.*

*Dentro de las propiedades evaluadas, la CIC se comportó de manera sensible, a las diferencias observadas entre horizontes similares -tanto horizontes A como BC y C- en el contenido de agua en el punto de marchitez permanente y en la humedad equivalente. Dicho comportamiento obedece a que en los horizontes profundos este parámetro sintetiza el efecto del contenido y tipo de arcilla presente, mientras que en los superficiales además de expresar el efecto de la arcilla también refleja contenido de carbono presente en los mismos.*

*El movimiento del agua está también relacionado con el contenido de arcilla de los suelos, pero a diferencia de la retención hídrica, la conductividad hidráulica saturada disminuye a medida que aumenta el contenido de arcilla y la microporosidad. En términos generales en los horizontes Bt la mayor proporción de microporos hizo disminuir el movimiento de agua, llegando a valores casi nulos. En los horizontes BC y C de los cinco perfiles, la conductividad hidráulica saturada aumentó, lo que es atribuible a una mayor proporción de macroporos en esos horizontes.*

*La distribución de poros también es una propiedad que se relaciona directamente con el contenido y tipo de arcilla. Así, en este estudio pudo constatar que la proporción de microporos tanto en horizontes Bt como BC se halla relacionada no sólo con el contenido de arcilla sino también con la proporción de arcillas interestratificadas illita/esmectita existente en dichos horizontes,*

*En comparación con las illitas, estas arcillas interestratificadas I/E tienen una mayor retención de agua en su espacio interfoliar, presentando a su vez una alta superficie específica, lo que genera altos potenciales de expansión y contracción. En este trabajo la combinación de la presencia de elevados contenidos de arcilla y una mineralogía con proporciones considerables de interestratificados I/E de carácter expansible se reflejó en altos valores de COLE así como en valores más elevados del índice de plasticidad de Atterberg. Además pudo constatar que la alta correlación entre estos parámetros con la CIC, lo cual refleja no sólo el rol de la arcilla sino también el efecto de la materia orgánica en el comportamiento mecánico de los suelos.*

*Finalmente, la cartografía de suelos de la Pampa Ondulada ha puesto en evidencia la existencia de distintos tipos de Argiudoles entre los cuales se destacan los Argiudoles típicos y los Argiudoles vérticos. Para algunas Series de suelos Argiudoles de esta región han surgido controversias respecto a su clasificación taxonómica, no estando claro todavía si deben ser incluidos en los subgrupos verticos o típicos En este*

*trabajo se incluyó un suelo localizado en San Pedro, Serie Ramallo y clasificado como Argiudol vértico y un suelo localizado en Arminda clasificado como Serie Peyrano, la que según la bibliografía ha sido considerado tanto Argiudol vértico como Argiudol típico. Desde el punto de vista morfológico, en el suelo de San Pedro se observaron rasgos vérticos, los que no se apreciaron en el suelo de Arminda. De acuerdo al segundo criterio alternativo que establece la Taxonomía de Suelos --la extensibilidad lineal- para clasificar a un suelo como Argiudol vértico, ambos suelos reúnen esas exigencias, presentando los mayores valores de los cinco suelos aquí estudiados. Sin embargo este requisito lo cumplen también los suelos de Oliveros y Chivilcoy que no podrían considerarse dentro de un subgrupo vértico.*

### CONCLUSIONES FINALES

*Los estudios mineralógicos de los suelos pampeanos son escasos. Aún más escasos son los trabajos que relacionan la composición mineralógica con las propiedades físicas y físico-químicas de perfiles completos de suelos. En esta tesis se ha pretendido contribuir generando esta información para algunos suelos Argiudoles característicos de distintos sectores de la Pampa Ondulada, lo que además de proveer conocimiento de base tendría aplicaciones prácticas diversas, en particular relacionadas con el comportamiento hídrico y mecánico de estos suelos. Algunas de las principales conclusiones que se han ido generando a lo largo del trabajo son las siguientes:*

*-El estudio efectuado de algunos suelos Argiudoles representativos de distintos ambientes de de la Pampa Ondulada ha puesto en evidencia su desarrollo a partir de distintos sedimentos loessicos diferenciados en su granulometría y mineralogía.*

*-En concordancia con estudios previos, los materiales parentales de estos suelos evidenciaron un incremento de la fracción arcilla hacia el este-noreste de la Pampa Ondulada, es decir hacia el eje fluvial Paraná-Río de la Plata. De acuerdo a la clasificación de los sedimentos loésicos el suelo de Chivilcoy se formó a partir de un loess arenoso en tanto los suelos de San Pedro, Luján, Arminda, Oliveros se formaron a partir de loess típico.*

*-En al menos dos de los suelos estudiados (Luján y Chivilcoy) se evidenciaron discontinuidades sedimentológicas en horizontes profundos de los perfiles.*

*-El análisis mineralógico de la fracción arcilla de los suelos muestra un aumento de minerales interestratificados de illita/esmectita desde las proximidades del Río Salado hacia las proximidades de los ríos Paraná y de la Plata.*

*-El estudio de la mineralogía magnética de los suelos de la Pampa Ondulada a través del análisis de la susceptibilidad magnética ha mostrado diferencias entre los suelos atribuibles a la composición litogénica.*

*-Tanto la mineralogía de las arcillas como la mineralogía magnética, así como algunas propiedades físico-químicas relacionadas, indican que los aportes sedimentarios que han constituido el material parental de estos suelos son diversos. Estos resultados sugieren que además de la preponderante contribución de materiales volcánico-clásticos de las fuentes del oeste, en algunos suelos existen aportes de las Sierras Pampeanas y/o de la cuenca del Paraná.*

*-Además de las diferencias de susceptibilidad magnética de origen litogénico entre los materiales parentales de los suelos, en todos los perfiles se constató un incremento similar de la susceptibilidad magnética en el techo del horizonte Bt, que sería de origen pedogenético y cuya intensidad estaría relacionada con el comportamiento hídrico interno de los suelos*

*-Aparte de ciertas características relacionadas con el grado de desarrollo, las diferencias composicionales -granulométricas y mineralógicas- entre los materiales parentales de los distintos suelos son un condicionante principal de los comportamientos físicos y físico-químicos diferenciales entre los suelos estudiados.*

*-Las diferentes propiedades físicas relacionadas con la retención y dinámica del agua en los suelos de la Pampa Ondulada, y además del rol que juega la materia orgánica en los horizontes superficiales, se encuentran relacionadas tanto con el contenido de arcilla como con su composición mineralógica.*

*-La retención hídrica determinada a distintas tensiones y con diversas metodologías mostró que el suelo de Chivilcoy es el que menor retención hídrica posee, el suelo de San Pedro es el que retiene más agua, en tanto los tres restantes suelos presentaron capacidades de retención intermedias. También en términos generales, los valores de retención son menores en los horizontes superficiales, máximos en los Bt e intermedios en los horizontes BC y C.*

*-La diferenciación entre estos tres grupos de suelos resultó más evidente tomando en cuenta los valores de humedad equivalente y del punto de marchitez permanente, lo que deja en claro que los valores obtenidos por estos métodos reflejan la composición granulométrica y mineralógica, y la porosidad textural (o microporosidad) que de ello se deriva. Es de tener presente que ambas metodologías se llevan a cabo sobre muestras de suelo molidas y tamizadas.*

*-Si bien la porosidad de los horizontes subsuperficiales mostró una similar distribución por tamaño en función de la profundidad, las diferencias en los valores absolutos entre los distintos perfiles, particularmente en la microporosidad, evidenciaron estar relacionadas con la granulometría y la mineralogía de las arcillas.*

