



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CULTIVO DE SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.) SOBRE
INDICADORES EDÁFICOS Y PRODUCTIVOS EN TIERRAS DESMONTADAS EN EL
SECTOR SUR DEL DEPARTAMENTO ALMIRANTE BROWN, PROVINCIA DEL CHACO**

ASTOR EMILIO LÓPEZ

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN MANEJO Y
CONSERVACIÓN DE RECURSOS NATURALES**

DIRECTOR: Ing. Agr. Dr. SERGIO MONTICO

2018

**ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CULTIVO DE SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.) SOBRE
INDICADORES EDÁFICOS Y PRODUCTIVOS EN TIERRAS DESMONTADAS EN EL
SECTOR SUR DEL DEPARTAMENTO ALMIRANTE BROWN, PROVINCIA DEL CHACO**

ASTOR EMILIO LÓPEZ

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Rosario - 1993

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el sector sur del Departamento Almirante Brown, Provincia del Chaco, durante el período comprendido entre mayo de 2013 y noviembre de 2018, bajo la dirección del Dr. Sergio Montico.

Nombre y firma del Maestrando

Nombre y firma del Director

Defendida:de 20__.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, por el aporte económico, la disponibilidad de su infraestructura y colaboración del personal, que posibilitó la realización de la maestría.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario por su apoyo para contribuir a mi formación profesional. A su personal docente y administrativo, que estuvieron siempre presentes.

A mi director de tesis, Dr. Sergio Montico, por su confianza en mí, por sus consejos, sugerencias y guía en este emprendimiento; y un agradecimiento especial a la Ing. Florencia Roldán por su colaboración y contribuciones para la ejecución de este trabajo.

A mis compañeros del Grupo de trabajo: “Inventario y Evaluación de Tierras de la Provincia del Chaco” del INTA EEA Sáenz Peña, por el apoyo y la buena predisposición prestada.

A la Dra. Laura Giménez por sus enseñanzas y responder siempre ante todas mis consultas estadísticas.

A los compañeros y amigos logrados durante la maestría, que enriquecieron cada curso con sus experiencias y buena compañía.

Al Ing. Pablo Carignano por su colaboración y asesoramiento en todas las etapas de esta tesis.

A los productores agropecuarios y sus asesores que permitieron el ingreso a sus campos para el muestreo y determinaciones, y me brindaron la información necesaria para la elaboración de este trabajo.

A todos, muchas gracias!

DEDICATORIAS

A mi madre, Suchy, por creer siempre en mí, por su apoyo incondicional, por sus enseñanzas, por estimular el deseo de superación y por todos los esfuerzos realizados en pos de mi formación.

A la memoria de mi padre, Juan, por inculcarme el amor por el campo que me acercó a esta profesión.

A mi hermana María Rita, por su permanente compañía y apoyo absoluto, a pesar de la distancia.

A mi esposa Magui y mis hijos, Fabricio e Iván,

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
SIGLAS Y ABREVIATURAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.1 EVALUACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS Y PRODUCTIVAS	14
2.2 DISEÑO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	26
2.2.1 Análisis de la Varianza	26
2.2.2 Análisis de correlación	27
2.2.3 Análisis multivariado	27
2.3 SISTEMA AUTOMATIZADO DE EVALUACIÓN DE TIERRAS (ALES)	28
2.3.1 Objetivo del modelo experto	29
2.3.2 Requisitos del uso de la tierra	30
2.3.3 Definición de las unidades de tierra	30
2.3.4 Características de las tierras	32
2.3.5 Cualidades de la tierra	33
2.3.6 Definición de los RUT	34
2.3.6.1 Condición para el almacenaje hídrico (CAH)	35
2.3.6.2 Condiciones para el enraizamiento (CEn)	36
2.3.6.3 Anclaje radicular (AR)	37
2.3.6.4 Resistencias mecánicas (RM)	38
2.3.6.5 Disponibilidad hídrica (DH)	39
3. RESULTADOS	42
3.1 VARIABLES EDÁFICAS Y PRODUCTIVAS	42
3.1.1 Densidad aparente	42
3.1.2 Resistencia mecánica a la penetración	45
3.1.3 Carbono orgánico total	50

3.1.4 Nitrógeno total	54
3.1.5 Fósforo extraíble	58
3.1.6 Potencial Hidrógeno	61
3.1.7 Conductividad eléctrica	63
3.1.8 Infiltración básica	65
3.1.9 Estabilidad estructural	67
3.1.10 Rendimientos	70
3.2 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN	70
3.3 ANÁLISIS MULTIVARIADO	71
3.3.1 Análisis de componentes principales para el espesor de 0 a 10 cm	71
3.3.2 Análisis de componentes principales para el espesor de 10 a 20 cm	74
3.4 SISTEMA EXPERTO DE EVALUACIÓN DE TIERRAS	77
3.4.1 Características de las unidades de tierras	77
3.4.2 Clasificación de Tierras para cultivo de soja en SD	79
4. DISCUSIÓN	81
5. CONCLUSIONES	90
6. BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXO I - Descripciones de las Series de suelos evaluadas	106
ANEXO II - Fotografías del muestreo de suelos y determinaciones a campo y laboratorio.	119
ANEXO III - Capturas de pantallas del Modelo experto de simulación - ALES	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de georreferencia que delimitan el área de estudio.	11
Tabla 2. Precipitaciones medias (mm) registradas en Pampa del Infierno y 30 Km al Norte; a) Período 2006 a 2013, b) Año 2012, c) Año 2013, d) Campaña 2012/2013.	12
Tabla 3. Tratamientos evaluados (T1 a T12), integrando Series de suelos (Tolosa, Luz, Pampa y Avía Terai) con condiciones de uso (bosque, un año de cultivo y seis años de monocultivo de soja).	17
Tabla 4. Clases de resistencia a la penetración.	20
Tabla 5. Escala clasificatoria orientativa de COT (Walkle & Black).	21
Tabla 6. Escala clasificatoria orientativa de N total (Kjeldahl)	22
Tabla 7. Escala clasificatoria orientativa de P extractable (ppm o mg.kg ⁻¹).	22
Tabla 8. Escala clasificatoria orientativa de pH actual (1:2,5).	23
Tabla 9. Escala clasificatoria orientativa de CE (1:2,5).	23
Tabla 10. Requerimientos del cultivo de soja para rendimientos óptimos.	30
Tabla 11. Unidades de tierras evaluadas en el modelo de simulación.	31
Tabla 12. Clases y límites de las características de la tierra (CAT) utilizadas en el ALES.	33
Tabla 13. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a la Condición de almacenaje hídrico de la tierra.	35
Tabla 14. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a las Condiciones para el enraizamiento.	37
Tabla 15. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente al anclaje radicular de la tierra.	38
Tabla 16. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a las Resistencias mecánicas de la tierra.	39
Tabla 17. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a la DH.	40
Tabla 18. Densidad aparente (DA; g.cm ⁻³) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados, independientemente de los espesores.	44
Tabla 19. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) y coeficiente de variación (CV%) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm.	48
Tabla 20. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) y coeficiente de variación (CV%) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm.	49
Tabla 21. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) y coeficiente de variación (CV %) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm.	52
Tabla 22. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm.	53
Tabla 23. Concentración de Nitrógeno total (N; %) y coeficiente de variación (CV; %) de los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm.	56
Tabla 24. Concentración de Nitrógeno total (N; %) y coeficiente de variación (CV; %) de los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm.	57
Tabla 25. Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores.	60

Tabla 26. Valor medio del potencial hidrógeno (pH) y coeficiente de variación (CV; %) de los tratamientos (T1 a T12), evaluados en el espesor de 0 - 20 cm.	62
Tabla 27. Conductividad eléctrica (CE; dS.m ⁻¹) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores.	64
Tabla 28. Infiltración básica (INF; cm.h ⁻¹) y coeficiente de variación (CV; %) correspondientes a los 12 tratamientos evaluados.	66
Tabla 29. Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) de los agregados en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores.	69
Tabla 30. Rendimientos (kg.ha ⁻¹) y coeficiente de variación (CV; %) en los ocho tratamientos evaluados.	70
Tabla 31. Matriz de correlación de las variables estudiadas.	70
Tabla 32. Descomposición de la variabilidad por componentes principales para 0 - 10 cm.	71
Tabla 33. Correlación entre variables y las tres CP para 0 - 10 cm.	72
Tabla 34. Descomposición de la variabilidad por componente principales para 10 - 20 cm.	74
Tabla 35. Correlación entre variables y las 3 CP para 10 - 20 cm.	75
Tabla 36. Características de la tierra (CaT) de las Unidades de tierra (UT) evaluadas.	78
Tabla 37. Clasificación de la aptitud y rendimientos de las unidades de tierras calculadas por el ALES con los valores de cada una de las cualidades.	79
Tabla 38. Datos de un perfil representativo de la Serie Tolosa.	109
Tabla 39. Datos de un perfil representativo de la Serie: Luz.	112
Tabla 40. Datos de un perfil representativo de la Serie Pampa.	115
Tabla 41. Datos de un perfil representativo de la Serie Avía Terai.	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Recorte de imagen satelital del sector sur del Departamento Almirante Brown de 1987. En tonos rojizos, el bosque nativo, surcado por gran cantidad de paleocauces o ríos muertos con sentido noroeste-sureste. En colores claros, aperturas en el bosque, especialmente en el sureste, destinadas a uso agrícola.	3
Figura 2. Recorte de imagen satelital del sector sur del Departamento Almirante Brown de julio de 2018. En tonos oscuros, el bosque nativo fragmentado, en una matriz de damero las cortinas forestales exigidas la reglamentación de la ley provincial de bosques. En colores claros áreas destinadas a la producción agropecuaria y en anaranjado, cereales de invierno.	4
Figura 3. Ubicación del área de estudio al sur del Departamento Almirante Brown (Chaco), e identificación de las localidades comprendidas.	11
Figura 4. a) Isohietas e isotermas; b) Relieve y pendiente; c) Material originario; d) Mapa taxonómico de los suelos.	13
Figura 5. Esquema de los perfiles modales (horizontes y profundidades) de las Series de suelos Tolosa (To), Luz (Lj), Pampa (Pt) y Avía Terai (Ak), indicando su clasificación taxonómica y aptitud de uso	15
Figura 6. Ubicación de los establecimientos relevados sobre el plano catastral.	16
Figura 7. Estaciones de evaluación a) en tratamientos con bosque, b) en tratamientos con cultivo de soja.	17
Figura 8. Recorte de imagen satelital de uno de los establecimientos relevados con las unidades cartográficas del mapa de suelos y las estaciones de muestreo.	18
Figura 9. Esquema de un penetrómetro de impacto con punta cónica.	20
Figura 10. Permeámetros de disco.	24
Figura 11. Diagrama del proceso de evaluación propuesto por FAO utilizando el software ALES.	29
Figura 12. Representación del modelo desarrollado según ALES para evaluar la aptitud de tierras para el cultivo de soja bajo SD.	41
Figura 13. Densidad aparente (DA; g.cm ⁻³) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año (1S) y seis años (6S) de cultivo de soja, independientemente de los espesores.	43
Figura 14. Densidad aparente (DA; g.cm ⁻³) para los tres espesores estudiados.	44
Figura 15. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) en el espesor 0 - 10 cm.	46
Figura 16. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) en el espesor 10 - 20 cm.	47
Figura 17. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) para los dos espesores estudiados.	47
Figura 18. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 0 - 10 cm.	50
Figura 19. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 10 - 20 cm.	51
Figura 20. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) para los dos espesores estudiados 0 - 10 y 10 - 20 cm.	52

Figura 21. Concentración de Nitrógeno total (N; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 0 - 10 cm.	55
Figura 22. Concentración de Nitrógeno total (N; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 10 - 20 cm.	55
Figura 23. Concentración de Nitrógeno total (N; %) para los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm.	56
Figura 24. Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) independientemente de los espesores.	59
Figura 25. Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) para los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm.	59
Figura 26. Potencial hidrogeno (pH) de los suelos bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año (1S) y seis años (6S) de cultivo de soja, independientemente de los espesores.	61
Figura 27. Conductividad eléctrica (CE; dS.m ⁻¹) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año (1S) y seis años (6S) de cultivo de soja, independientemente de los espesores.	63
Figura 28. Conductividad eléctrica (CE; dS.m ⁻¹) para los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la CE entre los espesores.	64
Figura 29. Infiltración básica (Infiltración; cm.h ⁻¹) de los suelos bajo las condiciones uso bosque (Bo), un año (1S) y 6 años (6S) de cultivo de soja.	66
Figura 30. Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) de los agregados bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) independientemente de los espesores.	68
Figura 31. Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) para los espesores estudiados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el CDMP entre los espesores.	68
Figura 32. Biplot de las variables (0 - 10 cm).	72
Figura 33. Elipses de confianza en torno a los tratamientos en suelos con bosques (Bo), un año de cultivo de soja (1S) y seis años de monocultivo de soja (6S) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.	72
Figura 34. Elipses de confianza en torno a las Series de suelos To (Tolosa), Lj (Luz), Pt (Pampa) y Ak (Avía Terai) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.	73
Figura 35. Elipses de confianza en torno a los tratamientos (T1 a T12) evaluados en el plano principal formado por las CP 1 y CP 2.	74
Figura 36. Biplot de las variables (10 - 20 cm).	75
Figura 37. Elipses de confianza en torno a los tratamientos en suelos con bosques (Bo), un año de cultivo de soja (1S) y seis años de monocultivo de soja (6S) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.	75
Figura 38. Elipses de confianza en torno a las Series de suelos To (Tolosa), Lj (Luz), Pt (Pampa) y Ak (Avía Terai) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.	76
Figura 39. Elipses de confianza en torno a los tratamientos evaluados en el plano principal formado por las CP1 y CP2.	77

SIGLAS Y ABREVIATURAS

<u>Sigla/abreviatura</u>	<u>Significado</u>	<u>Unidad</u>
1S	Tratamientos en suelos con un año de cultivo de soja	--
6S	Tratamientos en suelos con seis años de cultivo de soja	--
A	Tierras aptas	--
ACP	Análisis de componentes principales	--
Ak	Serie Avía Terai	--
ALES	Sistema automatizado de evaluación de tierras	--
AR	Anclaje radicular	--
Bo	Tratamientos en suelos con bosque	--
CAH	Condiciones para el almacenaje hídrico	--
CaT	Características de la tierra	--
CC	Capacidad de campo	--
CDMP	Cambio del diámetro medio ponderado	mm
CE	Conductividad eléctrica	dS.m ⁻¹
CEn	Condiciones para el enraizamiento	--
COP	Carbono orgánico particulado	%
COT	Carbono orgánico total	%
CP	Componentes principales	--
CuT	Cualidades de la tierra	--
CV	Coeficiente de variación	%
D	Déficit	--
DA	Densidad aparente	g.cm ⁻³
DAS	Dinámica del agua del suelo	--
DH	Disponibilidad hídrica	--
DMP	Diámetro medio ponderado	mm
DMPH	Diámetro medio ponderado de los agregados en húmedo	mm
DMPS	Diámetro medio ponderado de los agregados en seco	mm
E	Precipitación anual superior a la media	--
EEA	Estabilidad estructural de los agregados	--
EER	Espacio para la exploración radicular	--
ES	Estructuración superficial	--
Est.	Estaciones de muestreo	--

IC	Índice de cono	--
IM	Impedancias mecánicas	--
INF	Infiltración básica	cm.h ⁻¹
Lj	Serie Luz	--
M	Media	--
MdA	Tierras moderadamente aptas	--
MgA	Tierras marginalmente aptas	--
Moder.	Moderadamente	--
N	Nitrógeno total	%
NA	Tierras no aptas	--
P	Fósforo extraíble	ppm
PA	Precipitaciones anuales	--
pH	Potencial Hidrógeno	--
ppm	Partes por millón	--
Pss	Peso seco del suelo	g
Pt	Serie Pampa	--
RM	Resistencias mecánicas	--
RMP	Resistencia mecánica a la penetración	MPa
RUT	Requerimientos del tipo de utilización de la tierra	--
S	Sequía	--
Sup.	Superior	--
SD	Siembra Directa	---
To	Serie Tolosa	--
Trat.	Tratamientos	--
TUT	Tipo de utilización de la tierra	--
UT	Unidades de tierra	--
Vs	Volumen del suelo	--

ESTUDIO DEL IMPACTO DEL CULTIVO DE SOJA (*Glycine max* (L.) Merr.) SOBRE INDICADORES EDÁFICOS Y PRODUCTIVOS EN TIERRAS DESMONTADAS EN EL SECTOR SUR DEL DEPARTAMENTO ALMIRANTE BROWN, PROVINCIA DEL CHACO

RESUMEN

El proceso de agriculturización, dado en la Argentina en los años 80 del spp, se caracterizó por el predominio del monocultivo de soja, bajo labranza convencional, en reemplazo de otros cultivos, lo cual derivó en la progresiva degradación del recurso suelo. En la Prov. del Chaco, principalmente al oeste, este proceso se intensificó en los últimos años, a expensas del reemplazo del bosque nativo por el monocultivo de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), bajo siembra directa (SD).

El clima chaqueño, con régimen de precipitaciones muy variable y alta evapotranspiración, influye marcadamente en el desarrollo de los cultivos. El cambio de uso del suelo, sumado a la baja producción de materia seca del cultivo de soja, generaron alteraciones en los atributos edáficos, siendo prioritario su conocimiento y cuantificación, a través de indicadores que permitan evaluar los diferentes estados y tendencias.

Los objetivos de este trabajo fueron evaluar variables físicas, químicas y productivas de diferentes suelos, recientemente desmontados, que permitieran generar información sobre el impacto del monocultivo de soja sobre éstos, y crear un modelo de simulación para optimizar la toma de decisiones en la expansión de la frontera agropecuaria, teniendo en cuenta la sustentabilidad del recurso suelo. Para cumplir con los objetivos, se establecieron doce tratamientos integrando cuatro Series de suelos, representativas del sector sur del departamento Almirante Brown (Chaco), con tres condiciones de uso: bosques, un año y seis años de cultivo de soja. La evaluación del estado actual de los suelos, se determinó mediante la densidad aparente (DA) en los espesores 0 - 5, 5 - 10 y 10 - 20 cm y, en los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm se evaluaron los indicadores: resistencia mecánica a la penetración (RMP), carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (N), fósforo asimilable (P), potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), infiltración básica (INF) y estabilidad estructural de los agregados (EEA). Las variables productivas, se definieron a través de los rendimientos del cultivo de soja, relevados en las encuestas realizadas a los productores agropecuarios, de la campaña 2012/2013. El análisis de los datos de las variables estudiadas se realizó a través de Análisis de la Varianza y multivariado. El modelo de simulación para la evaluación de tierras, se efectuó aplicando la metodología de FAO, mediante el uso del software ALES, confrontando las características de las tierras con uno y seis años de cultivo, expresadas como cualidades, frente a los requerimientos del cultivo de soja bajo SD y en cuatro situaciones de abastecimiento hídrico.

DA y RMP se incrementaron cuando los suelos se destinaron a la producción de soja, siendo luego de seis años donde se detectaron los valores más altos, sin embargo, estas variables fueron diferentes entre tratamientos. Las concentraciones de COT y N, disminuyeron con el cambio de uso y el monocultivo en ambos espesores. Sin embargo, en el espesor subsuperficial, luego de un año de producción, los contenidos de N aumentaron, lo cual estaría vinculado a la mineralización de la materia orgánica. Por otra parte, todos los suelos estudiados estuvieron muy bien provistos de P, siendo las concentraciones significativamente mayores luego de un año de cultivo, disminuyendo éstas, después de seis años de monocultivo. El cambio de uso, además de un aumento del pH, de levemente ácido a neutro, produjo un aumento de la CE, atribuido posiblemente, al igual que el aumento de P, a la presencia de cenizas provenientes de la quema de la vegetación remanente posterior al aprovechamiento de la madera. Después de seis años de monocultivo, la CE disminuyó a valores próximos a los encontrados en tratamientos con bosques, posiblemente debido al lavado de las sales solubles. No obstante, en todos los casos, los suelos son clasificados por su CE como no salinos. Las mediciones de INF realizadas, no permitieron determinar diferencias significativas entre condiciones de uso, sin embargo, se observaron discrepancias importantes entre tratamientos que incidirían en la disponibilidad de agua para los cultivos. La EEA, mostró una marcada disminución al año de cultivo, debido probablemente, al gran disturbio ocasionado en el suelo, por las tareas de habilitación. Asimismo, luego de 6 años de cultivo, hubo diferencias entre tratamientos que podrían asociarse, en parte, a las concentraciones originales de COT. Los rendimientos, en el período analizado, estuvieron por debajo de la media zonal, debido principalmente a las escasas precipitaciones, no existiendo diferencias significativas entre los tratamientos.

Al analizar, las relaciones entre los indicadores edáficos y su evolución en el tiempo, se corroboró que los suelos poseen diferente susceptibilidad a la degradación, fundamentalmente por cambios en los atributos que acentúan la manifestación de impedancias mecánicas en los espesores estudiados. Sin embargo, los rendimientos de los cultivos, respondieron principalmente a las condiciones meteorológicas prevalecientes en la campaña evaluada, que a las diferencias edáficas encontradas. Por otra parte, se obtuvo un modelo de simulación de evaluación de tierras, que permite predecir la aptitud de uso y los rendimientos del cultivo de soja, en base a los indicadores estudiados, en distintos escenarios climáticos. Los resultados obtenidos, marcaron la importancia de considerar las Series de suelo y sus características morfológicas, en la evaluación de indicadores de suelo y, antes de tomar decisiones sobre el cambio de uso de este recurso.

Palabras Clave: aptitud de uso - desmonte - evaluación de tierras - modelo de simulación - Series de suelo - soja

THE IMPACT OF SOYBEAN CROPPING ON SOIL AND PRODUCTIVITY INDICATORS AFTER FOREST CLEARING, IN THE SOUTHERN SECTOR OF THE ALMIRANTE BROWN DEPARTMENT, IN CHACO PROVINCE.

SUMMARY

In Argentina, the advance of agriculture frontier process was characterized by soy monoculture, which in Chaco occupied native forest areas. The work evaluates the impact of soybean (*Glycine max* (L.) Merr), in soil variables and yield in cleared areas. The work was developed in Almirante Brown department (Chaco) on four soil series under three conditions of use: forest, one and six years of soybean cultivation. Bulk density, penetration resistance, organic carbon, nitrogen, phosphorus, pH, electrical conductivity, infiltration and structural stability were determined. The yields were obtained through surveys. An analysis of variance and multivariate were performed. The land evaluation was carried out using the FAO methodology, through ALES software. It was determined that the soils have different susceptibility to degradation, based mainly on mechanical impedances. The yields were more related to climatic conditions than to the soil characteristics. A simulation model was obtained that allow predicting the aptitude of use and the yields based on the indicators studied in different climatic scenarios. It is necessary to contemplate the soil series to compare indicators between uses and the characteristics of each soil should be considered to take decisions about use change.

Key Words: aptitude of use - clearing - land evaluation - simulation model - soil series - soybean -

1. INTRODUCCIÓN

En la Argentina, la agriculturización se caracterizó, a partir de la década del 80 del siglo pasado, por un creciente predominio de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) en monocultivo en reemplazo de otros cultivos. Inicialmente ocurrió en sistemas convencionales de labranza, caracterizados por la remoción del suelo y la escasa o nula permanencia de rastrojos en superficie (Paruelo et al., 2004). El predominio de este manejo por más de tres décadas derivó en la degradación del recurso suelo, principalmente por la pérdida de la fertilidad física, alteraciones en los procesos biológicos, disminución del carbono orgánico y la disponibilidad de nutrientes, cambio en la estructura del suelo e incremento del escurrimiento superficial (Rojas et al., 2016; Wilson, 2017). Hacia fines de la década de los 80, los sistemas fueron evolucionando hacia los llamados conservacionistas, dentro de los cuales el sistema siembra directa (SD), caracterizado por el no laboreo, es actualmente el de mayor adopción en el país (Campitelli et al., 2010; Volante et al., 2014).

El cambio de uso de los suelos de bosques, que actualmente se da en Argentina, está dado por el avance de la frontera agrícola y ganadera hacia el centro y norte del país, en la ecorregión Gran Chaco, y llega hasta Paraguay y Bolivia. Los resultados de esta expansión derivan en ecosistemas afectados como “el bosque de tres quebrachos”, en las provincias de Chaco y Santiago del Estero, y la zona de transición entre las regiones Chaco y Yungas, en Salta (Torrella, 2014). Este proceso de agriculturización, en la provincia del Chaco, principalmente en el oeste, ocurrió con mayor intensidad en las últimas dos décadas, a expensas del bosque nativo, (Paruelo et al., 2004; Cuadra, 2012; García et al., 2014a; Cuadra y Mónaca, 2016). Precisamente, fue en estos años cuando el cultivo de soja se constituyó en el eje de la economía argentina, en tanto resulta ser su principal fuente de divisas. Una causal significativa de esta expansión fue el *boom* de los precios de la soja de la primera década del 2000, sumada a la existencia de un favorable contexto nacional, dado que la soja no es parte de la canasta alimentaria argentina. Entonces, su comercialización, en el mercado internacional no compite con el abastecimiento del mercado interno y su potencial suba de precios no afecta la canasta familiar de alimentos (Manzanal, 2017).

El clima de la provincia del Chaco, especialmente en su parte septentrional es, sin duda alguna, el más caluroso del país. El valor medio más alto del mes de enero, en algunos años, superó los 28°C y la máxima media de 36°C. Las precipitaciones disminuyen de Este a Oeste, desde la confluencia Paraguay-Paraná, donde alcanzan un máximo aproximado de 1.300 mm, hasta el extremo noroeste con algo menos de 500 mm. La principal característica del régimen de precipitaciones es la gran variabilidad anual e interanual que, junto con la alta

evapotranspiración, influyen notoriamente en el desarrollo de los cultivos (Ledesma y Zurita, 1995a).

La base de la producción agrícola de la provincia del Chaco corresponde a los cultivos de algodón, soja, girasol, maíz, sorgo, trigo y arroz, la que se modifica a través de los años como consecuencia de la evolución de los precios relativos de los productos y el margen neto de las diferentes actividades (Cuadra y Mónaca, 2016). Esta situación, más la variabilidad climática, que en los últimos años ha marcado un incremento de las precipitaciones medias anuales, el desarrollo genético de nuevas variedades y los avances observados en la tecnología de siembra, manejo y protección de los cultivos, produjo, como antes se mencionara, un avance de la frontera agrícola hacia el oeste y generó un notorio incremento del área cultivada (Olivares y Mansilla, 2010; Heredia, 2017).

Aunque se inscribe en una tendencia de larga data, la expansión de la frontera agrícola en el Chaco propiciada por la soja avanzó sobre el bosque nativo agudizando el proceso de deforestación. La Ley Nacional de bosques y los controles provinciales han regulado el proceso sin revertirlo de manera significativa (Heredia, 2017). La superficie de cultivos anuales se ha incrementado sobre las tierras ocupadas por bosques, pastizales naturales, y pasturas implantadas (Sobral, 2009). La tendencia agrícola actual está dirigida a la sustitución de los remanentes del bosque. La inserción y avance territorial de la soja en el sector chaqueño se vio beneficiada por las sucesivas etapas de crisis que ha manifestado el monocultivo algodonero como resultado de las oscilaciones de precios, las consecuencias climáticas (sequías e inundaciones) y el gran endeudamiento en el que se encontraban inmersos los pequeños productores. Los suelos de las colonias agrícolas son en la actualidad los más deteriorados debido a un largo proceso de erosión, monocultivo del algodón y algunas prácticas no adecuadas de manejo de los suelos. Esto lleva a muchos productores a habilitar nuevas tierras para la agricultura, a través del desmonte, lo cual acentúa el problema ecológico, asimismo, se debe mencionar la introducción de nuevas tecnologías aplicadas al cultivo sojero y la inversión de capitales extraregionales especialmente en el oeste provincial (Pértile y Moreno, 2005; Torre Geraldí, 2005; Heredia, 2017).

El sector sur del Departamento Almirante Brown, ubicado en el suroeste del “Impenetrable Chaqueño”, constituye el área de la Provincia del Chaco con mayor dinamismo en las transformaciones de los sistemas productivos y de mayor afectación en la fragmentación del paisaje natural, produciéndose un avance de la frontera agrícola hacia el oeste. Este proceso se extendió desde fines de la década de 1980 (Figura 1) y continúa hasta la actualidad (Figura 2). Los suelos dominantes en albardones de cauces abandonados o ríos muertos, son de texturas medias (francos limosos), con alta susceptibilidad a la erosión hídrica

y/o eólica. Los suelos de los paleocauces, de textura arenosa, y aptitud marginal para agricultura constituyen los focos de erosión eólica que muestran un significativo avance de los procesos de degradación y pérdida de suelos. En las lomas medias bajas tendidas, con vegetación de bosque bajo abierto (ralera), los suelos son pobres en materia orgánica, con síntomas de erosión hídrica moderada y con limitaciones por drenaje. La vegetación natural de bosque alto abierto está siendo fragmentada por el proceso de agriculturización, especialmente potenciado por el cultivo de soja, y en menor medida girasol, sorgo y algodón. El parcelamiento de la tierra es muy denso en la Colonia de Pampa del Infierno, y menos concentrada en el resto de la zona (Zurita et al., 2010a).

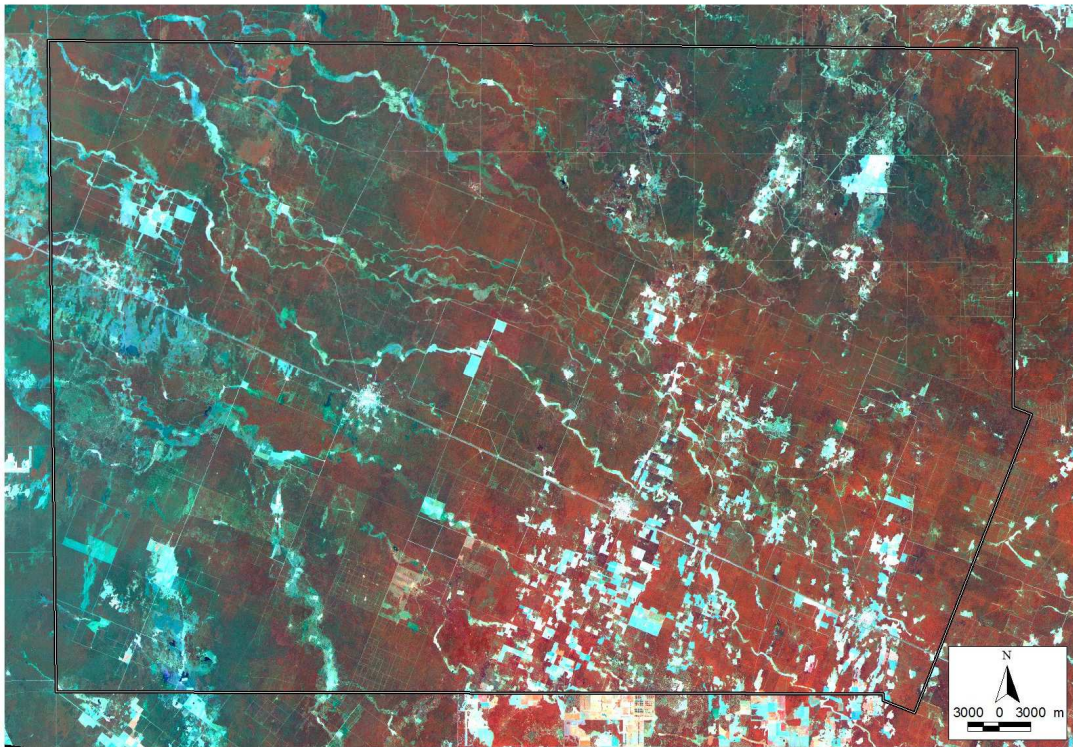


Figura 1. Recorte de imagen satelital del sector sur del Departamento Almirante Brown de 1987. En tonos rojizos, el bosque nativo, surcado por gran cantidad de paleocauces o ríos muertos con sentido noroeste-sureste. En colores claros, aperturas en el bosque, especialmente en el sureste, destinadas a uso agrícola.

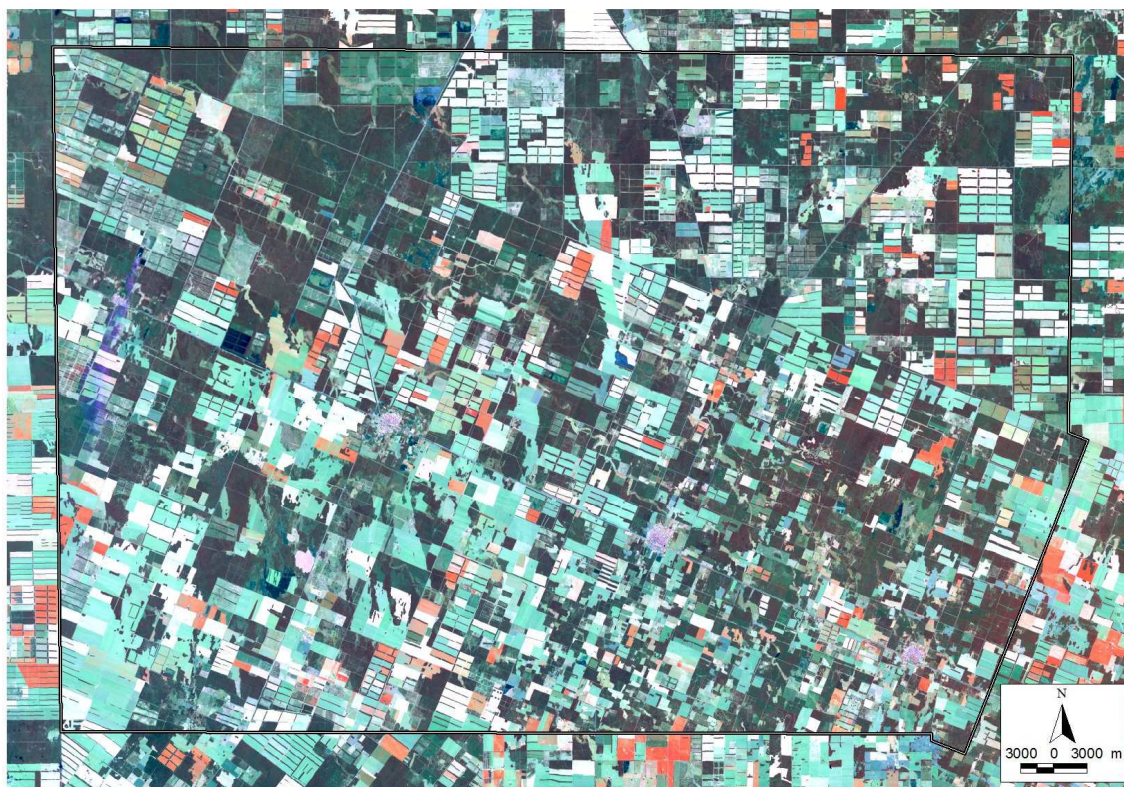


Figura 2. Recorte de imagen satelital del sector sur del Departamento Almirante Brown de julio de 2018. En tonos oscuros, el bosque nativo fragmentado, en una matriz de damero las cortinas forestales exigidas la reglamentación de la ley provincial de bosques. En colores claros áreas destinadas a la producción agropecuaria y en anaranjado, cereales de invierno.

El proceso de desmonte y habilitación de tierras para uso agrícola más difundido en la región está diferenciado en varias etapas. Inicialmente, se debe contar con la correspondiente autorización de la Dirección de Bosques de la Provincia del Chaco, debido a que toda intervención en bosques nativos debe encontrarse sujeta a algún instrumento de planificación, tal como está establecido en la Ley Nacional N° 26.331 y la Ley Provincial N° 6.409. Las categorías de conservación imponen ciertas restricciones en el uso de los bosques nativos, limitando o prohibiendo algunas actividades. Los distintos tipos de planes prescriben las actividades a realizar en las distintas categorías de conservación. El sector sur del Departamento Almirante Brown se encuentra en la Categoría III, verde, donde se puede aplicar el Plan de Cambio de Uso del Suelo, que posibilita la expansión de la frontera agrícola. Una vez obtenido el permiso de cambio de uso del suelo mediante la elaboración de planes de trabajo, que incluyen inventario forestal, aptitud de los suelos, y estudio de impacto ambiental (Boletín Oficial de Chaco, 2018), se inicia el proceso de desmonte y habilitación de tierras. El mismo consiste en tareas de rolado, en general, en invierno, las que aplastan y trituran la vegetación nativa con una herramienta denominada rolo, que es un cilindro metálico hueco, lastrado con agua, generalmente acompañado de cajón sembrador para la siembra de

pasturas megatérmicas. En este proceso, los individuos de mayor porte son derribados con la pala de la topadora. Los rolados intensivos, realizados con grandes maquinarias, provocan gran impacto en el suelo y en la vegetación nativa, por lo que no son recomendables (Coria et al., 2017). A continuación se efectúa el aprovechamiento de la madera, mediante la separación de los fustes, los que posteriormente son transportados para su comercialización. Se prosigue con la extracción de restos no aprovechables como ramas y tocones, se efectúan tareas de eliminación de restos con fuego, aprovechando el material combustible de la pastura sembrada durante las operaciones de rolado, dando previo aviso a las autoridades competentes y, finalmente, se realizan labranzas con herramientas de discos, tendientes a llevar a la superficie las raíces aún presentes, que son retiradas mediante tareas de recolección manual (Casas y Michelena, 1983).

El sistema de producción de soja local está basado en labranza cero o SD, consiste en mantener el rastrojo del cultivo anterior en la superficie y no realizar labranzas. Las malezas, entre y durante los cultivos, se controlan con herbicidas. Al momento de la siembra el suelo suele estar cubierto por una capa de rastrojo, sobre la cual se siembra con sembradoras que cortan ese manto de desechos y hacen una incisión en la tierra, en la que depositan las semillas. Actualmente, gran parte de la superficie sembrada con granos utiliza este sistema de siembra (INTA, 2011).

Los cambios de uso del suelo generaron en la región degradación significativa en la calidad física y química de los suelos agrícolas, en comparación con los suelos de la situación prístina en un plazo relativamente corto, más en las situaciones donde tras el desmonte se instaló el monocultivo de soja (Sanzano et al., 2005; Rojas et al., 2016).

El carbono orgánico total (COT) y la densidad aparente (DA) son los indicadores de mayor relevancia para el estudio y monitoreo de suelos locales. Existen pérdidas de COT, y también de Nitrógeno total (N) que significan disminución de la fertilidad en el horizonte superficial, tanto como un incremento de DA, que alertan sobre posibles procesos de compactación. Esto podría tener consecuencias negativas para la producción de cultivos en el mediano plazo, principalmente cuando del bosque se pasa a una agricultura sin rotación de cultivos. Para predecir y detener los procesos de degradación y erosión en suelos sometidos a estos cambios de usos en la región, es indispensable utilizar aquellos indicadores para monitorear y evaluar si las tendencias de descenso o aumento se mantienen, agudizan o suavizan dependiendo de las prácticas de manejo realizadas, específicamente de las rotaciones (Rojas y Zurita, 2017).

El problema de degradación más frecuente es la compactación superficial, que deriva en la pérdida de espacios porosos y con ello en la reducción de la infiltración (INF) y del

almacenamiento de agua en el suelo por un lado, y en un aumento de la escorrentía y de la generación de procesos erosivos por otro (Moro et al., 2005; Olivares et al., 2010; Rojas et al., 2016). Se han detectado compactaciones a partir de los cinco centímetros de profundidad, en lotes cultivados del oeste del Chaco, recientemente desmontados, y en la región pampeana, con varias décadas de agricultura, como consecuencia del uso de maquinaria pesada, existencia de suelos limosos, con bajo contenido de materia orgánica y escasa cobertura de rastrojos (Olivares et al., 2005; Botta et al., 2007; Mur y Balbuena, 2014). En el norte del país, los suelos bajo SD, con pasturas o bajo labranza convencional comparados con el suelo virgen, muestran un nivel de degradación significativo. Las variables más sensibles al cambio del uso del suelo fueron la resistencia mecánica a la penetración (RMP), el potencial hidrógeno (pH), COT, DA e INF (Sanzano et al., 2005, 2012; Sotelo et al., 2017). En provincias como Córdoba y Santiago del Estero, al comparar el nivel de COT del suelo en el bosque nativo en años sucesivos luego del desmonte, éste decrece abruptamente luego del primer año, permaneciendo en niveles bajos (Barbero et al., 2010). En el Chaco, se encontró que en suelos de desmonte con uso agrícola en relación a suelos vírgenes, el contenido de COT disminuyó en superficie, y gradualmente en profundidad (Ledesma, 1980; Rojas, 2012, Rojas et al., 2016), coincidente a lo encontrado en el área central de Córdoba por Campitelli et al. (2010), a medida que se prolongan los años de agricultura, especialmente, con el monocultivo de soja.

Los beneficios de las rotaciones de cultivos son bien conocidos, la alternancia espacial y temporal de distintas especies permiten una diversificación de los riesgos productivos, tienen un efecto inhibitorio sobre muchos patógenos, malezas e insectos, hacen un uso balanceado de nutrientes e influyen en las condiciones físicas y bioquímicas del suelo. En el aspecto físico, los distintos sistemas radicales de los cultivos exploran diferentes estratos del perfil, permitiendo una colonización del suelo con raíces de diferente arquitectura. Debido a esto, cada tipo de raíz genera una clase determinada de poros, los cuales según su tamaño tendrán funciones de aireación, ingreso del agua al perfil, almacenamiento, o funciones mixtas. Al descomponerse las raíces por actividad de los microorganismos quedan formados los poros, los cuales presentan alta estabilidad y continuidad espacial, favoreciendo una buena dinámica de aire y agua. Respecto a los aspectos bioquímicos, la rotación de cultivos favorece, en general, un balance neutro o positivo de carbono, comparado con el monocultivo. Se debe ajustar la intensidad de las rotaciones a la realidad climática y productiva de cada zona, principalmente a la disponibilidad de agua (Lorenzatti et al., 2003). No obstante, sus beneficios, esta práctica está tomando relevancia lentamente en el último tiempo debido,

fundamentalmente, a la aparición de síntomas de degradación en los suelos por el monocultivo de soja (Rojas et al., 2015; Heredia, 2017).

El uso del suelo produce alteraciones estructurales y funcionales que condicionan su productividad, siendo prioritario su conocimiento y cuantificación, a través de la identificación de indicadores que representen los diferentes estados, trayectorias y tendencias. La calidad y la salud del suelo son conceptos equivalentes, no siempre considerados sinónimos (Doran y Parkin, 1994a). La calidad del suelo tiene dos partes: una intrínseca que depende de la capacidad inherente del suelo para el crecimiento de los cultivos y una parte dinámica influenciada por el usuario del suelo. La calidad inherente de un suelo depende en parte de la naturaleza o composición, y está función de los materiales geológicos y factores del estado del suelo tales como la topografía. Atributos de la calidad inherente del suelo, como la mineralogía y la distribución del tamaño de partículas, se ven prácticamente estáticas y usualmente muestran cambios sutiles en el tiempo. La caracterización de la calidad inherente del suelo para la producción de cultivos también implica tomar en consideración otros factores extrínsecos, que influyen en el rendimiento, tales como factores climáticos (precipitaciones, evapotranspiración y temperatura del aire), y parámetros hidrológicos. La calidad dinámica del suelo comprende aquellas propiedades del suelo que pueden cambiar en respuesta al uso y manejo humano, y lo pueden hacer en períodos relativamente cortos. Como ejemplo, el contenido de carbono orgánico orgánico, el pH y la macroporosidad pueden cambiar durante espacios de tiempo variables en función de la gestión de manejo. Por lo tanto, el seguimiento y evaluación de la calidad dinámica del suelo tratan principalmente con atributos o indicadores que están más sujetos a cambios y están fuertemente influenciados por las prácticas agronómicas (Carter, 1990; Carter et al. 1997).

La calidad debe interpretarse como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo. El estado de las propiedades dinámicas del suelo como contenido de materia orgánica, diversidad de organismos, o productos microbianos en un tiempo particular constituye la salud del suelo. La calidad del suelo debe mantenerse, a largo plazo, dentro de ciertos límites que garanticen la capacidad productiva del recurso de forma económicamente viable. Los indicadores de calidad de suelo constituyen herramientas que permiten visualizar el origen de los procesos de degradación y, a partir de esto, delinear pautas de manejo que tiendan a mitigarlos o revertirlos. Los indicadores, como así también sus valores umbrales, deben ser desarrollados localmente para cada binomio suelo-sistema productivo. Es necesario definir los conjuntos mínimos de indicadores de calidad del suelo para los sistemas productivos de cada región y proponer practicas tecnológicas, de manejo o

de organización para lograr la seguridad de los suelos, la sustentabilidad de los sistemas productivos y el fortalecimiento de las economías regionales (Wilson, 2017).

Los indicadores de calidad del suelo son variables que sirven para evaluar la condición edáfica, pues representan dicha condición y conllevan información acerca de sus cambios o tendencias. Los indicadores pueden ser de estado, como las propiedades físicas, químicas y biológicas, o de procesos como la INF. La degradación del suelo implica el cambio en una o más de sus propiedades hacia una condición que es peor que la original. En términos generales, la degradación del suelo provoca alteraciones en la capacidad del suelo para sostener la actividad agrícola productiva (Díaz Orozco, 2017).

En las distintas regiones de Argentina se registran casos de desequilibrio entre usos de la tierra y su aptitud que se manifiestan en: desertificación, éxodo rural, degradación física, química y biológica de suelos, expansión agropecuaria desordenada, pérdida de biodiversidad y avance urbano sobre tierras agrícolas. Estos desequilibrios producen alteraciones en el funcionamiento de los procesos ecológicos, pérdida de productividad de las tierras y disminución del bienestar humano (Olivares et al., 2005; Sobral, 2009; García et al., 2014a; Silberman et al., 2015).

Precisamente, en Chaco, el uso de la cartografía de suelos está centralizado en aspectos que hacen a la evaluación de la potencialidad o aptitud de los suelos para la producción agrícola, entendiendo por tal, la producción de cultivos anuales. La evaluación de tierras para usos específicos, es un aspecto que a nivel local necesita ser investigado y profundizado. Los proyectos de desarrollo, infraestructura, planeamiento del uso sustentable de suelos y programas de Ordenamiento Territorial, demandan la predicción del comportamiento de las tierras bajo usos específicos. En particular, en aquellos casos de cambios de uso en que se requiere compatibilizar las potencialidades y limitaciones de cada unidad territorial con los requerimientos de las nuevas propuestas de utilización (Arzeno, 2008; Sobral, 2009; Perucca y Kurtz, 2016; Brest et al., 2018). La Ley Provincial N° 6.409 de Ordenamiento Territorial de los bosques nativos del Chaco (2009), establece la obligatoriedad en la planificación del cambio de uso del suelo, la cartografía de suelos en semidetalle y el correspondiente plan de manejo de los suelos, detallando técnicas de manejo y conservación del recurso, así como las medidas de mitigación propuestas en el estudio de impacto ambiental.

En un principio, las evaluaciones de tierras se llevaron a cabo principalmente para la planificación del uso y para proyectos del desarrollo de la tierra. Actualmente, el punto de vista de la evaluación de tierras está dirigido, principalmente, para seleccionar técnicas así como para resolver los problemas socio-económicos y medioambientales en el uso de tierras. La

solución de las disyuntivas de uso de la tierra requiere mayor participación, mediación y esfuerzos entre los diversos grupos relacionados con el sector rural (FAO, 2007).

Existen demandas de selección y monitoreo de índices de calidad, para establecer las relaciones entre indicadores y las funciones de los suelos, que permitan desarrollar herramientas que ayuden a explicar las interacciones y dinámica que se establecen en los propios sistemas biofísicos y a su vez entre éstos y el contexto socio económico (Groot, 2006; Sobral, 2009; Branthomme, 2009).

Debe investigarse con énfasis, en base a los atributos originales del suelo, para llegar a una mejora de las funciones particulares de interés para cada caso, que optimicen los objetivos combinados de alta producción de cultivos, baja degradación ambiental y uso sostenible del recurso suelo. Con objetivos amplios e integrales, para definir estrategias que promuevan la sostenibilidad de la producción agrícola y la conservación de los recursos naturales, y que permitan hacer un seguimiento de esa sostenibilidad a nivel de diferentes agroecosistemas. De esa manera, la evaluación de la aptitud de las tierras contribuye a la formulación de planes de organización del uso del recurso que brinden respuestas ante la demanda creciente de alimentos, con exigencias de normas bajo protocolos de producción sustentable (Pla, 2013).

El área de trabajo de esta tesis se encuentra sujeta a cambios de la cobertura, con escasos antecedentes de la resiliencia de sus suelos ante el uso agrícola tras el desmonte, por lo que es necesario realizar la evaluación de las tierras con el objeto de destinarlas al uso sustentable.

Hipótesis

Luego del desmonte y habilitación para uso agrícola, los suelos del sector sudoeste del Impenetrable Chaqueño, desarrollados sobre vegetación de bosques y utilizados en monocultivo de soja, poseen diferente susceptibilidad a la degradación, condición que, conjuntamente a la incidencia de la variabilidad climática, influye marcadamente sobre los rendimientos del cultivo.

Justificación de la hipótesis

La conformación morfológica y las propiedades físicas y químicas de los suelos, junto a las condiciones climáticas, condicionan los potenciales de producción y las respuestas ante el impacto del uso agrícola, fundamentalmente del cultivo de soja, luego del desmonte.

Objetivo General

Generar conocimiento sobre el impacto del cultivo de soja sobre propiedades físicas, químicas y productivas de suelos recientemente habilitados, para optimizar la adopción de decisiones en la expansión de la frontera agropecuaria en el sector sudoeste del Impenetrable Chaqueño, sur del Departamento Almirante Brown.

Objetivos Específicos

- Determinar el efecto del cultivo de soja en SD sobre indicadores edáficos en Series de suelos representativas de la región, luego del desmonte.
- Elaborar un modelo experto de simulación de evaluación de tierras que permita predecir la aptitud de uso y los rendimientos del cultivo de soja, en base a los indicadores estudiados de las Series de suelos representativas del área de estudio y en distintos escenarios climáticos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el sector sur del Departamento Almirante Brown (1.727.600 ha), en la provincia del Chaco. El área de trabajo, abarcó las localidades Río Muerto, Los Frentones, Pampa del Infierno y Concepción del Bermejo (550.000 ha), (Figura 3; Tabla 1), considerando la presión del proceso de agriculturización que se ha manifestado en esta región en los últimos veinte años.

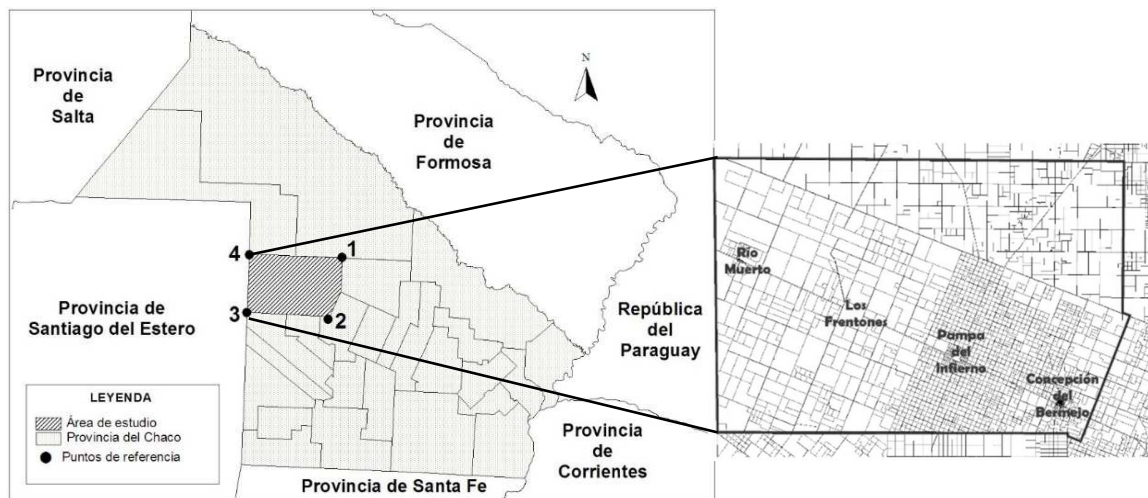


Figura 3. Ubicación del área de estudio al sur del Departamento Almirante Brown (Chaco), e identificación de las localidades comprendidas.

Tabla 1. Puntos de georreferencia que delimitan el área de estudio.

Puntos de referencia (Coordenadas geográficas)			
1 - Noreste	2 - Sureste	3 - Suroeste	4 - Noroeste
26° 7' S 60°48' O	26°40' S 60°54' O	26°39' S 61°42' O	26°6'S 61°42' O

El clima del área de estudio es subtropical semiárido a subhúmedo, con un régimen pluviométrico de 800 mm y una temperatura media anual de 23°C, siendo la de invierno de 16°C y la de verano de 28°C (Figura 4a) (Ledesma y Zurita, 1995a). Las precipitaciones son estacionales, concentradas en primavera y verano, siendo los inviernos secos. Existe una gran variación interanual, una condición ambiental-climática muy común en la región. Hay alternancia de períodos húmedos y secos. En el ciclo 2012/2013, período en el cual se realizó el relevamiento de las variables edáficas y productivas, las precipitaciones fueron menores a la media anual y, particularmente, en el ciclo de los cultivos estivales fueron menores a 350 mm, siendo esta

información relevada en la ciudad de Pampa del Infierno y en un establecimiento agropecuario ubicado a 30 Km al Norte de la misma (Tabla 2) (Fuente: INTA AER Pampa del Infierno)

Tabla 2. Precipitaciones medias (mm) registradas en Pampa del Infierno y 30 Km al Norte; a) Período 2006 a 2013 b) Año 2012, c) Año 2013, d) Campaña 2012/2013.

a)	Año	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	Pampa del Infierno	888	1057	549	1238	958	728	550	726
	30 km al norte	742	1045	606	1225	867	723	607	657

b)	2012	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
	Pampa del Infierno	152	8	12	152	35	14	0	105	0	0	72	0	550
	30 km al norte	200	37	14	102	50	11	0	102	0	0	91	0	607

c)	2013	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
	Pampa del Infierno	63	89	30	13	17	35	0	2	3	100	242	132	726
	30 km al norte	0	193	45	0	20	30	0	2	4	67	184	112	657

d)	2012				2013					Total
	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	
Pampa del Infierno	0	0	72	0	63	89	30	13	17	284
30 km al norte	0	0	91	0	0	193	45	0	20	349

El relieve es una llanura tendida muy suavemente ondulada con una pendiente general de 0,5% (Figura 4b). El material original de los suelos es loes-aluvial local fósil (Figura 4c). Los suelos son de colores claros y predominan aquellos de escaso desarrollo y texturas medias a gruesas en los albardones de ríos, riachos y cauces abandonados; de textura pesada en lomas bajas y áreas de derrame. Los suelos pertenecen a los órdenes Alfisoles, Molisoles, Inceptisoles y Entisoles. (Ledesma y Zurita, 1995a) (Figura 4d).

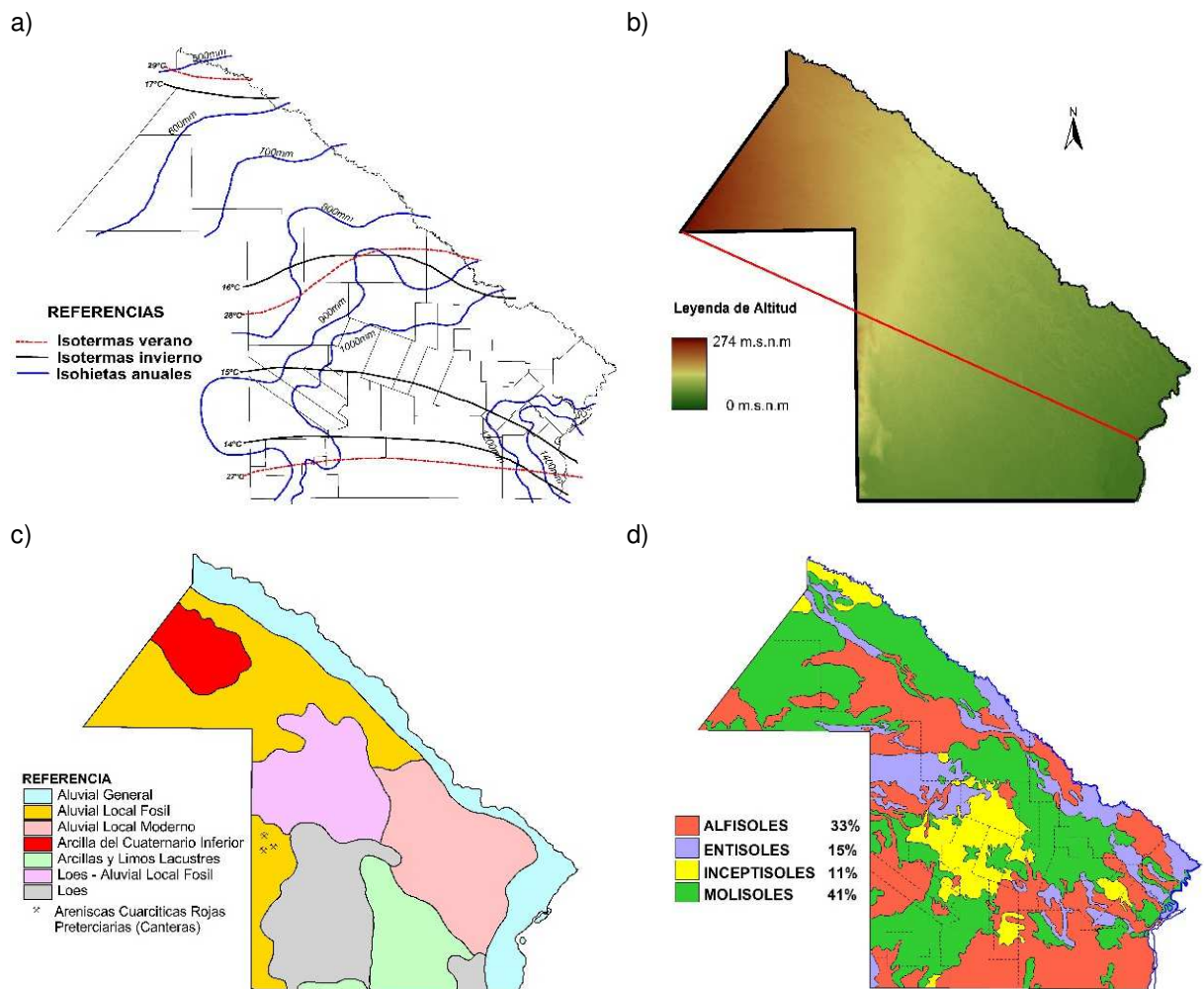


Figura 4. a) Isohietas e isotermas; b) Relieve y pendiente; c) Material originario; d) Mapa taxonómico de los suelos.

La vegetación dominante es de un bosque alto muy abierto con un denso estrato de arbustos herbáceos, la mayoría en explotación forestal o en condiciones de ser explotados y la agricultura en suelos de desmonte o en abras obtenidas a fuego. La actividad principal es la explotación forestal extractiva; el pastoreo de los suelos bajo bosque constituye un sistema ganadero de baja eficiencia. La agricultura se ve limitada por la gran variabilidad climática anual e interanual, con precipitaciones muchas veces insuficientes, alta evapotranspiración y escasa retención de agua en los suelos dominantes. Este sector del “Impenetrable” carece de aguas superficiales, el agua subterránea es generalmente de mala calidad para consumo humano y animal (Ledesma y Zurita, 1995a).

2.1 EVALUACIÓN DE VARIABLES FÍSICAS, QUÍMICAS Y PRODUCTIVAS

Mediante información preliminar confiable de la Carta de Suelos del Departamento Almirante Brown (actualmente en elaboración) se seleccionaron cuatro Series de suelos (Anexo I), representativas del área de estudio, contrastantes entre sí y clasificadas como Clase de Uso IV en el Sistema de clasificación por capacidad de uso (Klingebiel y Montgomery, 1964). A continuación, se describen brevemente cada una de las Series de suelos seleccionadas y sus características más relevantes (Figura 5):

Serie Tolosa (To): se encuentra en lomas tendidas, evolucionadas, de relieve normal. Es un *Haplustept Udico*, familia franca fina, mixta, hipertérmica. Sección control de familia entre 25 a 100 cm de profundidad (75 cm de profundidad). Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico, horizonte cámbico, horizonte Ck. Su vegetación natural es de bosque maderable, con fachinal y vegetación basal (Zurita, 2007).

Serie Luz (Lj): se encuentra en lomas medias tendidas de relieve normal. Es un *Haplustol Óxico*, familia franca gruesa mixta, hipertérmica. Sección de control de familia de 25 a 100 cm de profundidad (75 cm de espesor). Horizonte diagnóstico: epipedón mólico, horizonte cámbico, y horizonte Ck. Su vegetación natural es de bosque maderable de dos estratos, fachinal y vegetación basal (Zurita, 2007).

Serie Pampa (Pt): se encuentra en lomas tendidas, moderadas, de relieve normal. Es un *Durustalf*, familia franca, fina, mixta, hipertérmica. Sección control de familia entre 17 a 30 cm de profundidad (13 cm de espesor). Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico y horizonte argílico moderadamente textural, duripán, horizonte Ck. Su vegetación natural es de pajonal con un arbustal que puede alcanzar la forma de ralera (Ledesma y Zurita, 1995b).

Serie Avía Terai (Ak): Se encuentra en lomas medias bajas tendidas, evolucionadas, de relieve subnormal. Es un *Durustalf*, familia arcillosa fina, hipertérmica. Sección control de familia de 30 a 54 cm. de profundidad (24 cm de espesor). Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico, horizonte argílico fuertemente textural, duripán, horizonte Ck. Su vegetación natural es de fachinal y vegetación basal, rodeados por ralera con algunos pastos y otras plantas herbáceas Ledesma y Zurita, 2003).

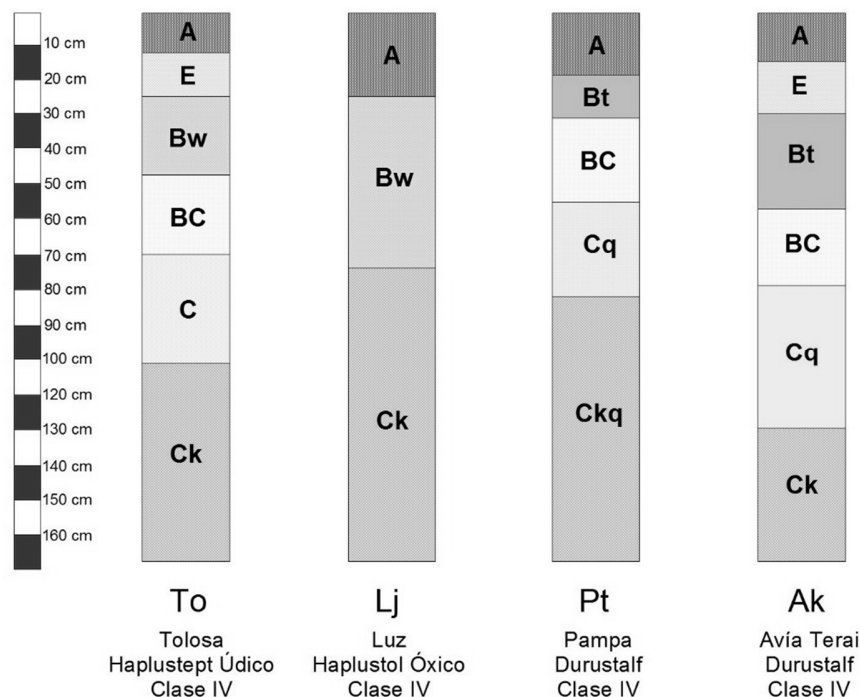


Figura 5. Esquema de los perfiles modales (horizontes y profundidades) de las Series de suelos Tolosa (To), Luz (Lj), Pampa (Pt) y Avía Terai (Ak), indicando su clasificación taxonómica y aptitud de uso.

Una vez seleccionadas las Series representativas, se procedió, a través de imágenes satelitales, la opinión de expertos y, encuestas realizadas a los productores agropecuarios¹ de la zona, a ubicar los lotes experimentales que tuvieran las Series de suelos seleccionadas, pero que además presentaran a campo las condiciones de uso de bosque, y luego del desmonte y habilitación según la legislación vigente, de un año de cultivo y de seis años de monocultivo de soja, bajo SD. Se eligió la secuencia soja sobre soja por ser el sistema productivo más común en suelos forestales desmontados y puestos en producción agrícola, en el área de estudio. Se seleccionaron once establecimientos (Figura 6) que contaban con la cartografía de suelos en escala de semidetalle correspondiente (Zurita et al., 2003, 2004, 2005, 2006a, 2006b, 2008; 2010b, 2010c, 2011a, 2011b, 2012). Por otra parte, las encuestas realizadas a los productores y/o asesores de cada establecimiento, además, permitieron recopilar información sobre proceso de desmonte y el manejo del cultivo (variedades, fecha y densidad de siembra, fertilización, protección, fecha de cosecha y rendimiento), tipo e intensidad de limitantes del suelo, datos de

¹ Productores agropecuarios: se refiere a las personas que toman decisiones sobre la gestión del sistema de producción en los establecimientos rurales.

precipitaciones y rendimientos potenciales en diferentes campañas de cultivo. Dicha información fue utilizada como una herramienta para la ubicación de las estaciones de muestreo de suelos y como insumo para la elaboración de un modelo experto de simulación para la evaluación de tierras para el cultivo de soja bajo SD.

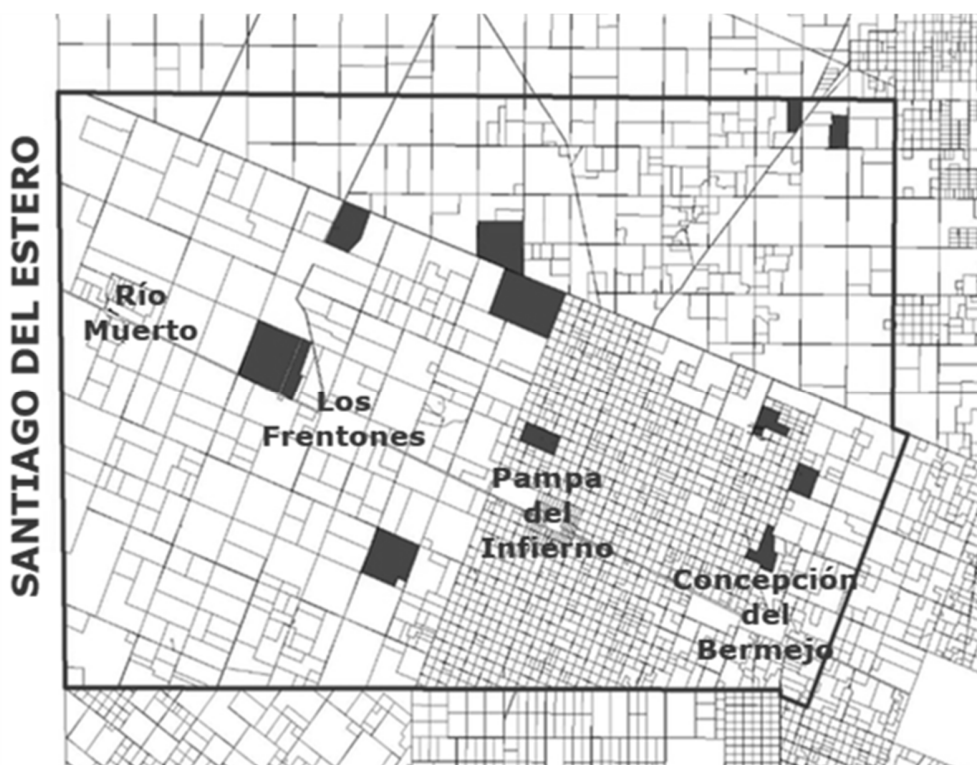


Figura 6. Ubicación de los establecimientos relevados sobre el plano catastral.

Para el análisis de la evolución de las propiedades edáficas se establecieron 12 tratamientos integrando cuatro Series de suelos con tres condiciones de uso (Tabla 3), resultando cuatro tratamientos (T1, T4, T7 y T10) de suelos con bosques (Bo), cuatro tratamientos (T2, T5, T8 y T11) de suelos con un año de cultivo de soja (1S), y cuatro tratamientos (T3, T6, T9 y T12) de suelos con seis años de monocultivo de soja (6S).

Tabla 3. Tratamientos evaluados (T1 a T12), integrando Series de suelos (Tolosa, Luz, Pampa y Avía Terai) con condiciones de uso (bosque, un año de cultivo y seis años de monocultivo de soja).

Tratamientos	Series de suelos - Condición de uso
T1	Tolosa - Bosque
T2	Tolosa - Soja un año posterior al desmonte
T3	Tolosa - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte
T4	Luz - Bosque
T5	Luz - Soja un año posterior al desmonte
T6	Luz - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte
T7	Pampa - Bosque
T8	Pampa - Soja un año posterior al desmonte
T9	Pampa - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte
T10	Avía Terai - Bosque
T11	Avía Terai - Soja un año posterior al desmonte
T12	Avía Terai - Soja continua durante seis años posteriores al desmonte

Por otra parte, en cada Serie de suelo se seleccionaron siete sitios de evaluación, distribuidos según la condición de uso, habiendo un sitio para bosque, y tres para un año de soja y seis años de monocultivo de soja, respectivamente, siendo en total 28 sitios. La elección de los sitios a relevar se efectuó mediante la técnica de muestreo sistemático con arranque aleatorio, sobre áreas de muestreo, previamente determinadas. Asimismo, en cada sitio de Bo se ubicaron cinco estaciones de evaluación, situadas en el interior de la masa forestal (Figura 7a), mientras que se dispusieron quince estaciones (cinco en cada sitio) en los 1S y 6S, respectivamente (Figura 7b). En cada sitio de 1S y 6S, las cinco estaciones se instalaron en una transecta diagonal en los lotes evaluados, distanciadas 80 metros unas de otras y alejadas de los límites de las unidades cartográficas (Figura 8), constituyendo un total de 140 estaciones.

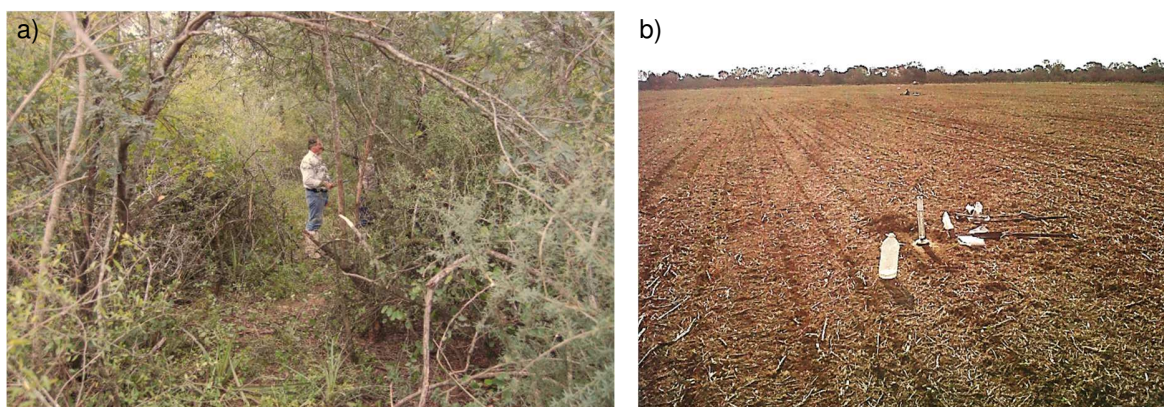


Figura 7. Estaciones de evaluación a) en tratamientos con bosque, b) en tratamientos con cultivo de soja.

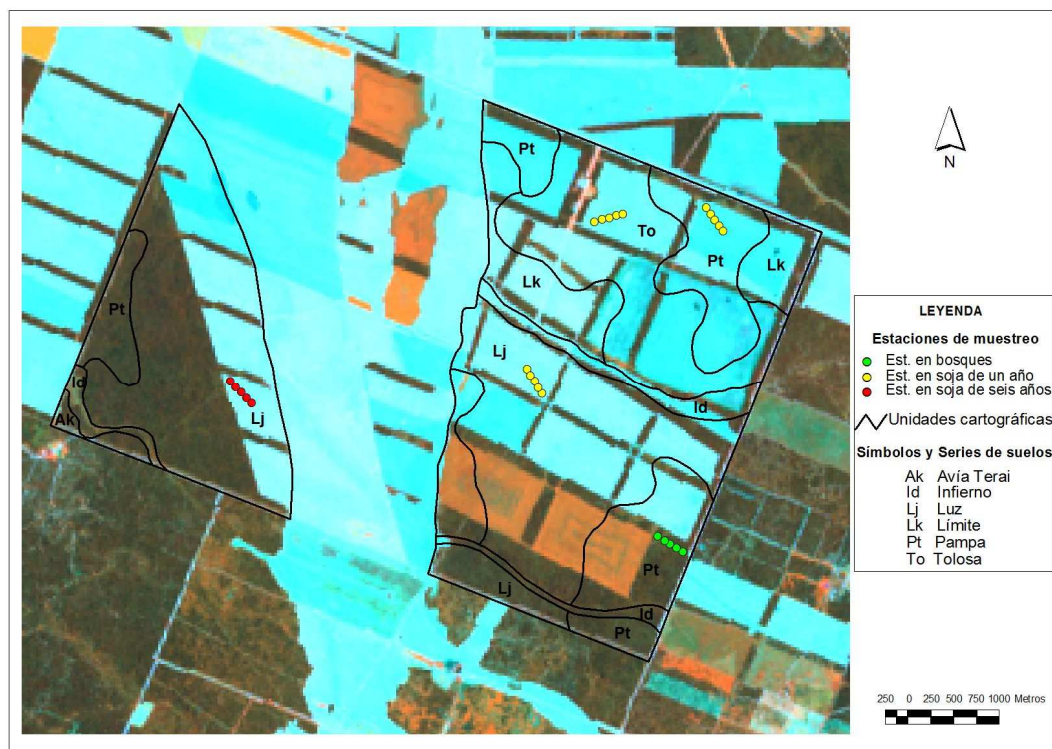


Figura 8. Recorte de imagen satelital de uno de los establecimientos relevados con las unidades cartográficas del mapa de suelos y las estaciones de muestreo.

La extracción de las muestras de suelo y la medición de las variables edáficas a campo, se llevaron a cabo, en todos los sitios, con posterioridad a la cosecha del cultivo de soja de la campaña 2012/2013, desde el 1 de junio hasta el 2 de septiembre de 2013; en los 1S y los 6S se realizaron entre las líneas de siembra (Anexo II - Fotografías).

Para la evaluación del estado actual de los suelos, en los Bo, 1S y 6S, se determinaron las siguientes variables:

Densidad aparente (DA)

La DA de un horizonte o determinado espesor de suelo, es la relación que existe entre la masa de suelo seco a 105°C y el volumen que ocupa, incluyendo los poros, y se expresa en g.cm^{-3} . La DA del suelo varía, entre otros factores, con la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y las labranzas. Para los suelos zonales oscila entre 0,9 a 1,8 g.cm^{-3} (Santos et al., 2012).

La DA se determinó mediante el método del cilindro de volumen conocido basado en Stengel (1983). Este método utiliza un cilindro de acero de volumen conocido ($98,52 \text{ cm}^3$), con uno de sus bordes biselado, para permitir la penetración en el suelo.

Se tomaron muestras en cada estación de muestreo en los espesores de 0 - 5, 5 - 10 y 10 - 20 cm. Se procedió removiendo la cobertura vegetal, introduciendo el cilindro en cada espesor, extrayendo luego el cilindro con pala, evitando en todo momento cualquier alteración de la muestra. Luego, las mismas, fueron llevadas al laboratorio donde se secaron en estufa a 105°C hasta obtener peso seco constante.

Donde el valor de la Densidad Aparente (DA) es igual a:

$$DA (g.cm^{-3}) = \frac{P_{ss}}{V_s} = \frac{P_{ss} (g)}{98,52 (cm^3)}$$

Siendo V_s = el volumen de suelo, y P_{ss} = el peso seco del suelo.

La DA puede ser incluida dentro del grupo mínimo de parámetros a medir para evaluar la calidad de un suelo, como indicador de la estructura y la dureza del suelo (Doran y Parkin, 1994b). La DA afecta al crecimiento de las plantas debido al efecto que tienen la dureza y la porosidad del suelo sobre las raíces. Con un incremento de la DA, la resistencia mecánica tiende a aumentar y la porosidad del suelo tiende a disminuir, estos cambios limitan el crecimiento de las raíces. Los valores críticos de la DA para el crecimiento de las raíces, varían según la textura que presenta el suelo y de la especie de que se trate (Pilatti et al., 2012).

Resistencia mecánica a la penetración (RMP)

La RMP permite evaluar la resistencia que ofrece el suelo a la elongación de las raíces; fue determinada a través del índice de cono (IC) utilizando un penetrómetro de impacto (Stolf, 1991), el cual consta de un vástago, cuyo extremo es un cono con un ángulo de 60° , medido en su vértice, y una sección de 2 cm^2 (Figura 9). Sobre el vástago se desplaza una pesa concéntrica de 1,798 Kg, a través de una carrera de 50 cm. Colocando el aparato en posición vertical con la punta cónica en la superficie del suelo y permitiendo la caída libre de la pesa, ésta golpea contra el tope, permitiendo la penetración del vástago en el suelo. Se relaciona el número de golpes, es decir el número de veces que la pesa en cuestión toca el tope inferior, para penetrar un intervalo fijo de suelo considerado, en este caso 10 cm. Estos números de golpes fueron medidos a 0 - 10 y 10 - 20 cm en todos los tratamientos, con 15 repeticiones en cada estación de muestreo y fueron convertidos a medidas de presión, expresada en mega pascales (MPa).

Por lo tanto, se tiene:

$$IC = \frac{\text{número de golpes} \times f}{\text{área del cono} \times \text{espesor}} = \text{Kg} \cdot \text{cm}^{-2} = \text{MPa}$$

Por otra parte, las mediciones de RMP, están altamente condicionadas por el contenido de humedad al momento del muestreo. Por lo tanto, los valores relevados a campo se corrigieron y estandarizaron a un porcentaje de humedad relacionado a la friabilidad de los suelos mediante una recta de ajuste, en ambos espesores (Jorajuría Collazo, 2004; Zerpa, 2006). Para la interpretación de los datos calculados se utilizaron los valores de la Tabla 4.

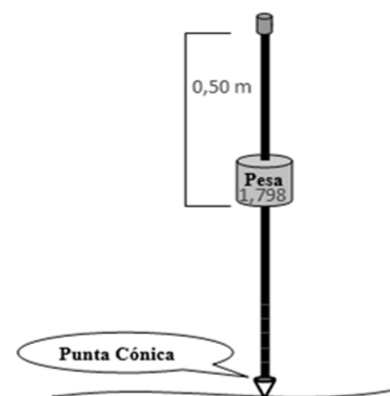


Figura 9: Esquema de un penetrómetro de impacto con punta cónica.

Tabla 4. Clases de resistencia a la penetración (Adaptado de Schoeneberger et al., 1998).

Resistencia a la Penetración o Índice de cono (MPa)	Clases
< 0,01	Extremadamente baja
0,01 - 0,1	Muy baja
0,1 - 1	Baja
1 - 2	Moderada
2 - 4	Alta
4 - 8	Muy alta
> 8	Extremadamente alta

Carbono Orgánico Total (COT)

El nivel de carbono orgánico oxidable se determinó, por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro, siguiendo la norma IRAM-SAGPyA 29571-2 (2011), la cual se basa en la metodología propuesta por Walkley y Black (1934). El carbono orgánico se oxida parcialmente por una solución de dicromato de potasio en medio ácido. El agregado de ácido sulfúrico aporta el medio para la reacción y el calor necesario para que se produzca la oxidación del carbono. El exceso de dicromato se valoró mediante volumetría redox con una solución ferrosa. Los resultados fueron expresados en términos de concentración en porcentaje (%), como carbono orgánico total, utilizando como factor de corrección o de recuperación el valor 1,3 propuesto por Walkley y Black, basado en una oxidación promedio del 77% del carbono orgánico total. Las

determinaciones de COT se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) tomadas en cada estación de muestreo a las profundidades de 0 - 10 y 10 - 20 cm. Para la interpretación de los resultados se utilizó la escala de la Tabla 5.

Tabla 5. Escala clasificatoria orientativa de COT (Walkle y Black).

COT (%)	Clases
< 0,75	Altamente desprovisto
0,75 - 1,25	Muy pobremente provisto
1,25 - 1,50	Pobremente provisto
1,50 - 2,0	Moderadamente provisto
2,0 - 3,0	Bien provisto
> 3,0	Muy bien provisto

Nitrógeno Total (N)

El nivel de nitrógeno total en el suelo, se determinó por el método Kjeldahl modificado, escala semi-micro (Bremmer and Mulvaney, 1996), siguiendo la norma IRAM-SAGyP 29572-1 (2011). El método se basa esencialmente en una oxidación húmeda, la digestión se realizó por calentamiento de la muestra con ácido sulfúrico y catalizadores que promueven la oxidación de la materia orgánica y la conversión del nitrógeno orgánico a amonio. El digesto se alcalinizó, y el amoníaco se recogió en ácido bórico, luego se tituló con ácido valorado. Las determinaciones de N se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) tomadas en cada estación de muestreo a las profundidades de 0 - 10 y 10 - 20 cm. Los resultados fueron expresados en términos de concentración en porcentaje (%).

Para la interpretación de los resultados se utilizó la escala de la Tabla 6.

Tabla 6. Escala clasificatoria orientativa de N total (Kjeldahl)

N total (%)	Clases
< 0,075	Altamente desprovisto
0,075 - 0,125	Muy pobremente provisto
0,125 - 0,150	Pobremente provisto
0,150 - 0,200	Moderadamente provisto
0,200 - 0,300	Bien provisto
> 0,300	Muy bien provisto

Fósforo extraíble (P)

El contenido de fósforo extraíble, se determinó por el método Bray Kurtz 1 modificado, mediante extracción con solución de fluoruro de amonio y ácido clorhídrico, siguiendo la Norma IRAM-SAGPyA 29570-1 (2010). Las determinaciones se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) extraídas en estación de muestreo en los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm. Los resultados fueron expresados en partes por millón (ppm). Para la interpretación de los resultados se utilizó la escala de la Tabla 7.

Tabla 7. Escala clasificatoria orientativa de P extractable (ppm o mg.kg⁻¹)

P extractable (ppm)	Clases
< 5	Muy deficiente
5 - 7,5	Deficiente
7,5 - 12	Moderadamente deficiente
12 - 20	Moderadamente provisto
20 - 30	Bien provisto
> 30	Muy bien provisto

Potencial Hidrógeno (pH)

El pH, se midió con un potenciómetro, sobre una suspensión de suelo:agua en relación 1:2,5 (m/V) siguiendo la norma IRAM-SAGyP 29574 (2011). Las determinaciones se realizaron sobre las muestras compuestas (10 submuestras) extraídas en los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm, en cada estación de muestreo. Para la interpretación de los resultados se utilizó la escala de la Tabla 8.

Tabla 8. Escala clasificatoria orientativa de pH actual (1:2,5)

Rango de pH	Clases
< 4,5	Extremadamente ácido
4,6 - 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 - 5,5	Fuertemente ácido
5,6 - 6,0	Moderadamente ácido
6,1 - 6,5	Débilmente ácido
6,6 - 7,3	Neutro
7,4 - 7,8	Ligeramente alcalino
7,9 - 8,4	Moderadamente alcalino
8,5 - 9,0	Fuertemente alcalino
> 9	Muy fuertemente alcalino

Conductividad Eléctrica (CE)

La CE se midió con un conductímetro sobre el extracto suelo:agua con una relación, 1:2,5 (m/V) y se expresó la lectura en dS.m^{-1} . Las determinaciones se realizaron sobre las muestras tomadas en cada sitio de estación de muestreo a las profundidades de 0 - 10 y 10 - 20 cm. Para la interpretación de la salinidad de los suelos se utilizó la escala de la Tabla 9.

Tabla 9. Escala clasificatoria orientativa de CE (1:2,5).

Rango de CE (dS.m^{-1})	Clases
0 - 2	Nula o baja
2 - 4	Escasa
4 - 8	Moderada
8 - 16	Alta
> 16	Muy alta

Infiltración (INF)

La INF básica se utiliza como parámetro de calidad de suelos porque es sensible a condiciones cercanas a la superficie. Está relacionada con múltiples factores intrínsecos como estabilidad de agregados, textura, carbono orgánico y desarrollo de la fauna del suelo; y

extrínsecos como uso del suelo y el manejo (USDA, 1999). Los datos de infiltración se refieren a la velocidad con que ingresa el agua en la superficie del suelo en cm.h^{-1} .

La INF se determinó en cada estación de muestreo, con un infiltrómetro-permeámetro de disco (Figura 10), adaptado por el Instituto de Suelos de INTA Castelar. Este instrumento permitió medir el movimiento de agua en el perfil directamente en el sitio de estudio y con el menor disturbio posible (Gil, 2006).



Figura 10. Permeámetros de disco.

Estabilidad de Agregados (EEA)

La EEA fue determinada por el método descrito por De Boodt y De Leenheer (1967), para ello se tomaron muestras no disturbadas, en los espesores de 0 - 10 y 10 - 20 cm en cada tratamiento en estudio.

Una vez en el laboratorio, la muestra húmeda se separó manualmente en agregados que le permitieran pasar por un tamiz de 8 mm de apertura de malla, estos agregados se secaron al aire libre (30°C). Una vez secos, los agregados de diámetro menor a 8 mm, se sometieron a un segundo fraccionamiento en seco, para lo cual se los tamizó a través de una serie de tamices de 4,8; 3,36 y 2 mm de apertura de malla. Posteriormente, se pesó la fracción de suelo retenida en cada tamiz, la suma de estos pesos se consideró como el 100 % (peso total), a partir del cual se calculó el porcentaje correspondiente a cada fracción, para constituir una muestra de 100 g. El porcentaje de suelo acumulado en el tamizado en seco se utilizó posteriormente para calcular el

diámetro medio ponderado de los agregados en seco (DMPS). Luego, se procedió a pesar la fracción correspondiente a cada tamaño de agregados, para el posterior humedecimiento e incubación. Para el humedecimiento, se utilizó la capacidad de campo (CC) de cada suelo, definida como humedad equivalente en las descripciones morfológicas de los suelos. Así, se obtuvo el volumen de agua necesario para humedecer cada fracción de agregados al punto donde el suelo desarrolla su máxima estabilidad. El mismo se aplicó en forma de gotas desde una altura de aproximadamente 25 cm para reproducir la energía cinética de las gotas de lluvia al inicio de una tormenta de verano. Luego, se procedió a incubar las muestras por 24 horas, para su posterior tamizado en húmedo. El tamizado consistió en sumergir los agregados con movimiento ascendente y descendente durante cinco minutos. El ingreso violento de agua a los agregados de suelo constituye el disturbio al cual se somete la muestra de suelo. En la medida que éstos fueron más resistentes se fraccionaron menos y una menor cantidad de material pasó a los tamices de menor tamaño de malla. Una vez que los agregados resultantes de cada tamiz, fueron secados y pesados, se calculó la distribución acumulativa de los agregados estables en agua, de donde se obtuvo el diámetro medio ponderado de los agregados en húmedo (DMPH).