*-Los índices de Atterberg diferenciaron claramente tres grupos de suelos, uno constituido por el suelo de Chivilcoy, otro por el de San Pedro y un tercero por los restantes tres suelos. Estos resultados mostraron estar relacionados tanto con la cantidad de arcilla como con la proporción de minerales interestraificados expansibles.*

*-Las propiedades de expansión-contracción determinadas a través del coeficiente de extensibilidad lineal (COLE) mostraron una alta correlación con el Índice plástico de*

*Atterberg. Por otro lado, tanto el COLE como el Índice plástico mostraron altos coeficientes de correlación con la CIC, siendo este un parámetro que integra el contenido de materia orgánica, el contenido de arcilla y la mineralogía de ésta.*

*-Si bien el suelo de Arminda correspondiente a la Serie Peyrano presenta ciertas características físicas relacionadas con un contenido considerable de arcillas expansibles de tipo I/E, estas no parecen suficientes para clasificar este suelo como Argiudol vértico aún cuando el criterio de Extensibilidad lineal permita clasificarlo como tal.*

*-Dado que los Argiudoles típicos de Oliveros y de Chivilcoy presentan también valores de Extensibilidad lineal suficientes para clasificarlos como vérticos, parecería necesario investigar la validez de este criterio como definitorio para este subgrupo, así como aparece también necesario profundizar el estudio de las propiedades físicas y los criterios de distinción entre los Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada.*

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah, WS; MS Al-Zou`bi & KA Alshhibli. 1999. Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays. *Applied Clay Science* 15, 447-462.
- Allbrook, RF. 1992. Shrinkage of some New Zealand soils and its implications for soil physics. *Aust. J. Soil Res.* 31:111-118.
- Alvarez, R & RS Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83:127-141.
- Anderson, JL & J Bouma. 1977a. Water movement through Pedal soils: I Saturated flow. *Soil Sci Soc. Am. J.* 41:413-418.
- Anderson, JL & J Bouma. 1977b. Water movement through Pedal soils: II Unsaturated flow. *Soil Sci Soc. Am. J.* 41: 419-423.
- Atterberg, A. 1911. Die Plastizität der Tone. *Internationale Mitteilungen fuer Bodenkunde* 1, 10-43.
- Baize, D. 2000. Guide des analyses en pédologie. INRA Editions
- Barreira, E & H Lopez Dominguez. 1970. Fósforo ligado al aluminio de hierro y calcio en perfiles de suelo de la región pampeana húmeda. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, Serie 3 VII (2), 127-132.
- Bartel, A; JC Bidegain & A Sinito. 2005. Propiedades magnéticas de diferentes suelos del Partido de La Plata, Provincia de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Geo. Ar.*, 60: 591-598.
- Bartel, A. 2009. Caracterización magnética de una climosecuencia de suelos entre el sureste de la Provincia de La Pampa y el Litoral Atlántico, *PhD Thesis*, Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Bahia Blanca, Argentina, 259 p.
- Baumer, OW & BR Brasher. 1982. Prediction of water content at selected suctions. *Am. Soc. Agri. Eng. Paper* 82-2590.
- Bear, J .1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, N.Y.
- Beroya, MAA; A Aydin & R Katsenbach. 2009. Insight into the effects of clay mineralogy on the cyclic behavior of silt-clay mixtures. *Engineering Geology* 106: 154-162
- Bertoldi de Pomar, H. 1969. Notas preliminares sobre la distribución de minerales edafógenos en la provincia de Santa fe. *Actas V Reun. Arg. Ciencia del suelo*, Santa Fe, pp.716-726.
- Beven, K & P German. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Res.Res.*, 18:1311-1325.
- Bidart, S. 1992. *Actas Cuarta Reunión Argentina de Sedimentología*, Tomo II: 159-166
- Blake, G & K Hartge. 1986b. In: Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. SSSA, Madison, Wisconsin, secon edition. 1188 pp.
- Bouma, J. 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy* 46:1-37.
- Brady, NC & RR Weil. 2002. The nature and Properties of Soil. 13<sup>th</sup> ed. Springer Netherlands, 249.
- Bray, RH & LT Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremmer, JM. 1960. Determination or nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J. Agr. Sci.* 55:1-23.
- Briggs, LJ & JW Mc Lane. 1907. *USDA Soils Bull.* N° 45
- Brindley, GW & G Brown. 1980. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. *Mineralogical Society*: 507 p.

- Bronick, CJ & R Lal. 2004. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124:3-22.
- Brooks, RH & AT Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper 3. Colorado State University, Fort Collins.
- Bruand, A & D Tessier. 2000. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parental material and soils history. *European Journal of Soil Science*, 51: 679-688.
- Bultel, F. 2001. Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels. Ph.D. Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Burke, IC; CM Yorker; WJ Parton; CV Cole; K Flack; & DS Schimel. 1989. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in United States grassland soils. *Soil Sci. Am. J.* 53: 800-805.
- Buschiazzo, DE; AR Quiroga & K Stahr. 1991. Patterns of organic matter accumulation on soils of the Semiarid Argentinean Pampas. *Z. Pflanzenerähr. Bodenkd.* 154: 437-441.
- Camilion, M. 1993. Clay mineral composition of Pampean loess (Argentina). *Quaternary International*, vol. 17: 27-31.
- Campbell, G. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117:311-314.-Casagrande, A. 1932. Research of Atterberg limits of soils. *Public Roads Vol.13, N° 8*: 121-136.
- Castiglioni, M; H Morrás; O Santanatoglia & M V Altinier. 2004-a. Análisis de la contracción de agregados de distintos horizontes de Argiudoles de la Pampa Ondulada. *Actas XVIII Congreso Arg. Cien. del Suelo, Paraná*, (editado en CD).
- Castiglioni, M; H Morrás; O Santanatoglia & MV Altinier. 2005-a. Movimiento de agua en el suelo y su vinculación con algunas propiedades de diferentes Argiudoles de Pampa Ondulada. *Actas XX Congreso Argentino del Agua, San Luis* (editado en CD).
- Castiglioni, M; H Morrás; O Santanatoglia & M V Altinier. 2005-b. Contracción de agregados de Argiudoles de la Pampa Ondulada diferenciados en su mineralogía de arcillas. *Ciencia del Suelo*, 23 (1): 13-22.
- Castiglioni, M. 2005. Influencia de la organización y composición del espacio poroso y la matriz en la dinámica hídrica de distintos Argiudoles de Pampa Ondulada. *Tesis para optar por el Magíster de la Universidad de Buenos Aires. Area Ciencias del Suelo*. Biblioteca de la Escuela para Graduados Alberto Soriano. FAUBA.
- Conti, M; L Barberis & E Chamorro. 1976. Estado del fósforo en suelos de Entre Ríos, Buenos Aires y Santa Fé. *Actas VII Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. IDIA, Suplemento (33)*, 62-68.
- Coulombe, CE; LP Wilding & JB Dixon. 1996. Overview of Vertisols: Characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57: 289-375.
- Cruzate G & HJM Morras. 2000. Contribución del limo a la capacidad de intercambio catiónico en el material parental de los suelos del norte de la región pampeana. *Actas XVII Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata*, (editado en CD).
- Damiano, F; RA Diaz & MO Grondona. 1996. Evaluación de una función uniparamétrica para la estimación de la curva de retención de agua en suelos agrícolas. *Actas del XVI Congreso Nacional del Agua. San Martín de los Andes. Argentina. Trabajo N° 148*.
- Damiano, F & M Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de pedo-transferencia en suelos agrícolas de la región pampeana. *Ciencia del Suelo*, 18(2):77-88.