El diámetro medio ponderado (DMP) en cada conjunto de tamizados para cada forma, seco (DMPS) y húmedo (DMPH), se determinó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

donde **i** es cada fracción de agregados, **n** es el número total de fracciones de agregados; **x_i** es el diámetro promedio de cada fracción **i** (mm), calculado como la media aritmética de la apertura de malla de dos tamices sucesivos, y **w_i** es la proporción del peso (g.g⁻¹) de cada fracción **i** respecto de la muestra tamizada total (100 g). Por diferencia entre los DMPS y los DMPH se obtuvo el cambio en DMP (CDMP, mm) como una medida de la estabilidad de los agregados. A mayor CDMP menor es la estabilidad de los agregados del suelo.

Rendimientos

Los rendimientos de los cultivos de soja (kg.ha⁻¹) se definieron a partir de la información recopilada en las encuestas realizadas a los productores agropecuarios de los lotes evaluados, para cada tratamiento. Se usaron en los análisis estadísticos para evaluar correlaciones con los parámetros de suelos analizados, valorar el comportamiento y estudiar su asociación con las mismas; y como insumo para la elaboración del modelo experto de simulación.

2.2 DISEÑO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

2.2.1 Análisis de la Varianza

El análisis de las variables de suelo se realizó a través de un Análisis de la Varianza correspondiente a un diseño Completamente Aleatorizado con 12 tratamientos (Tabla 3). El modelo utilizado fue:

$$y_{ij} = \mu + T_i + E_j + (TE)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad i = 1 \text{ a } 12; j = 1, 2$$

donde

y_{ij} es el valor de la variable respuesta para el i-ésimo tratamiento en el j-ésimo espesor.

μ es la media general de la variable respuesta.

T_i es el efecto del i-ésimo tratamiento.

E_j es el efecto del j-ésimo espesor.

$(TE)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre el i-ésimo tratamiento y el j-ésimo espesor.

ε_{ij} es el error aleatorio asociado a la observación del i-ésimo tratamiento en el j-ésimo espesor.

Con el objetivo de evaluar las distintas Series de suelos ($T_o - L_j - P_t - A_k$) y condiciones de uso ($B_o - 1S - 6S$), se realizaron contrastes.

Los rendimientos del cultivo de soja se analizaron utilizando un diseño completamente aleatorizado con Arreglo Factorial de Tratamientos, con 2 factores: Series de Suelos (4 niveles) y condiciones de uso (2 niveles). El modelo utilizado fue:

$$y_{ij} = \mu + S_i + C_j + (SC)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad i = 1 \text{ a } 4; j = 1, 2$$

donde

y_{ij} es el valor del rendimiento respuesta para la Serie i-ésima y la Condición j-ésima.

μ es la media general de la variable respuesta.

S_i es el efecto de la i-ésima Serie de suelo.

C_j es el efecto de la j-ésima Condición de uso.

$(SH)_{ij}$ es el efecto de la interacción entre la i-ésima Serie de suelo y la j-ésima Condición de uso.

ε_{ij} es el error aleatorio asociado a la observación de la i-ésima Serie de suelo en la j-ésima Condición de uso.

Se calcularon coeficientes de correlación entre las variables edáficas y el rendimiento en grano del cultivo de soja.

El procesamiento de los datos se realizó con el software InfoStat versión 2016 (Di Rienzo et al., 2016; licencia adquirida por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria).

2.2.2 Análisis de correlación

Se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables pH, CE, COT, N, P, RMP, DA, INF y CDMP. El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la magnitud de la asociación lineal entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales. Muestra el grado de asociación o la correlación que existe entre dos variables. Es un número que varía entre -1 y 1; si es negativo, se trata de una correlación negativa, la cual interpreta que a mayores valores de una variable corresponden menores valores de otra; si es positivo, manifiesta que a mayores valores de una variable corresponden mayores valores de la otra. El análisis de correlación se realizó con el software InfoStat (Di Rienzo, et al., 2016). Se obtuvo una matriz de correlaciones entre todas las variables, con su respectivo coeficiente de correlación

2.2.3 Análisis multivariado

El análisis multivariado permite estudiar conjuntos de datos de manera global y analizar el comportamiento de las variables en forma simultánea. Es capaz de resumir las principales relaciones entre variables de una manera visual, y esto lo realiza detectando las dimensiones principales de variabilidad, focalizando en las relaciones lineales entre variables, por más de que existan otras relaciones complejas, como exponenciales, logartímicas, etc. (Husson et al., 2011). Las herramientas multivariadas como el análisis de componentes principales (ACP) permiten estudiar el comportamiento simultáneo de las variables con el objetivo de evaluar si las mismas pueden separar las condiciones principales de estudio y en base a la contribución de las variables a las componentes principales (CP) establecer cuáles son las propiedades más afectadas por el manejo o las características genéticas intrínsecas a cada suelo.

El análisis se realizó separando los datos según los espesores estudiados de 0 - 10 y 10 - 20 cm, para las variables pH, CE, COT, N, P, RMP, DA, INF y CDMP (para la DA a 0 - 10 cm se promedió la información de los espesores 0 - 5 y 5 - 10 cm, la INF se determinó sólo en el espesor superficial) para las condiciones de uso, las Series de suelos y los tratamientos. Por otra parte, se efectuó el ACP con las variables en las condiciones de 1S y 6S para conocer el comportamiento del rendimiento de soja como variable suplementaria para estudiar su asociación con las variables en estudio.

El paquete FactoMine R, con el cual se realizó el análisis, es específico para análisis multivariado, en este trabajo se utilizó el ACP. El programa grafica la dispersión de los datos a partir de las componentes principales y un biplot con los autovectores de las variables en cada componente, y brinda la posibilidad de realizar elipses de confianza a partir de los p-valores de la correlación entre las condiciones estudiadas y las componentes principales. Se superpone entonces sobre el gráfico de dispersión, una elipse que representa la región de confianza para las medias de grupo, basado en el test de Student. Si las elipses no se interceptan, significa que hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos a causa de las variables estudiadas simultáneamente. Las elipses de confianza y el análisis de las correlaciones entre las condiciones analizadas y las CP, le dan fuerza estadística al ACP.

2.3 SISTEMA AUTOMATIZADO DE EVALUACIÓN DE TIERRAS (ALES)

La evaluación de tierras se efectuó aplicando la metodología propuesta por Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), a través del “Esquema para la evaluación de tierras” (FAO, 1976). Se trata de lineamientos sobre los principios, conceptos, la estructura y los procedimientos que deben guiar la creación y aplicación de sistemas de evaluación de tierras, orientado a valorar la aptitud de las tierras para usos específicos alternativos ecológicamente sostenibles, mediante el uso del software ALES (Automated Land Evaluation System, 1997). El resultado surge de la confrontación de las características de la tierra (CaT), expresadas como cualidades (CuT), con las exigencias de los tipos de utilización (TUT), que puede ser cultivos diversos, pasturas, pastizales, uso forestal; expresadas como requerimientos de los tipos de utilización (RUT), a partir de búsqueda bibliográfica e informantes expertos calificados (Figura 11).

Para determinar las clases de aptitud de las unidades de tierra (UT), se utilizó el módulo del programa ALES que realiza la evaluación física, y no se consideró la evaluación económica, es decir que el resultado final estará determinado exclusivamente por la aptitud física y los rendimientos.

La evaluación estuvo fundada en las CuT a partir de datos provenientes de información de expertos, cartas de suelos y variables medidas a campo, que permitieron la elaboración del Modelo Experto de Simulación para monocultivo de soja bajo SD.

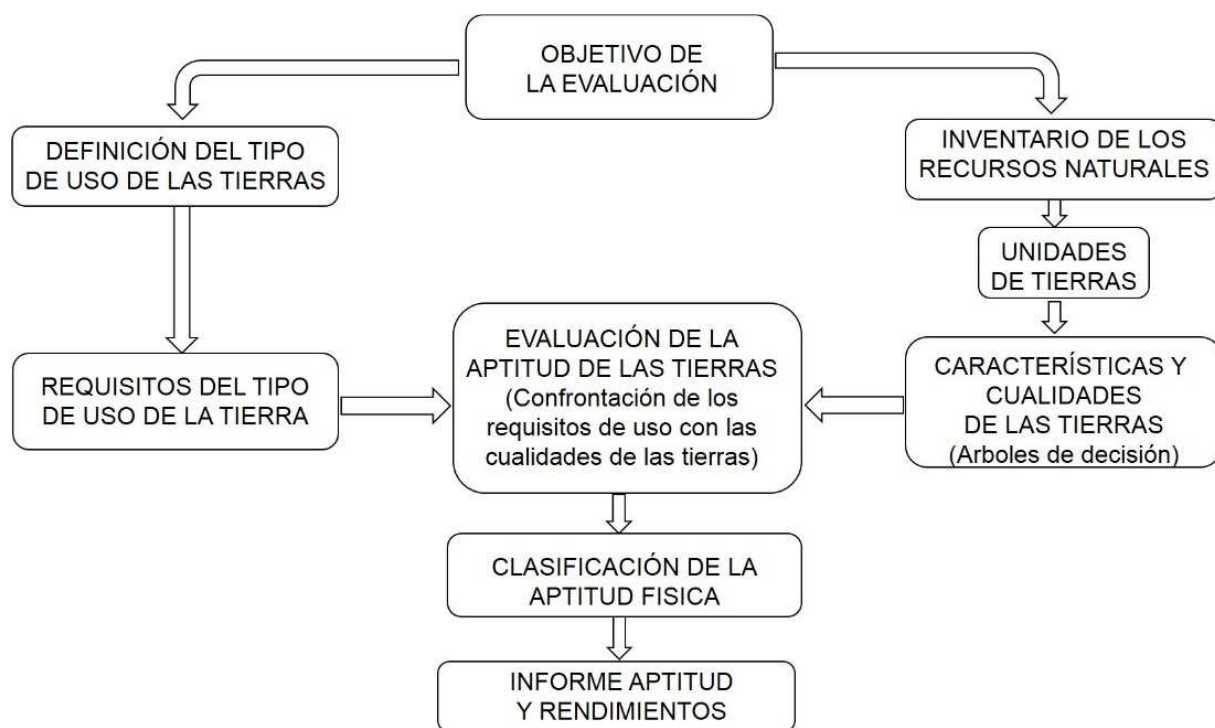


Figura 11. Diagrama del proceso de evaluación propuesto por FAO utilizando el software ALES.

2.3.1 Objetivo del modelo experto

Elaborar un modelo experto de simulación de evaluación de tierras que permita predecir la aptitud y los rendimientos del cultivo de soja en base a las variables estudiadas de cuatro Series de suelos representativas del sector sur del Departamento Almirante Brown (Chaco), con uno y seis años de cultivo y en cuatro situaciones de abastecimiento hídrico.

TUT: Monocultivo de soja bajo SD, en suelos desarrollados con vegetación de bosques que han sido habilitados y puestos en producción agrícola con una anterioridad de uno y seis años en el sector sur del Departamento Almirante Brown, Provincia del Chaco, Argentina, correspondientes a las Series de suelos Tolosa, Luz, Pampa y Avía Terai, en cuatro condiciones hídricas en función a las precipitaciones anuales: Sequía (S), Déficit (D), Media (M) y Superior a la media (E). La fecha de siembra se extiende desde inicios de diciembre hasta mediados de enero, y el período de cosecha ocurre en los meses de abril y mayo. El nivel tecnológico de manejo es medio, con sistema de labranza cero o SD, con control de malezas, plagas y enfermedades mediante el uso de herbicidas, insecticida y funguicidas, con inoculación a la

siembra y sin fertilización. No se consideran condiciones climáticas desfavorables en el período de cosecha.

Producto: Semilla de soja, rendimiento expresado en kg.ha⁻¹.

Rendimiento potencial: 3500 kg.ha⁻¹.

2.3.2 Requisitos del uso de la tierra

En la Tabla 10 se presentan los requerimientos del cultivo de soja necesarios para el logro de rendimientos óptimos.

Tabla 10. Requerimientos del cultivo de soja para rendimientos óptimos.

Características de la tierra	Requisitos	Fuente
Carbono orgánico total	> 2 % Bien provisto	Sys et al., 1993.
Densidad aparente	< 1,4 g.cm ⁻³	Sato et al., 2015.
Drenaje	Bueno	Sys et al., 1993.
Estabilidad estructural (CDMP)	Buena	Gil, 2012.
Infiltración	> 20 mm.h ⁻¹	USDA, 1999.
Profundidad efectiva	> 75 cm	Sys et al., 1993.
Precipitaciones anuales	700 a 900 mm.año ⁻¹	Sys et al., 1993.
Resistencia mecánica a la penetración	< 2 MPa	Sato et al., 2015.

2.3.3 Definición de las unidades de tierra

Las UT evaluadas corresponden a los tratamientos T2, T3, T5, T6, T8, T9, T11 y T12, (Series Tolosa, Luz, Pampa y Avía Terai, con dos condiciones de uso: un año de cultivo y seis años de monocultivo de soja) en cuatro situaciones en función a las precipitaciones anuales: Sequía (menores a 500 mm), Déficit (500 a 700 mm), Media (700 a 900 mm) y Superior a la media (mayores a 900 mm), constituyendo un total de 32 UT (Tabla 11).

Tabla 11. Unidades de tierras evaluadas en el modelo de simulación.

Precipitaciones anuales	Tratamientos	Serie de suelo	Condición de uso	UT
Sequía	T2	Tolosa	1S	S To1S
Sequía	T3	Tolosa	6S	S To6S
Sequía	T5	Luz	1S	S Lj1S
Sequía	T6	Luz	6S	S Lj6S
Sequía	T8	Pampa	1S	S Pt1S
Sequía	T9	Pampa	6S	S Pt6S
Sequía	T11	Avía Terai	1S	S Ak1S
Sequía	T12	Avía Terai	6S	S Ak6S
Déficit	T2	Tolosa	1S	D To1S
Déficit	T3	Tolosa	6S	D To6S
Déficit	T5	Luz	1S	D Lj1S
Déficit	T6	Luz	6S	D Lj6S
Déficit	T8	Pampa	1S	D Pt1S
Déficit	T9	Pampa	6S	D Pt6S
Déficit	T11	Avía Terai	1S	D Ak1S
Déficit	T12	Avía Terai	6S	D Ak6S
Media	T2	Tolosa	1S	M To1S
Media	T3	Tolosa	6S	M To6S
Media	T5	Luz	1S	M Lj1S
Media	T6	Luz	6S	M Lj6S
Media	T8	Pampa	1S	M Pt1S
Media	T9	Pampa	6S	M Pt6S
Media	T11	Avía Terai	1S	M Ak1S
Media	T12	Avía Terai	6S	M Ak6S
Superior a la media	T2	Tolosa	1S	E To1S
Superior a la media	T3	Tolosa	6S	E To6S
Superior a la media	T5	Luz	1S	E Lj1S
Superior a la media	T6	Luz	6S	E Lj6S
Superior a la media	T8	Pampa	1S	E Pt1S
Superior a la media	T9	Pampa	6S	E Pt6S
Superior a la media	T11	Avía Terai	1S	E Ak1S
Superior a la media	T12	Avía Terai	6S	E Ak6S

Referencias:

UT: Unidad de tierras

S: Sequía (precipitaciones menores a 500 mm)

D: Déficit (precipitaciones entre 500 a 700 mm)

M: Precipitaciones medias (precipitaciones entre 700 a 900 mm)

E: Precipitaciones superiores a la media anual (precipitaciones mayores a 900 mm)

To: Serie Tolosa

Lj: Serie Luz

Pt: Serie Pampa

Ak: Serie Avía Terai

1S: Un año de cultivo de soja

6S: Seis años de monocultivo de soja

2.3.4 Características de las tierras

Las UT son definidas por los valores de un conjunto de CaT, las cuales son atributos simples que pueden ser medidos o estimados. Los valores de las CaT, se combinan en niveles de CuT, que a su vez son atributos complejos de la tierra. Las CaT seleccionadas por el análisis de cada uno de los parámetros estudiados y por el ACP fueron: COT (0-10 cm), DA, CDMP, INF, RMP (10-20 cm). En el COT se consideró el espesor superficial debido a su importancia en las condiciones para el enraizamiento y la nutrición del cultivo, y a las mayores diferencias en este parámetro en los suelos; en la RMP se tomaron los datos del espesor subsuperficial, ya que en él se encuentran las mayores compactaciones edáficas, que afectan la penetración de las raíces. CE y P no se escogieron, porque se consideró que no son relevantes debido a que los valores de CE son muy bajos, todos los suelos son clasificados como no salinos, y en el caso de P, todos los suelos están muy bien provistos en este elemento.

Las CaT Drenaje y Profundidad efectiva de los suelos (PE) fueron incluidas en el modelo de simulación por su importancia en el movimiento del agua y en la profundidad de las restricciones para la exploración radicular. Estas Cat se obtuvieron de las descripciones de las cartas de suelos.

Las precipitaciones anuales se consideraron porque son de vital importancia para la producción agrícola, especialmente en zonas como el área de estudio, con gran variación interanual, como se comentó anteriormente. Esta Cat se estableció en función de datos meteorológicos del área, para cuatro condiciones frecuentes.

En el ALES, se definieron las clases y los límites de cada característica a partir de datos provenientes de información de expertos, cartas de suelos (Ledesma y Zurita, 1995b, 2003; Zurita, 2007), parámetros medidos a campo y a los valores críticos recopilados de la bibliografía (Sys et al., 1993; USDA, 1999; Gil, 2012; Sato et al., 2015; USDA, 2017). A su vez, a cada clase se le asigna un código de identificación con su correspondiente nombre descriptivo. El número de clases establecidas es variable, sin embargo, hay que considerar que cuanto mayor es la cantidad de clases más dificultoso se hace la resolución de los árboles de decisión. En el Tabla 12 se presentan las clases y límites de las CaT ingresadas en el modelo experto. Esta información representa o caracteriza a las UT que serán evaluadas en función del TUT.

Tabla 12. Clases y límites de las características de la tierra (CaT) utilizadas en el ALE S.

Código	CaT	Límites y clases
COT	COT (0 - 10 cm) (%)	0 - 1,2 Bajo
		1,2 - 2 Medio
		> 2 Alto
DA	Densidad aparente (g.cm ⁻³)	0 - 1,15 Baja
		> 1,15 Alta
Dren	Drenaje	Bueno
		Moderadamente bueno
		Algo pobre
		Pobre
EE	CDMP (Estabilidad estructural) (mm)	0 - 0,4 Bajo
		0,4 - 5 Alto
INF	Infiltración (cm.h ⁻¹)	0 - 2,3 Baja
		2,3 - 2,8 Media
		2,8 - 10 Alta
PE	Profundidad efectiva (cm)	0 - 25 Muy somero
		25 - 50 Somero
		50 - 100 Moderadamente profundo
		100 - 150 Profundo
Precip	Precipitaciones anuales (mm)	< 500 Sequía
		500 - 700 Déficit
		700 - 900 Media
		> 900 Superior a la media
RMP	RMP (10 - 20 cm) (MPa)	0 - 2 Baja
		2 - 3 Media
		3 - 10 Alta

Referencias:

COT: Concentración de carbono orgánico total en el espesor 0 - 10 cm.

CDMP: Cambio del diámetro medio ponderado.

RMP Resistencia mecánica a la penetración en el espesor 10 - 20 cm

2.3.5 Cualidades de la tierra

El ALES permite por medio de los árboles de decisión construir las CuT a partir de una o varias características diagnósticas. Las CaT y la selección de las CuT representan la oferta ambiental de las distintas UT para el TUT que se va a evaluar.

Dichas cualidades, se evaluaron de acuerdo al nivel de limitación o severidad en cuatro clases. Para la caracterización de las UT, se seleccionaron ocho CaT o atributos simples, que a su vez se integraron en cinco atributos complejos o CuT, según se detalla a continuación:

- CuT 1: Dinámica del agua del suelo (DAS)

Esta cualidad está definida por dos CaT: el Drenaje, atributo que se encuentra en las descripciones en las cartas de suelos, y la INF medida en cada uno de los suelos y para las condiciones de uso estudiadas, están asociados al movimiento del agua en el suelo. Estas dos características se integraron en un árbol de decisión para definir cuatro clases de DAS: 1 muy buena, 2 buena, 3 regular y 4 mala.

- CuT 2: Estructuración superficial (ES).

Definida por dos CaT: el CDMP (relacionado a la EEA) y el COT, ambos, medidos para los suelos y las condiciones de uso evaluadas, utilizados como indicadores del estado de la condición física en la capa superficial del suelo. Con estas dos CaT se construyó el árbol de decisión que definió cuatro clases de la ES: 1 muy buena, 2 buena, 3 regular y 4 mala.

- CuT 3: Espacio para la exploración radicular (EER).

Esta cualidad representa el lugar en el que las raíces de las plantas pueden penetrar sin mayores obstáculos donde alcanzar agua y nutrientes, de suma importancia para su crecimiento y desarrollo. La CaT considerada para su definición es la profundidad efectiva, insumo que se obtiene de las descripciones de los suelos. Se establecieron cuatro clases de EER: 1 muy buena, 2 buena, 3 regular y 4 mala.

- CuT 4: Impedancias mecánicas (IM).

Esta cualidad considera las CaT precipitaciones anuales, DA y RMP. Estas dos últimas, son parámetros usados para analizar la degradación del suelo por compactación debido, fundamentalmente, a las actividades agrícolas, y las precipitaciones anuales que inciden en el grado de la manifestación del impedimento, lo que repercute en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Estas tres CaT se constituyeron en un árbol de decisión y se definieron cuatro clases de IM: 1 no limitantes, 2 ligeras, 3 moderadas y 4 fuertes.

- CuT 5: Precipitaciones anuales (PA).

Esta cualidad está dada por las precipitaciones ocurridas en el año hidrológico y es de fundamental importancia ya que incide directamente en el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de soja. La CaT considerada para su definición son las precipitaciones ocurridas en el período entre los meses de julio de un año y junio del siguiente. Se establecieron cuatro clases de PA: 1 sequía, 2 déficit, 3 media y 4 superior a la media.

2.3.6 Definición de los RUT

El TUT elegido, soja bajo SD en suelos con uno y seis años de monocultivo, fue definido por 5 RUT:

- Condiciones para el almacenaje hídrico (CAH)
- Condiciones para el enraizamiento (CEn)
- Anclaje radicular (AR)
- Resistencias mecánicas (RM)

- Disponibilidad hídrica (DH)

2.3.6.1 Condición para el almacenaje hídrico (CAH)

En la definición del RUT correspondiente a la CAH de las tierras bajo cultivo de soja se utilizaron el drenaje y la INF para cada una de las UT (Tabla 11). Para el drenaje se establecieron las clases Bueno, Moderadamente bueno, Algo pobre y Pobre y para la INF las clases Baja, Media y Alta (Tabla 12), y se compatibilizaron en un árbol de decisión que considera las interacciones posibles entre las clases de los dos parámetros (Tabla 13), así se definieron cuatro clases de tierras para el cultivo de soja en SD, según la condición para el almacenaje hídrico de la tierra:

- Clase 1: óptima CAH. El perfil del suelo no presenta ninguna restricción para el normal crecimiento del cultivo.
- Clase 2: buena CAH. Se presentan leves restricciones que impiden la expresión del máximo potencial productivo del cultivo.
- Clase 3: regular CAH. Existen restricciones en el perfil que dificultan moderadamente el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.
- Clase 4: mala CAH. El perfil presenta severas restricciones que dificultan marcadamente, o impiden el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.

Tabla 13. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a la Condición de almacenaje hídrico de la tierra.

Drenaje	Infiltración básica	Clase de Tierra	Factor multiplicativo del rendimiento
Bueno	Baja	2	0,9
	Media	1	1
	Alta	2*	0,9
Moderadamente bueno	Baja	2	0,9
	Media	1	1
	Alta	1	1
Algo pobre	Baja	3	0,75
	Media	2	0,9
	Alta	2	0,9
Pobre	-	4	0,6

* Esta situación, de drenaje bueno e infiltración básica alta, es común en los suelos de los paleocausales o ríos muertos, de textura arenosa (no evaluados en este trabajo). Se considera que al ser alta la INF, el agua percola en profundidad, y no está disponible para el cultivo.

Por otra parte, cuando el drenaje del suelo es pobre, se aplica el concepto de máxima limitación, ya que la restricción es tan severa que es clasificado directamente como Clase de tierra 4.

2.3.6.2 Condiciones para el enraizamiento (CEn)

En la definición del RUT correspondiente a las CEn de las tierras bajo cultivo de soja se utilizaron el CDMP y el COT para cada una de las UT (Tabla 11). Para el CDMP se establecieron las clases Bajo y Alto, y para el COT las clases Bajo, Medio y Alto (Tabla 12), y se compatibilizaron en un árbol de decisión que considera las interacciones posibles entre las clases de los dos parámetros (Tabla 14), así se definieron cuatro clases de tierras para el cultivo de soja en SD, según las CEn:

- Clase 1: óptimas CEn. La condición física de la capa superficial del suelo no presenta ninguna restricción para el normal desarrollo del cultivo.
- Clase 2: buenas CEn. La condición física de la capa superficial del suelo presenta leves restricciones que impiden la expresión del máximo potencial productivo del cultivo.
- Clase 3: regulares CEn. Existen restricciones en la condición física de la capa superficial del suelo que dificultan moderadamente el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.
- Clase 4: malas CEn. La condición física de la capa superficial del suelo presenta severas restricciones que dificultan marcadamente, o impiden el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.

Tabla 14. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a las Condiciones para el enraizamiento.

CDMP	COT	Clase de Tierra	Factor multiplicativo del rendimiento
Bajo	Bajo	2	0,9
	Medio	1	1
	Alto	1	1
Alto	Bajo	3	0,75
	Medio	2	0,9
	Alto	2	0,9

2.3.6.3 Anclaje radicular (AR)

En la definición del RUT correspondiente al AR de las tierras bajo cultivo de soja se utilizó la profundidad efectiva del suelo para cada una de las UT (Tabla 11). Se establecieron las clases Muy somero, Somero, Moderadamente profundo y Profundo (Tabla 12) y se elaboró un árbol de decisión (Tabla 15), definiendo cuatro clases de tierras para el cultivo de soja en SD, según el AR de la tierra:

- Clase 1: óptimo AR. El perfil del suelo no presenta ninguna restricción para que las raíces de las plantas pueden penetrar sin mayores obstáculos, de suma importancia para su crecimiento y desarrollo.
- Clase 2: buen AR. Se presentan leves restricciones en el crecimiento de las raíces que impiden la expresión del máximo potencial productivo del cultivo.
- Clase 3: regular AR. Existen restricciones en el suelo que dificultan moderadamente el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.
- Clase 4: mal AR. El suelo presenta severas restricciones para el crecimiento radicular que dificultan marcadamente, o impiden el desarrollo y la expresión

Tabla 15. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente al anclaje radicular de la tierra.

Profundidad efectiva	Clase de Tierra	Factor multiplicativo del rendimiento
Muy somero	3	0,75
Somero	2	0,9
Moderadamente profundo	1	1
Profundo	1	1

2.3.6.4 Resistencias mecánicas (RM)

En la definición del RUT correspondiente a las RM de las tierras bajo cultivo de soja se utilizaron la RMP, la DA y las PA para cada una de las UT (Tabla 11). Para la RMP se establecieron las clases Baja, Media y Alta, para la DA las clases Baja y Alta, y para las precipitaciones anuales las clases Sequía (menor a 500 mm), Déficit (500 a 700 mm), Media (700 a 900 mm) y Superior a la media (mayor a 900 mm) (Tabla 12) y se compatibilizaron en un árbol de decisión que considera las interacciones posibles entre las clases de los dos parámetros y las precipitaciones anuales (Tabla 16), así se definieron cuatro clases de tierras para el cultivo de soja en SD, según las RM de la tierra:

- Clase 1: óptima RM. El perfil del suelo no presenta ninguna restricción para el normal crecimiento del cultivo.
- Clase 2: buena RM. Se presentan leves restricciones por compactación que impiden la expresión del máximo potencial productivo del cultivo.
- Clase 3: regular RM. Existen restricciones en el perfil que dificultan moderadamente el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.
- Clase 4: mala RM. El suelo presenta severas restricciones que dificultan marcadamente, o impiden el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.

Tabla 16. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a las Resistencias mecánicas de la tierra.

RMP	DA	Precipitaciones anuales	Clase de Tierra	Factor multiplicativo del rendimiento
Baja	Baja	Sequía	4	0,6
		Déficit	2	0,9
		Media	1	1
		Superior a la media	1	1
	Alta	Sequía	4	0,6
		Déficit	3	0,75
		Media	1	1
		Superior a la media	1	1
Media	Baja	Sequía	4	0,6
		Déficit	3	0,75
		Media	2	0,9
		Superior a la media	2	0,9
	Alta	Sequía	4	0,6
		Déficit	3	0,75
		Media	2	0,9
		Superior a la media	2	0,9
Alta	Baja	Sequía	4	0,6
		Déficit	3	0,75
		Media	3	0,75
		Superior a la media	2	0,9
	Alta	Sequía	4	0,6
		Déficit	4	0,6
		Media	4	0,6
		Superior a la media	3	0,75

2.3.6.5 Disponibilidad hídrica (DH)

En la definición del RUT correspondiente a la DH de las tierras bajo cultivo de soja se utilizaron las precipitaciones anuales para cada una de las UT (Tabla 11). Se establecieron las clases Sequía (menor a 500 mm), Déficit (500 a 700 mm), Media (700 a 900 mm) y Superior a la media (mayor a 900 mm) (Tabla 12) y se elaboró un árbol de decisión (Tabla 17), definiendo cuatro clases de tierras para el cultivo de soja en SD, según la DH:

- Clase 1: mala DH. Se presentan severas restricciones que afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo.
- Clase 2: regular DH. Se presentan moderadas restricciones en el crecimiento y desarrollo que impiden la expresión productiva del cultivo.

- Clase 3: buena DH. Existen ligeras restricciones en el suelo que dificultan levemente el desarrollo y la expresión de la productividad del cultivo.
- Clase 4: óptima DH. El suelo no presenta restricciones para el crecimiento y desarrollo que permiten la expresión del máximo potencial productivo del cultivo.

Tabla 17. Árbol de decisiones para definir los Requisitos de Uso correspondiente a la DH:

Precipitaciones anuales	Clase de Tierra	Factor multiplicativo del rendimiento
Sequía	1	0
Déficit	2	0,3
Media	3	0,75
Superior a la media	4	1

Los arboles de decisión creados para establecer las clases de las CAH, las CEn, el AR, las RM y la DH fueron utilizados para la evaluación de la aptitud final de las tierras.

De la confrontación entre las UT en estudio (oferta de la tierra), y el TUT seleccionado (demanda del uso productivo), mediante un árbol de decisión, surgen las clases de tierras según su aptitud y los rendimientos. Se definieron cuatro clases, que indican la aptitud relativa para ser utilizadas por el TUT de soja bajo SD.

Las clases determinadas son:

- **1:** Tierras aptas (A), con óptimas condiciones edáficas para el cultivo de soja bajo SD, prácticamente sin restricciones.
- **2:** Tierras moderadamente aptas (MdA); en general con muy buenas condiciones para el cultivo de soja bajo SD. alguna de las CaT consideradas puede presentar una leve a moderada restricción para el crecimiento y desarrollo del cultivo.
- **3:** Tierras marginalmente aptas (MgA), con buenas condiciones para el cultivo de soja bajo SD. Presenta restricciones moderadas en varias de las CaT o de las CuT consideradas.
- **4:** Tierras no aptas (NA), con regulares a malas condiciones para el cultivo de soja bajo SD. Las restricciones presentes en varias de las CaT y CuT, dificultan considerablemente el desarrollo del cultivo.

El árbol de decisión combina las clases de las CuT seleccionadas: cuatro clases según la DAS, cuatro según la ES, cuatro según el EER, cuatro según las IM y cuatro clases de las PA.

El esquema de la Figura 12 representa el modelo desarrollado, utilizado por el ALES para evaluar la aptitud final de cada una de las UT para el TUT considerado, y que indicará la aptitud que presenta la tierra y los rendimientos esperados.

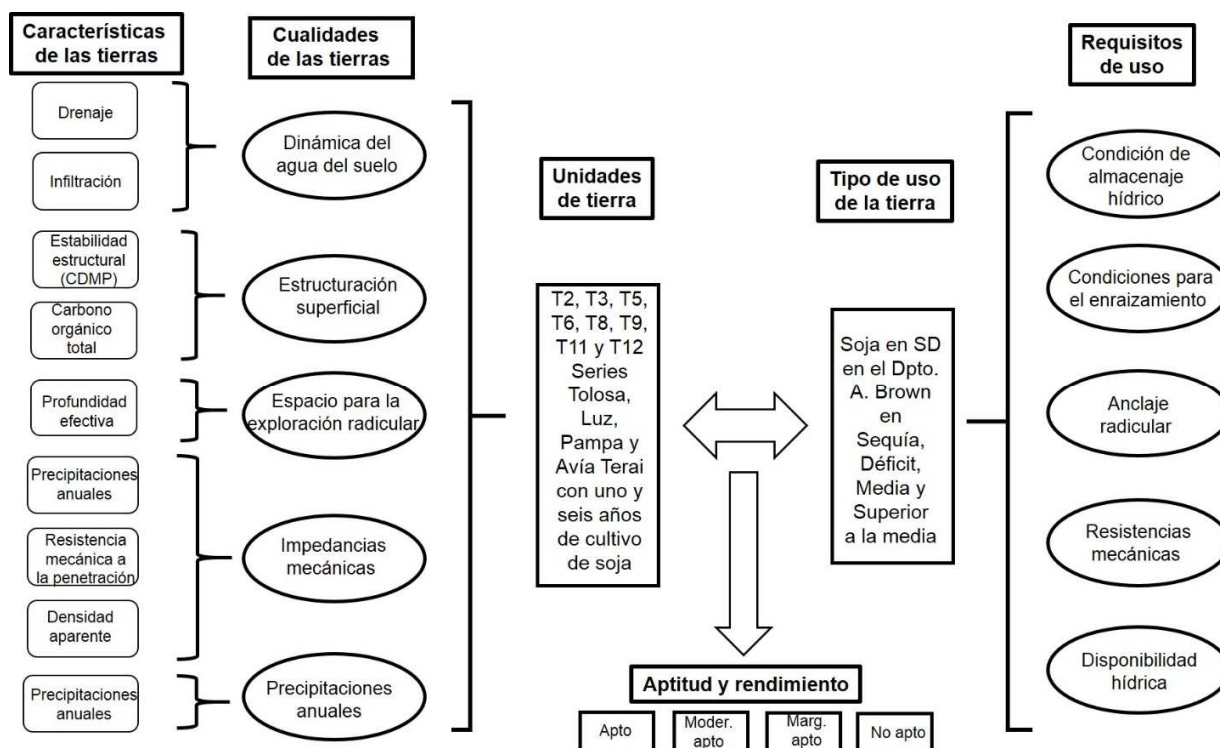


Figura 12: Representación del modelo desarrollado según ALES para evaluar la aptitud de tierras para el cultivo de soja bajo SD

Definido conceptualmente al modelo, la etapa siguiente consistió en suministrar la información al ALES para que realice la evaluación.

Las clases obtenidas, indican la aptitud física de la tierra para ser utilizada con cultivo de soja bajo SD. Una de las ventajas de esta metodología es que además de la clase de aptitud final, también se obtiene la clase de cada CuT y dentro de ella la CaT que actuaría como limitante. De esta manera es posible recorrer el árbol de decisiones que asignó la clase final, y analizar la incidencia de cada una de las CuT en la aptitud final. La oportunidad de aplicación de esta metodología, es tanto para las UT evaluadas, como así también para aquellas que se disponga de la información necesaria para correr el modelo, para el TUT estudiado. La evaluación de tierras con el programa ALES, es un modelo dinámico, dado que es posible modificar, actualizar, agregar o quitar CaT o CuT (Rossiter y Van Wambeke, 1995).

3. RESULTADOS

3.1 VARIABLES EDÁFICAS Y PRODUCTIVAS

3.1.1 Densidad aparente

Los valores de DA se incrementaron cuando los lotes se destinaron a la producción agrícola, siendo en el sexto año del cultivo de soja donde se produjo el mayor valor para los tres espesores estudiados, simultáneamente con el aumento en profundidad en cada uno de los tratamientos.

En el espesor 0 - 5 cm, el valor promedio fue 0,89 g.cm⁻³ en los Bo, 1,05 g.cm⁻³ en los 1S y 1,18 g.cm⁻³ en los 6S. En el espesor 5 - 10 cm en Bo el valor medio fue de 0,98 g.cm⁻³, de 1,12 g.cm⁻³ en 1S y de 1,26 g.cm⁻³ en 6S. En 10 - 20 cm también se produjo un incremento de la DA, siendo en los Bo 1,02 g.cm⁻³, 1,17 en los 1S y 1,29 g.cm⁻³ en los 6S.

El CV para los Bo fue de 8,4% para el primer espesor, siendo de 7,8% para el segundo y tercer espesor; para los 1S fue de 9,4%, 10,3% y 10% para el primer, segundo y tercer espesor, respectivamente, y para los 6S fue de 8,6%, 8,8% y 7,3%, respectivamente. La DA determinada con el método del cilindro es considerada un parámetro de baja variabilidad y estos valores de CV coinciden con los citados en la bibliografía como valores normales de variación (Pennock et al., 2008).

Al evaluar los valores de DA la interacción entre las diferentes condiciones de uso y los espesores no fue significativa ($p > 0,05$). Sin embargo, se hallaron diferencias significativas entre las condiciones de uso y entre los espesores.

En los 1S la DA aumentó (1,11 g.cm⁻³) en relación a los Bo (0,96 g.cm⁻³) y más aún en los 6S (1,24 g.cm⁻³), existiendo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$) entre ellas (Figura 13). Los CV fueron 10,71% para los Bo, 12,69% para los 1S y 9,26% para los 6S.

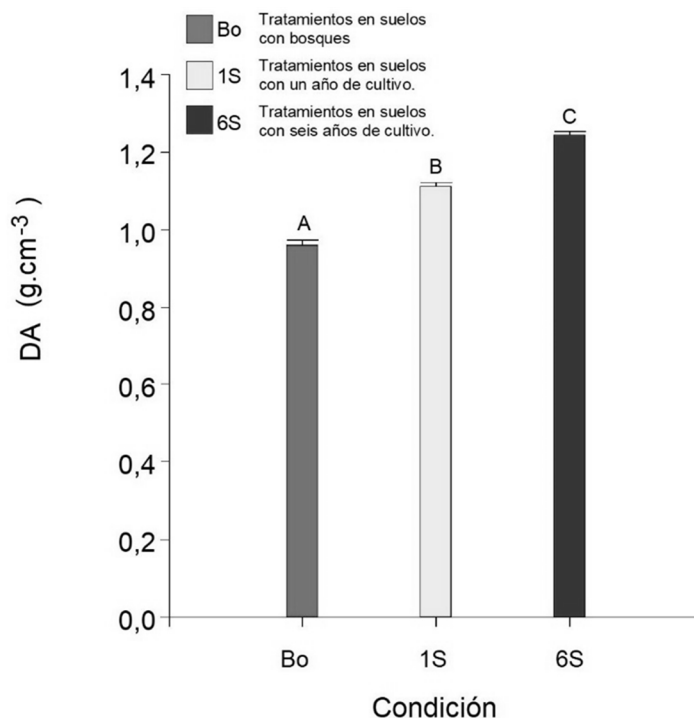


Figura 13. Densidad aparente (DA; g.cm⁻³) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año (1S) y seis años (6S) de cultivo de soja, independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la DA entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

Al evaluar los promedios de los valores de DA de cada espesor estudiado sin considerar las condiciones de uso, se encontró que existen diferencias significativas entre ellos ($p < 0,0001$).

Los valores medios de DA fueron 1,08 g.cm⁻³ en los primeros 5 cm, 1,16 g.cm⁻³ en el espesor 5 - 10 cm y 1,20 g.cm⁻³ en el espesor 10 - 20 cm (Figura 14). Los CV fueron de 13,88%, 13,82% y 12,04% para los tres espesores estudiados.

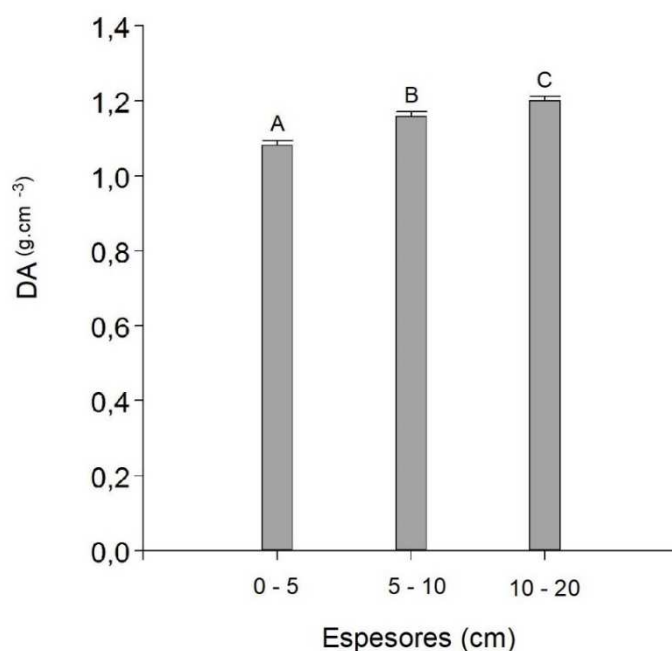


Figura 14. Densidad aparente (DA; g.cm⁻³) para los tres espesores estudiados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la DA entre los espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

La interacción de los valores de DA entre los tratamientos analizados y los espesores no fue significativa ($p > 0,05$), por lo que se describirán los resultados para los tratamientos con los tres espesores en conjunto. Las diferencias de DA fueron significativas entre tratamientos ($p < 0,0001$).

En la Tabla 18 se muestran los valores medios de DA de los tratamientos, los coeficientes de variación y las diferencias estadísticas encontradas entre ellos. El valor máximo fue de 1,28 g.cm⁻³ en el T12 y el valor mínimo fue de 0,91 g.cm⁻³ en el T1.

Tabla 18. Densidad aparente (DA; g.cm⁻³) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados, independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la Da entre los tratamientos.

Tratamientos	DA (g.cm ⁻³)	CV (%)
T1	0,91 A	9,75
T2	1,22 D	8,76
T3	1,21 D	8,43
T4	0,94 AB	8,81
T5	1,09 C	13,28
T6	1,27 E	8,86
T7	1,02 B	12,40
T8	1,12 C	9,29
T9	1,22 D	8,53
T10	0,97 AB	8,21
T11	1,01 B	12,55
T12	1,28 E	10,05

Al confrontar los tratamientos para la misma Serie de suelo, se encontró que T1, correspondiente a Tolosa con Bo y DA $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$ se diferencia significativamente de T2 y T3, de igual Serie de suelo con 1S y 6S con valores de $1,22$ y $1,21 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente. Los tratamientos T4, T5 y T6 con Bo, 1S y 6S, pertenecientes a Luz con valores de $0,94$, $1,09$ y $1,27 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente, se diferencian estadísticamente entre ellos. En el caso de los tratamientos T7, T8 y T9 concernientes a Pampa con Bo ($1,02 \text{ g.cm}^{-3}$), 1S ($1,12 \text{ g.cm}^{-3}$) y con 6S ($1,22 \text{ g.cm}^{-3}$), respectivamente, también presentan diferencias significativas entre ellos. Por otra parte, el comportamiento en los tratamientos con Avía Terai fue que T10, con Bo, con DA de $0,97 \text{ g.cm}^{-3}$ y T11 con 1S con $1,01 \text{ g.cm}^{-3}$, presentaron diferencias significativas con T12 con 6S y una media de $1,28 \text{ g.cm}^{-3}$.