- Danielson, R & P Sutherland. 1986. Porosity. In: Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. *Physical and mineralogical methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, second edition. 1188 p.
- Darwich, N. 1983. Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. *IDIA* n (409-412), 1-5.
- Dasog, GS & GB Shashidhara. 1993. Dimension and volume of cracks in a vertisol under different crop covers. *Soil science* 156(6):424-428.
- De Jong, E; LM Kozak & HB Stonehouse. 1992. Comparison of shrink-swell indices of some Saskatchewan soils and their relationships to standard soil characteristics. *Can J. Soil Sci.* 72: 429-439.
- Dexter, AR. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.* 11:199-238.
- Dontsova, K M; L D Norton; C T Johnston & J M Bigham. 2004. Influence of Exchangeable Cations on Water Adsorption by Soil Clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1218-1227.
- Duran, A; H Morras; G Studdert & Lui Xiaobing. 2011. Distribution, Properties, Land Use and Management of Mollisols in South America. *Chin. Geogr. Sci.* 21 (3).
- Ehlers, W; O Wendroth & F de Mol. 1995. Characterizing pore organization by soil physical parameters. In: Hartge, KH; Stewart BA (Eds.), *Soil Structure-Its Development and Function*. *Adv. Soil Sci.* 257-275.
- Etchichury, M & O Tofalo. 2004. Mineralogía de arenas y limos en suelos, sedimentos fluviales y eólicos actuales del sector austral de la cuenca Chaco-paranaense. Regionalización y áreas de aporte. *Rev. De la Asoc. Geol. Argentina*, 59(2):317-329.
- Favre, F; P Boivin & MCS Wopereis. 1997. Water movement and soil swelling in a dry, cracked Vertisol. *Geoderma* 78:113-123.
- Farrar, DM & JD Coleman. 1967. The correlations of surface area with other properties of nineteen British clay soils. *J. Soil Sci.* 18:118-124.
- Fies, J & P Stengel. 1981. Densité texturale des sols naturels. I. *Methodes de mesurew, Agronomie* 1(8): 655-659.
- Gaiser, T ; F Graef & J Carvalho Cordeiro. 2000. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. *Aust. J. Soil Res.* 38 :523-536.
- Gee, GW & JW Bauder. 1986. Particle-size Analysis; *In: Methods of Soil Analysis, Part 1º, Physical and Mineralogical Methods* (Klute and Arnold ed.) pp. 2<sup>nd</sup> ed. *Amer. Soc. Agr., Soil Sci. Soc. Amer.* Madison, Wisconsin, USA.
- Goldberg, S; DL Suarez & RA Glaubig. 1988. Factors affecting clay dispersion and aggregate stability of arid-zone soils. *Soil Science* 146, 317-325.
- Gonzalez Bonorino, F. 1966. Soil clay mineralogy of the Pampa plains, Argentina. *J. of Sed. Petrology*, 36(4):1026-1035
- González Uriarte, M & E Muro. 1998. Relaciones geomorfología – suelos en los paisajes del centro-oeste de la provincia de Buenos Aires. *Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 16. p. 313-314.
- Grabowska-Olszewska, B. 2003. Modelling physical properties of mixtures of clays; example of two-component mixture of kaolinite and montmorillonite. *Applied Clay Science.* 22, 251-259.
- Gray, CW & R Allbrook. 2002. Relationships between shrinkage indices and soil properties in some New Zealand soils. *Geoderma* 108:287-299.
- Green, WH. & G Ampt. 1911. Studies of Soil Physics, Part I – The Flow of Air and Water Through Soils. *Journal of Agricultural Science*, 4:

1-24 pp.

- Greenland, DJ. 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent?. *Phil Trans. Royal Soc. London* 281:193-208.
- Greenland, D & J Mott. 1978. Surface of soil particles. En: The chemistry of soil constituents (Greenland y Hayes, Eds.) *John Wiley & Sons*, pp.321-353.
- Grossman, R; B Brasher; D Franzmeier & J Walker. 1968. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. *SSSam. Proceedings*, 32:570-573
- Gupta, RD; PD Sharma; CL Acharya & BR Tripathi. 1983. Water retention characteristics of some soil profiles of north-west India in relation to soil properties under different bio- and climo-sequences. *Journal of Indian Society of Soil Science* 31:458-463.
- Hammel, JE; ME Sumner & J Burema. 1983. "Atterberg limits as indices of external surface areas of soils". *Soil Sci. Soc. Am J.* 47 :1054-1056.
- Hartmann, R. 2003. Soil water potential-soil water retention. *College on Soil Physics. Trieste Italy*. 3 al 21 de marzo de 2003. [www.agenda.ictp.trieste.it/agenda/](http://www.agenda.ictp.trieste.it/agenda/)
- Haynes, RJ & R Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 51, 123-137.
- Holmgren, GGS. 1968. Nomographic calculation of linear extensibility in soils containing coarse fragments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 32: 568-570.
- Imbellone, P & M Teruggi. 1993. Paleosols in loess deposits of the Argentine Pampa. *Quaternary International*, 17: 49-56.
- INTA. 1966-1967. Colección: Cartas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:50.000. CIRN, INTA, Buenos Aires. <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/>
- INTA. 1983. Cartas de Suelos de la República Argentina. Arroyo Seco Provincia de Santa Fé. Escala 1:50.000. CIRN, INTA, Buenos Aires.
- INTA. 1980. Mapa Detallado de Suelos de la Experimental Agropecuaria Oliveros. Publicado por INTA Rafaela.
- INTA-SAGyP., 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina, Buenos Aires.
- Iñiguez, A & C Scoppa. 1970. Los minerales de arcilla en los suelos zonales ubicados entre los ríos Paraná y Salado (Prov. De Buenos Aires). *RIA*, serie 3, vol. VII (1): 1-41.
- Iriondo, M & D Kröhling. 1995. Comunicaciones. Museo Prov. F.Ameghino, 5(1), 68 pp.
- Iriondo, M & D Kröhling. 1996. Los sedimentos eólicos del noroeste de la llanura pampeana. *Actas XIII Congr. Geológico Argentino*. Tomo IV: 27-48.
- Jury, WA; WR Gardner & VH Gardner. 1991. The soil solid phase. Ed John Wiley y Sons, Inc. *Soil Physics*. Capitulo 1 (1-33). Total paginas 327.
- Klute, A & C Dirsken. 1986. In: Klute, A., 1986. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. SSSA, Madison, Wisconsin, secon edition. 1188 pp.
- Keys to Soil Taxonomy. 2010. Eleven edition. Soil Survey Division.USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Lin, HS; KJ McInnes; LP Wilding & CT Hallmark. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well structured subsoil. *Trans. of the ASAE* 39(1): 131-133.
- Lipiec, J; J Kus; A Slowinska-Jurkiewicz & A Nosalewicz. 2006b. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Till. Res.* 89,210-220.
- Liu, Q; J Torrent; H Morras; A Hong; Z Jiang & Y Su. 2010. Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications. *Geophys. J. Int.* 183, 695-705.