Al comparar según la condición de uso, los Bo T1 y T7, se diferencian significativamente. En los 1S, T2 se diferencia significativamente de T5, T8 y T11 y, por otra parte, T11 se diferencia de T5 y T8. En los 6S, T3 y T9 se diferencian significativamente de T6 y T12.

Los contrastes entre suelos, no mostraron diferencias estadísticamente significativas.

Al comparar las condiciones de uso, se diferenciaron estadísticamente los Bo frente a los 1S ($p < 0,0001$) y 6S ($p < 0,0001$), lo mismo sucede al contrastar esta última con los 1S ($p < 0,0001$).

Al realizar contrastes en los Bo, sólo se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre T1 y T7 ($p = 0,0070$). En los 1S fueron significativos los contrastes entre T2 y T5 ($p < 0,0001$), entre T2 y T8 ($p = 0,0001$), entre T2 y T11 ($p < 0,0001$), entre T5 y T11 ($p = 0,0010$) y entre T8 y T11 ($p < 0,0001$) y en los 6S los contrastes que se diferenciaron fueron T3 y T6 ($p = 0,0089$), entre T3 y T12 ($p = 0,0060$), entre T6 y T9 ($p = 0,0382$) y entre T9 y T12 ($p = 0,0278$).

Los contrastes entre tratamientos de igual Serie de suelo con uno y seis años de uso agrícola que dieron diferencias significativas fueron entre T5 y T6 ($p < 0,0001$), entre T8 y T9 ($p < 0,0001$) y entre T11 y T12 ($p < 0,0001$).

3.1.2 Resistencia mecánica a la penetración

La RMP es un parámetro que evalúa compactación y ha sido seleccionada para diferentes suelos y ambientes en valoraciones de indicadores de calidad de suelos (Rojas et al., 2016). La interacción entre las diferentes condiciones de uso y los espesores fue significativa ($p = 0,022$), como así también lo fueron entre las condiciones de uso ($p < 0,0001$) y entre los espesores estudiados ($p < 0,0001$).

Las diferencias de los valores de RMP entre las condiciones de uso en los primeros 10 cm fueron estadísticamente significativas ($p > 0,0001$), siendo de $0,69 \text{ MPa}$ en los Bo, $1,19 \text{ MPa}$ en los 1S y $1,64 \text{ MPa}$ en los 6S (Figura 15).

La mayor variabilidad se observó en los Bo (CV 42,0%) en relación a los 1S y 6S (27,1 y 25,0%, respectivamente).

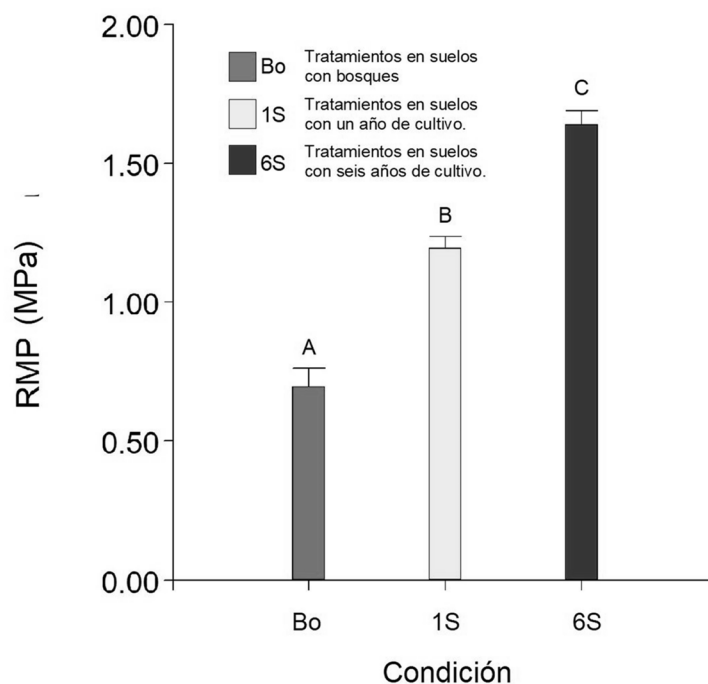


Figura 15. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

En el espesor de 10 a 20 cm, si bien, la RMP aumentó con el uso agrícola, al igual que en el espesor superficial, las diferencias sólo fueron estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en 6S (2,22 MPa) respecto de Bo (1,69 MPa) y 1S (1,90 MPa) (Figura 16). Los CV en este espesor fueron 25,2% en los Bo, 15,3% en los 1S y 22,9% en los 6S.

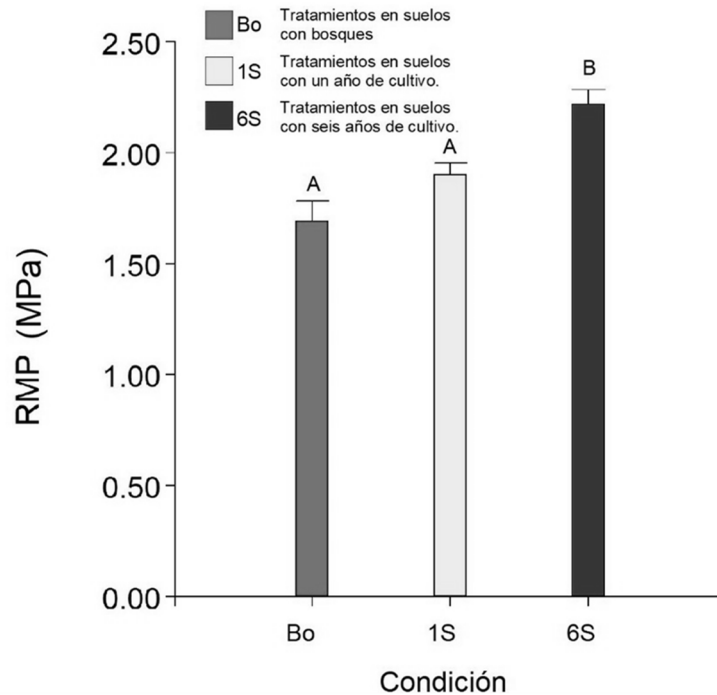


Figura 16. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

El valor medio de RMP, en los primeros 10 cm, fue de 1,31 MPa y de 2,01 MPa en el espesor 10 - 20 cm (Figura 17), siendo los mínimos y máximos de 0,46 y 2,76; 0,91 y 3,31 MPa, respectivamente. El espesor de suelo 0 - 10 cm tuvo mayor variabilidad en superficie (CV 36,96%) en relación al espesor 10 - 20 cm (CV 24,57%).

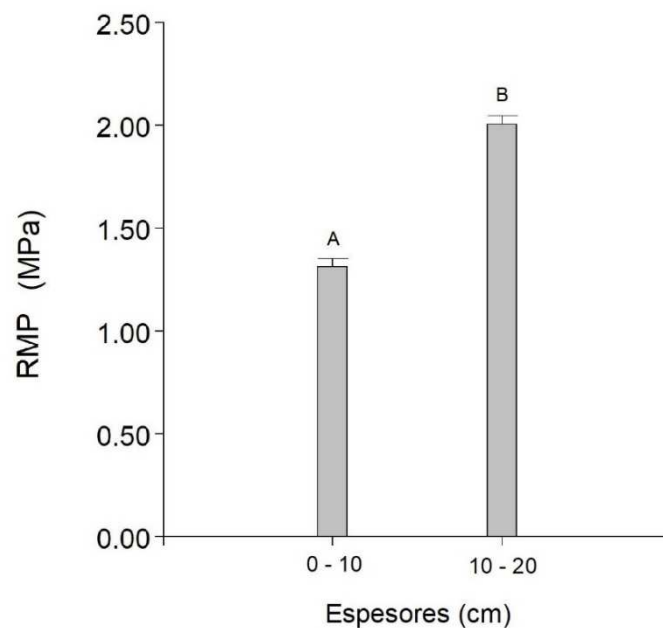


Figura 17. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) para los dos espesores estudiados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre los espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

Al considerar los valores de RMP de los 12 tratamientos, los dos espesores estudiados y la interacción entre ambos factores, se hallaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$).

La Tabla 19 muestra los valores medios de la RMP determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 0 - 10 cm. La mayor RMP se presentó en T6 con 1,72 MPa y el menor valor en el T1 con 0,51 MPa.

En el espesor superficial, al confrontar los 12 tratamientos puede observarse que para la misma Serie de suelo, en los casos de Tolosa (T1-T2-T3) y Luz (T4-T5-T6) se diferenciaron significativamente entre sí para las diferentes condiciones de uso. Sin embargo, en Pampa (T7 y T8) y Avía Terai (T10 y T11) no se diferenciaron de T9 y T12, respectivamente.

Tabla 19. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) y coeficiente de variación (CV%) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre los tratamientos.

Tratamientos	RMP (MPa)	CV (%)
T1	0,51 A	6,39
T2	1,43 C	22,63
T3	1,70 D	30,58
T4	0,60 A	24,04
T5	1,11 B	20,9
T6	1,72 D	19,5
T7	0,81 AB	28,77
T8	1,12 B	32,71
T9	1,44 C	28,96
T10	0,84 AB	57,03
T11	1,11 B	22,93
T12	1,68 CD	19,64

Además, los Bo (T1-T4-T7-T10) no se diferenciaron significativamente entre ellos, sin embargo, los 1S, T5, T8 y T11 se diferenciaron significativamente de T2, y en los 6S, T9 se diferencia significativamente de T3 y T6.

Al realizar contrastes de los valores de RMP en el espesor 0 - 10 cm, entre suelos se encontró que Avía Terai se diferenció estadísticamente de Tolosa ($p = 0,0001$), Luz ($p = 0,0005$) y Pampa ($p = 0,0123$).

Al contrastar las historias de uso se diferenciaron estadísticamente las tres condiciones entre sí ($p < 0,0001$).

Los contrastes entre los Bo solo manifestaron diferencias estadísticamente significativas T1 y T10, sin embargo, en los 1S el T2 fue significativamente diferente con T5, T8 y T11. Los 6S diferenciaron los contrastes entre T3 de T12 y T6 de T9.

Todos los contrastes entre tratamientos de igual Serie de suelo con 1S y 6S dieron diferencias significativas entre T2 y T3, T5 y T6, T8 y T9 y, entre T11 y T12.

La Tabla 20 muestra los valores medios de la RMP determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 10 a 20 cm. La mayor RMP se observó en T6 con 2,40 MPa y el menor valor en el T7 con 1,47 MPa.

En el espesor subsuperficial, al confrontar los 12 tratamientos puede observarse que para el mismo suelo, en el caso de la Serie Tolosa, T1 se diferencia de T2, y en Pampa y Avía Terai, se diferenciaron los tratamientos con 6S, es decir, T6 y T9. Cabe destacar que T6 presenta los valores máximos en los dos espesores.

Tabla 20. Resistencia mecánica a la penetración (RMP; MPa) y coeficiente de variación (CV%) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la RMP entre los tratamientos.

Tratamientos	RMP (MPa)	CV (%)
T1	1,64 AB	21,04
T2	2,20 CD	21,11
T3	2,02 BC	25,01
T4	1,81 ABC	19,5
T5	1,83 ABC	12,2
T6	2,40 D	23,32
T7	1,47 A	18,45
T8	1,69 AB	23,84
T9	2,23 CD	20,73
T10	1,84 ABC	35,39
T11	1,88 ABC	17,91
T12	2,23 CD	21,63

Además, los Bo (T1-T4-T7-T10) no se diferenciaron significativamente entre ellos, sin embargo, en los 1S, T2 se diferenció significativamente de T8, y en los 6S, T3 se diferencia significativamente de T6.

Al realizar contrastes de los valores de RMP en el espesor 10 - 20 cm, entre suelos, se encontró que Avía Terai se diferenció estadísticamente de las demás ($p < 0,0001$). Ahora bien, la condición 6S se diferenció de Bo ($p < 0,0001$) y 1S ($p = 0,0001$).

Los contrastes entre los Bo solo manifestaron diferencias estadísticamente significativas entre T1 y T10 ($p = 0,0104$), sin embargo, en los de 1S el T2 fue significativamente diferente con T5 ($p = 0,0238$) y T8 ($p = 0,0019$). Los 6S diferenciaron el contraste entre T3 y T6 ($p = 0,0167$).

Los contrastes entre tratamientos de igual Serie de suelo con 1S y 6S que dieron diferencias significativas fueron entre T5 y T6 ($p = 0,0005$), entre T8 y T9 ($p = 0,0011$) y entre T11 y T12 ($p = 0,0033$).

3.1.3 Carbono orgánico total

Las concentraciones de COT en general disminuyeron en los lotes cultivados y fueron más bajos en el espesor subsuperficial.

El análisis completo de todos los datos de COT mostró diferencias significativas para las condiciones de uso ($p < 0,0001$), los dos espesores estudiados ($p < 0,0001$) y la interacción entre las diferentes condiciones de uso y los espesores ($p < 0,0001$).

Las concentraciones de COT, en los primeros 0 - 10 cm fueron de 3,43% en Bo, 2,25% en los 1S y 1,80% en los 6S, siendo estas diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$) (Figura 18), con CV de 25,44, 17,05 y 21,11%, respectivamente.

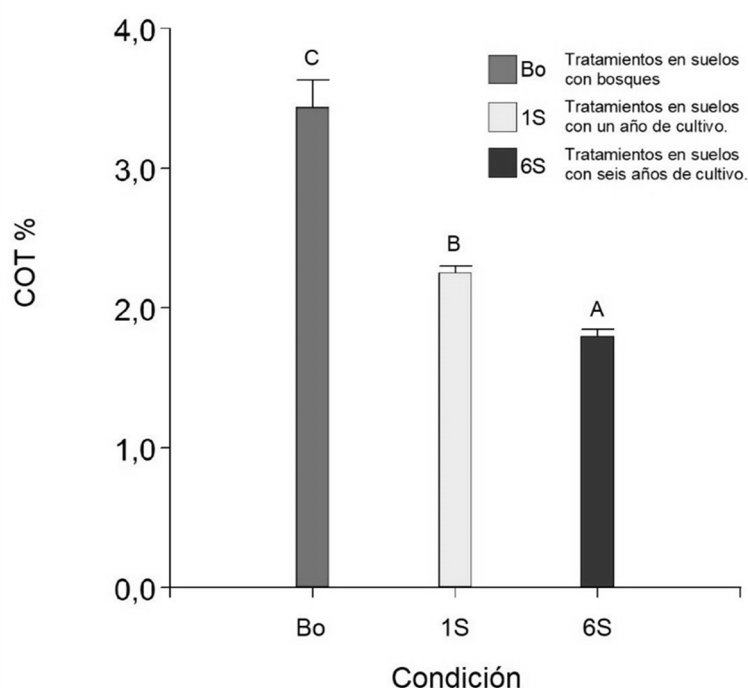


Figura 18. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

En el espesor superficial del suelo, las concentraciones de COT determinadas en Bo, 1S y 6S, permiten clasificar a los suelos en muy bien provistos, bien provistos y moderadamente provistos, respectivamente.

En el espesor de 10 - 20 cm, si bien, los valores de COT disminuyeron con el uso agrícola, al igual que en el espesor superficial, las diferencias sólo fueron estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en 6S (1,32%) respecto de Bo (1,75%) y 1S (1,57%) (Figura 19). Los CV para este espesor en Bo, 1S y 6S fueron 21,62, 21,85 y 29,21%, respectivamente.

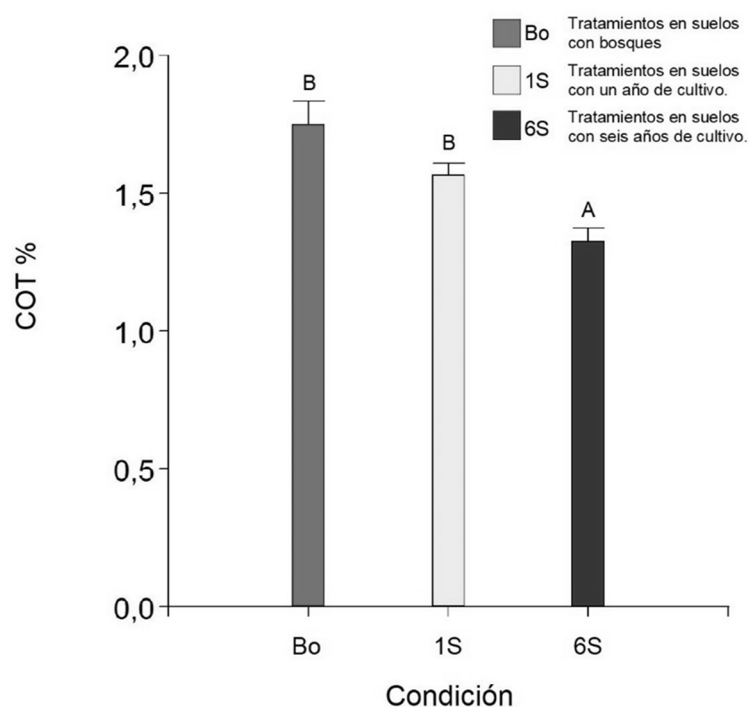


Figura 19. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

Las concentraciones de COT determinadas en el espesor subsuperficial, permiten clasificarlos como suelos moderadamente provistos en Bo y 1S, y como pobremente provistos en 6S.

El análisis de los datos de COT en función a los espesores estudiados mostró diferencias significativas entre ellas ($p < 0,0001$), siendo los niveles de COT en el espesor superficial un 33,18% mayor que en el espesor subsuperficial. En los primeros 0 - 10 cm el valor medio de COT fue de 2,23%, mientras que a 10 - 20 cm fue de 1,49% (Figura 20). Los CV para estos espesores fueron de 32,3 y 26,59%, observándose mayor variabilidad en los datos del espesor superficial.

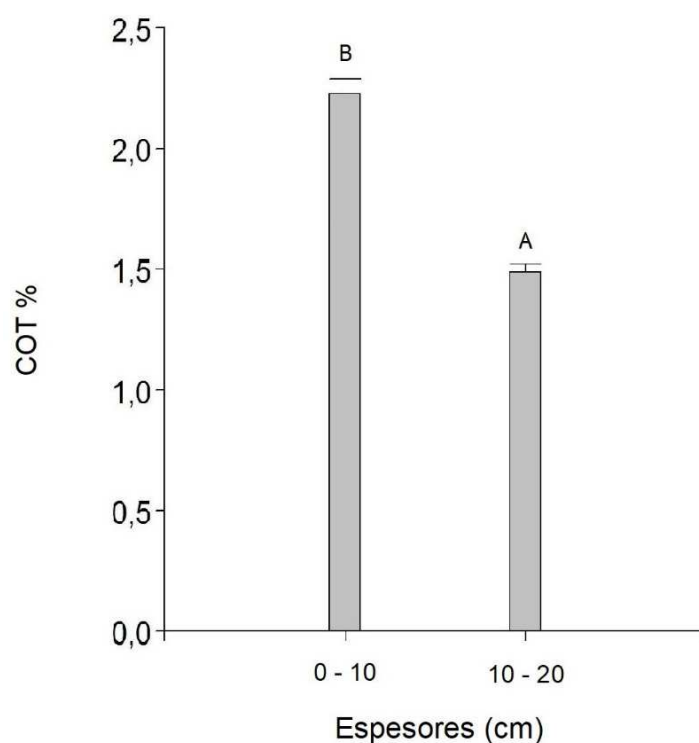


Figura 20. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) para los dos espesores estudiados 0 - 10 y 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre los espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

El análisis de los valores de COT de los 12 tratamientos, los dos espesores estudiados y la interacción entre ambos factores, detectó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$), en todos los casos.

La Tabla 21 muestra los valores medios de COT determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 0 - 10 cm. El valor máximo fue de 4,23 en el T1, y el valor mínimo de 1,71 en el T6.

Tabla 21. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) y coeficiente de variación (CV %) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre los tratamientos.

Tratamientos	COT (%)	CV (%)
T1	4,23 E	10,22
T2	1,99 A	16,35
T3	1,75 A	26,13
T4	3,78 E	22,49
T5	2,32 B	12,25
T6	1,71 A	17,06
T7	2,76 CD	13,10
T8	2,36 BC	19,96
T9	1,99 A	21,03
T10	2,97 D	30,18
T11	2,34BC	14,25
T12	1,74A	16,35

En el espesor superficial, al observar los tratamientos de igual Serie de suelo, se puede ver que, en Tolosa, T1 se diferencia significativamente de T2 y T3, en Luz (T4, T5 y T6) y Avía Terai (T10, T11 y T12) los tratamientos se diferencian significativamente entre sí, y en Pampa T7 y T8 se diferencian de T9. El análisis según la condición de uso, puso en evidencia que, en los Bo, T1 y T4 se diferencian significativamente de T7 y T10, en los 1S, T2 se diferencia de T5, T8 y T11. Sin embargo, en los 6S no se observan diferencias significativas entre ellos.

El análisis de contrastes entre Series de suelos, en el espesor 0 - 10 cm, estableció que Tolosa y Luz se diferencian estadísticamente de Pampa ($p = 0,0138$ y $0,0437$, respectivamente) y Avía Terai ($p = 0,0077$ y $0,0263$, respectivamente).

Al contrastar las condiciones de uso, Bo fue estadísticamente diferente de 1S ($p < 0,0001$) y 6S ($p < 0,0001$), como así también lo fue 1S de 6S ($p < 0,0001$).

Los contrastes de los Bo entre sí, determinaron que T1 y T4 se diferencian estadísticamente de T7 ($p < 0,0001$ y $p = 0,0002$, respectivamente) y T10 ($p < 0,0001$ y $p = 0,0025$, respectivamente). T2 se diferenció de T5 ($p = 0,0289$), T8 ($p = 0,0151$) y T11 ($p < 0,0001$) en los contrastes determinados entre los 1S. No obstante, en los 6S no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$), entre ellos.

Los contrastes entre 1S y 6S, de igual Serie de suelo, mostraron diferencias entre T5 y T6 ($p < 0,0001$), T8 y T9 ($p = 0,0171$) y, T11 y T12 ($p = 0,0002$).

La Tabla 22 muestra los valores medios del contenido de COT determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 10 a 20 cm. El valor máximo fue de 1,94 en el T7 y el valor mínimo de 1,19 en el T6.

Tabla 22. Concentración de carbono orgánico total (COT; %) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de COT entre los tratamientos.

Tratamientos	COT (%)	CV (%)
T1	1,78 CD	16,48
T2	1,33 AB	26,84
T3	1,48 BC	27,03
T4	1,63 BCD	18,80
T5	1,60 BCD	11,61
T6	1,19 A	34,07
T7	1,94 D	14,48
T8	1,75 CD	21,85
T9	1,31 AB	26,25
T10	1,64 BCD	35,48
T11	1,57 BC	18,78
T12	1,32 AB	28,67

La comparación de los tratamientos de igual Serie de suelo, mostró que, en Tolosa, T1 se diferencia significativamente de T2, en Luz T4 y T5 lo hacen de T6; en Pampa T7 y T8 son

diferentes de T9, mientras que en Avía Terai los tratamientos no se diferencian significativamente entre sí.

El análisis según la condición de uso, determinó que los Bo no se diferencian significativamente entre ellos, T2 se diferencia de T8 en los 1S y, T3 de T6 en los 6S.

Al contrastar entre Series de suelos se encontró que en el espesor 10 - 20 cm solo se diferencia significativamente Luz de Pampa ($p = 0,048$). El análisis por las condiciones de uso diferenció estadísticamente los Bo de los 1S ($p = 0,0474$) y 6S ($p < 0,0001$), lo mismo sucedió al contrastar estas dos últimas ($p = 0,0003$). Por otra parte, los contrastes de los Bo entre sí, no arrojaron diferencias estadísticamente significativas, mientras que, en los 1S, T2 se diferenció de T5 ($p = 0,0369$) y T8 ($p = 0,0016$), y en los 6S solo lo hizo T3 de T6 ($p = 0,0270$).

Los contrastes entre 1S y 6S, de igual Serie de suelo, determinaron diferencias significativas entre T5 y T6 ($p = 0,0017$), T8 y T9 ($p = 0,0009$) y, T11 y T12 ($p = 0,0481$).

3.1.4 Nitrógeno total

El Nitrógeno total (N) ha sido utilizado como indicador de calidad de suelos, tanto para evaluar efectos de cultivos o efectos de cambios en el uso de la tierra (Rojas et al., 2016).

El análisis completo de todos los valores de N presentó diferencias significativas para las condiciones de uso ($p < 0,0001$), los dos espesores estudiados ($p = 0,0285$) y la interacción entre éstos ($p = 0,0031$).

La concentración de N, en el espesor superficial, disminuyó significativamente ($p < 0,0001$) cuando los suelos fueron puestos en producción agrícola. Los valores medios de N fueron de 0,219% en Bo, 0,165% en 1S y 0,138% en 6S (Figura 21). Lo que permitiría clasificar a los Bo como muy bien provistos, a los 1S como bien provistos y a los 6S como moderadamente provistos de N. Los datos de N en Bo presentaron mayor variabilidad (CV 22,61%) en relación a los 1S y 6S (CV 18,67 y 17,91%, respectivamente).

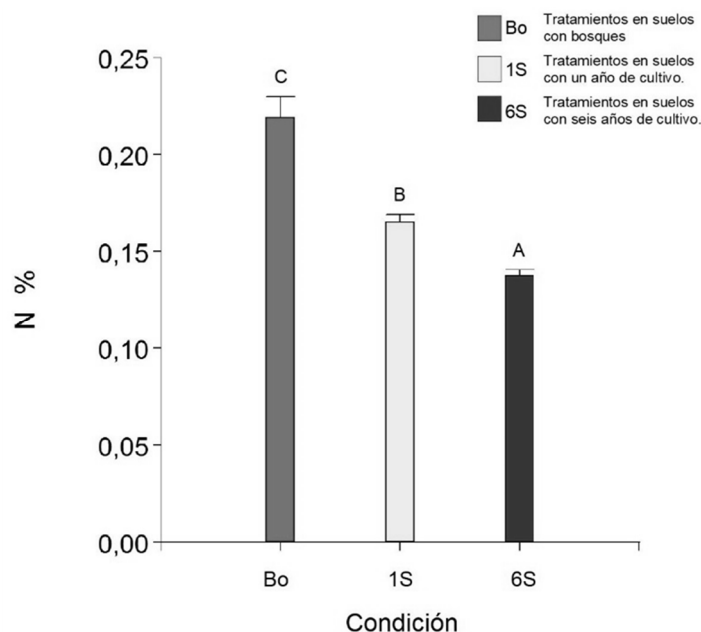


Figura 21. Concentración de Nitrógeno total (N; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de N entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

La concentración de N, en el espesor de 10 - 20 cm, registró diferencias estadísticamente significativas en 1S (0,128%) con respecto a Bo (0,115%) y a 6S (0,107%), (Figura 22). No obstante, en estas tres condiciones de uso, los suelos estarían moderadamente provistos de N. Siendo los CV de esos contenidos de N, 15,83, 20,63 y 21,21%, para Bo, 1S y 6S, respectivamente.

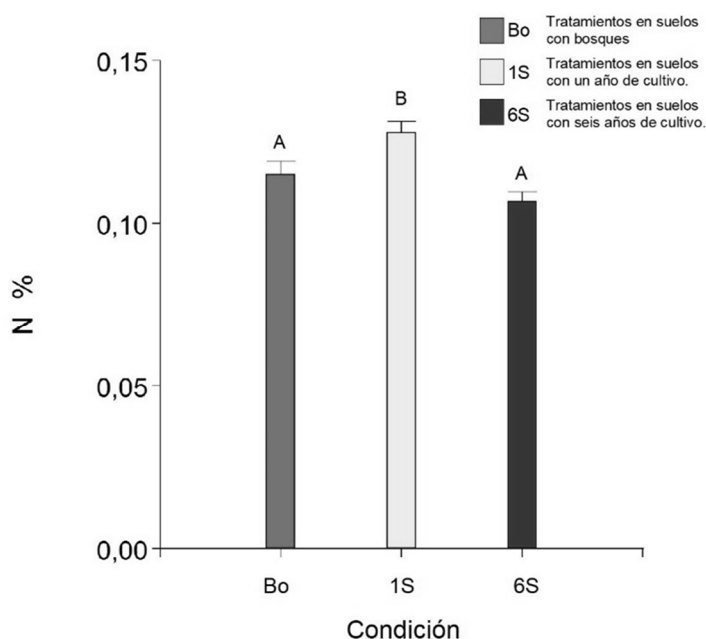


Figura 22. Concentración de Nitrógeno total (N; %) para los tratamientos en suelos con bosques (Bo), con año de cultivo (1S) y con seis años de cultivo (6S) en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de N entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

El valor medio de la concentración de N en el espesor 0 - 10 cm fue estadísticamente diferente al del espesor 10 - 20 cm, siendo estos valores de 0,16 (CV 25,8%) y 0,12% (CV 21,9%), respectivamente (Figura 23).

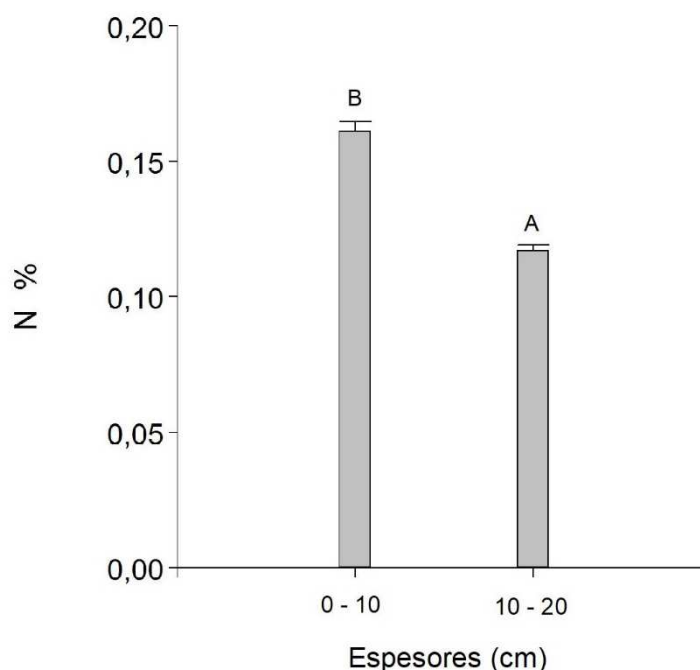


Figura 23. Concentración de Nitrógeno total (N; %) para los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido en N entre los dos espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

El análisis estadístico de los valores medios de N determinados en los 12 tratamientos, los espesores y la interacción entre ambos, mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) en todos los casos.

En la Tabla 23 se pueden observar los valores medios de los contenidos de N del espesor de 0 - 10 cm, determinados en los distintos tratamientos, donde el valor máximo fue 0,256% en T1 y, el valor mínimo 0,124% en T6.

Tabla 23. Concentración de Nitrógeno total (N; %) y coeficiente de variación (CV; %) de los 12 tratamientos evaluados en el espesor 0 - 10 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de N entre los tratamientos.

Tratamientos	N (%)	CV (%)
T1	0,256 F	25,70
T2	0,154 BCD	16,61
T3	0,148 BC	17,73
T4	0,218 EF	13,25
T5	0,174 D	14,33
T6	0,124 A	17,55
T7	0,176 DE	20,91
T8	0,166 CD	24,71
T9	0,144 AB	19,67
T10	0,216 E	19,26
T11	0,166 CD	17,16
T12	0,138 AB	12,23

Asimismo, al considerar los tratamientos de igual Serie de suelo, se puede ver que, en Tolosa, T1 se diferencia significativamente de T2 y T3, en Luz (T4, T5 y T6) y en Avía Terai (T10, T11 y T12), todos se diferencian entre sí, sin embargo, en Pampa, T7 y T8 lo hacen de T9. Ahora bien, al tener en cuenta las condiciones de uso se puede ver que, en los Bo, T1 se diferencia significativamente de T7 y T10, en los 6S T3 lo hace de T6, por el contrario, en los 1S no hay diferencias entre ellos.

La evaluación de los contrastes entre las Series de suelos, en el espesor de 0 - 10 cm, detectó, únicamente, diferencias significativas entre Tolosa y Pampa ($p = 0,0101$), sin embargo, el contraste entre las condiciones de uso, fue significativo en todos los casos ($p < 0,0001$). Por otra parte, los contrastes de los Bo, entre sí, arrojaron diferencias significativas entre T1 de T7 ($p = 0,0003$) y T10 ($p = 0,0390$), y entre T3 de T6 ($p = 0,0427$) en los 6S, sin embargo, no fueron significativos entre los 1S ($p > 0,05$).

Los contrastes entre los 1S y 6S de igual Serie de suelo manifestaron diferencias significativas entre T5 y T6 ($p < 0,0001$), T8 y T9 ($p = 0,0427$) y, T11 y T12 ($p = 0,0045$).

Los valores medios de la concentración de N determinados en los distintos tratamientos en el espesor de 10 a 20 cm se muestran en la Tabla 24. Se puede observar que el mayor valor de concentración fue 0,138% en T8 y el menor fue 0,097% en T6. Cabe destacar que T6 presentó el valor mínimo de concentración de N, en los dos espesores estudiados.

Tabla 24. Concentración de Nitrógeno total (N; %) y coeficiente de variación (CV; %) de los 12 tratamientos evaluados en el espesor 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el contenido de N entre los tratamientos.

Tratamientos	N (%)	CV (%)
T1	0,126 BCD	16,46
T2	0,113 BC	23,74
T3	0,115 BC	20,11
T4	0,123 BCD	15,77
T5	0,129 CD	15,97
T6	0,097 A	26,99
T7	0,102 AB	14,54
T8	0,138 D	22,95
T9	0,113 ABC	19,35
T10	0,110 ABC	9,09
T11	0,127 CD	16,11
T12	0,104 AB	15,37

Asimismo, se observa que, entre los tratamientos de igual Serie de suelo, los contenidos de N no se diferenciaron significativamente en Tolosa, sin embargo, en Luz el T4 y el T5 se

diferenciaron del T6; en Pampa el T7 y el T9 lo hicieron significativamente del T8, y en Avía Terai el T11 lo hizo del T12.

Por otra parte, se puede ver que, según la condición de uso, entre los Bo (T1, T4, T7, T10) no hubo diferencias significativas en el contenido de N. Por el contrario, el T2 (0,113%) se diferenció significativamente del T8 (0,138%) entre los 1S, y el T3 (0,115%) lo hizo del T6 (0,097%) entre los 6S.

El contraste entre las Series de suelos, en el espesor de 10 - 20 cm, estableció que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Por otra parte, al contrastar entre las condiciones de uso, los 1S se diferenciaron de los Bo ($p = 0,0331$) y de los 6S ($p < 0,0001$).

Los contrastes entre los Bo no tuvieron diferencias estadísticamente significativas, entre los 1S fue significativo el contraste del T2 con el T8 ($p = 0,0051$) y entre los 6S solo se diferenció el T3 con el T6 ($p = 0,0417$).

Los contrastes entre los 1S y los 6S de igual Serie de suelo, diferenciaron el T5 del T6 ($p = 0,0001$), y el T8 del T9.

3.1.5 Fósforo extraíble

Los niveles de P, expresados en partes por millón (ppm), en las diferentes condiciones de uso y en los dos espesores estudiados, fueron significativamente diferentes ($p < 0,0001$), no así, la interacción entre las condiciones de uso y los espesores ($p > 0,05$). Sin embargo, estos niveles en todos los casos clasifican a los suelos, en los espesores analizados, como muy bien provistos de este elemento.

La concentración de P, al comparar entre las condiciones de uso, fue significativamente mayor en los 1S (144,2 ppm) en relación a los 6S (121,7 ppm) y a los Bo (107,9 ppm), siendo en éstos últimos significativamente menor (Figura 24). Los CV fueron de 26,02%, 25,14% y 26,17% para los Bo, 1S y 6S, respectivamente.

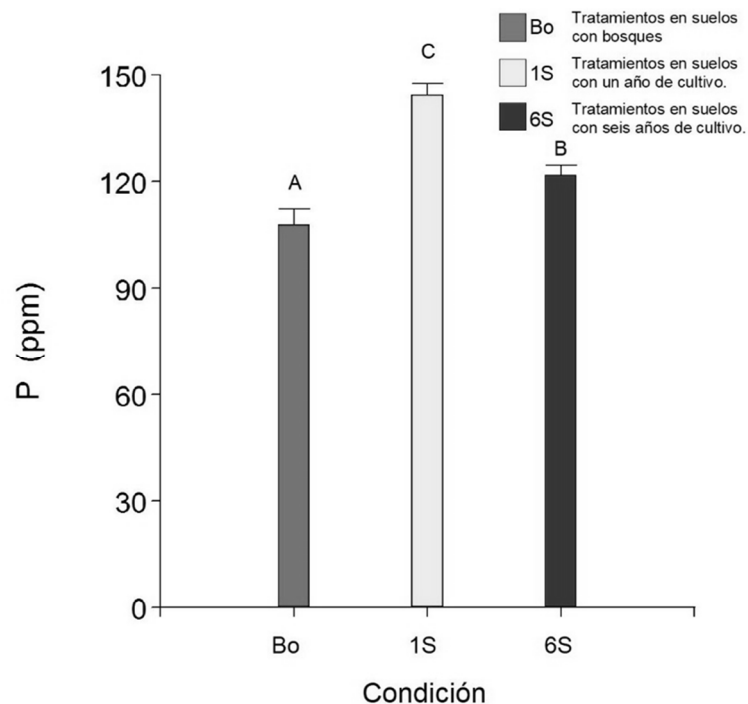


Figura 24. Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la concentración de P entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

El análisis, de la concentración de P, en función a los espesores estudiados, determinó que existen diferencias significativas entre ellos ($p < 0,0001$).

El valor medio de P, determinado en el espesor de 0 a 10 cm fue de 144,55 ppm (CV 21,7%), y de 10 a 20 cm de 114,20 ppm (CV 29,6%) (Figura 25).

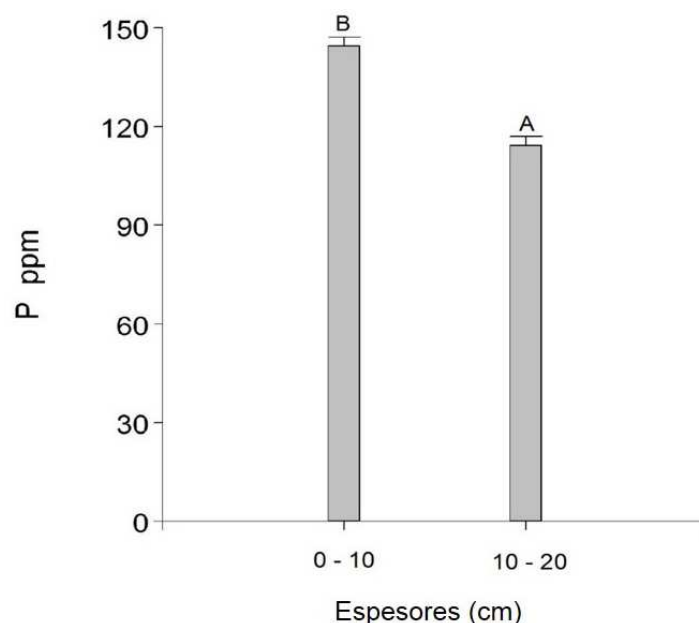


Figura 25. Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) para los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la concentración de P entre los espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

El análisis estadístico, de las concentraciones medias de P determinadas entre los 12 tratamientos, y entre los espesores mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$). Sin embargo, en la interacción entre ambos no fue así, por lo que se describen los resultados para los dos espesores en conjunto.

La Tabla 25 muestra los valores medios de P determinados en los 12 tratamientos, se puede observar, que el valor máximo fue 166,81 ppm en el T2 y el valor mínimo 97,56 ppm en el T7.

Tabla 25. Concentración de fósforo extraíble (P; ppm) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la concentración de P entre los tratamientos.

Tratamientos	P ppm	CV (%)
T1	112,05 ABC	6,92
T2	166,81 E	6,97
T3	126,09 BC	5,53
T4	107,53 AB	9,15
T5	131,58 C	5,82
T6	122,63 BC	5,47
T7	97,56 A	10,34
T8	129,18 BC	5,95
T9	123,53 BC	5,59
T10	114,59 ABC	9,18
T11	149,27 D	5,5
T12	114,49 ABC	6,66

Además, se puede observar que, el T2 se diferencia significativamente de T1 y T3 en Tolosa, T4 lo hace de T5 en Luz, en Pampa el T7 se diferencia de T8 y T9, mientras que en Avía Terai el T11 lo hace de T10 y T12, al considerar los niveles de P en tratamientos de igual Serie de suelo.

Al considerar, los tratamientos por su condición de uso, no se observan diferencias significativas entre los Bo y entre los 6S, lo contrario sucede entre los 1S, siendo T2 y T11 diferentes entre ellos y distintos de T5 y T8.

Por otra parte, el análisis de contrastes entre Series de suelos, determinó que Tolosa se diferencia estadísticamente de Luz ($p = 0,0205$) y de Pampa ($p = 0,0035$). Los contrastes, entre condiciones de uso, mostraron diferencias estadísticas entre Bo de 1S ($p < 0,0001$) y 6S ($p = 0,0197$), al igual que entre 1S de 6S ($p < 0,0001$). Ahora bien, los contrastes entre los Bo entre sí, al igual que los 6S, no tuvieron diferencias estadísticamente significativas, sin embargo, en los 1S fueron significativos entre T2 y T5 ($p < 0,0001$), y T8 ($p < 0,0001$), y T11 ($p = 0,0352$) y, entre T11 y T5 ($p = 0,0338$) y T8 ($p = 0,0160$). Los contrastes entre los 1S y

6S de igual Serie de suelo presentaron diferencias significativas entre T2 y T3 ($p < 0,0001$) y, T11 y T12 ($p < 0,0001$).

3.1.6 Potencial Hidrógeno

Los valores de pH del suelo, resultaron ser estadísticamente diferentes ($p < 0,0001$) entre las condiciones de uso, sin embargo, no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los espesores estudiados. Asimismo, tampoco hubo interacción significativa ($p > 0,05$).

El valor medio de pH mostró un incremento significativo, desde los Bo (6,54), a los 1S (6,93) y de éstos, a los 6S (7,11) (Figura 26). Es decir, de acuerdo a la escala de pH (USDA, 2017), los Bo, se clasificaron como levemente ácidos, mientras que los 1S y 6S resultaron ser neutros. Los CV fueron 9,4, 5,2 y 4,3% para los Bo, 1S y 6S, respectivamente.

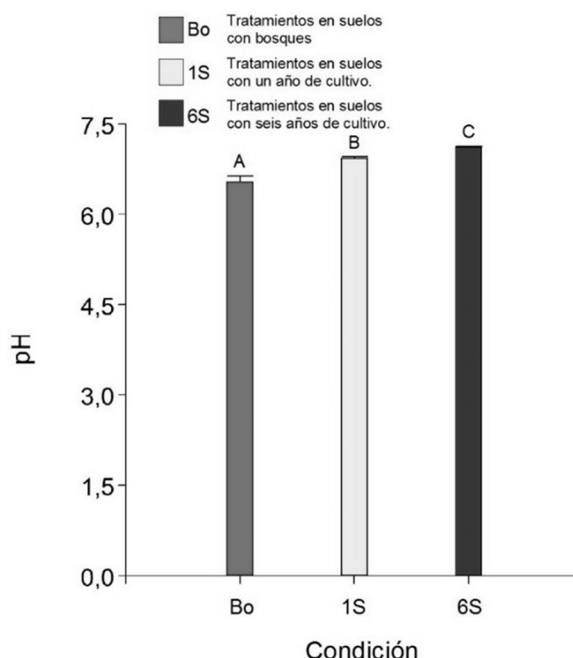


Figura 26. Potencial hidrogeno (pH) de los suelos bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año (1S) y seis años (6S) de cultivo de soja, independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el pH entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

Por otra parte, el análisis estadístico, mostró diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los valores medios de pH del suelo de los tratamientos. Sin embargo, no fue significativa la diferencia entre los espesores, como así tampoco, la interacción entre tratamientos y espesores ($p > 0,05$). La Tabla 26 muestra los valores medios de pH determinados en los distintos tratamientos, independientemente de los espesores. El pH más alto, se determinó en el T3 con un valor de 7,18 (neutro), y el más bajo, en el T7, con un valor de 6,18 (levemente ácido).

Tabla 26. Valor medio del potencial hidrógeno (pH) y coeficiente de variación (CV; %) de los tratamientos (T1 a T12), evaluados en el espesor de 0 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) de pH entre los tratamientos.

Tratamientos	pH	CV (%)
T1	6,32A	10,93
T2	7,06 CD	4,44
T3	7,18 D	4,91
T4	6,96 BCD	4,85
T5	6,90 BC	4,2
T6	7,05 CD	4,65
T7	6,18 A	8,79
T8	7,04 CD	3,87
T9	7,08 D	3,67
T10	6,71 B	8,47
T11	6,71 B	6,47
T12	7,12 D	4,05

Se puede observar que las diferencias de pH, entre tratamientos con la misma Serie de suelo, fueron significativas ($p < 0,05$) entre T1 (débilmente ácido) de T2 y T3 (neutros), no así entre estos dos últimos. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los T4, T5 y T6 (neutros), correspondientes a suelos de la Serie Luz. Al igual que en Tolosa, T7 (levemente ácido) se diferenció de T8 y T9 (neutros), pero no hubo diferencias entre ellos ($p > 0,05$), en Pampa. Por otro lado, en Avía Terai, el T12 se diferenció significativamente de los T10 y T11, aunque todos fueron clasificados como suelos neutros.

También, por la condición de uso, entre los Bo, T1 y T7 (levemente ácidos) se diferenciaron significativamente de T4 y T10 (neutros); entre los 1S, T2, T5 y T8 (neutros) no se diferenciaron entre ellos, sin embargo, T2 y T8 lo hicieron de T11 (neutro). Asimismo, entre los 6S, no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ellos.

Por otra parte, el análisis de contrastes entre Series de suelos fue significativo, únicamente, entre Luz y Pampa ($p = 0,0043$), sin embargo, entre las condiciones de uso, los contrastes fueron significativos entre sí ($p < 0,0001$). Entre los Bo, fueron significativos los contrastes de T1 y T7 frente a T4 ($p = 0,0001$) y T10 ($p = 0,0012$, respectivamente). Asimismo, entre los 1S los contrastes fueron significativos entre T11 frente a T2 ($p = 0,0079$), T5 ($p = 0,0468$) y T8 ($p = 0,0004$). Por otra parte, sólo fue significativo el contraste de T4 frente T12 ($p < 0,0001$), entre los 6S. Finalmente, los contrastes, entre los valores de pH de los 1S y los 6S de igual Serie de suelo, sólo fueron significativos entre T11 y T12 ($p < 0,0001$).

3.1.7 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) en las tres condiciones de uso ($p < 0,0001$) y los dos espesores estudiados ($p = 0,0008$), fue significativamente diferente, no así la interacción entre éstos ($p > 0,05$).

En la Figura 27 se grafican los valores medios de la CE de las tres condiciones de uso estudiadas. El mayor valor de CE se observó en los 1S ($0,36 \text{ dS.m}^{-1}$), siendo estadísticamente diferentes ($p < 0,05$) al valor de los Bo ($0,20 \text{ dS.m}^{-1}$) y de los 6S ($0,23 \text{ dS.m}^{-1}$). Sin embargo, los valores de CE medidos permiten clasificar a estos suelos como no salinos (USDA, 2017), dado que se encuentran dentro de rangos que no afectan el crecimiento de las plantas. Los CV fueron de 61,87% para la condición de Bo, 55,17% para 1S y 56,07% para los 6S.

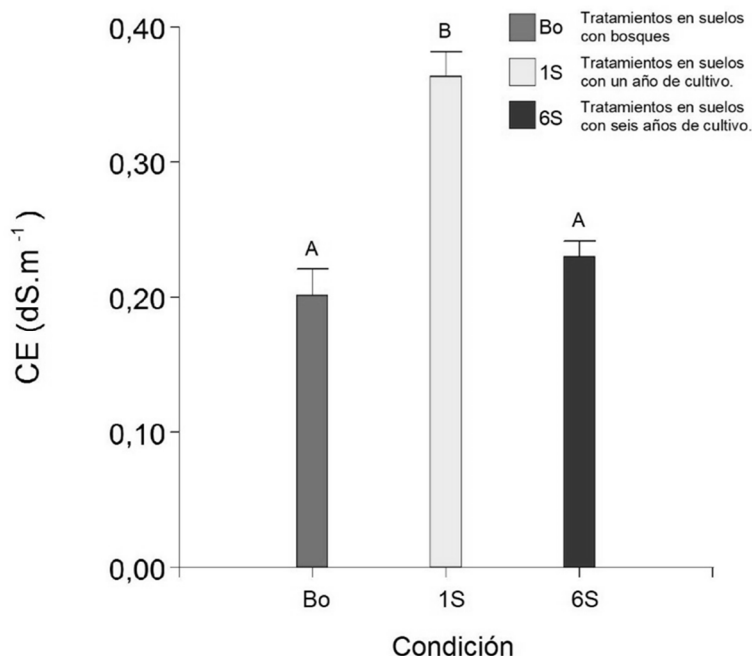


Figura 27. Conductividad eléctrica (CE; dS.m^{-1}) bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año (1S) y seis años (6S) de cultivo de soja, independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la CE entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican el error estándar estimado de la media.

En el espesor 0 - 10 cm, el valor medio de CE fue $0,32 \text{ dS.m}^{-1}$, mientras que, a 10 - 20 cm fue $0,24 \text{ dS.m}^{-1}$, y éstos variaron de $0,07 \text{ dS.m}^{-1}$ a $1,10 \text{ dS.m}^{-1}$, y de $0,06 \text{ dS.m}^{-1}$ a $0,71 \text{ dS.m}^{-1}$, respectivamente (Figura 28). Los CV en los espesores, fueron 61,75 y 57,83%, respectivamente.

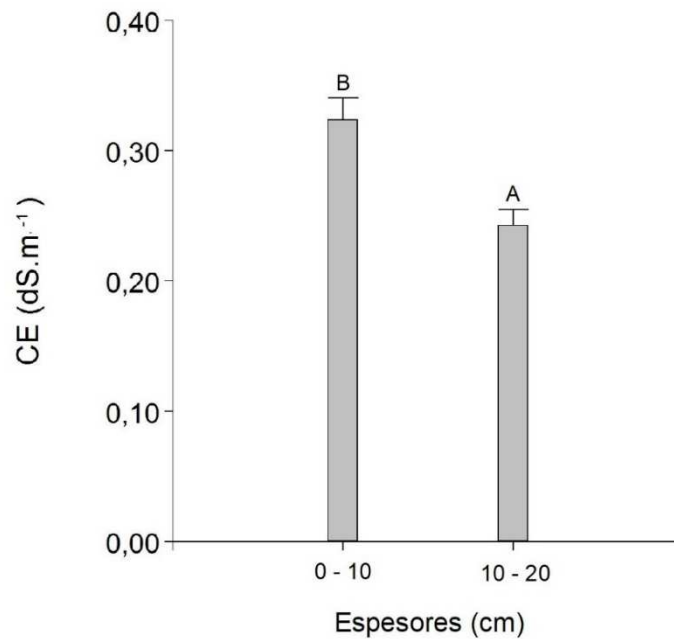


Figura 28. Conductividad eléctrica (CE; dS.m⁻¹) para los espesores 0 - 10 y 10 - 20 cm. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la CE entre los espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

El análisis estadístico de los tratamientos, determinó diferencias significativas entre ellos ($p < 0,0001$). El valor máximo 0,43 dS.m⁻¹ se observó en el T5, y el mínimo 0,13 dS.m⁻¹ en el T10 (Tabla 27).

Tabla 27. Conductividad eléctrica (CE; dS.m⁻¹) y coeficiente de variación (CV; %) en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la CE entre los tratamientos.

Tratamientos	Ce (dS.m ⁻¹)	CV (%)
T1	0,28 BCD	61,88
T2	0,37 DE	71,10
T3	0,26 BC	59,66
T4	0,21 ABC	57,43
T5	0,43 E	43,78
T6	0,25 BC	45,03
T7	0,20 ABC	47,74
T8	0,38 DE	41,08
T9	0,19 AB	54,14
T10	0,13 A	42,36
T11	0,28 CD	55,71
T12	0,21 ABC	60,51

En la Tabla 27, se puede visualizar que, entre los tratamientos de igual Serie de suelo, en Tolosa el T2 se diferencia significativamente del T3. El T4 y el T6, se diferencian del T5 en

Luz. Así también, en Pampa el T8 se diferencia del T7 y el T9, mientras que, en Avía Terai el T10 lo hace del T11.

Por otra parte, se puede ver, que, según la condición de uso, dentro de los Bo, el T1 se diferencia del T10; el T5 lo hace del T11, en los 1S. Mientras, que no se observan diferencias entre los 6S.

El análisis de contrastes entre Series de suelos fue significativo entre Avía Terai frente a Tolosa ($p = 0,0015$) y a Luz ($p = 0,0044$). Asimismo, los contrastes fueron significativos entre 1S frente a Bo y a 6S ($p < 0,0001$). Por otra parte, los contrastes entre los Bo fueron significativos, entre T1 y T10 ($p = 0,0379$), mientras que en los 1S lo fueron T11 frente a T2 ($p = 0,0220$), a T5 ($p = 0,0005$) y a T8 ($p = 0,0211$). Por el contrario, los contrastes en 6S fueron no significativos. Finalmente, los contrastes entre los 1S y los 6S, fueron significativos entre T2 frente a T3 ($p = 0,0079$), T5 frente a T6 ($p < 0,0001$) y, entre T8 frente a T9 ($p < 0,0001$)

3.1.8 Infiltración básica

La INF si bien mostró un leve aumento en la condición 1S ($2,68 \text{ cm.h}^{-1}$) no se diferenció significativamente ($p > 0,05$) de las condiciones Bo ($2,42 \text{ cm.h}^{-1}$) y 6S ($2,54 \text{ cm.h}^{-1}$) (Figura 29). Los CV para la condición Bo, 1S y 6S fueron 47,07, 33,81 y 36,18%, respectivamente. Si bien, la variabilidad de los resultados fue alta, los CV se encuentran dentro de rangos aceptables, de acuerdo a los valores estimados para este parámetro (Pennock et al., 2008).

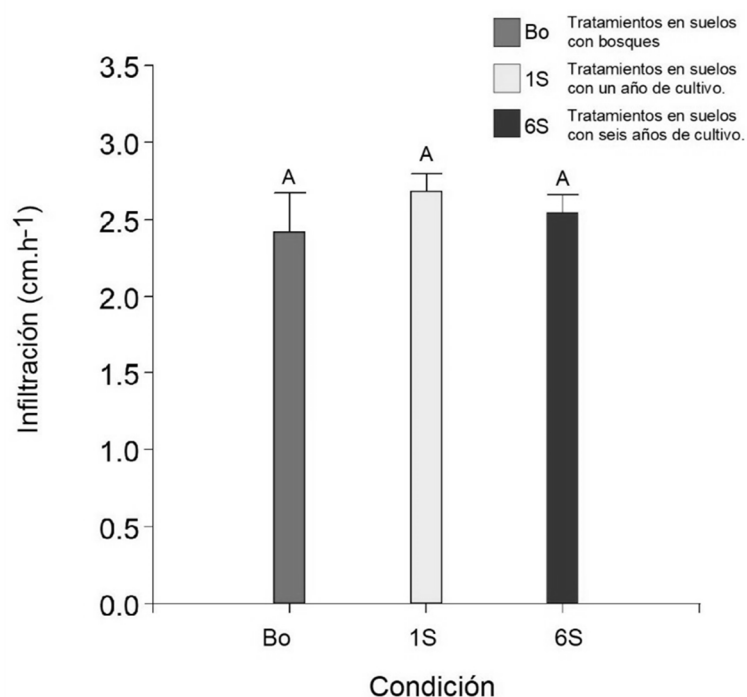


Figura 29. Infiltración básica (Infiltración; cm.h⁻¹) de los suelos bajo las condiciones uso bosque (Bo), un año (1S) y 6 años (6S) de cultivo de soja. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la Infiltración entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

El análisis entre los tratamientos arrojó diferencias significativas entre ellos ($p = 0,0025$). La Tabla 28, muestra los valores medios de INF (cm.h⁻¹) determinados en los distintos tratamientos. La INF máxima fue de 3,75 cm.h⁻¹ en el T1 y la mínima fue de 1,64 cm.h⁻¹ en el T7, ambas corresponden a tratamientos bajo la condición de uso Bo.

Tabla 28. Infiltración básica (INF; cm.h⁻¹) y coeficiente de variación (CV; %) correspondientes a los 12 tratamientos evaluados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en la INF entre tratamientos.

Tratamientos	INF (cm.h ⁻¹)	CV (%)
T1	3,75 E	28,35
T2	3,25 DE	23,78
T3	2,47 ABC	32,17
T4	2,32 ABC	33,72
T5	2,51 ABC	43,11
T6	2,53 ABC	44,41
T7	1,64 A	48,70
T8	2,33 ABC	37,91
T9	2,88 CDE	22,24
T10	1,96 AB	36,90
T11	2,64 BCD	23,95
T12	2,29 ABC	39,78

Se puede visualizar, al comparar los tratamientos en la misma Serie de suelo, que, en Tolosa, el T3 presenta significativamente menor INF que el T1 y el T2. Tanto, en Luz (T4, T5 y T6), como en Avía Terai (T10, T11 y T12), no se observan diferencias significativas, entre los valores de INF de los tratamientos correspondientes. En Pampa, se puede ver un aumento de la INF, que va desde el T7 (Bo) hasta el T9 (6S), siendo las diferencias sólo significativas entre estos dos.

Por otra parte, si se compara la INF de los tratamientos según las condiciones de uso, se destaca que, entre los Bo, el T1, se diferencia significativamente de los demás tratamientos (T4, T7 y T10). Entre los 1S, el T2 se diferencia significativamente con mayor INF, del T5 y el T8. Los 6S (T3, T6, T9 y T12), no se diferenciaron significativamente entre ellos.

El análisis de contrastes, entre las Series de suelos, fue significativo entre Tolosa contra Luz ($p = 0,004$), Pampa ($p = 0,0004$) y Avía Terai ($p = 0,0005$). Sin embargo, entre las condiciones de uso éstos no fueron significativos. Por otro lado, en los Bo fueron significativos los contrastes entre el T1 contra el T4 ($p = 0,0117$), el T7 ($p = 0,0002$), y el T10 ($p = 0,0017$). Mientras que, en los 1S, fueron significativos al enfrentar el T2 contra el T5 ($p = 0,0223$), el T8 ($p = 0,0048$) y el T11 ($p = 0,0053$). En los 6S, únicamente se diferenció el contraste entre T9 contra T12 ($p = 0,0714$). Al contrastar los 1S frente a los 6S de igual Serie de suelo, sólo fue significativo el del T2 frente al T3 ($p = 0,0162$).

3.1.9 Estabilidad estructural

El CDMP permite cuantificar el grado de estabilidad de los agregados al agua como consecuencia del sistema de labranza o el manejo. A mayor CDMP menor es la EEA del suelo.

No se detectó interacción ($p > 0,05$) entre las condiciones de uso y los espesores sobre el CDMP. Los resultados sugieren que la EEA se vio afectada una vez que los lotes se destinaron a la producción agrícola. El CDMP aumentó en los 1S (0,36 mm) y luego en los 6S (0,38 mm) en relación a los Bo (0,26 mm), siendo estas diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$). Sin embargo, la menor EEA en los 6S no fue estadísticamente diferente a la evaluada luego en los 1S ($p > 0,05$) (Figura 30). Los CV fueron de 41,07% para Bo, 50,95% para 1S y 57,07% para 6S.

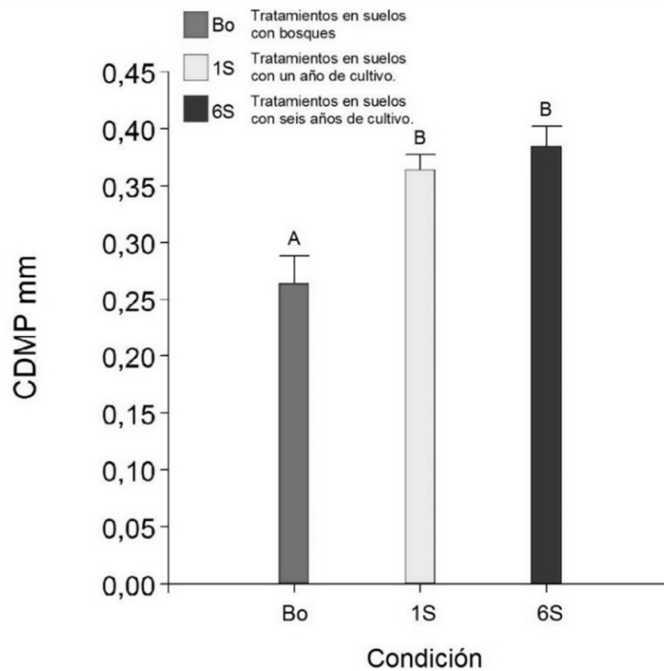


Figura 30. Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) de los agregados bajo las condiciones de uso bosque (Bo), un año de cultivo (1S) y seis años de cultivo (6S) independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el CDMP entre las condiciones de uso. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

Los valores medios del CDMP en función de los dos espesores evaluados, independientemente de las condiciones de uso, ponen en evidencia la menor estabilidad de los agregados en los primeros 10 cm del suelo (0,40 mm) en relación al espesor subsuperficial de 10 - 20 cm (0,32 mm), siendo las diferencias del CDMP entre ambos espesores estadísticamente significativas ($p < 0,0001$) (Figura 31). El espesor de 0 - 10 cm tuvo mayor variabilidad (CV 49,49%) en relación al espesor de 10 - 20 cm (CV 43,57%).

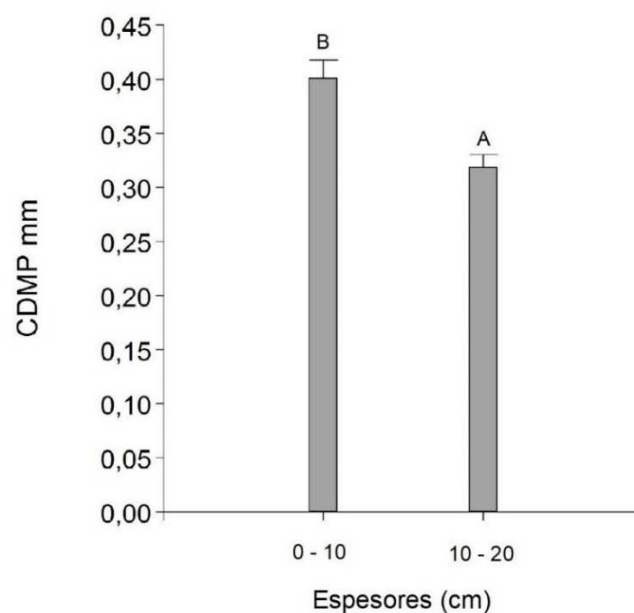


Figura 31. Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) para los espesores estudiados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el CDMP entre los espesores. Las líneas verticales en cada columna indican error estándar estimado de la media.

En el análisis de los 12 tratamientos se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre ellos ($p < 0,0001$), al igual con los espesores ($p = 0,0011$), pero no ocurrió lo mismo en la interacción entre ambos, por lo que se describirán los resultados para los dos espesores en conjunto. La Tabla 29 muestra los valores medios de CDMP determinados en los 12 tratamientos. El valor máximo fue 0,49 mm en el T9, mientras que, el valor mínimo fue 0,22 mm en el T4.

Tabla 29. Cambio del diámetro medio ponderado (CDMP; mm) de los agregados en los 12 tratamientos evaluados independientemente de los espesores. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en el CDMP entre los tratamientos.

Tratamientos	CDMP (mm)	CV (%)
T1	0,33 ABC	79,6
T2	0,43 CD	41,8
T3	0,33 AB	42,2
T4	0,22 A	37,5
T5	0,32 AB	35,6
T6	0,32 AB	42,3
T7	0,24 A	35,1
T8	0,38 BC	46,0
T9	0,49 D	57,3
T10	0,26 A	32,4
T11	0,33 AB	26,6
T12	0,40 BC	37,0

Los resultados de CDMP teniendo en cuenta los tratamientos de igual Serie de suelo, diferenciaron significativamente el T2 del T3, en Tolosa. En Luz, los tratamientos no presentaron diferencias significativas entre ellos, mientras que si lo hicieron en Pampa. Asimismo, en Avía Terai, el T10 presentó un valor de CDMP estadísticamente diferente al T12. Al comparar los tratamientos según la condición de uso, se observa que los Bo no se diferenciaron significativamente entre ellos. En los 1S, el T2 se diferenció del T5 y del T11, pero no del T8. Por otra parte, el T9 se diferenció estadísticamente de los demás (T3-T6-T12), en los 6S.

Los contrastes entre Series de suelos fueron significativos entre Luz frente a Tolosa ($p = 0,0200$) y a Pampa ($p = 0,0092$). Además, éstos fueron significativos al confrontar la condición de uso Bo con 1S ($p = 0,0009$), y con 6S ($p = 0,0001$). Por otra parte, los contrastes entre los Bo fueron significativos entre el T1 frente al T10 ($p = 0,0082$), entre los 1S fueron significativos el T2 frente al T5 ($p = 0,0090$) y al T11 ($p = 0,0048$), y entre los 6S fueron significativos los contrastes entre el T9 frente al T3 ($p = 0,0002$), al T6 ($p = 0,0001$) y al T12 ($p = 0,0267$).

Los contrastes entre los 1S y los 6S al considerar igual Serie de suelo, fueron significativos entre el T2 y el T3 ($p = 0,0173$) y entre el T8 frente al T9 ($p = 0,0126$).

3.1.10 Rendimientos

Los rendimientos de los cultivos de soja en todos los tratamientos se obtuvieron a través de encuestas que se realizaron a los productores. Fueron particularmente bajos en la campaña 2012/2013, debido fundamentalmente a cuestiones climáticas.

Al efectuar el análisis estadístico se halló que no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos (Tabla 30), entre las condiciones de uso, al igual que entre las distintas Series de suelos. Los tratamientos T1, T4, T7 y T8 no se analizaron ya que tienen vegetación de bosque.

Tabla 30. Rendimientos ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) y coeficiente de variación (CV; %) en los ocho tratamientos evaluados. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) en los rendimientos de los tratamientos.

Tratamientos	Rendimiento ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)	CV (%)
T2	533 A	127,6
T3	900 A	19,2
T5	867 A	53,3
T6	1067 A	48,1
T8	733 A	31,5
T9	533 A	86,6
T11	1067 A	21,6
T12	1000 A	34,6

Al calcular coeficientes de correlación entre las variables edáficas y el rendimiento en grano del cultivo de soja, sólo se encontró correlación negativa con el pH y la CE.

3.2 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN

En la tabla Tabla 31 se presenta la matriz de correlación de las variables analizadas.

Tabla 31. Matriz de correlación de las variables estudiadas.

	DA	RMP	COT	N	P	pH	CE	INF	CDMP
DA									
RMP	0,59								
COT	-0,6	-0,93							
N	-0,55	-0,82	0,87						
P	-0,1	-0,24	0,15	0,25					
pH	0,35	0,24	-0,26	-0,2	0,06				
CE	-0,1	-0,33	0,27	0,37	0,4	-0,1			
INF	0,05	0,09	-0,05	-0,06	-0,07	0,09	-0,1		
CDMP	0,13	0,01	-0,004	0,03	0,16	0,23	-0,04	0,09	

El análisis estadístico muestra que existe una alta correlación positiva entre DA y RMP (0,59), parámetros físicos asociados a compactación del suelo y entre COT y

N (0,87) relacionados con la fertilidad química. Por otra parte, se obtuvo correlación negativa entre DA con COT (-0,6) y N (-0,55), y entre RMP con COT y N (-0,93 y -0,82, respectivamente).

3.3 ANÁLISIS MULTIVARIADO

Si bien se identificaron correlaciones entre variables que simplifican la interpretación de los efectos y diferencias entre tratamientos, se optó por utilizar todas ellas a efectos de disponer de una escena más amplia interacciones. A continuación, se presentan los resultados del ACP separados por espesores.

3.3.1 Análisis de componentes principales (CP) para el espesor de 0 a 10 cm

Las tres primeras CP explicaron un 69,37 % de la variabilidad total (Tabla 32).

Tabla 32. Descomposición de la variabilidad por componentes principales para 0 - 10 cm.

	Autovalores	Porcentaje de varianza	Porcentaje acumulado
CP 1	3,65	40,61	40,61
CP 2	1,48	16,47	57,08
CP 3	1,11	12,29	69,37

Las variables que más contribuyeron a la construcción de la CP 1 fueron la RMP y la DA en el eje positivo y el COT y el N en el eje negativo. Para la CP 2, la mayor carga la tuvieron el P y la CE y para la CP 3 la infiltración y el CDMP (Figura 32). Se observa que en la CP1 se oponen parámetros físicos que indican compactación como la RMP y DA, con parámetros que indican fertilidad química como COT y N. Cuando los tratamientos no se diferenciaron por estas propiedades, lo hicieron por P y CE y las variables que tuvieron mayor peso en la CP3 fueron la infiltración y el CDMP relacionados a la porosidad del suelo y por ende al movimiento del agua y aire (Tabla 33).

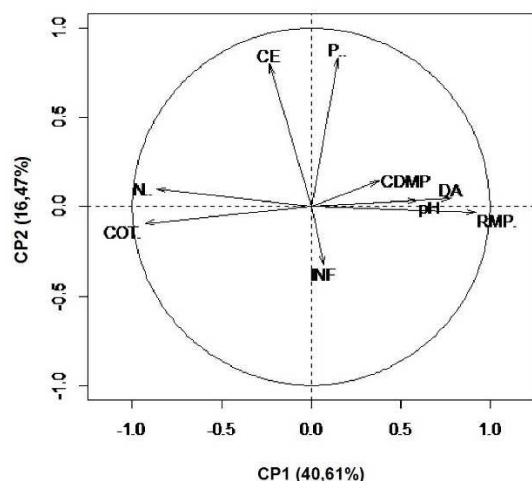


Figura 32. Biplot de las variables (0 - 10 cm).

Tabla 33. Correlación entre variables y las tres CP para 0 - 10 cm.

	CP ₁	CP ₂	CP ₃
pH	0,59	0,04	0,17
CE	-0,23	0,80	0,07
COT	-0,93	-0,09	0,19
N	-0,87	0,10	0,19
P	0,15	0,83	0,08
RMP	0,92	-0,03	-0,15
DA	0,78	0,05	0,10
INF	0,07	-0,33	0,74
CDMP	0,38	0,15	0,65

Las elipses de confianza separaron las tres condiciones de uso (Figura 33) ubicando en valores mayores de COT y N a los Bo ($p < 0,01$) y con mayores valores de DA y RMP a los tratamientos con 6S ($p < 0,01$). Los tratamientos con 1S no se diferenciaron por estos parámetros, pero sí por mayores valores de P y CE ($p < 0,01$).

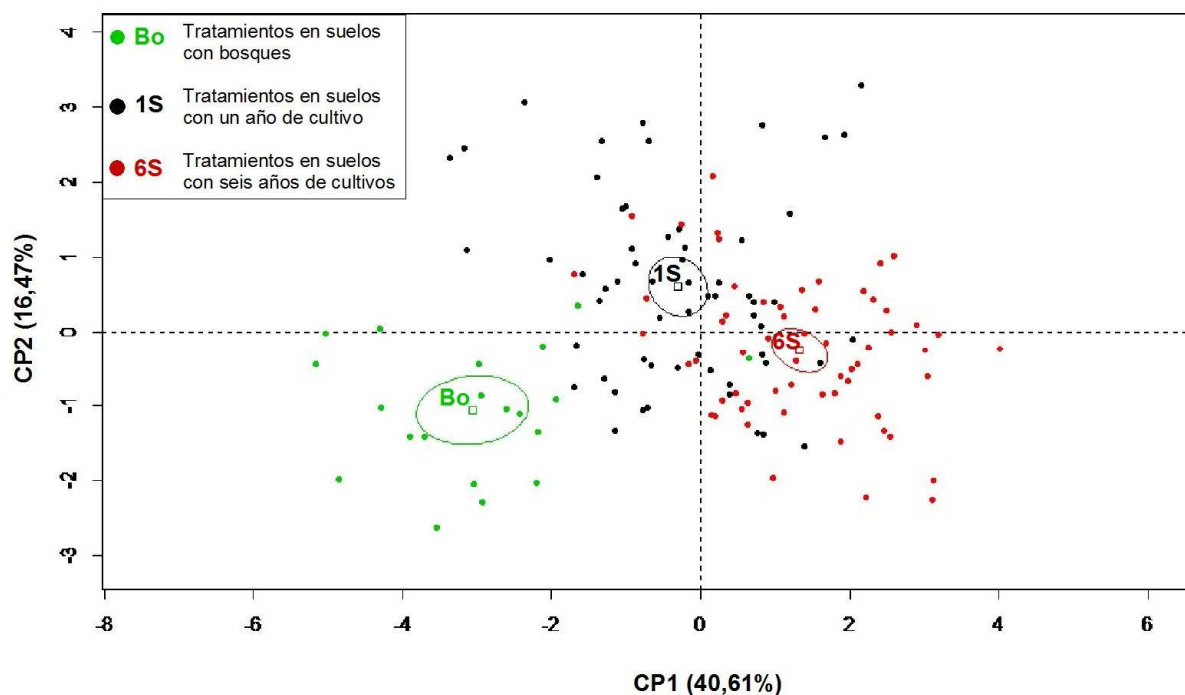


Figura 33. Elipses de confianza en torno a los tratamientos en suelos con bosques (Bo), un año de cultivo de soja (1S) y seis años de monocultivo de soja (6S) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.

Las elipses de confianza no separaron las cuatro Series de suelos en la CP 1. En la CP 2, Tolosa se separó por P y CE, con diferencias mínimas ($p = 0,016$) (Figura 34). En la CP 3 se diferencian Tolosa, Luz y Avía Terai, por valores de INF y CDMP, hallándose en Tolosa valores mayores ($p < 0,01$) y en Luz ($p = 0,04$) y Avía Terai ($p = 0,01$) valores más bajos.

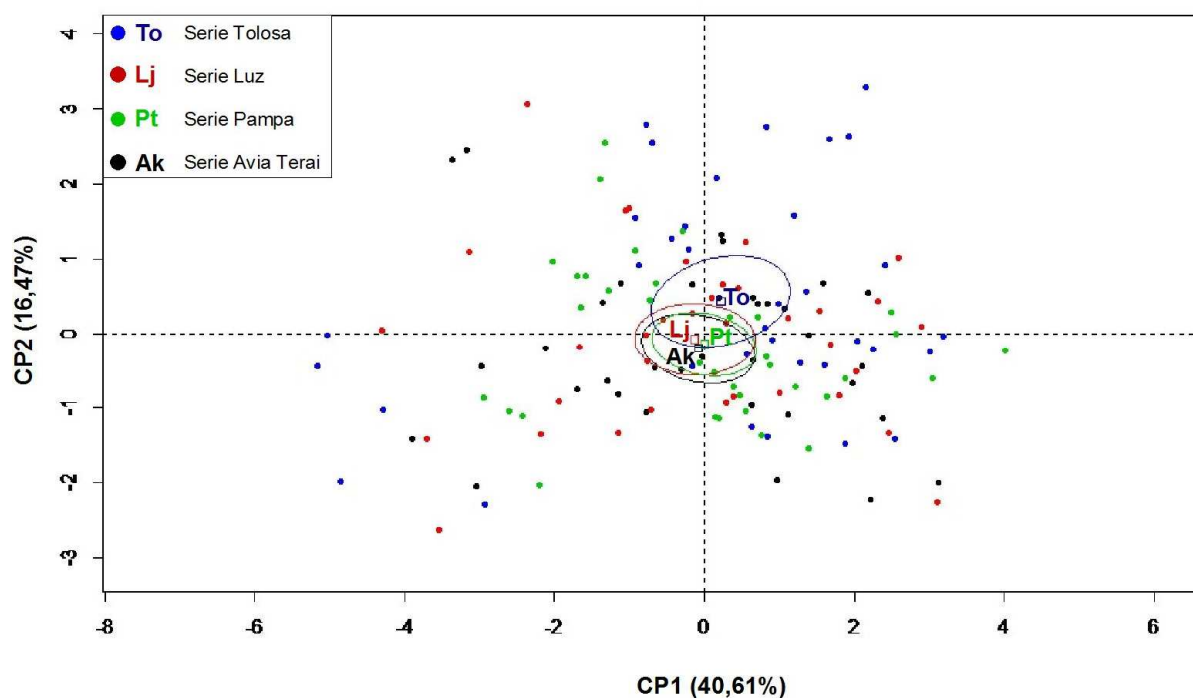


Figura 34. Elipses de confianza en torno a las Series de suelos To (Tolosa), Lj (Luz), Pt (Pampa) y Ak (Avia Terai) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.

En la CP 1 las elipses de confianza agruparon a los distintos tratamientos por la condición, como se manifestó previamente (Figura 35).

Sin embargo, en CP 2 Tolosa fue la única que se diferenció entre Bo y 1S, presentando T1 ($p = 0,01$) menor CE y contenido de P ($p < 0,01$). T4 también presentó menor contenido de P y CE ($p = 0,01$).

En la CP 3 se diferenciaron también T1, T2 y T9 con mayores valores de INF y CDMP ($p < 0,01$) y T7 con menores valores de estos parámetros que el conjunto de tratamientos ($p < 0,01$).

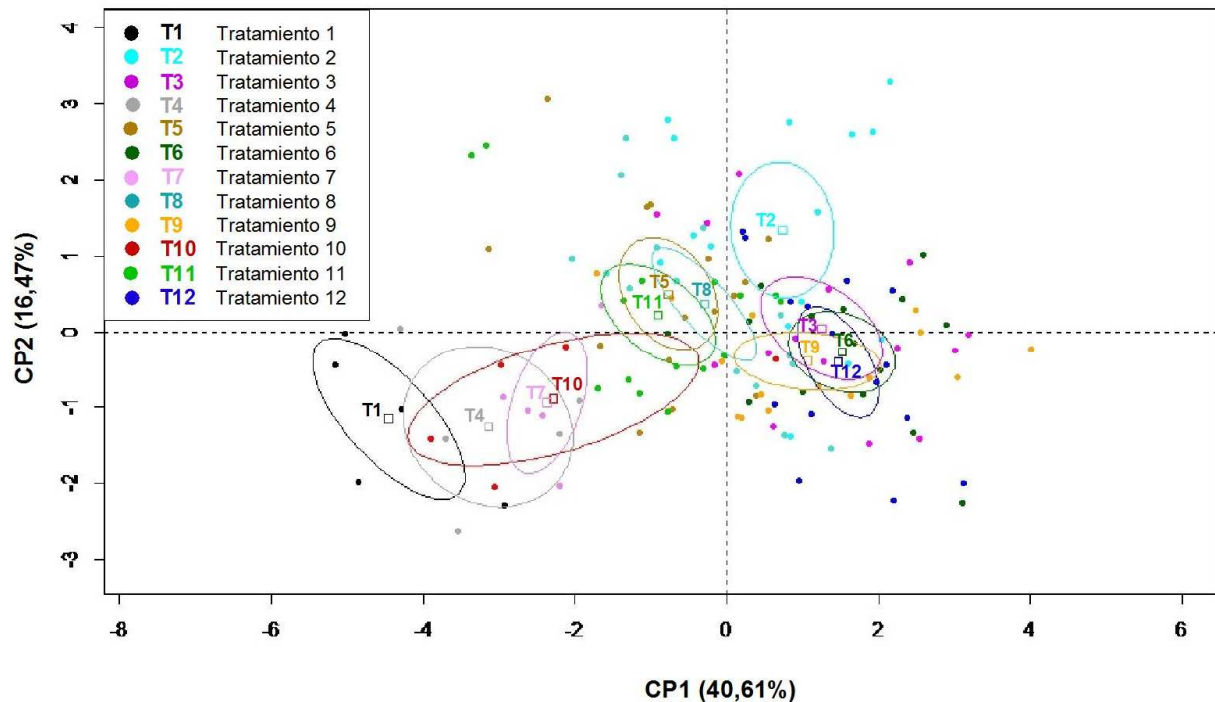


Figura 35. Elipses de confianza en torno a los tratamientos (T1 a T12) evaluados en el plano principal formado por las CP 1 y CP 2.

3.3.2 Análisis de componentes principales para el espesor de 10 a 20 cm

Las tres primeras CP explicaron un 70,4 % de la variabilidad total (Tabla 34).

Tabla 34. Descomposición de la variabilidad por componentes principales para 10 - 20 cm.

	Autovalores	Porcentaje de varianza	Porcentaje acumulado
CP 1	3,22	40,24	40,24
CP 2	1,30	16,27	57,51
CP 3	1,11	13,89	70,40

Las variables que más contribuyeron a la construcción de la CP 1 fueron el COT y el N en el eje positivo y la RMP en el eje negativo. Para la CP 2, la mayor carga la tuvieron el P, el pH, la DA y la CE y para la CP 3 el pH en el eje positivo y el P y la CE en el eje negativo (Figura 36). Se observa que en la CP 1 se oponen parámetros que indican fertilidad química como COT y N, con la RMP que está relacionada a cuestiones físicas como compactación subsuperficial. Cuando los tratamientos no se diferenciaron por estas propiedades, lo hicieron por P, pH, DA y CE y las variables que tuvieron mayor peso en la CP3 fueron el pH, el P y la CE, todas de índole químico (Tabla 35).

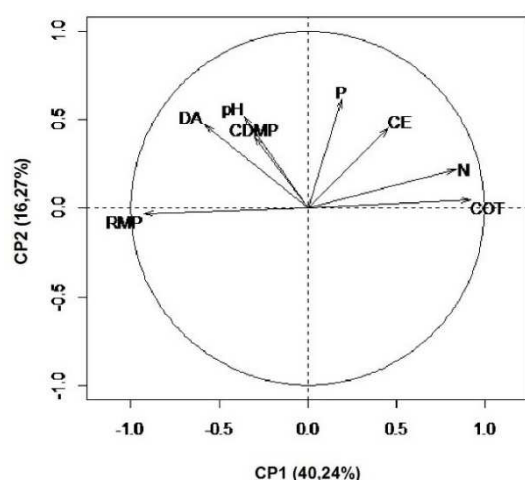


Tabla 35. Correlación entre variables y las 3 CP para 10 - 20 cm.

	CP ₁	CP ₂	CP ₃
pH	-0,36	0,52	0,52
CE	0,45	0,45	-0,48
COT	0,92	0,05	0,28
N	0,84	0,22	0,15
P	0,19	0,62	-0,49
RMP	-0,93	-0,03	-0,28
DA	-0,58	0,47	0,02
CDMP	-0,31	0,41	0,44

Figura 36. Biplot de las variables (10 - 20 cm).

Las elipses de confianza separaron las tres condiciones de uso (Figura 37) ubicando en valores mayores de COT y N a los Bo y 1S ($p < 0,01$) y con mayores valores de RMP a los tratamientos con 6S ($p < 0,01$). En CP 2 Bo y 1S se diferenciaron por tener Bo menos P, pH, DA y CE ($p < 0,01$). En CP 3, 1S se diferenció de 6S por tener menor pH y mayor P y CE ($p = 0,02$).

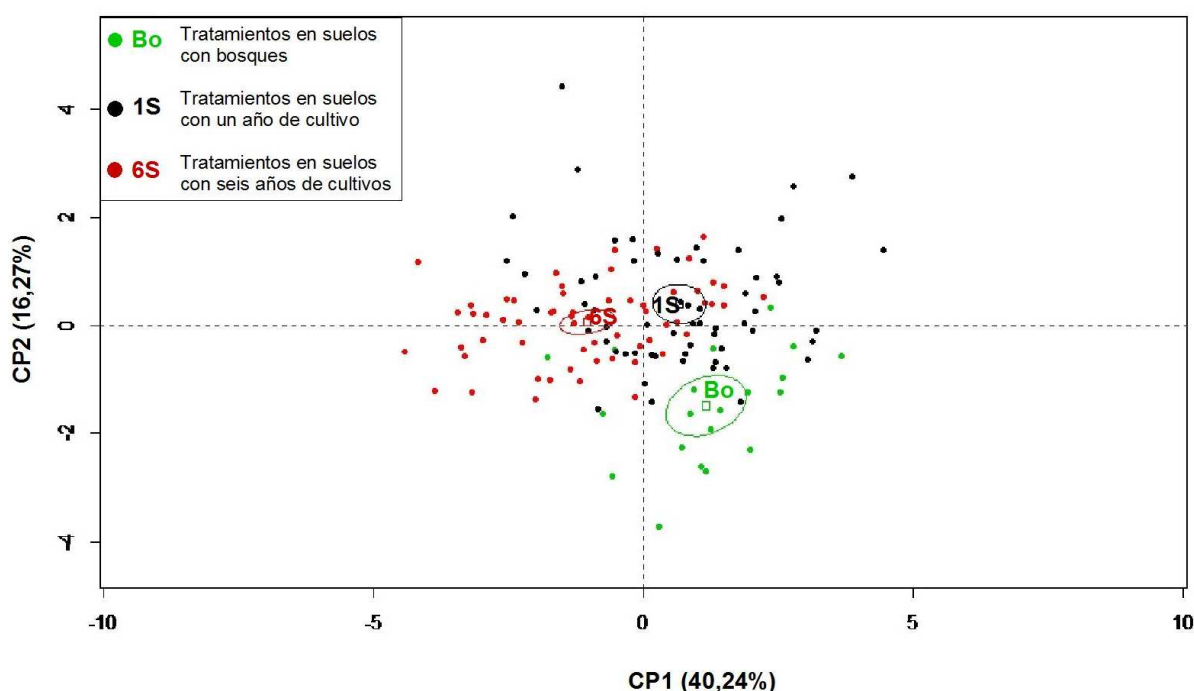


Figura 37. Elipses de confianza en torno a los tratamientos en suelos con bosques (Bo), un año de cultivo de soja (1S) y seis años de monocultivo de soja (6S) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.

Las elipses de confianza no separaron las cuatro Series de suelos en las CP 1 y CP 2. En la CP 3 se diferencia Luz, por valores mayores de P y CE ($p = 0,02$) (Figura 38).