- Kutilek M. 1973. The influence of soil minerals and exchangeable cations on soil moisture potential. In X Hadas et al.(Eds.) *Physical Aspects of Soil Water and Salts in Ecosystems*. Springer-Verlag, New York.
- Kutilek, M. 1996. Water relations and water management of Vertisols. In: N.Ahmad and A.Mermut (Ed) *Vertisols and technologies for their management*. Cap 6. pp 201-230.
- Kutilek, M. 2004. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil Till. Res.* 86,27-37.
- Marquez, CG. 1985. Propiedades ingenieriles de los suelos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín. 243 p.
- Martel, YA; CR De Kimpe & MR Laverdiere. 1978. Cation exchange capacity of clay-rich soils in relation to organic matter, mineral composition, and surface area. *Soil Science Society of America Journal* 42: 764-767.
- Mc Garry, D & KW Malafant. 1987. The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 290-297.
- Means, RE & JV Parcher. 1965. Plasticity. In *Physical properties of soils*. Prentice-Hall of India Ltd. Pags. 68-84.
- Morari, F & WG Knisel. 1997. Modifications of the Gleams model for crack flow. *Trans of the ASAE* 40(5):1337-1348.
- Morrás, H; J Postma; M Rapp & C Scoppa. 1980. Mineralogía de arcillas de algunos suelos del norte de la provincia de Santa Fe. Actas IX Reunion Arg. Ciencia del Suelo, Paraná, 1980, Vol. III, pp.1185-1191.
- Morrás, H & L Candiotti. 1981. Relación entre permeabilidad, ciertos caracteres analíticos y situación topográfica en algunos suelos de los bajos Submeridionales. *Rev. de Investig. Agrop.*, XVI (1):23-32.
- Morrás, H; D Robert & G Bocquier. 1982. Caracterisation minéralogique de certains sols salsodiques et planosoliques du "Chaco Deprimido". *Cah. ORSTOM, Sér Pédol.*, XIX (2): 151-169.
- Morrás, H. 1983. Interrelación de las características pedológicas y los procesos hidrológicos en los Bajos Submeridionales. *I Coloquio Internacional sobre Hidrología de Grandes Llanuras* (CONAPHI-UNESCO), Olavarría (Arg.), Vol. III, pp. 1338-1348.
- Morrás, H & M Delaune.1985. Caracterización de áreas sedimentarias del norte de la provincia de Santa Fe en base a la composición mineralógica de la fracción arena. *Ciencia del Suelo* 3: 140-151.
- Morrás, H. 1995. Mineralogy and cation exchange capacity of the fine silt fraction in two soils from southern Chaco Region (Argentina). *Geoderma* 64: 281-295.
- Morrás, H. 1996. Composición y evolución de la fracción limo grueso de suelos del Chaco Meridional argentino. *Actas XIII Congr. Geológico Argentino*, Buenos Aires, Vol. IV: 263.
- Morrás, H. 1997. Origen y mineralogía del material parental de los suelos de la región pampeana. Homogeneidad o heterogeneidad? *1º Taller de Sedimentología y Medio Ambiente. Asociación Argentina de Sedimentología*, Buenos Aires, pp.19-20.
- Morrás, H; P Nabel & W Zech. 1998. Identificación de distintos materiales parentales de suelos Argiudoles en un sector de la Pampa Ondulada (Pcia. de Buenos Aires). *Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Carlos Paz, pp. 305-306.
- Morrás, H; W Zech & P Nabel. 1998. Composición geoquímica de suelos y sedimentos loésicos de un sector de la Pampa Ondulada. *Actas, Quintas jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses*, Vol. I., Mar del Plata, pp. 225-232.

- Morrás, H. 1999. Geochemical differentiation of Quaternary sediments from the Pampean region based on soil phosphorous contents as detected in the early 20<sup>th</sup> century. *Quaternary International*, 62: 57-67.
- Morrás, H. 1999. Composición geoquímica de suelos y sedimentos cuaternarios de un sector del Chaco Meridional. *Actas del 1° Congreso Argentino del Cuaternario y Geomorfología*, Santa Rosa, La Pampa, p. 13.
- Morrás, H & G Cruzate. 2000-a. Clasificación textural y distribución espacial del material originario de los suelos de la Pampa Norte. *Actas XVII Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo*, Mar del Plata, (editado en CD).
- Morrás, H & G Cruzate. 2000-b. Distribución de los sedimentos superficiales en la Región Pampeana Norte (Argentina) a través del análisis de la variación espacial de parámetros físicos y químicos. *Actas II Cong. Latinoam. de Sedimentología*, Mar del Plata, pp.126-127.
- Morrás, H & G Cruzate. 2002. "Origen y distribución del potasio en suelos y sedimentos superficiales de la región Chaco-pampeana". En: *El potasio en sistemas agrícolas argentinos* (Eds.: Melgar, Magen y Lavado), INTA-IPI, pp.35-42.
- Morrás, H; MV Altinier; M Castiglioni; G Grasticini; G Ciari & G Cruzate. 2002. "Composición mineralógica y heterogeneidad espacial de sedimentos loésicos superficiales en la Pampa Ondulada". *XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, Pto. Madryn, (editado en CD).
- Morrás, H. 2003. Distribución y origen de sedimentos superficiales de la Pampa Norte en base a la mineralogía de arenas. Resultados preliminares. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 10 (1): 53-64.
- Morrás, H; MV Altinier; M Castiglioni & D Tessier. 2004-a. Relación entre la mineralogía de arcillas y la susceptibilidad magnética en tres suelos del sur de la Pampa Ondulada. *Actas XVIII Congreso Arg. Cien.del Suelo*, Paraná, (editado en CD).
- Morrás, H; G Ciari; C Grasticini; G Cruzate; MV Altinier & M Castiglioni. 2004-b. Variación espacial y relación entre la retención de humedad y la mineralogía magnética en suelos de la Pampa Ondulada. *Actas XVIII Congreso Arg. Cien. del Suelo*, Paraná, (editado en CD).
- Moscatelli, G. 1991. "Los suelos de la Región Pampeana ". En: Barsky, O. (Edit.): *El Desarrollo Agropecuario Pampeano*. INDEC - INTA - IICA. Buenos Aires.
- Mullins, CE. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil Science- A review. *Journal of Soil Science*. 28: 223-246.
- Nabel, P; H Morrás; G Petersen & W Zech. 1999. Correlation of magnetic and lithologic features of soils and Quaternary sediments from the Undulating Pampa. *Journal of South America Earth Sciences*, 12: 311-323.
- Nabel, P & F Pereyra. 2000. El paisaje natural bajo las calles de Buenos Aires. *Museo Arg. de Cs. Nat. B. Rivadavia*, 123 p.
- Ogden, CB; HM Van Es; RJ Wagenet & TS Steenhuis. 1999. Spatial -Temporal variability of preferential flow in a clay soil under no-till and plow till. *J.Env.Quality* 28:1264-1273.
- Orgeira, MJ & R Compagnucci. 2006. Correlation between paleosol-soil magnetic signal and climate. *Earth Planet. Space*, 58, 1373-1380.
- Orgeira, MJ; FX Pereyra; C Vazquez; E Castañeda & R Compagnucci. 2008. Rock magnetism in modern soils, Buenos Aires Province, Argentina. *J.South Am. Earth Sci.*, 26, 217-224.

- Pachepsky Ya, A; D Timlin & D Varallyay. 1996. Artificial neural networks to estimate soil water retention from easily measurable data. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 60:727-733.
- Parker, JC; DF Amos & DL Kaster. 1977. An evaluation of several methods of estimating soil volume change. *Soil Sci. Soc. Am J.* 41 :1059 :1064.
- Pecorari, C; LF Balcaza & E Frutos. 1988. Relaciones empíricas entre contenido de agua, textura y materia orgánica en suelos representativos de la Pampa Ondulada. *Informe técnico N° 222*. EEA Pergamino 32 p.
- Pereyra, F & J Ferrer. 1997. El material originario de los Molisoles de las Sierras Australes, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 15 (2): 87-94.
- Perillo, CA; SC Gupta; EA Nater & JF Moncrief. 1999. Prevalence and initiation of preferential flow paths in a sandy loam with argillic horizon. *Geoderma* 89:307-331.
- Puckett, WE; JH Dane & BF Hajek. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic properties. *Soil Sci.Soc. Am.J.* 49:831-836.
- Ratto, S. 2000. Capítulo Agua del Suelo. En: Principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos. Editorial Facultad de Agronomía (2° ed) pp 233-268.
- Rawls, WJ; YA Pachepsky; JC Ritchie; TM Sobecki & H Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116:61-76.
- Rawls, WJ; TJ Gish & DL Brakensiek. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties characteristics. *Advances in soil Science*. 16:213-234.
- Rawls, WJ & DL Brakensiek. 1990. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: Unsaturated flow in Hydrologic Modeling. H.J.Morel – Seytoux (ed.) pp 275-300.
- Read, JW & RH Ridgell. 1921. On the use of the conventional carbon factor in estimating soil organic matter. *Soil Science*, Vol. 13 N°1 1:6.
- Reeve, MJ; DGM Hall & P Bullock. 1980. The effect of soil composition and environmental factors on the shrinkage of some clayey british soils. *Journal of Soil Science* 31:429-442.
- Reitemeier, RF & M Fireman. 1944. Prevention of calcium carbonate precipitation in soil solutions and waters by sodium hexametaphosphate. *Soil. Sci.* 58: 35-41, illus.
- Richards, LA. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110.
- Richards, LA. 1949a. Filter funnels for soils extracts. *Agro. Jour.* 41:446, Illus.
- Robert, M. 1975. Principes de détermination qualitative des minéraux argileux á l'aide des rayons X. *Annales Agronomiques*, vol. 26, n° 4 : 363-399.
- Ross, GJ. 1978. Relationships of specific surface area and clay content to shrink-swell potential of soils having different clay mineralogical compositions. *Can. J. Soil Sci.* 58: 159-166.
- Sainz Rozas, H; H Echeverria & H Angelini H. 2012. Fósforo disponible en suelos agrícolas de la region pampeana y extra pampeana argentina. *Revista RIA vol 38 (1): 33-39*.
- Schoeneberger, PJ; DA Wysocki; EC Benhman & WD Broderson. (Ed) 2002. *Field book for describing and sampling*. Version 2.0. USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Schulten, HR & P Leinweber. 2000. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. *Biol. Fertil. Soils* 30, 399-432.
- Scoppa CO & JR Vargas Gil. 1969. Delimitación de sub-zonas geomorfológicas en un sector de la región pampeana y sus relaciones edafogenéticas. *Actas V Reun. Arg. De la Ciencia del Suelo*, Santa Fé, pp. 424-431.

- Scoppa, C. 1976. La mineralogía de los suelos de la llanura pampeana en la interpretación de su génesis y distribución. *Actas VII Reun. Arg. De la Ciencia del Suelo*, Bahía Blanca, IDIA, Suplemento 33, pp.659-673.
- Seed, JR; RJ Woodward & R Lundgren. 1963. Prediction of swelling potential for compacted clays. *Trans. Am. Soc. Civil Eng.* 128(1):1443-1477.
- Shipitalo, MJ; WM Edwards; WA Dick & LB Owens. 1990. Initial storm effects on macropore transport of surface-applied chemicals in no till soil. *Soil Sci. Soc. Am Journal* 54:1530-1536.
- Six, J; ET Elliott & K Paustian. Soil Structure and Soil Organic Matter : II.A Normalized Stability Index and the Effect of Mineralogy. 2000. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64 :1042-1049.
- Soil Survey Division Staff (SSDS). 1993. Soil survey manual. Handbook N° 18. United States Department of Agriculture (USDA). Washington D.C. 437 p.
- Sollins, P. P Homann & BA Cadwell. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma* 74, 65-105.
- Stephan, S; A De Petre; J De Orellana & L Priano. 1977. Brunizem soils of the central part of Pédologie, XXVII (3): 225-253.
- Stern, R; M Ben-Hur & I Shainberg. 1991. Clay mineralogy effect on rain infiltration, seal formation and soil losses. *Soil Science* 152 (6): 455-462.
- Teruggi, M. 1957. The nature and origin of Argentine loess. *J. of Sed. Petrology*, 27(3): 322-332.
- Tessier, D ; A Lajudie & J Petit. 1992. Relations between macroscopic behaviour of clays and their microstructural properties. *Appl. Geochem.*, Suppl Issue, 1:151-161.
- Thomas, PJ; JC Baker & LW Zelazny. 2000. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential. *Soil Sci. Soc. Am J.* 64 :268-274.
- Thompson, ML; H Zhang; M Kazemi & JA Sandor. 1989. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. *Soil Science* 148, 250-257.
- Tomasella, J & MG Hodnett. 1998. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science* 163 (3):190-202.
- Tonon, G; S Sohi; O Francioso; E Ferrari; D Montecchio; P Gioacchini; C Ciavatta; P Panzacchi & D Powlson. 2010. Effect of soil pH on the chemical composition of organic matter in physically separated soil fractions in two broadleaf woodland sites at Rothamsted, UK. *European Journal of Soil Science* 61, 970-979.
- USDA. 1996. Coefficient of linear extensibility (COLE). Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigation report n° 42. Version 3.0. National Soil Survey Center. pp 177-178.
- Van Stiphout, TPJ; HAJ Van Lanen; OH Boldersma & J Bouma. 1987. The effect of bypass flow and internal catchment of rain on the water regime in a clay loam grassland soil. *Journal of Hydrology* 95 1-11.
- van Bergen, PF; ID Bull; PR Poulton & RP Evershed. 1997. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted classical experiments e I. Total lipids extracts, solvent insoluble residues and humic acids from Broadbalk Wilderness. *Organic Geochemistry* 26, 117-135.
- van Genuchten, MTh. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- van Wambeke, A & CO Scoppa. 1976. Las taxas climáticas de los suelos argentinos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias, Serie 3 Clima y Suelo*, Vol. XIII, N° 1.
- Vereecken, H. 1995. Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. *Geoderma.* 65:81-92.

- Walkley, A & A Black. 1934. An examination of Degtereff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid tritration method. *Soil Sci.* 37:38-39.
- Williams, D; T Cook & W Lynn. 1996. Evaluating the field morphology of Vertisols. *Soil Surv. Horiz.* 37: 123-131.
- Williams, J; RE Prebble; WT Williams & CT Hignett. 1983. *The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic.*
- Yerima, BPK; LP Wilding & CT Hallmark. 1989. Statistical relationships among selected properties of Northern Cameroon Vertisols and associated Alfisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1758-1763.
- Yule, DF & JT Ritchie. 1980. Soil shrinkage relationships of Texas vertisols: I. Small cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 1285-1291.
- Zárate, M & A Blasi. 1993. Late Pleistocene-Holocene eolian deposits of the southern Buenos Aires Province., Argentina: a preliminary model. *Quaternary International* 17: 15-20.
- Zárate, M. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22: 1987-2006.
- Zubillaga, MM & ME Conti. 1994. Importance of the textural fraction and its mineralogic characteristics in the potassium contents of different Argentine soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 25: (5-6).479 - 487.

## Apéndice

### Análisis granulométricos

<b>CHIVILCOY</b>										
Diámetro(μm)	A1	A2	Bt1	Bt2	BC1	BC2	2C			
Arcilla total	18,9	12,4	20,8	12	9,2	14	5,6			
Limo total	48,1	50,1	39,3	53,2	49,2	41,2	38,6			
Arena total	33	37,6	39,9	34,7	41,5	44,8	55,9			
<b>SAN PEDRO</b>										
Diámetro(μm)	A1	A1	BA	Bt1	Bt2	BC1	BC2	C		
Arcilla total	24,4	27,6	31,8	40,8	33,7	22,4	20,5	18		
Limo total	65,8	65,5	62,6	54,8	61,4	71,2	72,9	73,3		
Arena total	9,8	7	5,6	4,4	4,9	6,3	6,5	8,7		
<b>LUJAN</b>										
Diámetro(μm)	A1	A2	E1	E2	Bt1	Bt2	Bt3	BC1	BC2	2C
Arcilla total	17,9	17,3	16,8	17,2	24,9	21,3	12,4	17,7	15,2	55,5
Limo total	70,2	72	70,5	66,3	65,6	67	74,9	69,5	73	41,5
Arena total	11,9	10,7	12,7	16,5	9,6	11,7	12,7	12,8	11,8	3,1
<b>ARMINDA</b>										
Diámetro (μm)	Ap	A1	BA	Bt1	Bt2	BC1	BC2	C	Cx	Ck
Arcilla total	14	16	19,8	24,1	32	15,3	13,9	16,5	11,3	13,7
Limo total	79	77,5	74,7	70,3	62,4	74,5	75,1	75,6	78,5	75,9
Arena total	6,9	6,5	5,6	5,6	5,6	10,3	11,1	7,9	10,2	10,4
<b>OLIVEROS</b>										
Diámetro (μm)	A1	A2	AB	E/B	Bt1	Bt2	Bt3	BC	BCkb	Ckb
Arcilla total	21,1	22	22,8	26,1	34,4	29,7	23,2	21,2	16,5	16,2
Limo total	75,6	73,24	74,2	71,3	62,9	67,1	73,1	74	78,3	80,5
Arena total	3,3	4,59	3,1	2,6	2,6	3,2	3,7	4,8	5,3	3,4