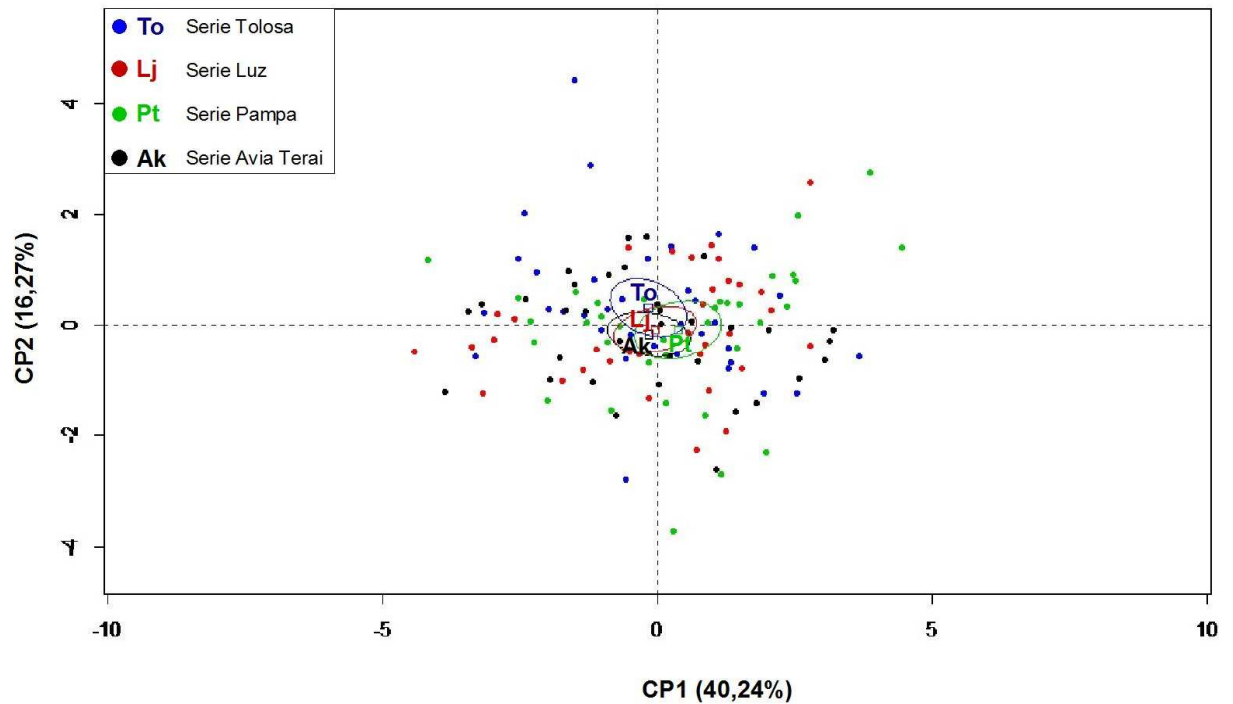


Figura 38. Elipses de confianza en torno a las Series de suelos To (Tolosa), Lj (Luz), Pt (Pampa) y Ak (Avía Terai) en el plano principal formado por las CP1 y CP2.

En CP 1 los tratamientos que más diferencias mostraron con el conjunto fueron T6 ($p < 0,01$) y T12 ($p < 0,01$) con mayor RMP y menor COT y N. T1 fue el que mayor COT y N presentó ($p < 0,05$). En CP 2 se diferenciaron T2 con mayor P y pH de T7 con los menores valores de éstos parámetros ($p < 0,01$). En CP 3 T12 se diferenció de todos los tratamientos por mayor pH y CDMP ($p = 0,01$) (Figura 39).

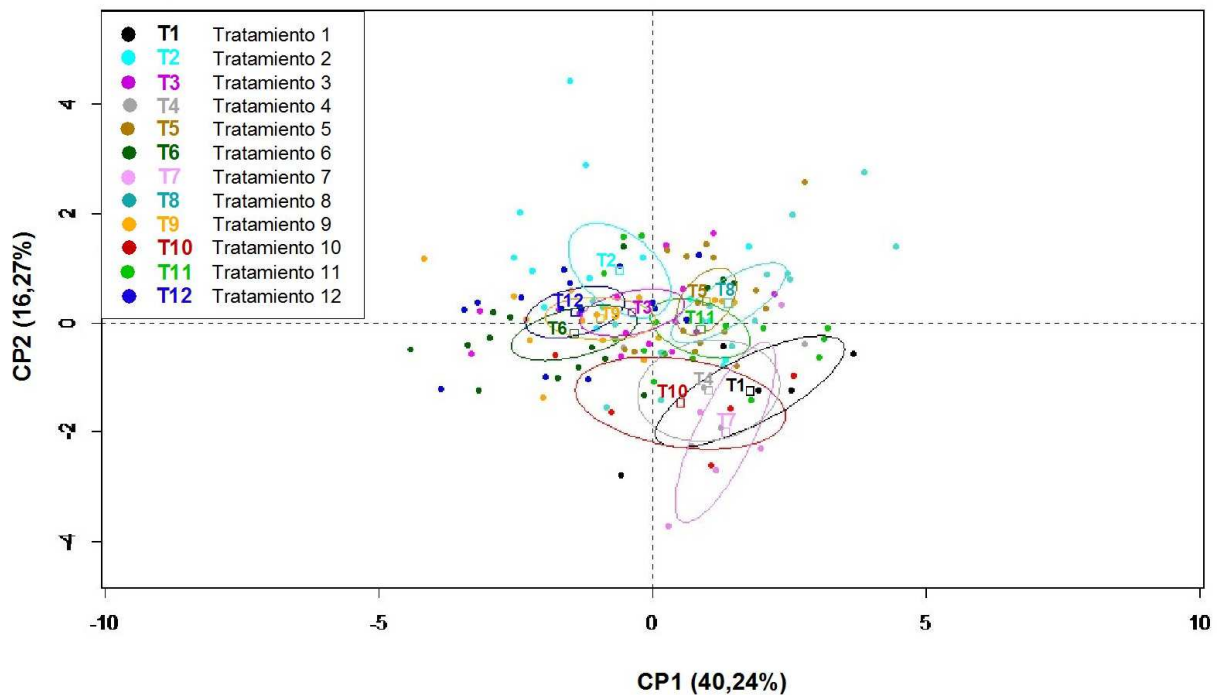


Figura 39. Elipses de confianza en torno a los tratamientos evaluados en el plano principal formado por las CP1 y CP2.

Se efectuó el ACP con las variables en las condiciones de 1S y 6S para conocer el comportamiento del rendimiento de soja como variable suplementaria o “ilustrativa”, es decir que, aunque tiene diferentes características a las variables en estudio y no juega ningún rol en el cálculo de las distancias, puede estudiarse su asociación con las mismas. Se encontró que se asoció con la INF y el CDMP en forma inversa, lo cual es sólo un dato complementario que podría servir en futuras indagaciones, ya que los rendimientos estuvieron severamente afectados por bajas precipitaciones durante el ciclo.

3.4 SISTEMA EXPERTO DE EVALUACIÓN DE TIERRAS

En el proceso de desarrollo del modelo de simulación, con los árboles de decisión de los RUT definidos, se realizó la evaluación de aptitud de uso de las UT empleando el árbol de decisión final creado para tal fin.

3.4.1 Características de las unidades de tierras

Las CaT de las UT evaluadas se presentan en la Tabla 36. Esta información proviene de la descripción de las Series de suelos y las variables medidas a campo; las precipitaciones se establecieron en función de datos meteorológicos del área, para cuatro condiciones frecuentes, debido a la gran variabilidad interanual existente que condiciona el comportamiento de los cultivos.

Tabla 36. Características de la tierra (CaT) de las Unidades de tierra (UT) evaluadas.

UT	Trat	Precipitaciones anuales	COT	DA	Drenaje	CDMP	INF	PE	RMP
S To1S	T2	Sequía	Medio	Alta	Moder. bueno	Alto	Alta	Profundo	Baja
S To6S	T3	Sequía	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Media	Profundo	Media
S Lj1S	T5	Sequía	Alto	Baja	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
S Lj6S	T6	Sequía	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Baja
S Pt1S	T8	Sequía	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Somero	Media
S Pt6S	T9	Sequía	Medio	Alta	Algo pobre	Alto	Alta	Somero	Alta
S Ak1S	T11	Sequía	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Moder. prof.	Baja
S Ak6S	T12	Sequía	Medio	Alta	Algo pobre	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
D To1S	T2	Déficit	Medio	Alta	Moder. bueno	Alto	Alta	Profundo	Baja
D To6S	T3	Déficit	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Media	Profundo	Media
D Lj1S	T5	Déficit	Alto	Baja	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
D Lj6S	T6	Déficit	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Baja
D Pt1S	T8	Déficit	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Somero	Media
D Pt6S	T9	Déficit	Medio	Alta	Algo pobre	Alto	Alta	Somero	Alta
D Ak1S	T11	Déficit	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Moder. prof.	Baja
D Ak6S	T12	Déficit	Medio	Alta	Algo pobre	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
M To1S	T2	Media	Medio	Alta	Moder. bueno	Alto	Alta	Profundo	Baja
M To6S	T3	Media	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Media	Profundo	Media
M Lj1S	T5	Media	Alto	Baja	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
M Lj6S	T6	Media	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Baja
M Pt1S	T8	Media	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Somero	Media
M Pt6S	T9	Media	Medio	Alta	Algo pobre	Alto	Alta	Somero	Alta
M Ak1S	T11	Media	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Moder. prof.	Baja
M Ak6S	T12	Media	Medio	Alta	Algo pobre	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
E To1S	T2	Sup. a la media	Medio	Alta	Moder. bueno	Alto	Alta	Profundo	Baja
E To6S	T3	Sup. a la media	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Media	Profundo	Media
E Lj1S	T5	Sup. a la media	Alto	Baja	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Media
E Lj6S	T6	Sup. a la media	Medio	Alta	Moder. bueno	Bajo	Baja	Moder. prof.	Baja
E Pt1S	T8	Sup. a la media	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Somero	Media
E Pt6S	T9	Sup. a la media	Medio	Alta	Algo pobre	Alto	Alta	Somero	Alta
E Ak1S	T11	Sup. a la media	Alto	Baja	Algo pobre	Bajo	Media	Mod. prof.	Baja
E Ak6S	T12	Sup. a la media	Medio	Alta	Algo pobre	Bajo	Baja	Mod. prof.	Media

Referencias:

UT: Unidad de tierras

Trat.: Tratamientos

COT: Contenido de carbono orgánico total en el espesor 0 - 10 cm.

DA: Densidad aparente

CDMP: Cambio del diámetro medio ponderado.

INF.: Infiltración básica

PE: Profundidad efectiva

RMP Resistencia mecánica a la penetración en el espesor 10 - 20 cm

S: Sequía (precipitaciones menores a 500 mm)

D: Deficit (precipitaciones entre 500 a 700 mm)

M: Precipitaciones medias (precipitaciones entre 700 a 900 mm)

E: Precipitaciones superiores a la media anual (precipitaciones mayores a 900 mm)

To: Serie Tolosa

Lj: Serie Luz

Pt: Serie Pampa

Ak: Serie Avía Terai

1S: Un año de cultivo de soja

6S: Seis años de monocultivo de soja

Moder.: Moderadamente

Sup.: Superior

3.4.2 Clasificación de Tierras para cultivo de soja en SD

La aptitud de uso de las tierras se obtiene como resultado de la aplicación del modelo experto generado (Anexo III – Pantallas ALES). En la Tabla 37, se indican los valores de cada una de las de las CuT calculadas por el ALES a partir de los respectivos árboles de decisión, y la clase final de aptitud y el rendimiento de cada UT, utilizando el árbol que integra a las cinco CuT consideradas (PA, EER, ES, IM y DA).

Tabla 37. Clasificación de la aptitud y rendimientos de las unidades de tierras calculadas por el ALES con los valores de cada una de las cualidades.

UT	Trat.	PA	EER	ES	IM	DAS	Clase	Aptitud	Rendimiento
S To1S	T2	1	-	-	-	-	4	NA	-
S To6S	T3	1	-	-	-	-	4	NA	-
S Lj1S	T5	1	-	-	-	-	4	NA	-
S Lj6S	T6	1	-	-	-	-	4	NA	-
S Pt1S	T8	1	-	-	-	-	4	NA	-
S Pt6S	T9	1	-	-	-	-	4	NA	-
S Ak1S	T11	1	-	-	-	-	4	NA	-
S Ak6S	T12	1	-	-	-	-	4	NA	-
D To1S	T2	2	1	2	3	1	3	MgA	708
D To6S	T3	2	1	1	3	1	3	MgA	787
D Lj1S	T5	2	1	1	2	2	3	MgA	850
D Lj6S	T6	2	1	1	3	2	3	MgA	708
D Pt1S	T8	2	2	1	2	2	3	MgA	765
D Pt6S	T9	2	2	2	3	2	3	MgA	574
D Ak1S	T11	2	1	1	2	2	3	MgA	850
D Ak6S	T12	2	1	2	3	3	4	NA	-
M To1S	T2	3	1	2	1	1	1	A	2362
M To6S	T3	3	1	1	2	1	1	A	2362
M Lj1S	T5	3	1	1	1	2	1	A	2362
M Lj6S	T6	3	1	1	2	2	2	MdA	2126
M Pt1S	T8	3	2	1	2	2	2	MdA	1913
M Pt6S	T9	3	2	2	2	2	3	MgA	1722
M Ak1S	T11	3	1	1	1	1	1	A	2362
M Ak6S	T12	3	1	2	2	3	3	MgA	1594
E To1S	T2	4	1	2	1	1	1	A	3150
E To6S	T3	4	1	1	2	1	1	A	3150
E Lj1S	T5	4	1	1	1	2	1	A	3150
E Lj6S	T6	4	1	1	2	2	1	A	2835
E Pt1S	T8	4	2	1	1	2	1	A	2835
E Pt6S	T9	4	2	2	2	2	2	MdA	2296
E Ak1S	T11	4	1	1	1	1	1	A	3150
E Ak6S	T12	4	1	2	2	3	2	MdA	2126

Referencias:

UT: Unidad de tierras

S: Sequía (precipitaciones menores a 500 mm)

D: Déficit (precipitaciones entre 500 a 700 mm)

M: Precipitaciones medias (precipitaciones entre 700 a 900 mm)

E: Precipitaciones superiores a la media anual (precipitaciones mayores a 900 mm)

To: Serie Tolosa

Lj: Serie Luz

Pt: Serie Pampa

Ak: Serie Avía Terai

1S: Un año de cultivo de soja

6S: Seis años de monocultivo de soja

Trat.: Tratamientos
PA: Precipitaciones anuales
EER: Espacio para la explotación radicular
ES: Estructuración superficial
IM: Impedancias mecánicas
DAS: Dinámica de agua del suelo
A: Apta
MdA: Moderadamente apta
MgA: Marginalmente apta
NA: No apta

Cuando las precipitaciones anuales están por debajo de 500 mm, denominado Sequía en este modelo, la restricción es tan severa que se considera como limitación máxima, no utilizando las demás CuT y la tierra es clasificada directamente como Clase de tierra 4 - NA.

Los resultados del modelo de simulación permitieron la valorización en cuatro clases de aptitud y los rendimientos esperados de cada UT para el cultivo de soja, es decir, para cada Serie de suelo, en dos condiciones de uso y en diferentes situaciones hidrológicas.

En la situación de Sequía, las condiciones son muy severas, los tratamientos no tienen aptitud para el TUT, son clase 4, por lo que no se determina el rendimiento. Con Déficit, los suelos responden de manera similar, ya que la limitante hídrica es la que más afecta al cultivo de soja (Giménez, 2017), son clase 3, MgA y los rendimientos están siempre debajo del rendimiento de indiferencia (Quirolo y Leonhardt, 2018), a excepción del T12 que es NA, porque, fundamentalmente, se manifiestan las IM que inciden negativamente en la disponibilidad de agua en el perfil (Maressa et al., 2014). Con precipitaciones anuales medias, los tratamientos manifiestan distintos comportamientos tanto en aptitud como en el rendimiento, los tratamientos con un año de cultivo son A, a excepción de T8 que es MdA, y todos los tratamientos con seis años de monocultivo tienen menor aptitud, a excepción de T3 que continúa como clase 1, A. Es de destacar que Tolosa mantiene su aptitud y rendimiento, Luz y Pampa descienden un nivel, de A a MdA y de MdA a MgA, respectivamente, en cambio, Avía Terai desciende dos niveles, de A a MgA, al igual que los rendimientos, que descienden más del 32%. Con precipitaciones superiores a la media, los tratamientos son todos A, salvo T9 y T12 que son MdA.

4. DISCUSIÓN

Los resultados logrados, al comparar las Series de suelos Tolosa, Luz, Pampa y Avía Terai, como representativas del sector sur del Impenetrable Chaqueño, en tres condiciones de uso, con bosque, con uno y seis años de cultivo de soja bajo SD, permitieron mediante la cuantificación de parámetros edáficos y productivos, como indicadores del estado actual de los suelos, desarrollar la siguiente discusión de cada uno de ellos, como así también de los resultados obtenidos a través del modelo de simulación de evaluación de tierras para el cultivo de soja bajo SD.

La DA es un parámetro que permite evaluar, entre otras variables, la compactación del suelo y la modificación del espacio poroso, ya que su variación en el tiempo manifiesta cambios en la estructura del suelo, pudiendo afectar el crecimiento de las raíces y el movimiento de gases y fluidos. Los valores de DA se incrementaron cuando los lotes se destinaron a la producción de cultivo de soja, siendo luego de seis años de realización de este cultivo donde se detectó la mayor DA en los tres espesores estudiados. Numerosos autores (Campitelli et al., 2010; Sanzano et al., 2012; Rojas et al., 2016; Álvarez Arteaga et al., 2017; Hernández Jiménez et al., 2017) mencionan incrementos de la DA debido a cambios en las propiedades de los suelos cuando se destinan a la producción agrícola, en especial, en sistemas de monocultivo y bajo SD. Asimismo, los valores de esta variable determinados en los tres espesores evaluados, coinciden con los cambios asociadas al efecto de las maquinarias usadas bajo el sistema de labranza SD. Las menores DA encontradas en superficie (0 - 5 cm), en todos los tratamientos, estarían relacionadas con las mayores concentraciones de COT presentes en los suelos de bosques y, en los suelos cultivados se adiciona la estratificación producida bajo este sistema de labranza (Franzluebbers, 2002; Duval et al., 2016). Así también, la mayor compactación en los espesores inferiores (5 - 10 y 10 - 20 cm) podrían deberse al constante tránsito de maquinarias desde la habilitación de las tierras (Labelle y Jaeger, 2011), y en cada campaña de cultivo bajo SD (Botta et al., 2007; Schmidt y Amiotti, 2015), a la textura franco limosa predominante en estos suelos, como así también, a la realización de operaciones agrícolas con niveles inadecuados de humedad (Rojas et al., 2016), y a los menores contenidos de COT. Sin embargo, ninguno de los valores medios de DA encontrados en estos espesores serían limitantes para el crecimiento y desarrollo radical (Álvarez et al., 2012).

El estudio de la DA en diferentes Series de suelos y distintas condiciones de uso evidencia que suelos con presencia de horizonte E, pero con diferencias de textura, posición en el relieve y de COT, revelaron disímiles compactaciones frente al uso agrícola. En la Serie Avía Terai, las diferencias en DA se evidenciaron luego de seis años de monocultivo

bajo SD, probablemente como consecuencia de condiciones de hidromorfismo que se producen por su drenaje algo pobre, que potencian la compactación del suelo por el tránsito de la maquinaria en las sucesivas campañas (Ledesma y Zurita, 2003). Sin embargo, en la Serie Tolosa aumentó luego del primer año de siembra, no obstante, se mantuvo constante tras seis años; este aumento inicial de la DA detectado al año de cultivo, podría ser explicado, por la disminución de las concentraciones de COT, producto de la mezcla del horizonte A con el horizonte E por las labranzas con herramientas de discos durante la habilitación del suelo, y la disminución de la estabilidad de los agregados estructurales, que favorece la baja resistencia de esta Serie al tránsito de la maquinaria, provocando el consiguiente aumento de la DA (Brest et al., 1999). La RMP es otro parámetro que permite evaluar la compactación edáfica, y ha sido seleccionada para diferentes suelos y ambientes en valoraciones de indicadores de calidad. En los suelos densificados, la penetración de las raíces es afectada y, además, puede disminuir el aporte de agua y nutrientes para las plantas, interfiriendo en los procesos de desarrollo vegetal. En general, la RMP aumentó con los años de uso agrícola, al igual que lo informado por Draghi et al. (2005) y Rey Montoya et al. (2017), siendo la compactación menos intensa en el espesor superficial que en el subsuperficial, lo que podría estar asociado a diferencias texturales, estratificación del COT, al sistema SD (Duval et al., 2016; Bonel et al., 2018), y al tránsito de maquinarias asociadas a la habilitación de tierras (Aparecida Silva y Simões de Castro, 2015).

Dado que RMP mayores a 2 MPa son consideradas impedancias mecánicas críticas para muchas especies (Sato et al., 2015), se advierte que esta variable presentó altos valores en el espesor subsuperficial (promedios de 1,90 MPa en los suelos con un año de cultivo y 2,22 MPa en los suelos con seis años de monocultivo de soja). Asimismo, los valores de RMP determinados en los dos espesores evaluados, coinciden con los cambios asociados al efecto de las maquinarias utilizadas bajo el sistema de labranza SD en esquemas de manejo similares (Rey Montoya et al., 2017). En el espesor 10 - 20 cm, el estudio de la RMP en diferentes condiciones de uso demuestra que suelos con presencia de horizonte E subsuperficial, pero con diferencias de textura, posición en el relieve y de COT, al igual a lo observado en el análisis de la DA, mostraron distintas densificaciones frente al disturbio debido al uso agrícola. Las diferencias en la RMP, en la Serie Avía Terai, se evidenciaron luego de seis años de monocultivo, sin embargo, en la Serie Tolosa se incrementó luego del primer año de siembra, no obstante, luego de seis años de cultivo, mostró cierta resiliencia, con valores intermedios entre la condición de bosque y un año de cultivo. Cabe destacar que la Serie Pampa en la condición de bosque presenta los valores máximos en los dos espesores, esto podría ser motivo de nuevas investigaciones.

Las concentraciones de COT, disminuyeron con el cambio de uso, los años de producción agrícola y el espesor de suelo considerado, siendo inversamente proporcionales a la DA y RMP tanto, en el espesor superficial como en el subsuperficial. Las mayores concentraciones de COT estuvieron asociadas a los valores más bajos de DA y RMP. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por numerosos autores (Six et al., 2002; Sanzano et al., 2005; Taboada y Micucci, 2008; Álvarez Arteaga et al., 2017; Zúñiga Ugalde et al., 2018) que asocian los atributos del COT en la agregación del suelo, aireación, actividad de macrofauna en los primeros centímetros del suelo, y la estratificación bajo SD.

Las mayores concentraciones de COT se observaron en el espesor superficial, en la condición de bosques. Sin embargo, el análisis que incluyó a los suelos diferenció a las Series Tolosa y Luz, con mayores contenidos, de Pampa y Avía Terai. Estas mayores concentraciones de COT, presentes en la situación prístina de Tolosa y Luz, estarían asociadas al tipo de bosque, ya que, en los bosques altos hay mayores aportes de restos orgánicos y la tasa de descomposición es más lenta debido a las menores temperaturas en la superficie del suelo por el efecto del sombreado (Prause et al., 2012; Toledo et al., 2013; Galicia et al., 2015). No obstante, luego de un año de producción agrícola bajo el cultivo de soja, todas las Series de suelo mostraron una disminución de las concentraciones de COT, respecto del bosque. Esto se debería, principalmente, a la mineralización de la fracción lábil o particulada (COP) del COT del bosque que se encontraba protegida en los agregados del suelo y que fue expuesta por las prácticas de habilitación de las tierras. (Six et al., 2002; Roldán et al., 2014, 2015; Conti et al., 2014; Rojas et al., 2016). La disminución de más del 50% del COT, observada en la Serie Tolosa luego de un año de cultivo, podría ser explicada, además, por el efecto de dilución de las concentraciones de COT, resultado de la mezcla del horizonte A (poco profundo, con alto contenido de COT) con el horizonte E (subsuperficial, con menor tenor de COT) en las labranzas con herramientas de discos durante el proceso de desmonte (Brest et al., 1999). Es importante mencionar que, esta mezcla de horizontes se ve favorecida por la baja resistencia de esta Serie de suelo a la penetración de los implementos utilizados en las operaciones de habilitación de las tierras.

Asimismo, las menores e iguales concentraciones de COT determinadas, en todas las Series de suelos, luego de 6 años de producción bajo monocultivo de soja, estarían más asociadas a la baja cantidad y calidad de los rastrojos aportados al suelo en el espesor superficial (Arolfo et al., 2010), y al escaso aporte de materia seca del sistema radicular de esta leguminosa (Castiglioni et al., 2013), en el espesor subsuperficial. Además, en ambos espesores la humedad presente bajo el sistema SD, propiciaría una mayor actividad microbiana y por consiguiente un aumento de la tasa de mineralización (Revelli et al., 2010).

La concentración de N, al igual que ocurrió con el COT, disminuyó con el cambio de uso, los años de producción agrícola, y la profundidad, tanto en el espesor superficial como en el subsuperficial (Rojas, 2012; Toledo et al., 2013). Sin embargo, en éste último, al año de producción de soja se observó un mayor contenido de N en relación al bosque y luego de seis años de producción de ese cultivo. Las condiciones generadas por la presencia del bosque, permiten en el espesor superficial del suelo, la acumulación de restos orgánicos en distintos grados de descomposición, que se traduce en suelos bien provistos de materia orgánica y N. Estos elementos, como se comentó para COT, al ingresar los suelos a producción agrícola, y modificarse el ambiente que los generó, sufren un proceso acelerado de descomposición y mineralización (Silberman et al., 2015; Delgado Restrepo et al., 2016; Álvarez Arteaga et al., 2017). Las pérdidas, propias del ciclo del N, como la lixiviación, desnitrificación, volatilización y la extracción por las cosechas (Celaya Michel y Castellanos Villegas, 2011; Cruz Ruiz et al., 2012), a lo largo de los años de producción de monocultivo de soja, evidentemente superan a los ingresos de este nutriente al sistema, debido en parte a la baja calidad y cantidad de rastrojo que aporta este cultivo (Conti et al., 2014; Duval et al., 2016) y por las condiciones ambientales de la región bajo estudio.

Las menores concentraciones de N, en el espesor subsuperficial, determinadas en el bosque, están en concordancia con la estratificación del material orgánico en los primeros centímetros del suelo y, a la distribución natural de la biomasa radical asociados al tipo de vegetación de estos bosques (Arzuaga et al., 2016). Sin embargo, en este espesor, luego de un año de producción agrícola, los contenidos de N aumentan respecto al observado en el bosque, lo cual estaría vinculado a la mineralización de la materia orgánica como producto del cambio de uso, por exposición del material orgánico protegido y la probable lixiviación. Sin embargo, este aumento no se evidenció en la Serie Tolosa, posiblemente debido a una mayor lixiviación del N, dada por condiciones favorables al movimiento del agua en el suelo, teniendo en cuenta los contenidos de COT, los valores de DA, RMP e INF evaluados en los suelos de esta Serie. Lo que podría sugerir que el N se encontraría a mayor profundidad a la estudiada, sin descartar otros tipos de pérdidas, no evaluadas en este trabajo.

Las concentraciones de P, en el espesor de 0 - 20 cm, en todos los tratamientos estudiados permitieron categorizar a los suelos como muy bien provistos de P (> 30 ppm) (García et al., 2014b). Los suelos con un año de cultivo de soja, mostraron concentraciones de P significativamente mayores en relación a los suelos prístinos, poniendo en evidencia, la activación de algún *pool* de P no disponible anteriormente. Esto se podría explicar, a partir del efecto de las prácticas realizadas en el suelo, para la habilitación de las tierras. Estas prácticas, además de aumentar el grado de incorporación de los residuos orgánicos del

bosque dentro de la matriz del suelo, exponen fracciones de P orgánico asociadas al carbono que son liberadas como P inorgánico a través del proceso de mineralización (Six et al., 2002; Galantini et al., 2007).

Por otra parte, el cambio de uso, produjo, además, un aumento del pH, lo cual podría deberse a una menor actividad de los iones de hierro (Fe) y aluminio (Al), en la disolución de P inicialmente precipitado (García et al., 2014b). Asimismo, el incremento del pH del suelo estuvo acompañado, también, por el de la CE, lo que hace suponer un aumento de P disponible, atribuido a las cenizas (Certini, 2005; Varela Teijeiro, 2007), producto de la quema de restos de vegetación como práctica para la habilitación de tierras, propia de la zona bajo estudio en el período analizado (Sánchez, 1981; Paruelo et al., 2004).

Sin embargo, las menores concentraciones de P observadas luego de seis años de monocultivo de soja en la capa superficial, podrían estar asociadas principalmente a las pérdidas por remoción de los productos de cosecha y, a la insuficiente reposición por la poca cantidad y baja calidad de los rastrojos aportados por la soja. Eventualmente, podría además ser atribuida a las pérdidas por erosión eólica, propiciada por la baja cobertura y los vientos predominantes de la zona (Buschiazzi et al., 2007; Aimar et al., 2010).

Las mediciones de pH realizadas en los suelos bajo estudio, permitieron determinar que, al ser éstos cultivados se producen cambios en el estrato superficial. El pH del suelo se modificó, de levemente ácido a neutro (USDA, 2017), cuando la condición de uso cambió de bosque a producción agrícola. Estos cambios en el pH, podrían tener múltiples causas, siendo una de ellas, como ya se mencionó anteriormente, el efecto de las cenizas en la solución del suelo, provenientes de las actividades de habilitación posteriores al desmonte. Numerosos autores (Sanzano et al., 2005; Álvarez Arteaga et al., 2017) aseveran que el uso agrícola disminuye el pH de los suelos, sin embargo, los resultados hallados en este trabajo, hacen suponer que la presencia de cenizas de carácter alcalino y el humedecimiento de éstas, provoca la hidrólisis de los cationes contenidos en ellas (Varela Teijeiro, 2007), condición coincidente con lo encontrado en suelos de bosques recientemente habilitados para uso agrícola en Chaco (Rojas, 2012).

La CE también se incrementó ligeramente en el primer año de cultivo en relación a los bosques, en todos los suelos, con valores superiores en la capa superficial respecto a la subsuperficial. Esto, al igual que el aumento del pH y P, podría atribuirse a la presencia de cenizas en los suelos producto de la quema de restos orgánicos realizados en las tareas de desmonte. Posteriormente, después de seis años de monocultivo, la CE disminuye a valores próximos a los iniciales, posiblemente debido al lavado de las sales solubles, considerando que hubo años con precipitaciones que superaron ampliamente la media anual (Tabla 2a).

No obstante, todos los valores son muy bajos (siempre en el rango de suelos no salinos), y no siendo importante en la explicación de las diferencias existentes entre tratamientos, en coincidencia a lo encontrado por Campitelli et al. (2010) y Rojas et al. (2016).

Las mediciones de INF realizadas, no permitieron determinar diferencias significativas entre condiciones de uso, sin embargo, se observaron discrepancias importantes entre tratamientos que incidirían en la disponibilidad de agua para los cultivos. Estas modificaciones en los estratos superficiales afectan propiedades físicas e hidráulicas, que inciden en la INF y podrían tener múltiples causas. En Tolosa, al año de la siembra, disminuyó la INF, posiblemente por la disminución de la porosidad total del suelo y al aumento de la DA, como consecuencia del efecto de la mezcla del horizonte A (poco profundo, con alto tenor de COT) con el horizonte E (subsuperficial, con bajo tenor de COT) en las operaciones de habilitación de las tierras, lo cual coincide con lo hallado por Rojas (2012) en igual Serie de suelos. En Pampa sucedió lo contrario, inicialmente la INF presentó valores bajos en la condición de bosque, lo cual ya fue descripto por Brest et al. (1999), y luego de uno y seis años de agricultura la INF se incrementó, ello podría deberse al cambio de uso, el cual reduciría el efecto del encostramiento superficial presente en este suelo en condiciones prístinas, no obstante se necesitan más estudios para confirmar esta afirmación.

La EEA, determinada a través del CDMP, fue directamente proporcional a las concentraciones determinadas de COT. Numerosos autores, (Tisdall y Oades, 1982; Buchmann y Schaumann, 2018), mencionan que la EEA depende de los materiales orgánicos del suelo, pudiendo ser éstos transitorios (polisacáridos), temporarios (raíces e hifas de hongos) y persistentes (cationes metálicos polivalentes) y mencionan al COT como el principal agente ligante de las partículas minerales del suelo. El CDMP fue menor en los tratamientos con bosques respecto a las otras condiciones de uso, lo que estaría en concordancia con los mayores niveles de COT evaluados en éstos, con respecto a los determinados bajo cultivo de soja. Cacchiarelli et al. (2008) y Tiwari et al. (2018), mencionan que en los suelos cultivados, los agregados son frecuentemente expuestos a una disrupción física, producto de la actividad agrícola, lo que provoca la exposición y mineralización del material orgánico protegido dentro de los agregados, resultando esta disminución de COT en una menor cantidad de agregados estables al agua. Tal como se esperaba, los resultados muestran una marcada disminución de la EEA al año de siembra, debido al gran disturbio ocasionado por el tránsito y las labranzas propias de la actividad de desmonte, de aprovechamiento de la madera y habilitación de las tierras (Caruso, y. Miranda, S. 2012). Por otra parte, luego de 6 años de cultivo, las diferencias observadas entre tratamientos

podrían deberse a las concentraciones originales de COT (0 - 10 cm), donde aquellas Series de suelos con mayores contenidos fueron resilientes (To) o se mantuvieron estables (Lj). Las Series de suelos con menores contenidos originales y con menor aporte de rastrojos (bajos rendimientos), podrían explicar, en parte, la menor estabilidad al agua de éstas (Pt y Ak) (Studdert et al., 2005; Rojas et al., 2015; Duval et al., 2016).

Es necesario advertir sobre la importancia de tomar la Serie de suelo como determinante para la evaluación de indicadores de suelo entre condiciones de uso, además del tipo de cobertura. Las mediciones de algunas variables, como la INF y el CDMP, pusieron en evidencia que de no hacerlo, las diferencias entre condiciones de uso, podrían quedar enmascaradas.

Los rendimientos, fueron muy bajos debido a que las insuficientes precipitaciones tuvieron un efecto importante en el desarrollo de los cultivos de soja que no permitieron que se manifestaran diferencias entre los suelos estudiados (RIAN Chaco-Formosa, 2013). No se detectaron diferencias significativas al analizar las dos condiciones de uso, las distintas Series de suelos y los tratamientos. Al efectuar las correlaciones entre todos los parámetros con los rendimientos se encontró que solo existió correlación negativa con el pH y la CE, parámetros que resultaron muy poco sensibles a los cambios en este trabajo, no obstante, podrían ser objeto de estudio en nuevas investigaciones y en suelos con mayor historia agrícola.

El análisis de correlación de las variables edáficas indicó que a mayores contenidos de COT y N hay menores valores de DA y RMP; esto podría relacionarse a las propiedades del COT en la estructuración del suelo y su consiguiente efecto en la dinámica del N (Blanco Sepúlveda, 2009; Campitelli, et al., 2010; Hernández Vigoa, et al. 2018).

Los resultados obtenidos en los ACP contribuyeron a detectar y seleccionar las variables COT, DA, RMP, INF y CDMP y revelar interrelaciones, confirmando su utilidad ya publicado por numerosos autores (Jaramillo et al., 2011; Rojas et al., 2015; Villazón Gómez et al., 2017), suministrando información para la diferenciación de los tratamientos y aportando a la construcción del modelo de experto de simulación de evaluación de la aptitud de las tierras y predecir los rendimientos en distintas condiciones de abastecimiento hídrico.

La evaluación con ALES de la aptitud de los tratamientos para el cultivo de soja bajo SD en suelos forestales que han sido recientemente habilitados, en años con precipitaciones próximas a la media anual, ha puesto de manifiesto que las Series de suelos estudiadas presentan distintos comportamientos al ser destinadas al uso agrícola, específicamente al monocultivo de soja. Estas diferencias se dan fundamentalmente por causas debidas a la degradación ocurrida producto de la gestión productiva (Studdert et al., 2005; Duval et al.,

2016), que afectan las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, lo cual fue claramente manifestado en las variables analizadas, a través de diferencias en la agregación, porosidad e INF, que redundan en la provisión de agua, aire y oferta de nutrientes, cuestiones de fundamental importancia en el crecimiento y desarrollo vegetal. Éstos deben estar disponibles para las plantas y esa disponibilidad está regulada por propiedades como aireación, almacenamiento hídrico y facilidad de la penetración de raíces. (Díaz Orozco, 2017). Al considerar las distintas Series de suelos, Avía Terai es la que mayores cambios presenta en los indicadores medidos desde que es destinada a la producción agrícola y luego de seis años de monocultivo. Variables como INF, COT, DA y RMP, que inciden en las condiciones de almacenamiento hídrico, en el enraizamiento y la exploración radicular, influyen en el comportamiento y condicionan su aptitud y rendimiento. Lo contrario sucede con Tolosa en la que, se modifican algunos valores muy levemente, incluso con mejoras en las condiciones para el enraizamiento, no afectando su aptitud de uso, al menos en el período estudiado. En Luz y Pampa ocurren cambios que afectan sus desempeños productivos, fundamentalmente en las impedancias mecánicas; en la primera, seguramente esté asociado, en parte, a su textura rica en limo (Zurita et al., 2012); y en Pampa, que a diferencia de los demás suelos, desde el primer año de producción tiene menor aptitud de uso y rendimiento, probablemente debido a características genéticas propias inherentes a su conformación morfológica, tales como el escaso espesor del horizonte A y horizonte B moderadamente textural (Ledesma y Zurita, 1995b; Brest et al., 2007) que inciden en la profundización y exploración de las raíces del cultivo.

La evaluación de los suelos en distintas situaciones de abastecimiento hídrico muestra que el régimen de precipitaciones anuales condiciona la aptitud y los rendimientos (Giménez, 2014; Gvozdenovich et al., 2015), ya que en años con déficit, los suelos prácticamente no revelan diferencias entre ellos, debido a que, como se dijo anteriormente, la respuesta del cultivo está muy condicionada por la disponibilidad de agua (Capurro et al., 2017). Con precipitaciones superiores a la media anual el modelo predice buenos y muy buenos rendimientos, indicando que el régimen de precipitaciones anuales los determina, al igual que su aptitud de uso y, por el contrario, en años con déficit están por debajo del rendimiento de indiferencia (Giménez, 2017). En períodos con precipitaciones muy bajas, menores a 500 mm.año^{-1} , generalmente acompañadas con altas temperaturas y estrés calórico, el efecto es tan importante que se suspenden o abandonan las actividades, tales como siembra, pulverizaciones o cosecha, dependiendo el momento de ocurrencia de la sequía (Cuniberti et al., 2018).

Los resultados obtenidos indican que los suelos estudiados, luego del desmonte, y al ser destinados al uso agrícola con cultivo de soja, con diferentes años de antigüedad, son afectados negativamente en los parámetros analizados. De la misma forma, la situación de insuficiente abastecimiento hídrico remarca e intensifica esa respuesta.

5. CONCLUSIONES

Respecto a la hipótesis, se corroboró la relación entre el desmonte y las diferentes susceptibilidades a la degradación de los suelos estudiados, luego de su habilitación para la producción de soja. Dado que las precipitaciones ocurridas durante el período de estudio fueron muy insuficientes, no resultó posible confirmar su influencia sobre los rendimientos del cultivo”.

Se confirmó que los suelos destinados al cultivo de soja luego del desmonte poseen distinta susceptibilidad a la degradación, y que la conformación morfológica y las propiedades físicas y químicas, condicionan el desempeño ante el impacto del uso agrícola, revelado fundamentalmente por incrementos en la manifestación de las impedancias mecánicas.

En base a los resultados obtenidos, se demostró la importancia de considerar la Serie de suelo como determinante para la comparación de indicadores de suelo entre condiciones de uso, además del tipo de cobertura. Las Series de suelos deberían ser tenidas en cuenta en la planificación de las actividades productivas, dado que son parte fundamental, incidiendo en gran manera en el resultado de los emprendimientos y en la conservación de los recursos naturales.

El modelo de simulación elaborado constituye una herramienta para gestionar el uso de las tierras en la zona de expansión de la frontera agropecuaria del departamento Almirante Brown, provincia del Chaco.

Sin embargo, el modelo de simulación podrá ser aplicado y deberá ser validado para evaluar otros suelos regionales, y con ello, valorar diferentes estrategias de intervención productiva, con menor impacto, ganaderos o silvopastoriles, e incluso desestimar el cambio de uso y mantener la vegetación original.

La tendencia de degradación de los suelos indicó claramente que el monocultivo de soja en SD, impacta negativamente sobre las propiedades del suelo, de manera diferente según el tipo de suelo. Sería conveniente continuar las investigaciones para verificar si la tendencia que manifiestan los indicadores persiste en el tiempo.

Se deberían evaluar rotaciones con otros cultivos y pasturas de modo de disponer de información calificada para evaluar los cambios en las propiedades de los suelos sometidos a estos usos.

Esta tesis aportó conocimientos y herramientas tendientes a la conservación de la calidad de los suelos de la región, principalmente suelos forestales frágiles destinados a usos agrícolas productivos, generando elementos técnicos y científicos para alertar en forma temprana sobre procesos de degradación de los recursos naturales, que apoyen la creación de políticas adecuadas para la planificación del uso sustentable de las tierras.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Aimar, SB; A Iturri; JM Rojas; G Guevara y DE Buschiazzi. 2010. Nutrient losses by wind erosion in an Entic Haplustoll of Chaco, Argentina. Conferencia; ICAR VII International Conference on Aeolian.
- ALES (Automated Land Evaluation System). 1997. Cornell University, Department of Soil, Crop & Atmospheric Sciences. SCAS Teaching. Series N° T93-2. Revision 6. Ithaca, NY USA.
- Álvarez, C; P Fernández y M Taboada. 2012. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos de la región pampeana. *Ci. Suelo*, 30 (2): 173-178.
- Álvarez Arteaga, G; B García Fajardo; ME Orozco Hernández; P Mireles Lezama y J Contreras Martínez. 2017. Estimation of carbon stocks under different soil uses in the central highlands of Mexico. *Acta Agronómica*, 66 (1): 21-26.
- Aparecida Silva, A y S Simões de Castro. 2015. Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no Cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar: o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás. *Revista Ateliê Geográfico* 9 N°2: 114. Complementary Index, EBSCOhost.
- Arolfo, RV; JC Bedano y AR Becker. 2010. Effects of transgenic soybean cultivation under no-tillage on soil mite taxocenosis in Haplustolls of Central Córdoba. *Ci. Suelo*, 28 (2): 191-200.
- Arzeno, J. 2008. Guía Técnica. Proyectos de habilitación de tierras para su uso sustentable. INTA EEA Salta.
- Arzuaga, SA; DM Toledo; SM Contreras Leiva y S Vázquez. 2016. Stocks y relaciones de estratificación del carbono y nitrógeno en Oxisoles bajo sistemas forestales. *Ci. Suelo*, 34 (1): 13-20.
- Barbero, M; H Apezteguía y R Sereno. 2010. Tasa de mineralización del carbono orgánico del suelo luego del desmonte en Córdoba y Santiago del Estero. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Blanco Sepúlveda, R. 2009. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239.