Análisis de susceptibilidad magnética

Muestra	Horizonte	LF 10x6 (kHz)	HF 10x6 (kHz)
Chivilcoy 0 cm	A1	3,543	3,417
Chivilcoy 10 cm	A2	3,893	3,733
Chivilcoy 20 cm	A2	3,81	3,66
Chivilcoy 30 cm	Bt1	4,127	3,963
Chivilcoy 40 cm	Bt1	4,267	4,093
Chivilcoy 50 cm	Bt2	3,517	3,387
Chivilcoy 60 cm	Bt2	3,447	3,35
Chivilcoy 70 cm	BC1	3,327	3,243
Chivilcoy 80 cm	BC1	3,257	3,183
Chivilcoy 90 cm	BC2	3,407	3,337
Chivilcoy 100 cm	BC2	3,107	3,043
Chivilcoy 110 cm	2C	3,147	3,08
Chivilcoy 120 cm	2C	3,153	3,097
Chivilcoy 130 cm	2C	3,133	3,08
Chivilcoy 140 cm	2C	3,093	3,033
Muestra	Horizonte	LF 10x6 (kHz)	HF 10x6 (kHz)
Lujan 0 cm	A1	1,213	1,17
Lujan 10 cm	A1	1,17	1,137
Lujan 20 cm	A2	1,253	1,21
Lujan 30 cm	A2	1,567	1,5
Lujan 40 cm	E1	2,07	1,963
Lujan 50 cm	E2	2,163	2,06
Lujan 60 cm	Bt1	1,873	1,79
Lujan 70 cm	Bt1	1,937	1,863
Lujan 80 cm	Bt2	2,11	2,03
Lujan 90 cm	Bt2	2,04	1,963
Lujan 100 cm	Bt2	2,08	2,007
Lujan 110 cm	Bt3	2,157	2,083
Lujan 120 cm	Bt3	2,137	2,057
Lujan 130 cm	BC1	2,087	2,02
Lujan 140 cm	BC1	2,133	2,067
Lujan 150 cm	BC1	2,06	2,003
Lujan 160 cm	BC2	1,79	1,72
Lujan 170 cm	BC2	1,727	1,663
Lujan 180 cm	BC2	1,467	1,407
Lujan 185 cm	BC2	1,273	1,213
Lujan 190 cm	2C	1,103	1,053

Muestra	Horizonte	LF 10x6 (kHz)	HF 10x6 (kHz)
San Pedro 0cm	A1	1,271	1,25
San Pedro 10cm	A1	1,748	1,698
San Pedro 20cm	A2	2,359	2,503
San Pedro 30cm	BA	2,23	2,109
San Pedro 40cm	Bt1	1,839	1,643
San Pedro 50cm	Bt1	1,856	1,743
San Pedro 60cm	Bt2	2,077	1,964
San Pedro 70cm	Bt2	2,127	2,015
San Pedro 80cm	Bt2	2,183	2,081
San Pedro 90cm	BC1	2,171	2,075
San Pedro 100cm	BC1	2,019	1,938
San Pedro 110cm	BC2	1,953	1,869
San Pedro 120cm	BC2	2,027	1,952
San Pedro 130cm	C	1,991	1,902
San Pedro 140cm	C	2,016	1,963
San Pedro 140-150cm	C	1,989	1,853
San Pedro 150-160cm	C	2	1,93
San Pedro 160-170cm	C	1,897	1,838
San Pedro 170-177cm	C	1,893	1,852

Muestra	Horizonte	LF 10x6 (kHz)	HF 10x6 (kHz)
Arminda 0 cm	A1	2,98	2,86
Arminda 10 cm	A2	2,967	2,847
Arminda 20 cm	A2	3,173	3,017
Arminda 30 cm	BA	3,403	3,23
Arminda 40 cm	Bt1	3,2	3,023
Arminda 50 cm	Bt1	2,75	2,597
Arminda 60 cm	Bt2	2,527	2,42
Arminda 70 cm	Bt2	2,45	2,333
Arminda 80 cm	BC1	2,403	2,31
Arminda 90 cm	BC1	2,393	2,283
Arminda 100 cm	BC2	2,53	2,443
Arminda 110 cm	BC2	2,477	2,383
Arminda 120 cm	C	2,44	2,353
Arminda 130 cm	C	2,483	2,393
Arminda 140 cm	Cx	2,52	2,447
Arminda 150 cm	Ck	2,617	2,543
Arminda 160 cm	Ck	2,477	2,407
Arminda 170 cm	Ck	2,49	2,417

Muestra	Horizonte	LF 10x6 (kHz)	HF 10x6 (kHz)
Oliveros 0 cm	A1	2,137	2,03
Oliveros 10 cm	A2	2,173	2,057
Oliveros 20 cm	A2	2,267	2,157
Oliveros 30 cm	AB	2,34	2,23
Oliveros 40 cm	E/B	2,457	2,317
Oliveros 50 cm	Bt1	2,04	1,943
Oliveros 60 cm	Bt1	1,753	1,657
Oliveros 70 cm	Bt2	1,757	1,667
Oliveros 80 cm	Bt2	1,79	1,7
Oliveros 90 cm	Bt3	1,757	1,68
Oliveros 100 cm	Bt3	1,76	1,687
Oliveros 110 cm	Bt3	1,727	1,65
Oliveros 120 cm	Bt3	1,807	1,727
Oliveros 130 cm	BC	1,8	1,737
Oliveros 140 cm	BC	1,743	1,683
Oliveros 150 cm	BCKb	1,817	1,753
Oliveros 160 cm	BCKb	1,943	1,867
Oliveros 170 cm	BCKb	1,78	1,713
Oliveros 180 cm	BCKb	1,713	1,65
Oliveros 190 cm	Ckb	1,673	1,603

### Análisis químicos y físico-químicos

<b>CHIVILCOY</b>							
Horizonte	A1	A2	Bt1	Bt2	BC1	BC2	2C
Profundidad (cm)	0-9	9-30	30-47	47-67	67-82	82-101	101 +
<b>SALINIDAD</b>							
Conduc. eléc. mS/cm	0,30	0,29	0,42	0,35	0,27	0,25	0,18
pH 1:2.5 agua	6,07	6,82	7,05	7,19	7,29	7,39	7,55
<b>FERTILIDAD</b>							
Materia Orgánica %	6,07	3,14	1,10	0,72	0,38	0,24	0,14
Carbono Orgánico %	3,52	1,82	0,64	0,42	0,22	0,14	0,08
Fósforo asimilable mg/kg	24,8	37,0	14,6	3,8	6,5	7,0	14,9
<b>COMPLEJO DE INTERCAMBIO</b>							
Calcio cmol/kg	15,0	13,9	13,9	12,5	10,0	8,0	7,6
Magnesio cmol/kg	2,8	3,1	5,1	6,0	2,8	3,1	3,9
Sodio cmol/kg	0,4	0,3	0,6	0,3	0,5	0,6	0,4
Potasio cmol/kg	2,4	1,3	3,0	3,5	3,2	4,3	2,5
Suma de cationes cmol/kg	20,6	18,6	22,6	22,3	16,5	16,0	14,4
CIC cmol/kg	32,7	20,2	30,1	23,8	17,3	19,6	17,4
%SATURACION DE BASES	63,0	92,1	75,1	93,7	95,4	81,6	82,8
PSI %	1,2	1,5	2,0	1,3	2,9	3,1	2,3