- Boletín Oficial de Chaco. 2018. Disposición N° 300/18. Subsecretaría de Recursos Naturales. Novedades normativas en materia ambiental.
- Bonel, BA; NC Di Leo y S Montico. 2018. Evaluación de la compactación de suelos en sistemas de producción agropecuarios del sur de Santa Fe. Capítulo 11. Compactaciones Naturales y Antrópicas en Suelos Argentinos. 344-374.
- Botta, GF; O Pozzolo; M Bomben; H Rosatto; D Rivero; M Ressia; M Tourn; E Soza y J Vazquez. 2007. Traffic alternatives for harvesting soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under a direct sowing system. *Soil & Tillage Res.* 96: 145-154.
- Branthomme, A. 2009. Monitoreo y Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales. Manual para la recolección integrada de datos de campo. Versión 2.2 (3ª Edición). Documento de Trabajo NFMA 37/S - Roma.
- Bremner, J y R Mulvaney. 1996. Nitrogen total and inorganic forms. In: Sparks, D (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. Pp: 869-919. SSSA Book Series N°5, SSSA & ASA, Madison, WI, USA.
- Brest, EF; MR Melgratti; AE Lopez y JJ Zurita. 1999. Evaluación del impacto ambiental en áreas transformadas. Proyecto 510. Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación. Convenio SRNyDS-INTA-GTZ.
- Brest, EF; AE López y JJ Zurita. 2007. Zonificación agroedáfica. Atlas climático Región Noreste. Oficina de Riesgo Agropecuario. (http://www.ora.gob.ar/eval_atlas_nea.php. Acceso: 8 de agosto de 2017).
- Brest, EF; AE López y JJ Zurita. 2018. Fragipanes en la provincia del Chaco: identificación, propiedades y distribución. Capítulo 2. Compactaciones Naturales y Antrópicas en Suelos Argentinos. 58-88.
- Buchmann, C y GE Schaumann. 2018. The contribution of various organic matter fractions to soil–water interactions and structural stability of an agriculturally cultivated soil. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 181: 586-599.
- Buschiazzo, DE; TM Zobeck y SA Abasca. 2007. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. *Journal of Arid Environments.* 69: 29–39.
- Cacchiarelli, J; JA Galantini y RA Rosell. 2008. Estabilidad estructural y P en fracciones de agregados en la cuenca del A° El Divisorio (Coronel Pringles, BA). *Ci. Suelo*, 26 (1): 71-79.

- Campitelli, P; A Aoki; O Gudel; A Rubenacker y R Sereno. 2010. Soil quality indicators of the effects of land use and agricultural practices in a pilot area of the central region of Córdoba. *Ci. Suelo*, 28 (2): 223-231.
- Carter, M.R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Carter, M.R.; Gregorich, E.G.; Anderson, D.W.; Doran, J.W.; Janzen, H.H. y Pierce, F.J. 1997. Concepts of soil quality and their significance. Chapter 1. En (Gregorich, E. G.; Carter, M. R., eds.) *Soil Quality For Crop Production and Ecosystem Health*. Elsevier. 1997. 1-19.
- Caruso, H. y S. Miranda, S. 2012. Efecto del método de desmonte sobre los indicadores de calidad del suelo y la condición de las pasturas en el Chaco semiárido salteño. *AgriScientia*, v. 29, n. 2, 2012.
- Casas, R y R Michelena. 1983. La degradación de los suelos y la expansión de la frontera agropecuaria en el Parque Chaqueño Occidental. Séptima Reunión Nacional para el Estudio de las regiones áridas y semiáridas. San Luis. Buenos Aires. IDIA N°36:141-146.
- Castiglioni, MG; F Behrends Kraemer y HJ Morras. 2013. Efecto de la secuencia de cultivos bajo siembra directa sobre la calidad de algunos suelos de la región Pampeana. *Ci. Suelo*, 31(1): 93-105.
- Capurro, M; A Beretta; C García; J Sawchik y L Puppo. 2017. Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego. *Agrociencia Uruguay*, 21(2): 65-76.
- Celaya Michel, H y AE Castellanos Villegas. 2011. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 29 (3): 343-356.
- Certini, G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: a review. USDA, 2017. *Soil Survey Manual*. Handbook No. 18. (3). *Oecologia* 143: 1–10.
- Conti, ME; MG González; E Gómez; E Ferrero Holtz y G Moreno. 2014. Soil organic carbon fractions as influenced by soybean cropping in the humid Pampa of Argentina. *Terra Latinoamericana*, 32(3): 195-200.
- Coria, RD; CR Kunst y V Navarrete. 2017. Rolado selectivo de baja intensidad (RBI) sobre bosque nativo en el Chaco Semiárido: influencia sobre la diversidad y la composición de un ensamble de reptiles. *Ecología austral*, 27 (1): 1-9.

- Cruz Ruiz, E; A Cruz Ruiz; LI Aguilera Gómez; HT Norman Mondragón, RA Velázquez; G Nava Bernal; L Dendooven y BG Reyes Reyes. 2012. Edaphic characteristics of a forest temperate by effect of the land use change. *Terra Latinoamericana*, 30 (2): 189-197.
- Cuadra, DE. 2012. La problemática forestal en la provincia del Chaco, Argentina. Un análisis desde la geografía. *Revista Geográfica Digital*. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 9. Nº 18. (<http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default> Acceso: 10 de mayo de 2018).
- Cuadra, DE y NA Mónaca. 2016. El centro-sudoeste de la provincia del Chaco (Argentina): Un bastión agrícola. *Revista Geográfica Digital*. IGUNNE. Facultad de Humanidades. UNNE. Año 13. Nº 26. (<http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/default.htm> Acceso: 8 de febrero de 2018).
- Cuniberti, M; R Herrero; L Mir; E Chialvo; O Berra; S Macagno; M Pronotti y G Mansilla. 2018. Productividad y calidad de la soja en la zona Núcleo-Sojera Campaña 2017/18. Ediciones INTA. Soja 2018. Informe de Actualización Técnico en línea Nº 12. 57-63.
- De Boodt, M y L De Leenheer. 1967. West European Methods for Soil Structure Determination, VII. The State Faculty Agricultural Sciences. Gent. Bélgica. 60-62.
- Delgado Restrepo, OM; JC Menjivar Flores y F Muñoz Arboleda. 2016. Influence of management systems on the nitrogen mineralization and fertilization of sugarcane. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69 (1): 7755-7762.
- Díaz Orozco, AY. 2017. Evaluación de sistemas agroforestales mediante la implementación de sistemas de información geográfica. Trabajo de tesis. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Escuela de ciencias agrícolas, pecuarias y del medioambiente. Programa de Ingeniería Agroforestal. Valledupar. (<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13543> Acceso: 22 de junio de 2018).
- Di Rienzo, JA; F Casanoves; MG Balzarini; L González; M Tablada y CW Robledo. InfoStat versión 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL.
- Doran, JW y BT Parkin. 1994a. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. Soil Science Society of America, Inc. Special Publication. Number 35. Madison, Wisconsin, USA.
- Doran, JW y BT Parkin. 1994b. Defining and Assessing Soil Quality. In *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*; Doran, JW; DC Coleman; DF Bezdicek y BA Stewart, eds., Soil Sci. Soc. Amer. Madison, Wis., 3-21.

- Draghi, LM; GF Botta; RH Balbuena; JA Claverie y H Rosatto. 2005. Differences in mechanical conditions of a clayey soil under different tillage systems. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9 (1): 120-124.
- Duval, ME; JA Galantini; JM Martínez y JO Iglesias. 2016. Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ci. Suelo*, 34 (2): 197-209.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación]. 1976. Esquema para la evaluación de tierras. Boletín 32. Roma.
- FAO [Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación]. 2007. Land evaluation. Towards a revised framework. Land and water discussion. Paper 6. Roma.
- Franzluebbers, AJ. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Res.* 66: 95-106.
- Galantini, JA; LG Suñer y JO Iglesias. 2007 Sistemas de labranzas en el sudoeste bonaerense: efectos de largo plazo sobre las formas de fósforo en el suelo. *RIA*. 36 (1): 63–81. INTA. Argentina.
- Galicia L; V Saynes y J Campo. 2015. Biomasa aérea, biomasa subterránea y necromasa en una cronosecuencia de bosques templados con aprovechamiento forestal. *Bot.* 93 (3): 473-484.
- García, M; M Román y MC González. 2014a. Desmonte y soja en una provincia del norte argentino: implicaciones ecosistémicas y socioeconómicas. *Ambiente y Desarrollo*, 18 (34): 109-124.
- García, FO; LI Picone y IA Ciampitti. 2014b. Fósforo. en: Echeverría, HE y FO García (eds.). *Fertilidad de suelo y fertilización de cultivos*. 2da. Ed. Ediciones INTA. 229–264.
- Gil, RC. 2006. Infiltrómetro-Permeámetro de disco. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy.
- Gil, RC. 2012. El Comportamiento Físico-Funcional de los Suelos. ¿Cómo debería ser un suelo para permitir un óptimo desarrollo al cultivo? INTA.
- Giménez, L. 2014. Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja. *Agrociencia Uruguay*, 18 (1): 53-64.

- Giménez, L. 2017. Respuesta del maíz y la soja a diferentes disponibilidades hídricas en distintas etapas de desarrollo. *Agrociencia Uruguay*, 21 (2): 77-90.
- Groot, R. 2006. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes. *Landscape and Urban Planning*. Volume 75, Issues 3–4, 15: 175–186.
- Gvozdenovich J; C Píoto y O Paparotti. 2015. Variación del rendimiento del cultivo de soja debido a la erosión hídrica en Entre Ríos. Ediciones INTA. EEA Paraná. Serie Extensión 76: 01-108. 45-49.
- Heredia, M. 2017. Sojización del Chaco. Estado del conocimiento. Escuela de gobierno. (<http://escueladegobierno.chaco.gov.ar/files/documentos-de-trabajo/soja-informe-definitivo-junio.pdf> Acceso: 5 de septiembre de 2018).
- Hernández Jiménez, A; L Vera Macías; CA Naveda Basurto; Á Guzmán Cedeño; M Monserrate, Vivar Arrieta; T Roberto Zambrano; F Mesías Gallo; K Ormanza; L Aguilar; R Venancio y GA López Alava. 2017. Variations in some soil properties because of the land use change in the middle and low parts of the Membrillo micro-watershed, Manabi, Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 38 (1): 50-56.
- Hernández Vigoa, G; G. Cabrera Dávila, I. Izquierdo Brito; AA Socarrás Rivero, L Hernández Martínez; y JA Sánchez Rendón. 2018. Indicadores edáficos después de la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos. *Pastos y Forrajes*, 41(1), 3-12.
- Husson, F; S Lê y J Pagès. 2011. Exploratory multivariate analysis by example using R, Work. (<http://dx.doi.org/10.1080/02664763.2012.657409> Acceso: 10 de agosto de 2017).
- INTA. 2011. Actualización técnica N° 18. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca Presidencia de la Nación. (https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-siembra_directa_2011.pdf Acceso: 20 de febrero de 2018).
- IRAM-SAGyP 29570-1. 2010. Determinación de fósforo extraíble en suelos - Parte 1 - Método Bray Kurtz 1 modificado (Extracción con solución de fluoruro de amonio - ácido clorhídrico). Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM - SAGPyA 29571-2. 2011. Determinación de materia orgánica en suelos. Parte 2: Determinación de carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

- IRAM-SAGyP 29572-1. 2011. Determinación de nitrógeno en suelo por el método Kjeldahl modificado. Parte 1: Escala semi-micro. Esquema A1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM-SAGyP 29574. 2011. Determinación de pH en suelo para uso agropecuario. Esquema A1. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Jaramillo, DF; ML Anaya Gómez; CA Restrepo Moná; HA González Sánchez y F Álvarez Mejía. 2011. Variables físicas que explican la variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 46 (12): 1707-1715.
- Jorajuría Collazo, D. 2004. La resistencia mecánica a la penetración como parámetro mecánico del suelo. En: Filgueira, R y F Micucci (Ed.) *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría*. Editorial de la Universidad de la Plata. Colección Naturales. 43-53.
- Klingebiel, AA y PH Montgomery. 1964. Clasificación por Capacidad de Uso de las Tierras. Departamento de Agricultura de EE.UU. Servicio de Conservación de Suelos. Manual de Agricultura N° 210. Centro Regional de Ayuda Técnica (AID) Méjico.
- Labelle, ER y D Jaeger. 2011. Soil Compaction Caused by Cut-to-Length Forest Operations and Possible Short-Term Natural Rehabilitation of Soil Density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 (6): 2314-2329.
- Ledesma, LL. 1980. Influencia del uso agropecuario en suelos de desmonte en la Provincia del Chaco. Departamento de Recursos Naturales. INTA. EEA Sáenz Peña.
- Ledesma, LL y JJ Zurita. 1995a. Los suelos de la Provincia del Chaco, República Argentina. INTA - Gobierno del Chaco.
- Ledesma, LL y JJ Zurita. 1995b. Carta de suelos de la República Argentina. Los suelos del Departamento General Belgrano. INTA - Gobierno del Chaco. (<https://inta.gob.ar/documentos/mapa-de-suelo-departamento-belgrano> Acceso 8 de abril de 2016).
- Ledesma, LL y JJ Zurita. 2003. Carta de suelos de la República Argentina. Los suelos del Departamento Comandante Fernández. INTA - Gobierno del Chaco. (<http://cedei.produccion.chaco.gov.ar/cartas-de-suelos/> Acceso 8 de abril de 2016).

- Lorenzatti S. 2003. La rotación de cultivos: Una herramienta poco utilizada. Revista técnica: Conociendo el suelo en siembra directa. Aapresid.
- Manzanal, M. 2017. Territory, power and soybean production in the Latin American Southern Cone: The Argentine case. Mundo agrario, 18(37), 00.
- Maressa, M; M Basanta; JP Giubergia; MB Aimetta; C Alvarez y C Cesaretti. 2014. Resistencia mecánica de un Haplustol del centro de la provincia de Córdoba. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Moro, EC; OE Ingaramo; CA Venialgo y NC Gutierrez. 2005. Infiltración en un Argiustol Údico con diferentes sistemas de uso en el departamento 9 de Julio, Chaco. Agrotecnia 14. 14-19.
- Mur, M y RH Balbuena. 2014. Compactación de un suelo Argiudol Típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes. Ci. Suelo, 32 (1): 1-12.
- Olivares, R; JJ Zurita; J Parera; EF Brest y AE López. 2005. Evaluación de tierras. Regulación de la Frontera Agropecuaria. Ministerio de la Producción del Chaco.
- Olivares, R y CN Mansilla. 2010. Evaluación de la situación actual de los suelos de la Provincia del Chaco. Dirección de Suelos y Agua Rural. Subsecretaría de Recursos Naturales. Ministerio de Producción y Ambiente.
- Paruelo, JM; M Oesterheld; F Del Pino; JP Guerschmann; SR Verón; G Piñeiro Guerra; J Volante; G Baldi; C Caride; D Arocena; M Vasallo; L Porfirio y M Durante. 2004. Patrones Espaciales y Temporales de la Expansión de Soja en Argentina: Relación con Factores Socio-Económicos y Ambientales. Informe final LART/ FAUBA al Banco Mundial.
- Pennock, D; T Yates y J Braidek. 2008. Soil Sampling Designs. In: Carter, MR & EG Gregorich (eds.). 2008. Soil Sampling and methods of analysis. 2nd. Ed. Taylor & Francis Group. LLC. 25-39.
- Pértile, D y A Moreno. 2005. Documento base de análisis territorial - Región Impenetrable. Provincia del Chaco.
- Perucca, SC, y DB Kurtz. 2016. Evaluación de tierras para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en el noroeste de la provincia de Corrientes, Argentina. Agrotecnia 24: 11-16.

- Pilatti, MA; JA de Orellana; S Imhoff y ÁP da Silva. 2012. Revisión de los límites críticos del Intervalo Hídrico Óptimo (IHO). *Ci. Suelo*, 30 (1): 9-21.
- Pla, I. 2013. Análisis crítico de la calidad de suelos y sus indicadores. *Suelos Ecuatoriales*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 43 (1): 1-81.
- Prause J; C Fernandez López; SM Contreras Leiva y JF Gallardo Lancho. 2012. Aporte y descomposición de hojas y re-absorción de N, P y K en un bosque primario de *Schinopsis balansae Engler* con y sin manejo silvopastoril en el Parque Chaqueño Húmedo. *FACENA. Revista de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura*. FACDYA, Vol. 28, 41-50.
- Quirolo, ME y EAA Leonhardt. 2018. Resultados económicos de los cultivos de renta en la campaña 2017/2018. Depto. Almirante Brown, Provincia del Chaco. INTA. (<https://inta.gob.ar/documentos/resultados-economicos-de-los-cultivos-de-renta-en-la-campana-2017-2018-depto-almirante-brown-provincia-del-chaco> Acceso: 11 de octubre de 2018).
- Rey Montoya, TS; FA Paredes; HC Dalurzo; C Fernández Lopez y RM Kersting. 2017. Propiedades Físicas de un Argiudol Ácuico bajo diferentes sistemas de manejo. *Ci.Suelo*, 35 (1):171-180.
- Revelli, GR; RC Gagliardi; OA Sbodio y EJT Tercero. 2010. Physicochemical properties of predominant soils in Northwestern Santa Fe and Southern Santiago del Estero provinces, Argentina. *Ci. Suelo*, 28 (2): 123-130.
- RIAN-Chaco-Formosa. 2013. Informe mensual agropecuario. Por Departamentos. Mayo 2013. Ediciones INTA.
- Rojas, JM. 2012. Indicadores de calidad de suelos desmontados y destinados a la producción agrícola en el Área piloto de la Ecorregión Chaqueña. Tesis Maestría en Ciencias Agrarias Orientación: Producción Sustentable. Facultad de Agronomía y Zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán.
- Rojas, JM; MF Roldán y GS Guevara. 2015. Influencia de rotaciones en la calidad del suelo en la zona central del Chaco y su relación con la producción de algodón. *Ci. Suelo*, 33 (2): 239-246.

- Rojas, JM; J Prause; GA Sanzano; OEA Arce y MC Sánchez. 2016. Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. *Soil & Tillage Res.* 155: 250-262.
- Rojas, JM y JJ Zurita. 2017. Ecorregión Chaqueña. Agricultura de secano en siembra directa sobre suelos forestales sujetos a cambios en el uso del suelo. Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. 19– 199.
- Roldán, MF; GA Studdert; C Videla; S San Martino y L Picone. 2014. Distribución de tamaño y estabilidad de agregados en molisoles bajo labranzas contrastantes. *Ci. Suelo* 32 (2):247-257.
- Roldán, MF; GA Studdert; C Videla; L Picone y S San Martino. 2015. Cambios de distribución de las fracciones de carbono orgánico en agregados del suelo en relación a su situación prístina. En: Impacto de los sistemas actuales de cultivos sobre las propiedades químicas del suelo. (Eds. Sa Pereira et al.), 118-122.
- Rossiter, DG y AR Van Wambeke, 1995. Automated Land Evaluation System. Version 4.5. User's Manual. SCAS. Teaching Series T93-2 Revision 5. Department of Soil, Crop & Atmospheric Sciences, Cornell University, Ithaca, NY.
- Sánchez, PA. 1981. Suelos del trópico: características y manejo. 1ra. Ed. IICA. Costa Rica. 354-421.
- Santos, DJ; MG Wilson y M Ostinelli. 2012. Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo: protocolos básicos comunes. 1a ed. - Paraná. Ediciones INTA. 70.
- Sanzano, GA; RD Corbella; JR García y GS Fadda. 2005. Degradación física y química de un Haplustol Típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ci. Suelo*, 23 (1): 93-100.
- Sanzano, GA; C Hernández; M Morandini; F Sosa; H Rojas Quinteros; C Sotomayor y J Romero. 2012. Evaluation of soil compaction under no tillage systems in the Chacopampeana Plain in Tucumán, Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 89 (1): 31-38.
- Sato, MK; HV de Lima; PD de Oliveira y S Rodrigues. 2015. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. *International Int. Agrophys.* 29: 441-447.
- Schmidt, E; y N Amiotti. 2015. Propiedades edáficas superficiales en sistemas de agricultura de conservación en la región pampeana semiárida sur. *Ci. Suelo* 33 (1): 79-88.

- Schoeneberger, PJ; DA Wysocki; EC Benham, y WD Broderson. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Silberman, JE; AL Arinques; JA Domínguez Núñez; CG Kunst y AS Albanesi. 2015. La cobertura arbórea en un sistema silvopastoril del Chaco y su contribución diferencial al suelo. *Ci. Suelo* 33 (1): 11-17.
- Six, J; RT Conant; EA Paul y K Paustian. 2002. Stabilization mechanisms for soil organic matter: implications for C saturation of soils. *Plants Soil*, 141: 155–176.
- Sobral, R. 2009. Proyecto Específico: Aplicación de sistemas de evaluación de la aptitud actual y potencial de las tierras para el ordenamiento territorial (OT). Programa Nacional ecorregiones. INTA.
- Sotelo, CE; GL Pérez; AA Sirio; S Carnicer; N Mansilla; C Panzardi y AA Driutti. 2017. *Agrotecnia 25 REBIOS. XI Reunión Nacional Científico-Técnica de Biología de Suelos. Corrientes. Argentina.*
- Stengel, P. 1983. Analyse de la porosité. Séminaire CEE - Agrimed, 14-18 p. Mars, INRA, Avignon.
- Stolf, R. 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 15 (2): 229-35.
- Studdert, GA; GF Domínguez; MJ Eiza y CC Videla. 2005. Manejo de cambios en el suelo a través de rotaciones de cultivos y labranzas en el sudeste bonaerense: algunos resultados de ensayos de larga duración. Simposio Impacto de la intensificación de la agricultura sobre el recurso suelo. Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo - Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Colonia del Sacramento, R.O. Uruguay.
- Sys, C; E Van Ranst; J Debaveye y F Beernaert. 1993. Land Evaluation Part III: Crop requirements. Agricultural Publication, No. 7. GADC, Brussels, Belgium.
- Taboada, MA y FG Micucci. 2008. Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En: Taboada, MA y CR Álvarez (eds). *Fertilidad física de los suelos*. 2da. Ed. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina. 94–151.

- Tisdall, JM y JM Oades. 1982. Organic matter and water - stable aggregates in soils. *Soil Sci.* 33 (1):141-163.
- Tiwari, R; RK Naresh; Vivek; L Jat; Purushattom; Suniti y A Singh. 2018. Soil aggregation and aggregate associated organic carbon fractions and microbial activities as affected by tillage and straw management in a rice-wheat rotation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7 (5): 2865-2893.
- Toledo, DM; JA Galantini; E Ferreccio; S Arzuaga; L Gimenez y S Vázquez. 2013. Indices and indicators of soil quality in natural and cultivated red soil systems. *Ci. Suelo*, 31 (2): 201-212.
- Torre Geraldí, AH. 2005. Expansión de la frontera agraria en la Provincia del Chaco. El caso de la soja entre los años 1997 y 2003. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Universidad Nacional del Nordeste. H-014.
(<http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/com2005/2-Humanidades/H-014.pdf> Acceso: 5 de noviembre de 2017)
- Torrella, SA. 2014. Fragmentación y pérdida del “bosque de tres quebrachos” y su comunidad de plantas leñosas en el SO de la Provincia de Chaco. Tesis de doctorado. Área Ciencias Biológicas. Universidad de Buenos Aires.
- USDA. 1999. Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura Servicio de Investigación Agrícola. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Instituto de Calidad de Suelos.
- USDA. 2017. Soil Survey Manual. Handbook N° 18. (3)
- Varela Teijeiro, MF. 2007. Efectos de los incendios forestales en la degradación física de los suelos de Galicia. Universidad de Vigo. Departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo. Facultad de Biología. (<http://www.cesam.ua.pt/files/TESIS%20M.E.%20VARELA.pdf> Acceso: 6 de diciembre de 2017).
- Villazón Gómez, JA; GM Gutiérrez y Y Cobo Vidal. 2017. Análisis multivariado de las propiedades químicas de los suelos pardos erosionados. *Revista Centro Agrícola*, 44 (1): 56-62.
- Volante, JN; MJ Mosciaro; D Alcaraz Segura; LM Vale; EF Viglizzo y JM Paruelo. 2014. Dinámica del avance de la frontera agropecuaria y cambios funcionales en ecosistemas del Noroeste de Argentina. Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: avances en la Argentina. Capítulo 27. Argentina. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.

- Walkley, A y A Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, as a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wilson, MG. 2017. Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. Ediciones INTA. 1a ed.
- Zerpa, G. 2006. Degradación de suelos de uso pasturil. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Rosario.
- Zúñiga Ugalde, F; J Huertas; G Guerrero; J Sarasty; J Dörner y H Burbano Orjuela. 2018. Propiedades morfológicas de los suelos asociadas a los ecosistemas de Páramo, Nariño, Sur de Colombia. *Revista Terra Latinoamericana*. [S.l.], 36 (2): 183-196.
- Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2003. Carta de suelos: Establecimiento Capellino. Parcelas 42, 43, 44, 45, 52, 53, 54 y 55. Circunscripción VII. Departamento Almirante Brown. Chaco.
- Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2004. Carta de suelos: Establecimiento Curin. Parcela 60. Circunscripción VII. Departamento Almirante Brown. Chaco.
- Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2005. Carta de suelos: Establecimiento La Almada. Parcela 230. Circunscripción VIII. Departamento Almirante Brown. Chaco.
- Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2006a. Carta de suelos: Establecimiento Bedino. Parcela 1135. Circunscripción VI. Departamento Almirante Brown. Chaco.
- Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2006b. Carta de suelos: Establecimiento Lambrech. Parcelas 347 y 348. Circunscripción VI. Departamento Almirante Brown. Chaco.
- Zurita, JJ. 2007. Carta de suelos de la República Argentina. Los suelos del Departamento General Güemes. INTA - Gobierno del Chaco. (<https://inta.gob.ar/documentos/mapa-de-suelo-departamento-guemes> Acceso 8 de abril de 2016).
- Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2008. Carta de suelos: Establecimiento Luna. Parcela 462. Circunscripción VIII. Departamento Almirante Brown. Chaco.
- Zurita, JJ; AE López; EF Brest; JM Rojas; YS Goytía y AE Bianconi. 2010a. Zonificación RIAN Chaco y Formosa. Red de Información Agroclimática Nacional. INTA EEA Sáenz Peña. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-zonificacin_rian_chaco_y_formosa_2010.pdf Acceso: 30 de marzo de 2017).

Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2010b. Carta de suelos: Establecimiento De la Flor. Parcela 615. Circunscripción VI. Departamento Almirante Brown. Chaco.

Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2010c. Carta de suelos: Establecimiento Fogante. Parcela 339. Circunscripción VI. Departamento Almirante Brown. Chaco.

Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2011a. Carta de suelos: Establecimiento La Luciana. Parcela 980. Circunscripción VI. Departamento Almirante Brown. Chaco.

Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2011b. Carta de suelos: Establecimiento Te. Parcelas 55 y 56. Circunscripción VII. Departamento Almirante Brown. Chaco.

Zurita, JJ; AE López y EF Brest. 2012. Carta de suelos: Establecimiento el Guayacán. Parcela 740. Circunscripción VI. Departamento Almirante Brown. Chaco.

ANEXO I

Serie **TOLOSA**

Símbolo de mapeo: To

Es un *Haplustept Údico* que se encuentra en lomas tendidas, poco evolucionadas, de relieve normal. Tiene un horizonte superficial color pardo grisáceo, textura media, con su base lixiviada por procesos de pseudo-podsolización; un subsuelo pardo claro, textura pesada, poco desarrollado, que descansa sobre un material pardo claro, textura media. Medianamente provisto de materia orgánica; mediana capacidad de retención de agua hasta los 160 cm de profundidad estudiados; neutro en el suelo y subsuelo, ligeramente alcalino a mayor profundidad; rico en calcio; bueno en magnesio; muy rico en potasio; alto contenido en fósforo; moderadamente alta capacidad de intercambio de cationes; bajo porcentaje de saturación de bases. Suelo moderadamente profundo, con penetración efectiva de raíces hasta 1 m.

Sus problemas principales son erosión hídrica moderada y tendencia a salinizarse en superficie. Al perderse por escurrimiento superficial (erosión hídrica) el horizonte A, aumenta el riesgo de arar el horizonte lixiviado E, al que hay que cuidar de incorporarlo paulatinamente al lecho de siembra. Este lecho de siembra tiene tendencia a salinizarse, produciéndose fallas en la germinación de las semillas.

Es un suelo forestal muy utilizado en agricultura, con rendimientos comerciales. Cuando se lo desmonta, debería tratarse como a los de Capacidad de Uso Clases II, III y IV, agricultura.

Su vegetación natural es de bosque maderable, con fachinal y vegetación basal.

- Árboles altos: quebracho colorado chaqueño, quebracho colorado santiagueño, quebracho blanco, guayaibí, itín, a veces mistol.
- Árboles medianos: mistol, itín, guayacán, guayaibí, a veces guaraniná y carandilla.
- Fachinal: talas, garabato, granadilla, guayacán, mistol, molle, carandilla.
- Vegetación basal: cardos, cactáceas, plantas blandas de hoja ancha.
- **Forrajes**: ramones, hojarasca, plantas blandas de hoja ancha y/o refugiadas.

Un perfil representativo de esta Serie tiene la siguiente descripción (I 25):

Oa	5 a 0 cm	Residuos vegetales descompuestos.
A ₀₁	5 a 10 cm	Pardo grisáceo (7.5 YR 4/2) en seco y negro pardusco (7.5 YR 2/2) en húmedo; textura franca; estructura migajosa, media, débil; consistencia blanda en seco, friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; escasos moteados, medios, de hierro; abundantes raíces y raicillas; límite abrupto y suave.
E	10 a 23 cm	Pardo grisáceo (7.5 YR 6/2) en seco y negro pardusco (7.5 YR 4/2) en húmedo; textura franco arcillosa; estructura migajosa, fina, moderada; consistencia blanda en seco, friable en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; escasos moteados, medios, de hierro; raíces comunes; ligeramente salino, límite abrupto y suave.
Bw	23 a 45 cm	Pardo (7.5 YR 4/3) en seco y pardo oscuro (7.5 YR 2/3) en húmedo; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios, moderados; consistencia dura en seco, firme en húmedo, plástica y ligeramente adhesiva en mojado; escasas concreciones, finas, de hierro; moteados comunes, medios, de hierro; raíces comunes; límite claro y suave.
BC	45 a 61 cm	Pardo claro (7.5 YR 5/3) en seco y pardo oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo; textura franco arcillosa; estructura en bloques subangulares medios, moderados; consistencia ligeramente dura en seco, firme en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; moteados comunes, medios, de hierro; raíces comunes; límite gradual y suave.
C	61 a 100 cm	Pardo claro (7.5 YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7.5 YR 3/4) en húmedo; textura franca; estructura masiva; consistencia blanda en seco, friable en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; moteados comunes, medios, de hierro; raíces escasas; límite abrupto y suave.

Ck	100 a 160 cm	Anaranjado claro (7.5 YR 6/4) en seco y pardo claro (7.5 YR 5/4) en húmedo; textura franca; estructura masiva; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; abundantes carbonatos, libres, en masa; moteados comunes, medios, de hierro.
----	--------------	--

NOTA: llama la atención la distribución de sales en el perfil con salinidad ligera en el horizonte E.

El horizonte A varía de 10 a 20 cm de espesor, textura media; el E entre 25 a 35 cm, textura pesada y media; el B entre 40 a 65 cm, textura pesada; el C se presenta a partir de los 70 a 75 cm de profundidad, textura media, con concentraciones de calcio entre los 80 a 110 cm, alrededor de 20% de durinódulos de hasta 1/4 cm de diámetro.

En las unidades mapeadas en este Departamento, aparece como serie pura y asociada con la Serie Bajo Hondo Chico, que es suelo ganadero con problemas de alcalinidad.

Clasificación taxonómica: *Haplustept Udico*, familia franca fina, mixta, hipertérmica. Sección control de familia entre 25 a 100 cm de profundidad (75 cm de espesor). Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico, horizonte B cámbico, horizonte Ck. Serie competidora: Iporá Guazú. Se diferencia porque Iporá Guazú tiene horizonte argílico; más limo en todo su perfil y duripan.

Los datos analíticos se dan en la Tabla 38.

INTA-EEA SAENZ PEÑA - INVENTARIO Y EVALUACIÓN DE TIERRAS
RESULTADOS ANALÍTICOS DE LOS LABORATORIOS
DE FÍSICA Y QUÍMICA - SUELOS

Tabla 38.Datos de un perfil representativo de la Serie Tolosa.

Perfil N° I 25		A ₀₁	E	Bw	Bc	C	Ck
N° Laboratorio		21869	21870	21871	21872	21873	21874
Profundidad (cm)		0-10	10-23	23-45	45-61	91-100	100-160
Factor de humedad		1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01
Mat Org.	C (%)	2.37	0.56	0.24	0.15		
	N (%)	0.250	0.088				
	C/N	10	6				
T E X T U R A E N %	Arcilla (<2 µ)	19.5	29.3	27.2	27.0	23.2	17.4
	Limo (2-20 µ)	17.8	20.6	18.8	20.4	21.1	19.7
	Limo (2-50 µ)	32.9	40.8	33.4	33.4	37.7	34.6
	Arena m. fina 1(50-74 µ)	5.9	9.4	3.9	6.7	1.9	1.7
	Arena m. fina 2(74-100 µ)	11.9	10.9	10.2	11.6	12.0	14.9
	Arena fina (100-250 µ)	29.4	9.6	24.9	20.9	24.8	27.9
	Arena media (250-500 µ)	0.4		0.4	0.4	0.4	0.6
	Arena gruesa (500-1000 µ)						0.2
	Arena m gruesa (1000-2000 µ)						
Gravilla (>2 mm)							
P (ppm)		88.5	63.5		60.7	71.4	84.5
CaCO ₃ (%) V		0	0	0	0	0	27
Equivalente de humedad (%)		16.0	20.4	16.9	18.0	17.8	15.5
Resistencia de la pasta (Ohms/cm)		2606	622	2534	2389	2213	2351
pH en pasta		7.2	6.4	7.5	7.6	7.5	8.0
pH en H ₂ O (1: 2.5)		7.7	6.7	7.7	7.9	8.2	8.7
pH en 1N KC1 (1:2.5)		7.0	6.0	6.6	6.8	6.7	7.7
Conductividad (dS/m)		0.96	4.02	0.99	1.05	1.13	1.06
Cat. de Cambio. (m.e./ 100 g)	Ca ++	18.9	10.9	11.7	11.1	11.5	
	Mg ++	2.1	2.7	1.9	4.1	2.4	
	Na +	0.3	1.0	0.4	0.3	0.3	0.4
	K +	2.1	1.8	2.1	2.1	1.8	1.5
% Na ⁺ en cambio de v.T		1.5	6.0	2.8	2.0	2.0	5
% Agua de saturación		45	38	41	35	37	31
Valor S (m.e/100 g)		23.4	16.4	16.1	17.6	16.0	
H cambio (m.e/100g)		2.9	2.0				
Valor T (m.e/100g) NH ₄ ⁺ o Na ⁺		20.1	16.6	14.1	15.1	15.2	8.9
% de saturación de T		100	99	100	100		
% de saturación de S+H		89	89				

OBSERVACIONES: Alto contenido en fósforo.

Serie LUZ

Símbolo de mapeo: Lj

Es un *Haplustol Óxico* que se encuentra en lomas medias tendidas de relieve normal. Tiene un horizonte superficial color pardo grisáceo; un subsuelo poco desarrollado, pardo claro, que descansa sobre un material anaranjado, todo el perfil es de textura media. Medianamente provisto de materia orgánica, moderada capacidad de retención de agua hasta los 130 cm de profundidad estudiados; fuertemente ácido en superficie y neutro en profundidad, muy rico en calcio y potasio, rico en magnesio; moderadamente alta capacidad de intercambio de cationes, bajo porcentaje de saturación de bases. Suelo somero, con profundidad efectiva de penetración raíces hasta los 50 cm.

Sus problemas principales son el riesgo de erosión hídrica, tendencia a salinizarse, contenido de materia orgánica.

Es un suelo forestal que en caso de ser habilitado para agricultura debería tratarse como a los suelos agrícolas Capacidad de Uso Clase IV.

Su vegetación natural es de bosque maderable de dos estratos, fachinal y vegetación basal empobrecida y agrupamiento marcado.

- Árboles altos: quebracho colorado santiagueño.
- Árboles bajos: quebracho blanco, teatín, mistol, brea, patao, atamísqui, garabato
- Fachinal: sombra de toro, atamísqui, teatín, iscayote, pata, quimil.
- Vegetación basal tipo cardal: cardo gancho, aishpapela, mantillo, cactáceas.
- **Forrajes**: ramones, hojaracas, frutos, cactáceas.

Un perfil representativo de esta Serie tiene la siguiente descripción (A4)

A1 ₀₁	0 a 7 cm	Pardo grisáceo (7.5 YR 5/2) en seco y negro pardusco (7.5 YR 3/2) en húmedo; textura franca; estructura migajas, fina, débil; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; escasos moteados finos de hierro; raíces y raciales comunes; límite claro y suave.
A2	7 a 22 cm	Pardo claro (7.5 YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7.5 YR 3/4) en húmedo; textura franca, estructura migajosa, media, débil; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y no

adhesiva en mojado; escasos moteados finos de hierro; raíces y raicillas comunes; límite claro y suave.

Bw ₁	22 a 50 cm	Pardo claro (7.5 YR 5/3) en seco y pardo oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares, finas, moderados; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico en mojado; escasas concreciones medias de hierro; moteados comunes, medios de hierro; escasas raíces y raicillas límite gradual y suave.
Bw ₂	50 a 70 cm	Pardo claro (7.5 YR 5/4) en seco y pardo oscuro (7.5 YR 3/4) en húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares, finos débiles; consistencia suelta en seco, friable en seco, friable en húmedo, ligeramente adhesiva y ligeramente plástica en mojado; escasas concreciones finas, de hierro; moteados comunes finas, de hierro; raíces y raicillas escasas; límite claro y suave.
Ck ₁	70 a 110 cm	Pardo claro (7,5 YR 6/3) en seco y pardo (7,5 YR 4/3) en húmedo; textura franca; estructura masiva; consistencia: suelto en seco, friable en húmedo, ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; carbonatos libres en masa, concreciones finas, de hierro; moteados comunes, finos de hierro; 15% de durinódulos de 2 a 3 mm de diámetro; escasas raíces y raicillas; límite claro y suave.
Ck ₂	110 a 130 cm	Anaranjado opaco (7,5 YR 7/4) en seco y pardo claro (7,5 YR 5/4) en húmedo; textura franca; estructura masiva; consistencia: suelto en seco y friable en húmedo ligeramente adhesivo y ligeramente plástico en mojado; abundantes carbonatos libres en masa; calcio en polvo; escasas concreciones finas, de hierro; escasos moteados finos, de hierro; 30% de durinódulos de 2 a 3 mm de diámetro.

Clasificación Taxonómica: *Haplustol Óxico*, familia franca gruesa mixta, hipertérmica. Sección de control de familia de 25 a 100 cm de profundidad (75 cm de espesor). Horizonte diagnóstico: epipedón mólico y Ck.

Los datos analíticos se dan en la Tabla 39.

INTA-EEA SAENZ PEÑA - INVENTARIO Y EVALUACIÓN DE TIERRAS
RESULTADOS ANALÍTICOS DE LOS LABORATORIOS
DE FÍSICA Y QUÍMICA - SUELOS

Tabla 39. Datos de un perfil representativo de la Serie: Luz.

Perfil N° A 4		A 1 ₀₁	A2	Bw ₁	Bw ₂	Ck ₁	Ck ₂
N° Laboratorio		22133	22134	22135	22136	22137	22138
Profundidad (cm)		0 - 7	7 - 22	22 - 50	50 - 70	70 - 110	110 - 180
Factor de humedad		1.05	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02
Mat Org	C (%)	2.69	1.62	0.74	0.60	0.37	0.20
	N (%)	0.255	0.157	0.090	0.068	0.090	
	C/N	10.5	10.3	8.02	8.8	4.1	
T E X T U R A E N %	Arcilla (<2 µ)	18.5	16.2	18.0	18.7	13.7	12.5
	Limo (2-20 µ)	21.8	16.2	16.7	20.7	22.6	24.2
	Limo (2-50 µ)	37.0	35.6	35.3	36.8	37.9	41.5
	Arena m. fina 1(50-74 µ)	8.8	11.8	10.4	11.8	11.4	10.4
	Arena m. fina 2(74-100 µ)	6.6	7.9	7.8	6.0	7.7	7.8
	Arena fina (100-250 µ)	16.9	15.9	15.8	16.0	18.6	17.5
	Arena media (250-500 µ)	9.1	11.4	10.8	9.5	7.7	6.8
	Arena gruesa (500-1000 µ)	3.1	1.2	1.8	1.2	1.9	1.9
	Arena m gruesa (1000-2000 µ)			0.1		0.1	0.2
Gravilla (>2 mm)							
P (ppm)		79.5	48.6	38.5	38.5	5.7	3.2
CaCO ₃ (%) V						1.0	1.4
Equivalente de humedad (%)		19.0	15.8	16.0	15.7	15.6	16.1
Resistencia de la pasta (Ohms/cm)		1434	912	3557	3374	3192	2189
PH en pasta		5.5	5.6	6.3	6.6	7.7	7.7
PH en H ₂ O (1: 2.5)		5.9	5.9	6.8	7.0	8.3	8.2
PH en 1N KC1 (1:2.5)		5.3	5.4	5.6	6.0	7.1	7.3
Conductividad (dS/m)			3.4				
Cat. de Cambio. (m.e./ 100 g)	Ca ++	14.7	11.8	10.3	11.3		
	Mg ++	3.9	3.0	1.6	3.4		
	Na +	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4	0.4
	K +	1.9	1.5	1.2	1.1	1.0	1.4
% Na+ en cambio de v.T		0.8	0.5	1.4	0.6	2.7	2.9
% Agua de saturación		45	37	38	32	31	29
Valor S (m.e/100 g)		20.7	16.4	13.3	15.9		
H cambio (m.e/100g)		6.3	3.7	2.2	1.2		
Valor T (m.e/100g) NH ₄ ⁺ o Na ⁺		23.9	18.8	14.3	16.6	14.7	13.9
% de saturación de T		87	87	93	96		
% de saturación de S+H		77	82	86	93		

OBSERVACIONES: Alto contenido en fósforo.

Serie **PAMPA**

Símbolo de mapeo: Pt

Es un *Durustalf* que se encuentra en lomas tendidas, moderadas, de relieve normal. Tiene un horizonte superficial color pardo rojizo; un subsuelo color gris rojizo oscuro, que descansa sobre un material pardo rojizo claro. Perfil completo de textura media. Medianamente provisto de materia orgánica; mediana capacidad de retención de agua hasta los 150 cm de profundidad estudiados; débilmente ácido en superficie; rico en calcio, bien en magnesio; rico en potasio, alto contenido de fósforo; moderadamente alta capacidad de intercambio de cationes; bajo porcentaje de saturación de bases; suelo somero con penetración efectiva de raíces de las plantas, hasta alrededor del medio metro.

Sus problemas principales son erosión actual moderada y drenaje pobre.

Este suelo debería tratarse como a los de Capacidad de Uso Clase IV, agricultura y ganadería con intersiembra de pasturas que permitan mejorar la estabilidad de los agregados estructurales del horizonte superficial.

Su vegetación natural es de pajonal con un arbustal que puede alcanzar la forma de ramera.

- Pajonal: espartillo, pasto crespo.
- Arbustal: itín, algarrobo, talas, garabato, quimil.
- Árboles altos: algarrobo blanco, itín, quebracho blanco, quebracho colorado chaqueño.
- Plantas de hoja ancha: moco yuyo, batatita, cabra yuyo negro, altamisa chivil.
- **Forrajes**: ramones, hojarasca, espartillo, pasto crespo, plantas blandas de hoja ancha.

Un perfil representativo de esta Serie tiene la siguiente descripción: (A 10):

A ₀₁	0 a 17 cm	Pardo rojizo (5 YR 5/3) en seco y pardo rojizo oscuro (5 YR 3/3) en húmedo; textura franco arenosa fina; estructura migajosa, media, débil; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y
-----------------	-----------	---

		no adhesiva en mojado; moteados comunes, medios, de hierro; abundantes raíces y raicillas; límite claro y suave.
Bt	17 a 30 cm	Gris rojizo oscuro (5 YR 4/2) en seco y pardo rojizo oscuro (5 YR 2/2) en húmedo; textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, medios, moderados; consistencia ligeramente dura en seco, friable en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; escasas concreciones, finas, de hierro; moteados comunes, medios de hierro; abundantes raíces y raicillas; límite claro y suave.
BC	30 a 50 cm	Pardo rojizo (5 YR 4/4) en seco y pardo rojizo oscuro (5 YR 2/4) en húmedo; textura franca; estructura en bloques subangulares, finos, moderados; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; moteados comunes, medios, de hierro; raíces y raicillas comunes; límite gradual y suave.
Cq	50 a 80 cm	Pardo rojizo claro (5 YR 6/4) en seco y pardo rojizo (5YR 4/4) en húmedo; textura franca; estructura en grano simple; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; moteados comunes, medios, de hierro; raíces y raicillas comunes; 50 % de durinódulos de 2 cm de diámetro; límite abrupto y suave.
Ckq	80 a 150 cm	Rosado (5 YR 7/4) en seco y pardo rojizo (5 YR 5/4) en húmedo; textura franca; estructura en grano simple; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; abundantes carbonatos de calcio en polvo; concreciones comunes, medias de carbonato de calcio; moteados comunes, medios, de hierro escasas raíces y raicillas comunes; 50 % de durinódulos de 2 cm. de diámetro.