LUJAN											
Horizonte	A1	A2	E1	E2	Bt1	Bt2	Bt3	BC1	BC2	2C	
Profundidad (cm)	0-9	9-35	35-45	45-55	55-82	82-105	105-125	125-157	157-185	185 +	
<b>SALINIDAD</b>											
Conduc. eléc. mS/cm	0,25	0,24	0,25	0,23	0,44	0,47	0,37	0,34	0,41	0,65	
pH 1:2.5 agua	6,36	6,23	6,43	6,51	6,59	6,66	6,75	6,85	6,93	7,12	
<b>FERTILIDAD</b>											
Materia Orgánica %	5,17	3,38	1,26	0,95	0,62	0,50	0,38	0,19	0,12	0,09	
Carbono Orgánico %	3,00	1,96	0,73	0,55	0,36	0,29	0,22	0,11	0,07	0,05	
Fósforo asimilable mg/kg	16,9	3,9	2,7	1,3	0,8	1,4	4,3	6,6	14,4	14,2	
<b>COMPLEJO DE INTERCAMBIO</b>											
Calcio cmol/kg	11,3	12,4	10,5	10,1	17,7	17,3	14,5	15,7	19,6	24,2	
Magnesio cmol/kg	2,3	1,6	1,9	3,1	5,6	5,8	4,8	5,2	5,6	6,7	
Sodio cmol/kg	0,3	0,4	0,4	0,3	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	
Potasio cmol/kg	2,9	1,7	1,0	1,2	1,4	1,5	1,3	1,4	1,5	2,3	
Suma de cationes cmol/kg	16,8	16,1	13,8	14,7	25,3	25,2	21,1	22,8	27,3	33,8	
CIC cmol/kg	19,9	20,1	16,4	18,4	30,0	27,1	26,4	25,1	28,2	41,0	
%SATURACION DE BASES	84,4	80,1	84,1	79,9	84,3	93,1	79,9	90,8	96,8	82,4	
PSI %	1,5	2,0	2,4	1,6	2,0	2,2	1,9	2,0	2,1	1,5	
<b>SAN PEDRO</b>											
Horizonte	A1	A2	BA	BT1	BT2	BC1	BC2	C			
Profundidad (cm)	8-12	18-25	25-37	37-61	61-88	88-105	105-128	128 +			
<b>SALINIDAD</b>											
Conduc. eléc. mS/cm	0,31	0,48	0,60	0,96	0,53	0,48	0,59	0,59			
pH 1:2.5 agua	6,3	7,0	7,3	7,4	7,8	8	7,9	7,9			
<b>FERTILIDAD</b>											
Materia Orgánica %	4,29	3,47	3,24	2,34	1,67	1,17	0,33	0,28			
Carbono Orgánico %	2,49	2,01	1,88	1,36	0,97	0,68	0,19	0,16			
Fósforo asimilable mg/kg	75,3	81,5	154,8	149,5	35,9	34,9	49,8	56,6			
<b>COMPLEJO DE INTERCAMBIO</b>											
Calcio cmol/kg	13,6	15,8	15,8	18,7	17,3	15,6	14,0	15,2			
Magnesio cmol/kg	2,7	2,7	4,1	5,7	4,9	4,5	3,9	3,8			
Sodio cmol/kg	0,3	0,4	0,4	0,3	0,6	0,4	0,5	0,4			
Potasio cmol/kg	3,0	2,8	4,8	5,3	10,1	9,9	9,9	8,8			
Suma de cationes cmol/kg	19,6	21,7	25,1	30,0	32,9	30,4	28,3	28,2			
CIC cmol/kg	23,5	23,0	26,7	36,0	34,6	31,1	30,4	29,4			
%SATURACION DE BASES	83,5	94,4	94,2	83,4	95,1	97,7	93,1	95,9			
PSI %	1,3	1,7	1,5	0,8	1,7	1,3	1,6	1,4			

ARMINDA										
Horizonte	A1	A2	BA	Bt1	Bt2	BC1	BC2	C1	Cx	Ck
Profundidad (cm)	0-6	6-20	20-33	33-58	58-80	80-102	102-121	121-142	142-152	152-172
<b>SALINIDAD</b>										
Conduc. eléc. mS/cm	0,42	0,33	0,38	0,45	0,46	0,54	0,46	0,40	0,29	0,32
pH 1:2.5 agua	6,36	5,94	6,28	6,78	7,16	7,35	7,40	7,40	7,36	7,30
<b>FERTILIDAD</b>										
Materia Orgánica %	3,77	2,54	1,54	1,04	0,76	0,40	0,26	0,25	0,22	0,18
Carbono Orgánico %	2,19	1,47	0,90	0,60	0,44	0,23	0,15	0,14	0,13	0,11
Fósforo asimilable ppm	41,1	16,7	18,0	11,4	17,5	18,6	20,0	20,8	21,8	26,4
<b>COMPLEJO DE INTERCAMBIO</b>										
Calcio cmol/kg	11,3	12,5	14,3	19,1	17,6	17,2	12,5	13,8	13,0	14,0
Magnesio cmol/kg	3,3	2,3	3,5	5,4	6,5	5,6	3,3	3,3	3,4	4,0
Sodio cmol/kg	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6
Potasio cmol/kg	2,0	1,8	1,5	2,0	2,3	2,4	2,0	1,6	1,9	1,9
Suma de cationes cmol/kg	17,1	17,1	19,9	27,1	27,0	25,8	18,3	19,3	18,9	20,5
CIC cmol/kg	19,0	18,0	23,7	28,7	30,1	27,2	22,8	20,7	19,0	20,6
% SATURACION DE BAS	89,8	95,0	84,1	94,3	89,7	94,9	80,3	93,3	99,4	99,4
PSI %	2,6	2,8	2,5	2,1	2,0	2,2	2,2	2,9	3,2	2,9

OLIVEROS										
Horizonte	A1	A2	AB	E/B	Bt1	Bt2	Bt3	BC	Bckb	Ckb
Profundidad (cm)	0-13	13-26	26-44	44-50	50-74	74-94	94-129	129-154	154-189	189-200
<b>SALINIDAD</b>										
Conduc. eléc. mS/cm	0,26	0,21	0,27	0,18	0,41	0,37	0,50	0,38	0,54	0,54
pH 1:2.5 agua	6,42	6,40	6,39	6,25	6,76	7,16	7,24	7,33	7,64	7,98
<b>FERTILIDAD</b>										
Materia Orgánica %	4,34	2,50	1,96	1,56	0,84	0,51	0,39	0,13	0,04	0,08
Carbono Orgánico %	2,52	1,45	1,14	0,91	0,49	0,30	0,23	0,07	0,02	0,05
Fósforo asimilable mg/kg	53,5	25,4	46,8	41,4	13,3	11,4	17,4	25,3	23,4	17,9
<b>COMPLEJO DE INTERCAMBIO</b>										
Calcio cmol/kg	13,5	13,0	12,3	11,1	15,9	14,9	12,7	12,3	12,7	19,8
Magnesio cmol/kg	2,8	3,0	4,5	4,0	5,5	5,7	5,0	4,2	4,9	6,0
Sodio cmol/kg	0,6	0,6	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6
Potasio cmol/kg	1,8	1,4	1,8	1,9	1,3	1,9	2,0	1,9	2,4	1,9
Suma de cationes cmol/kg	18,7	18,0	19,2	17,7	23,5	23,1	20,4	19,1	20,6	28,3
CIC cmol/kg	20,1	21,5	19,2	20,1	27,2	26,3	23,9	22,8	22,7	24,2
% SATURACION DE BAS	93,2	83,6	100,0	88,2	86,4	87,7	85,2	83,9	90,8	116,9
PSI %	3,0	2,8	3,1	3,5	2,9	2,3	2,9	3,1	2,6	2,5

Agua de saturación

CHIVILCOY										
Horizonte	A1	A2	Bt1	Bt2	BC1	BC2	2C			
Profundidad m	0-9	9-30	30-47	47-67	67-82	82-101	101 +			
H2O de saturación	40,26	43,56	47,85	45,87	43,89	39,6	38,28			
LUJAN										
Horizonte	A1	A2	E1	E2	Bt1	Bt2	Bt3	BC1	BC2	2C
Profundidad m	0-9	9-35	35-45	45-55	55-82	82-105	105-125	125-157	157-185	185 +
H2O de saturación	53,1	58,1	44,6	38,3	49,2	48,8	42,2	35,0	37,6	51,5
SAN PEDRO										
Horizonte	A1	A2	BA	BT1	BT2	BC1	BC2	C		
Profundidad (cm)	8-12	18-25	25-37	37-61	61-88	88-105	105-128	128 +		
H2O de saturación	56,76	42,57	42,24	75,24	60,39	59,73	57,09	49,5		
ARMINDA										
Horizonte	A1	A2	BA	Bt1	Bt2	BC1	BC2	C	Cx	Ck
Profundidad (cm)	0-6	6-20	20-33	33-58	58-80	80-102	102-121	121-142	142-152	152-172
H2O de saturación	51,81	42,57	50,49	50,2	47,2	44,9	39,6	38,0	36,63	37,62
OLIVEROS										
Horizonte	A1	A2	AB	E/B	Bt1	Bt2	Bt3	BC1	BCkb	Ckb
Profundidad (cm)	0-13	13-26	26-44	44-50	50-74	74-94	94-129	129-154	154-189	189-200
H2O de saturación	54,45	51,2	43,9	41,3	46,2	41,3	37,95	37,95	37,95	43,9

## Humedad equivalente

<b>Chivilcoy</b>			<b>Luján</b>		
<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>H. E. (%)</i>	<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>H. E. (%)</i>
A1	0-9 cm	23,16	A1	0-9 cm	19,72
A2	9-30 cm	18,55	A2	9-35 cm	19,96
Bt1	30-47cm	20,65	E1	35-45 cm	17,97
Bt2	47-67 cm	19,96	E2	45-55 cm	19,36
BC1	67-82 cm	16,08	Bt1	55-82 cm	27,43
BC2	82-101 cm	14,08	Bt2	82-105 cm	34,46
2C	101 o más	12,02	Bt3	105-125 cm	29,76
<b>San Pedro</b>			BC1	125-157 cm	23,15
<i>Horizonte</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>H. E. (%)</i>	BC2	157-185 cm	31,69
A1	8-12 cm	27	2C	185 a +	23,48
A2	18-23 cm	27,68	<b>Arminda</b>		
BA	25-37 cm	29,76	<i>Horizontes</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>H. E. (%)</i>
Bt1	37-61 cm	41,64	Ap	0 a 6 cm	25,87
Bt2	61-88 cm	40,52	A1	6 a 20 cm	23,52
BC1	88-105 cm	35,71	BA	20 a 33 cm	25,49
BC2	105-128 cm	33,24	Bt1	33 a 58 cm	32,93
C	128 cm a +	31,67	Bt2	58 a 80 cm	33,42
<b>Oliveros</b>			BC1	80 a 102 cm	30,90
<i>Horizontes</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>H. E. (%)</i>	BC2	102 a 121 cm	25,65
A1	0 a 13 cm	26,31	C	121 a 142 cm	25,64
A2	13 a 26 cm	24,21	Cx	142 a 152 cm	21,24
AB	26 a 44 cm	25,86	Ck	152 a 172 cm	23,01
E/B	44 a 50 cm	26,83			
Bt1	50 a 74 cm	33,02			
Bt2	74 a 94 cm	31,12			
Bt3	94 a 129 cm	29,71			
BC	129 a 154 cm	27,36			
BCKb	154 a 189 cm	27,82			
Ck	189 a 200 cm	34,04			

Densidad aparente, porosidad total, capacidad de campo y punto de marchitez permanente

<b>Chivilcoy</b>					
<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Dap(g/cm3)</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>PT 1-(Dap/Dp)</b>
A2	15	1,36	14,3	34,6	48,74
Bt	35	1,27	15,4	33,8	51,89
BC1	70	1,32	11,9	31,7	50,03
2C	105	1,26	9,3	38,8	52,56
<b>San Pedro</b>					
<b>Horizonte</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Dap(g/cm3)</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>PT 1-(Dap/Dp)</b>
A1	15	1,33	17,3	31,0	49,66
BA	25	1,28	20,5	35,8	51,72
Bt	50	1,32	31,6	46,6	50,33
BC1	95	1,28	25,5	37,3	51,85
C	140	1,24	21,0	41,8	53,3
<b>Luján</b>					
<b>Horizontes</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Dap g/cm3</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>PT 1-(Dap/Dp)</b>
A2	15	1,26	12,94	32,0	52,58
E1	42	1,35	12,90	33,0	49,13
Bt1	65	1,44	22,66	40,5	45,55
BC1	140	1,30	21,50	38,5	51,12
2C	185	1,13	24,68	39,5	57,38
<b>Arminda</b>					
<b>Horizontes</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Dap g/cm3</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>PT 1-(Dap/Dp)</b>
A	13	1,293	13,4	29,7	51,22
BA	27	1,357	18,6	32,9	48,78
Bt1	45	1,315	30,1	42,0	50,38
BC	91	1,282	20,4	32,6	51,63
C	131	1,154	13,8	26,1	56,44
<b>Oliveros</b>					
<b>Horizontes</b>	<b>Profundidad (cm)</b>	<b>Dap g/cm3</b>	<b>PMP (%)</b>	<b>CC (%)</b>	<b>PT 1-(Dap/Dp)</b>
A2	20	1,22	13,63	34,55	53,86
AB	35	1,31	14,46	35,55	50,41
Bt1	62	1,40	28,12	48,19	47,04
Bt3	112	1,20	20,04	41,28	54,65
BCkb	172	1,29	16,55	37,57	51,2



Conductividad hidráulica saturada

<b>Chivilcoy</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Kh (cm/h)</b>	<b>San Pedro</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Kh (cm/h)</b>
A2	15	2,20	A1	15	0,21
Bt	35	3,14	BA	25	0,15
BC1	70	6,68	Bt	50	0,00
2C	105	7,78	BC1	95	0,36
			C	140	9,79
<b>Luján</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Kh (cm/h)</b>	<b>Arminda</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Kh (cm/h)</b>
A2	15	5,73	A	5	6,61
E1	42	22,24	BA	20	54,10
Bt1	65	2,48	BT1	41	0,00
2C	185	25,95	BC	85	5,30
			C	130	1,92
<b>Oliveros</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Kh (cm/h)</b>			
A2	13	3,18			
AB	30	0,92			
Bt1	55	0,50			
Bt3	105	5,80			
BCkb	165	2,08			