El horizonte superficial varía entre 13 a 17 cm. de espesor textura media; el B entre 20 a 40 cm., textura media y pesada, descansa sobre un material de textura media, con duripán y con concentración de calcio a partir de 100 a 130 cm de profundidad.

Fue mapeada como unidad pura.

Clasificación taxonómica: *Durustalf*, familia franca, fina, mixta, hipertérmica. Sección control de familia entre 17 a 30 cm de profundidad (13 cm de espesor). Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico y horizonte argílico moderadamente textural, duripán, Ck. No tiene Series competidoras en este Departamento

Los datos analíticos se dan en la Tabla 40.

**INTA-EEA SAENZ PEÑA- INVENTARIO Y EVALUACIÓN DE TIERRAS
RESULTADOS ANALITICOS DE LOS LABORATORIOS DE FISICA Y
QUIMICA-SUELOS**

Tabla 40. Datos de un perfil representativo de la Serie Pampa.

Perfil N° A 10		A ₀₁	Bt	BC	Cq	Ckq
N° Laboratorio		22157	22158	22159	22160	22161
Profundidad (cm)		0-17	17-30	30-50	50-80	80-150
Factor de humedad		1.02	1.03	1.03	1.03	1.03
Mat	C (%)	1.46	0.92	0.67	0.29	0.11
	N (%)	0.172	0.112	0.082		
Org	C/N	8.5	8.2	8.2		
T E X T U R A E N %	Arcilla (<2 µ)	16.8	24.5	20.7	20.2	12.4
	Limo (2-20 µ)	11.4	15.2	19.2	17.5	23.9
	Limo (2-50 µ)	25.2	26.2	30.1	31.1	43.4
	Arena m. fina 1(50-74 µ)	12.9	9.5	10.1	8.7	11.3
	Arena m. fina 2(74-100 µ)	12.5	12.5	12.4	11.9	9.9
	Arena fina (100-250 µ)	32.4	26.6	26.5	28.1	21.2
	Arena media (250-500 µ)					
	Arena gruesa (500-1000 µ)					
	Arena m gruesa (1000-2000 µ)					
Gravilla (>2 mm)						
P (ppm)						
CaCO ₃ (%) V		0.2	0	0.2	0	1.8
Equivalente de humedad (%)		13.8	16.2	16.5	15.4	17.5
Resistencia de la pasta (Ohms/cm)		3255	3534	3162	3534	2790
pH en pasta		7.4	7.0	7.3	7.5	8.0
pH en H ₂ O (1: 2.5)		7.5	7.3	7.5	7.8	8.5
pH en 1N KC1 (1:2.5)		6.7	6.3	6.4	6.5	7.3
Conductividad (dS/m)		0.77	0.71	0.79	0.71	0.90
Cat. de Cambio. (m.e./ 100 g)	Ca ++		12.8		11.3	
	Mg ++		2.0		3.0	
	Na ⁺	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6
	K ⁺	1.2	1.3	1.2	0.9	1.2
% Na ⁺ en cambio de v.T		2.9	1.8	1.8	2.7	4.0
% Agua de saturación		51	41	43	43	35
Valor S (m.e/100 g)			16.4		15.6	
H cambio (m.e/100g)			1.8			
Valor T (m.e/100g) NH ₄ ⁺ o Na ⁺		17.1	16.5	16.5	14.8	16.5
% de saturación de T			99		100	
% de saturación de S+H			90			

Serie **AVIA TERA**

Símbolo de mapeo: Ak

Es un *Durustalf* que se encuentra en lomas medias tendidas, evolucionadas, de relieve subnormal. Tiene un horizonte superficial color pardo grisáceo, de textura media, con su base lixiviada, por procesos de pseudo planosolización; un subsuelo pardo rojizo claro de textura pesada, que descansa sobre un material pardo rojizo brillante, de textura media. Medianamente provisto de materia orgánica; buena capacidad de retención de agua hasta los 160 cm. de profundidad estudiados; medianamente ácido; rico en calcio y magnesio; muy rico en potasio; alto contenido en fósforo; mediana capacidad de intercambio de cationes; bajo porcentaje de saturación de bases.

Sus problemas principales son una erosión hídrica moderada que le ha dejado un horizonte arable 5 a 10 cm de espesor, excepcionalmente hasta 15 cm que implica el riesgo de incorporar el horizonte lixiviado a la superficie; drenaje imperfecto; concentración de durinódulos a los 80 cm de profundidad, que limita la penetración de raíces.

Suelo agrícola, que debería tratarse como a los de Capacidad de Uso Clase IV o preferiblemente con largos períodos con forrajeras para ganadería.

Su vegetación natural es de fachinal y vegetación basal, rodeados por ramera con algunos pastos y otras plantas herbáceas.

- Fachinal: talas, garabato, molle, itín y sombra de toro.
- Vegetación basal: cardal, cardos, cactáceas y plantas de hoja ancha.
- Ramera: itín, mistol, algarrobo, pasto crespo, pluma blanca.
- Base del pajonal: pasto horqueta, babosita (ambos escasos).
- **Forrajes:** ramones, hojarasca, pasto crespo, pluma blanca, plantas de hoja ancha.

Un perfil representativo de esta serie tiene la siguiente descripción (J 1):

A ₀₁	0 a 13 cm	Pardo grisáceo (5 YR 4/2) en seco y negro pardusco (5 YR 2/2) en húmedo; textura franca; estructura migajosa, media, moderada; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; escasas concreciones y moteados finos de hierro; abundantes raíces y raicillas; límite claro y suave.
E	13 a 30 cm	Pardo grisáceo (5 YR 6/2) en seco y (5 YR 4/2) en húmedo; textura franca; estructura migajosa, fina débil; consistencia suelta en seco, friable en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; escasas

concreciones finas de hierro y moteados comunes, finos de hierro; raíces y raicillas comunes; cristales de sales comunes; límite claro y suave.

- Bt 30 a 54 cm Pardo rojizo claro (5 YR 4/4) en seco y pardo rojizo muy oscuro (5 YR 2/4) en húmedo; textura franco arcillosa; estructura en bloques angulares regulares, medios, fuertes; consistencia dura en seco, firme en húmedo, plástica y adhesiva en mojado; escasas concreciones finas de hierro y abundantes moteados finos de hierro; raíces comunes; raicillas escasas; cristales de sales, comunes; límite claro y suave.
- BC 54 a 74 cm Pardo rojizo claro (5 YR 5/4) en seco y pardo rojizo oscuro (5 YR 3/4) en húmedo; textura arcillosa; estructura en bloques subangulares, medios moderados; consistencia dura en seco, firme en húmedo, plástica y adhesiva en mojado; escasas concreciones finas de hierro y abundantes moteados finos de hierro; raíces escasas; cristales comunes de sales; límite gradual y suave.
- Cq 74 a 120 cm Anaranjado (5 YR 6/6) en seco y pardo rojizo (5 YR 4/6) en húmedo; textura franca; estructura masiva; consistencia ligeramente dura en seco, friable en húmedo, ligeramente plástica y ligeramente adhesiva en mojado; escasas concreciones finas de hierro y moteados comunes, medios, de hierro; cristales comunes de sales; raíces escasas; 40 % de durinódulos de ¼ a 1 cm de diámetro; límite abrupto y suave.
- Ck 120 a 160 cm Pardo rojizo brillante (5 YR 5/6) en seco y pardo rojizo oscuro (5 YR 3/6) en húmedo; textura franco limosa; estructura masiva; consistencia suelta en seco, muy friable en húmedo, no plástica y no adhesiva en mojado; abundantes carbonatos, libres en masa, en polvo y en concreciones finas y medias; escasas concreciones finas de hierro y moteados comunes, finos, de hierro; 10 % de durinódulos de ¼ a 1 cm. de diámetro.

En unos pocos casos de erosión severa carece de horizonte A, pero en general éste varía entre 5 a 10 cm de espesor, excepcionalmente hasta 15 cm y su textura es media. El E varía entre 10 a 25 cm también de textura media. El B entre 40 cm a 66 cm con un mínimo de 30 cm y un máximo de 70 cm textura pesada. El C a partir de los 55 a 85 cm de profundidad, de textura media. El horizonte Ck entre los 100 a 125 cm en raras ocasiones alrededor de los 80 cm y como máximo a los 140 cm. Concentración de durinódulos entre 30 y 50 %.

Clasificación taxonómica: *Durustalf*, familia arcillosa fina, ilítica, hipertérmica. Sección control de familia de 30 a 54 cm de profundidad (24 cm de espesor). Horizontes diagnósticos: epipedón ócrico horizonte argílico fuertemente textural, duripán, horizonte Ck.

La Serie Avía Terai se presenta como unidad pura. No tiene series competidoras.

Los datos analíticos se dan en la Tabla 41.

INTA-EEA SAENZ PEÑA- INVENTARIO Y EVALUACIÓN DE TIERRAS
RESULTADOS ANALITICOS DE LOS LABORATORIOS DE
FISICA Y QUÍMICA SUELOS

Tabla 41. Datos de un perfil representativo de la Serie Avía Terai.

Perfil N° J 1		A ₀₁	E	Bt	BC	Cq	Ck
N° Laboratorio		21702	21703	21704	21705	21706	21707
Profundidad (cm)		0-13	13-30	30-54	54-70	70-120	120-160
Factor de humedad		1.01	1.01	1.03	1.02	1.02	1.02
Mat.	C (%)	1.63	0.72	0.40	0.24		
Org.	N (%)	0.170	0.090	0.067	0.055		
	C/N	10	8	6	6		
T E X T U R A E N %	Arcilla (<2 µ)	23.4	23.7	40.6	33.7	25.5	21.6
	Limo (2-20 µ)	22.7	20.4	20.0	24.9	31.3	30.3
	Limo (2-50 µ)	43.6	40.1	36.5	42.5	49.2	50.5
	Arena m. fina 1(50-74 µ)	13.8	14.4	10.1	7.2	11.9	13.9
	Arena m. fina 2(74-100 µ)	12.9	14.9	8.7	11.7	8.8	8.9
	Arena fina (100-250 µ)	6.1	6.7	4.0	4.8	4.5	4.1
	Arena media (250-500 µ)	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
P (ppm)		85,1	41,7	34,3	70,5		2,5
CaCO ₃ (%) V		0	0	0	0	0	0.9
Equivalente de humedad (%)		19.9	18.8	22.4	22.1	20.7	19.6
Resistencia de la pasta (Ohms/cm)		3.230	4.442	1.884	1.750	3.096	1.884
PH en pasta		71	6.5	6.5	6.5	6.9	7.6
PH en H ₂ O (1: 2.5)		7.3	7.1	7.0	7.1	7.4	8.1
PH en 1N KC1 (1:2.5)		6.4	5.9	5.8	5.7	5.7	7.1
Conductividad (dS/m)		0.77	0.56	1.33	1.43	0.81	1.33
Cat. de Cambio. (m.e./ 100 g)	Ca ++	12.0	7.8	14.8	13.7	12.6	
	Mg ++	1.6	1.6	2.0	1.8	4.0	
	Na +	0.4	0.2	0.5	0.5	0.4	0.2
	K +	2.7	2.1	2.2	1.8	1.7	1.4
	2.9	1.8	2.6	3.0	2.4	1.3	
% Na ⁺ en cambio de v.T		42	36	42	42	40	36
% Agua de saturación		16.7	11.7	19.5	17.8	18.7	
Valor S (m.e/100 g)		3.8	2.2	3.9	3.5	2.4	
H cambio (m.e/100g)		13.9	10.9	19.4	16.9	16.5	15.5
Valor T (m.e/100g) NH ₄ ⁺ o Na ⁺		100.	100	100	100	100	
% de saturación de T		81	84	83	84	87	

OBSERVACIONES: Alto contenido en fósforo.

ANEXO II

Fotografías del muestreo de suelos y determinaciones a campo y laboratorio.



Bosque alto. Serie Tolosa



Bosque alto. Serie Luz.



Bosque bajo. Serie Pampa.



Bosque bajo. Serie Avía Terai.



Determinación de resistencia mecánica a la penetración en tratamiento de bosque.



Determinación de infiltración en tratamiento de bosque.



Rastrojo de cultivo de un año. Serie Pampa.



Penetrometría en rastrojo de cultivo de un año, con vista de la cortina forestal. Serie Tolosa



Estaciones de muestreo en rastrojo se soja, distanciadas a 80 m, unas de otras.



Toma de submuestra con barreno, para determinaciones químicas.



Determinación de infiltración en rastrojo de cultivo de un año. Serie Avía Terai.



Muestreo con cilindro para determinación de densidad aparente en tratamiento de un año de cultivo. Serie Avía Terai.



Bolsas para el muestreo y planilla para el registro de las determinaciones, en un día ventoso.



Toma de muestras para determinación de densidad aparente en cultivo de seis años. Serie Luz.



Transecta de muestreo en cultivo de seis años, sin cosechar. Serie Pampa.



Retorno del muestreo diario hacia el laboratorio: Infiltrómetros, penetrómetro, muestras para determinaciones químicas y estabilidad estructural.



Ingreso al laboratorio de muestras de suelo para determinaciones de pH, carbono orgánico total, nitrógeno total y fósforo extraíble.



Secado de muestras de suelo en estufa, para determinaciones químicas.



Secado de muestras en estufa para determinación de humedad presente en el suelo.



Determinaciones químicas en el laboratorio de INTA EEA Sáenz Peña.



Muestras de suelo sin disturbar previo al tamizado en seco para determinación de Estabilidad estructural.



Muestras separadas por tamizado en seco.



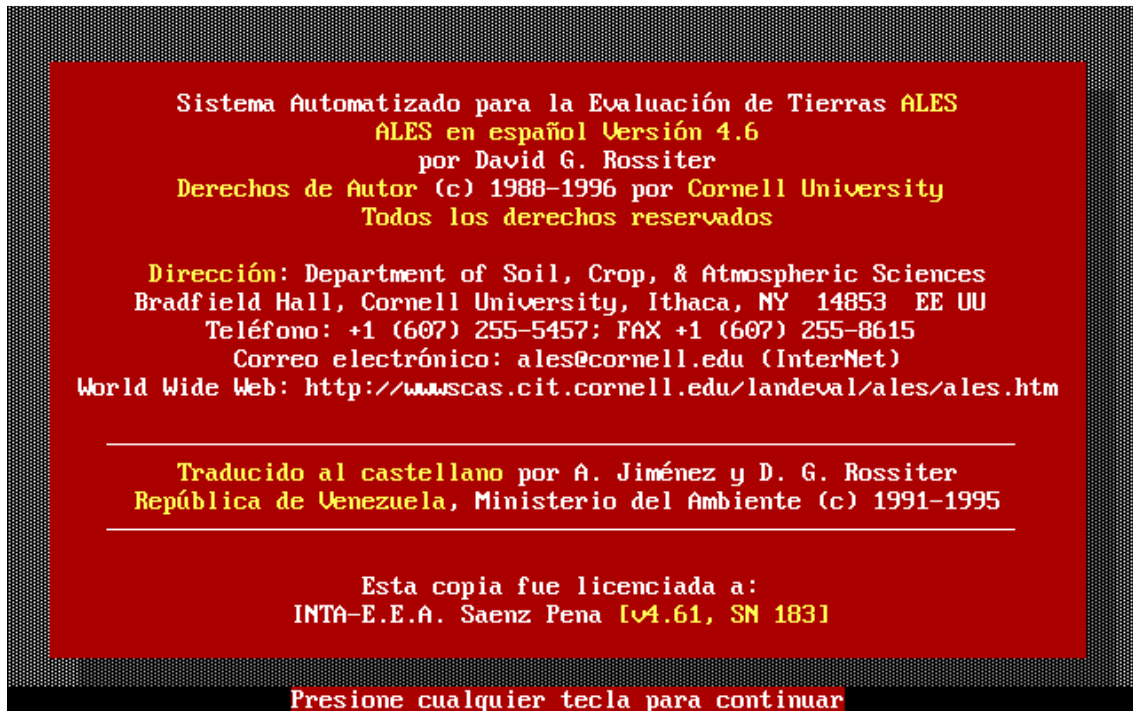
Batería de tamices para el tamizado en húmedo.



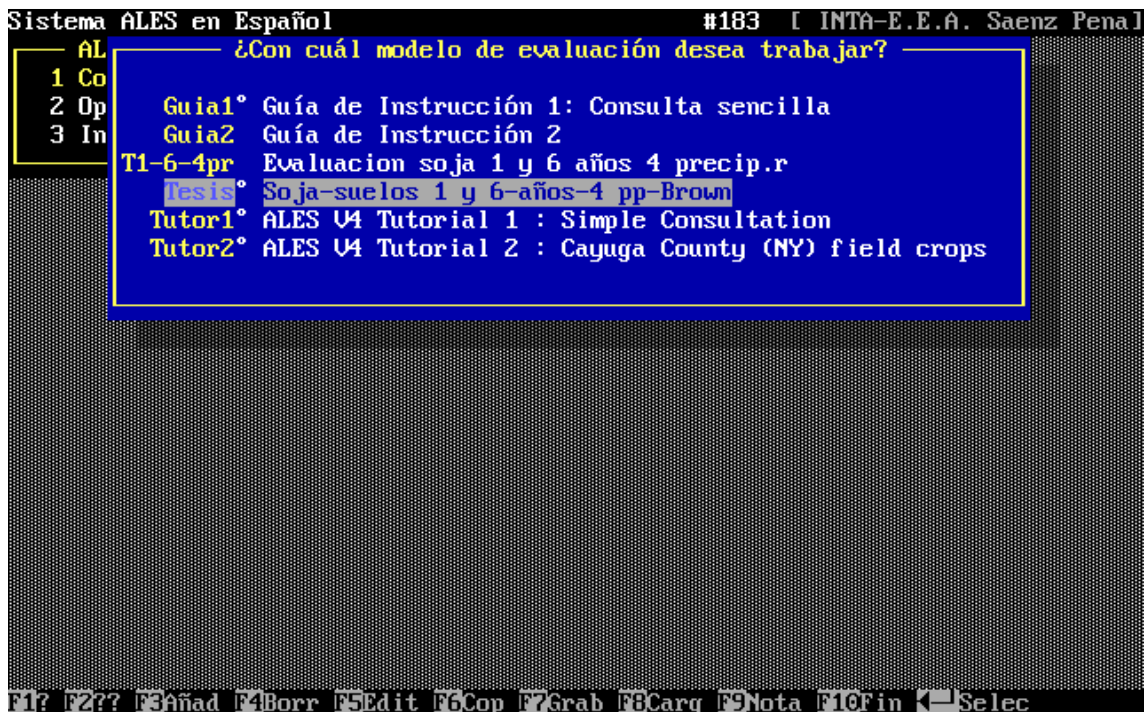
Agitador para realizar el tamizado en húmedo.

ANEXO III

Capturas de pantallas del Modelo experto de simulación – ALES



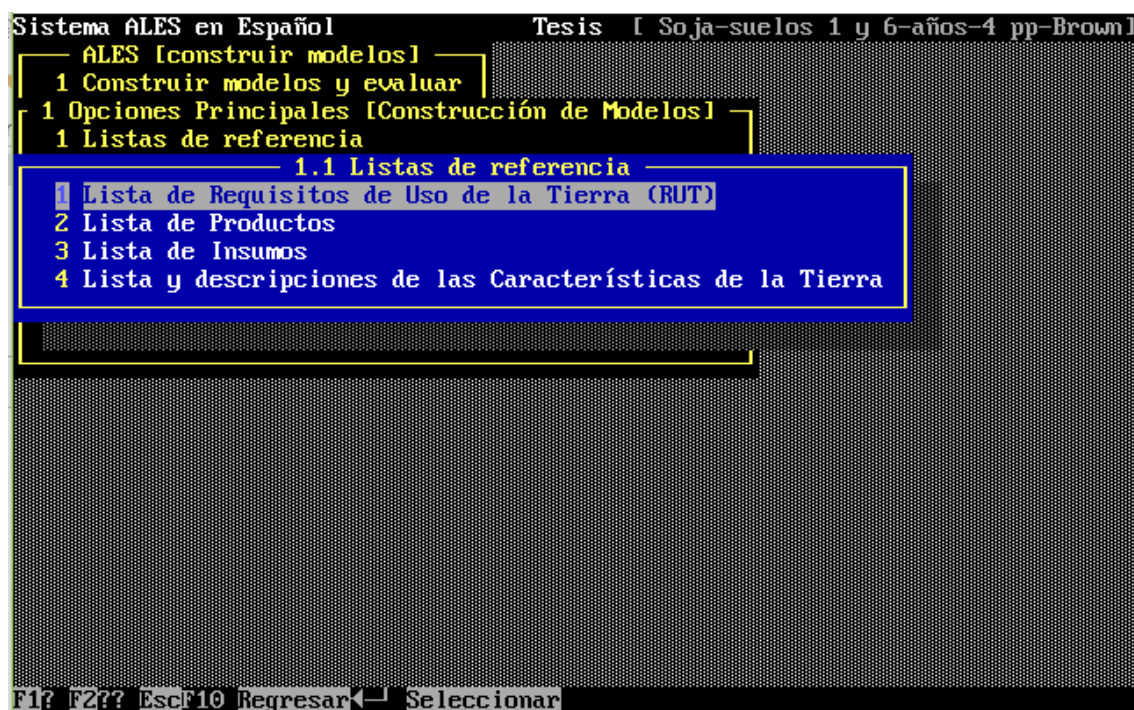
ALES: Pantalla de inicio.



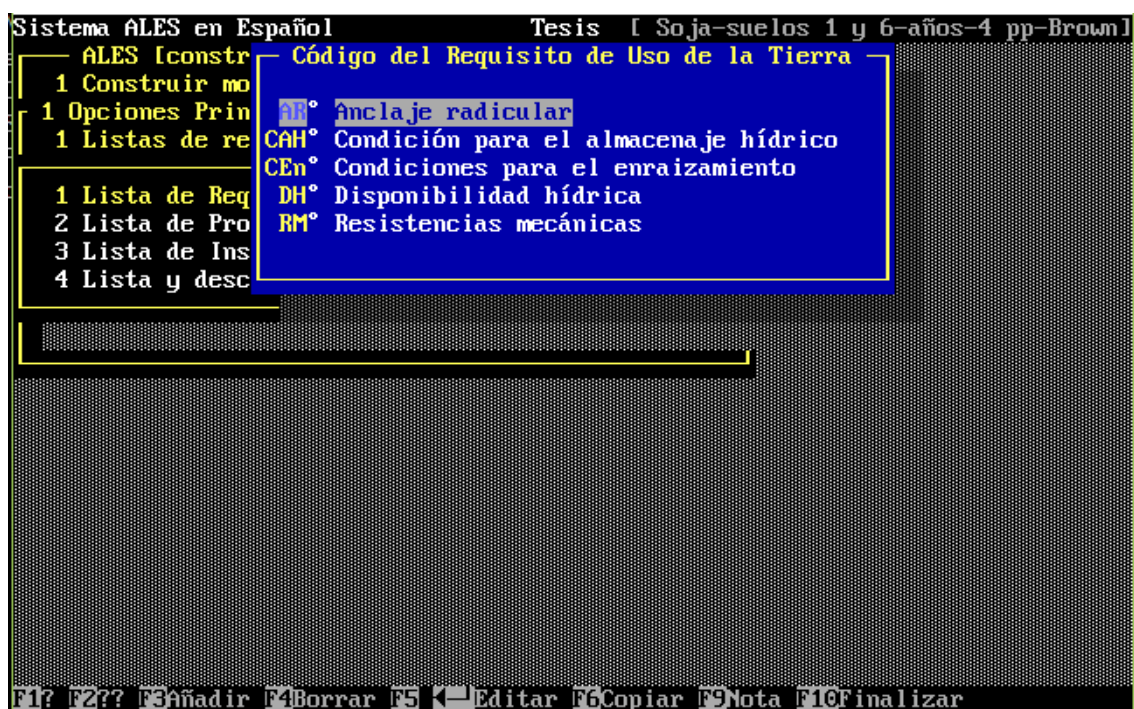
Listado de modelos: Selección del modelo de simulación.



Nota: Breve descripción del modelo seleccionado.



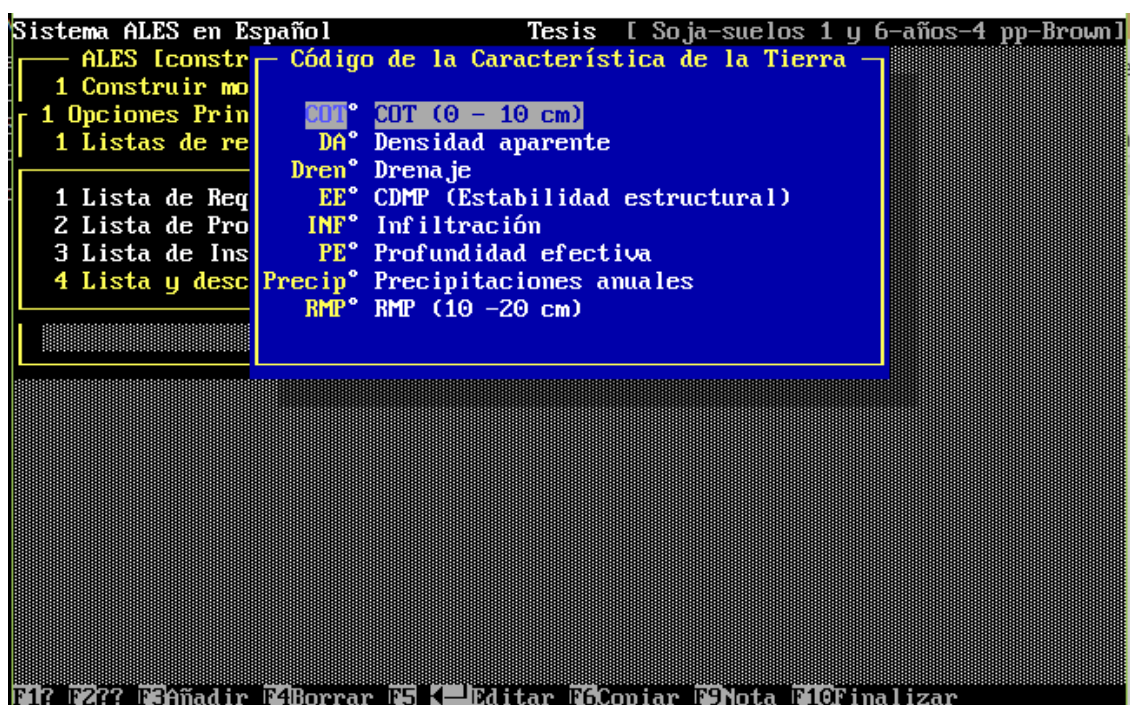
Listas de referencia: en este modelo, Requisitos de uso de la tierra, Productos y Características de la Tierra.



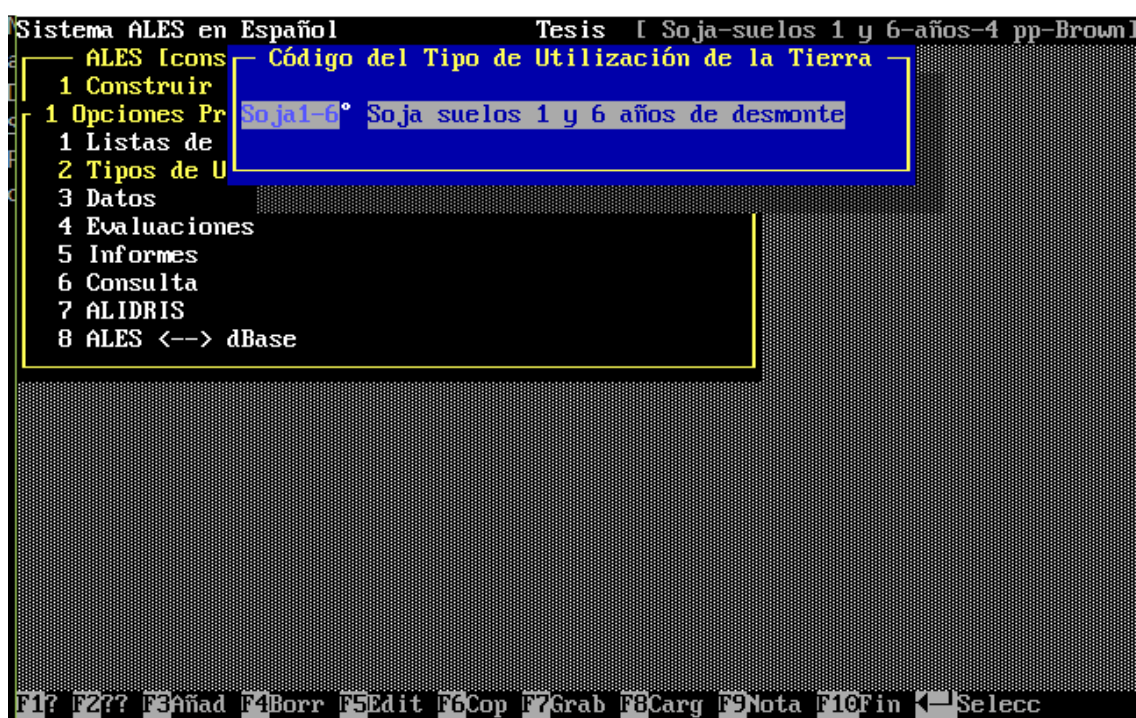
Lista de requisitos de uso de la tierra.



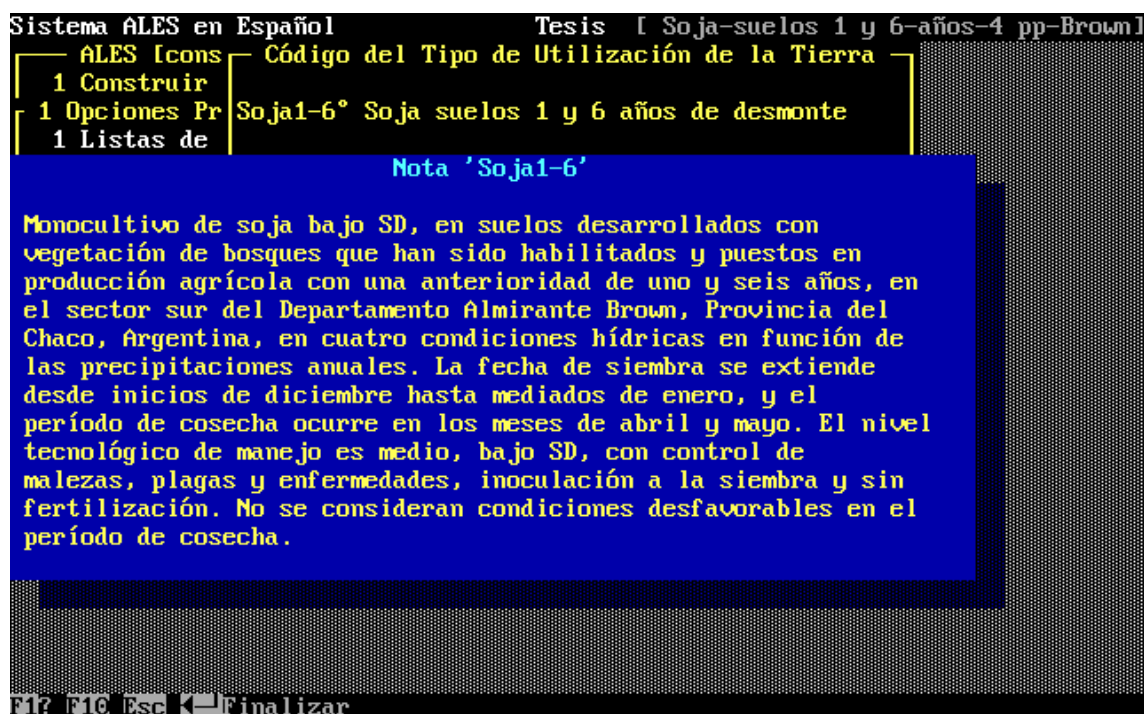
Nota: breve descripción del requisito de uso de la tierra Resistencias mecánicas.



Lista de Características de la Tierra.



Tipo de Utilización de la Tierra



Nota: Breve descripción del Tipo de Utilización de la Tierra.



Producto: Soja.



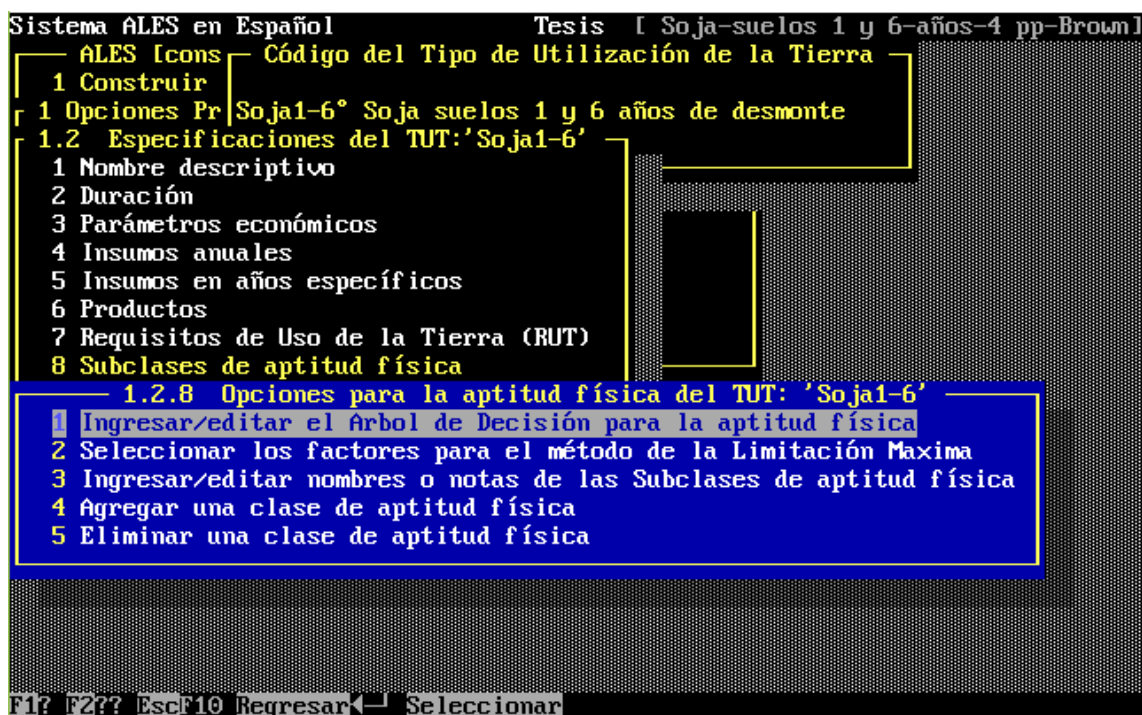
Producto: Rendimiento óptimo. Efecto sobre el rendimiento.



Factores multiplicativos de rendimiento para el requisito Anclaje radicular.



Árbol de decisión para los niveles de la calidad de uso.



Ingresar o editar el árbol de decisión para la aptitud física.



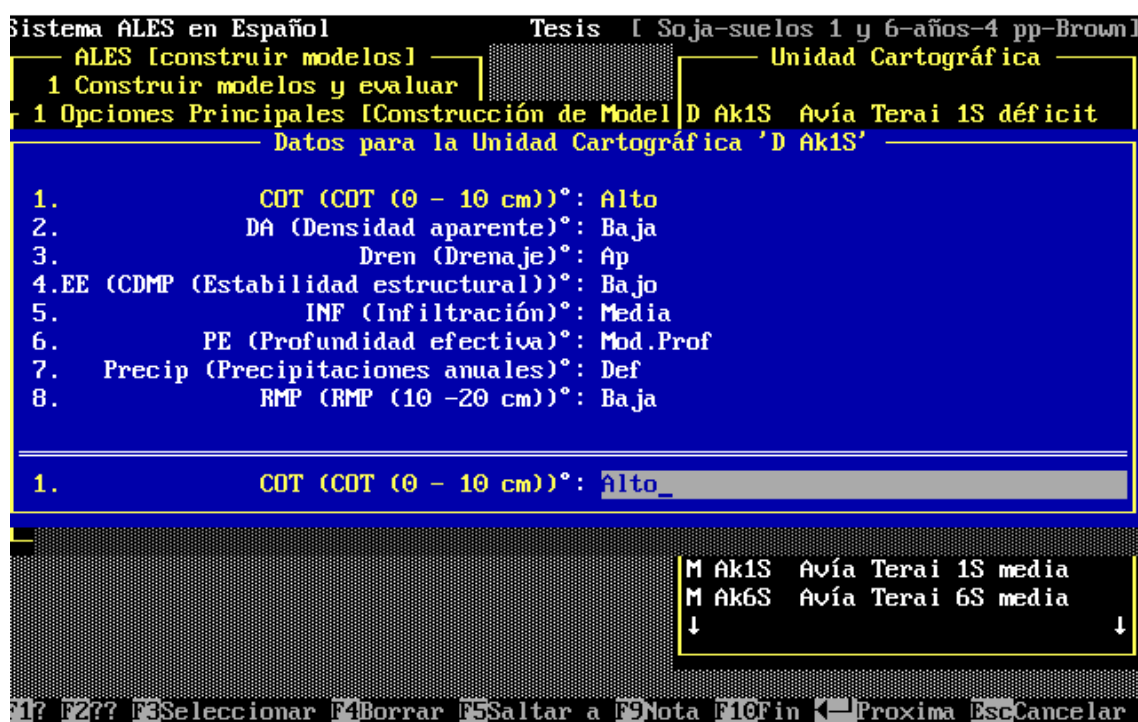
Parte del árbol de decisión para la aptitud física.



Ingreso y edición de datos de las Unidades de la tierra.



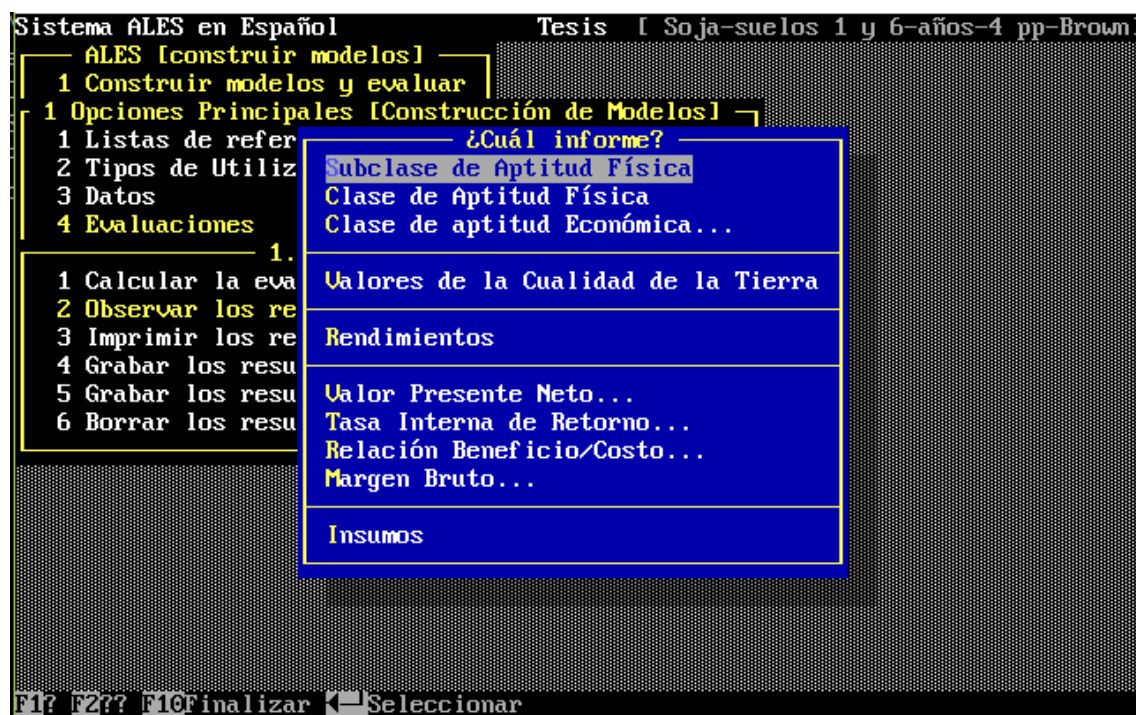
Lista de Unidades de la tierra.



Datos de una Unidad de tierra.



Calcular la evaluación.



Observar los resultados de aptitud de las tierras.

Tesis (Soja-suelos 1 y 6-años-4 pp-Brown)		Subclase de aptitud física
	Soja1-6	
D Ak1S	3	
D Ak6S	4	
D Lj1S	3	
D Lj6S	3	
D Pt1S	3	
D Pt6S	3	
D To1S	3	
D To6S	3	
E Ak1S	1	
E Ak6S	2	
F1? F2¿Por qué? F3Calcular F4Editar datos F5Editar TUT F7Archivo F10Fin		

Resultados de la aptitud de las tierras.

Tesis (Soja-suelos 1 y 6-años-4 pp-Brown)		'Soja' (Soja) [kg/ha/ha]
	Soja1-6	
E Lj1S	3.150,00	
E Lj6S	2.835,00	
E Pt1S	2.835,00	
E Pt6S	2.296,35	
E To1S	3.150,00	
E To6S	3.150,00	
M Ak1S	2.362,50	
M Ak6S	1.594,69	
M Lj1S	2.362,50	
M Lj6S	2.126,25	
F1? F2¿Por qué? F3Calcular F4Editar datos F5Editar TUT F7Archivo F10Fin		

Resultados del rendimiento de las unidades de tierras.

Tesis (Soja-suelos 1 y 6-años-4 pp-Brown)		Subclase de aptitud física
Soja1-6		¿Por qué?
D Ak1S		UC: E Ak6S (Avía Teraí 6S sup)
D Ak6S		*TUT: Soja1-6 (Soja suelos 1 y 6 años de desmonte)
D Lj1S		Subclases de Aptitud Física: 2 [1-4]
D Lj6S		Requisitos del Uso de la Tierra y sus niveles de aptitud :
D Pt1S		(♦ RUT usados por método del factor más limitante)
D Pt6S		AR (Anclaje radicular) = 1 [1-4]
D To1S		CAH (Condición para el almacenaje hídrico) = 3 (regular) [1-4]
D To6S		CEn (Condiciones para el enraizamiento) = 2 [1-4]
E Ak1S		DH (Disponibilidad hídrica) = 4 [1-4]
E Ak6S		RM (Resistencias mecánicas) = 2 [1-4]
		*Árbol de decisión para la Subclase de Aptitud Física (# 6):
		DH (Disponibilidad hídrica) = 4
		>AR (Anclaje radicular) = 1
		>>CEn (Condiciones para el enraizamiento) = 2
		>>>RM (Resistencias mecánicas) = 2
		↓ ...<más>... ↓
F1? F2¿Por qué? Niv apt F3Edit AD CAF F4Edit Max Limit F5Edit TUT F10Regr Esc		

Modo consulta ¿Por qué?: Explicación del resultado de la evaluación de una unidad de tierra.