Influencia de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de alfalfa (*Medicago sativa L.*) bajo riego. Una aproximación utilizando herramientas de teledetección y agricultura de precisión

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

Paolo Daniel Sartor
Biólogo - Universidad Nacional de Córdoba - 2010

Lugar de trabajo:
Agencia de Extensión Rural "Colonia 25 de mayo – La Pampa" - INTA

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis
Carlos M. Di Bella
Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía (UBA)
Doctor del Institut National Agronomique Paris-Grignon (Francia)

Co-director de tesis
Miguel A. Taboada
Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía (UBA)
Magister Scientiae (Ciencias del Suelo). Facultad de Agronomía (UBA)
Docteur Fonctionnement Ecosystèmes et Agrosystèmes. Institut National Polytechnique de Toulouse (Francia)

Consejero de Estudios
Cristian O. Álvarez
Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía (UNLPam)
Magister en Ciencias Agrarias. Facultad de Agronomía (UNS)
Doctor en Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas, Física y Química (UNRC)

JURADO DE TESIS

Juan Cruz Colazo
Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía (UNLPam)
Doctor en Agronomía. Departamento de Agronomía (UNS)

Mario Guillermo Castiglioni
Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía (UBA)
Magister Scientiae (Ciencias del Suelo). Facultad de Agronomía (UBA)
Doctor en Ingeniería. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR)

Pablo Leandro Cicore
Ingeniero Agrónomo. Facultad Ciencias Agrarias (UNMDP)
Magister Scientiae. Posgrado en Producción Vegetal, Área Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales, Facultad Ciencias Agrarias (UNMDP)
Doctor en Ciencias en Ciencias Agrarias. Facultad Ciencias Agrarias (UNMDP)

Dedicatoria

A mis hijos, Catalina y Octavio, y a mi mujer, Luján… por el tiempo que les quite.

Agradecimientos

A mi familia por el apoyo incondicional.

A mis compañeros de la AER 25 de mayo (LP), por su ayuda y acompañamiento.

A mi comité de tesis, en especial a Carlos por brindar sus conocimientos y a Cristian por toda su predisposición y experiencia para mejorar la calidad de mi tesis.

Al jurado de tesis, por su tiempo y las valiosas sugerencias.

A tantas personas que me han ayudado y acompañado en este camino y no los nombro……

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, es original producto de mi propio trabajo, y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

ÍNDICE GENERAL

Resumen....1
Abstract....2
CAPÍTULO I....4
INTRODUCCIÓN GENERAL....4
I.1.Introducción....5
I.1.1 Características de zonas áridas y semiáridas....5
I.1.2. El cultivo de alfalfa....6
I.1.3. Herramientas de teledetección....8
I.1.4. Planteamiento del problema....10
I.2. Objetivo general....11
I.2.1. Objetivos específicos....11
I.2.2. Hipótesis....11
I.3. Materiales y métodos....12
I.3.1. Ubicación área de estudio....12
I.3.2. Descripción del área de estudio....13
I.3.3. Datos y análisis....15
I.4. Estructura y organización de la tesis....15
CAPÍTULO II....17
DESCRIPCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE VARIABLES EDÁFICAS, PARÁMETROS DE CULTIVO E INFORMACIÓN DERIVADA DE SENSORES REMOTOS....17
II.1. Introducción....18
II.1.1. Información edafica....18
II.1.2. Alfalfa como recurso forrajero....19
II.1.3. Uso de teledetección como herramienta alternativa....22
II.2. Materiales y métodos....24
II.2.1. Información de suelo y métodos de análisis....24
II.2.2. Información del cultivo y técnicas de muestreo....24
II.2.3. Información satelital....25
II.2.3.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)....26
II.2.3.2. Índice de Vegetación Mejorado (EVI)....26
II.2.3.3. Índice de Vegetación ajustado con el suelo (SAVI)....27
II.2.4. Análisis estadísticos....27

II.3. Resultados y discusión....28
II.3.1. Descripción y análisis de los perfiles de suelo estudiados....28
II.3.1.1. Análisis Físicos....30
II.3.1.2. Análisis químicos....36
II.3.1.3. Análisis de temporal de variables dinámicas....44
II.3.2. Rendimiento del cultivo de alfalfa....47
II.3.2.1. Análisis espacial de variables asociadas al cultivo....47
II.3.2.2. Análisis temporal de variables asociadas al cultivo....51
II.3.3. Índices verdes derivados de información espectral....54
II.3.3.1. Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Mejorado (EVI) e Índice de Vegetación ajustado con el suelo (SAVI)....54
II.4. Conclusiones....64
CAPÍTULO III....66
ANÁLISIS DE RELACIONES: VARIABLES EDÁFICAS-RENDIMIENTO DE CULTIVO, ÍNDICES ESPECTRALES-RENDIMIENTO DE CULTIVO, Y DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO....66
III.1. Introducción....67
III.2. Materiales y métodos....71
III.2.1. Información y datos de suelo....71
III.2.2. Cultivo de alfalfa....71
III.2.3. Datos espectrales....72
III.2.4. Análisis y estadística....73
III.3. Resultados y discusión....73
III.3.1. Relaciones entre producción (kg MS/ha) y las variables edáficas....73
III.3.1.1. Análisis Físicos....74
III.3.1.2. Análisis Químicos....77
III.3.2. Información derivada de sensores remotos (Modelo Digital de elevaciones e Índices Espectrales) y su relación con la producción (kg MS/ha)....85
III.3.3. Relación entre información de suelo e información derivada de sensores remotos (MDE y EVI)....98
III.4. Conclusiones....102
CAPÍTULO IV....104
CONSIDERACIONES FINALES GENERALES....104
Recomendaciones prácticas de manejo de suelos....108
Zonas con elevada CE y Na....108

Zonas con baja capacidad de retención de agua en el suelo.....109
ANEXO.....111
Bibliografía.....132

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

FIGURA I.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN LA PROVINCIA DE LA PAMPA. LOS CIRCULOS VERDES INDICAN LOS 3 PIVOTES DE MUESTREO.....12

FIGURA I.2. UBICACIÓN DE LOS 18 SITIOS DE MUESTREO EN 3 ZONAS DEL ESTABLECIMIENTO ZILLE AGRO S.A. CON CULTIVO DE ALFALFA BAJO RIEGO POR PIVOTE CENTRAL (INDICADOS CON A, B Y C).....13

CAPITULO II

FIGURA II. 1. ESQUEMA DE PERFIL TÍPICO DE SUELOS DE LA ZONA DE ESTUDIO (CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES, 1982).....18

FIGURA II. 2. VARIABILIDAD DE PERFILES REPRESENTTIVOS DE LA ZONA DE ESTUDIO. **A.** PRESENCIA DE GRAVAS DESDE LA SUPERFICIE CON CANTOS RODADOS EN PROFUNDIDAD (SITIO 12). **B.** PRESENCIA DE GRAVAS Y CANTOS RODADOS A PARTIR DE LOS 50CM DE PROFUNDIDAD (SITIO 16). **C.** PERFIL SIN PRESENCIA GRAVAS (SITIO 4).....29

FIGURA II. 3. UBICACIÓN DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO EN EL TRIÁNGULO TEXTURAL DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN PORCENTUAL DE ARENA, ARCILLA Y LIMO.....31

FIGURA II. 4. VALORES DE MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA COMPOSICIÓN GRANULOMÉTRICA DE CADA UNO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO (N=18) PARA LAS VARIABLES ARENA (%), ARCILLA (%) Y LIMO (%). LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO NARANJA INDICA EL VALOR MÍNIMO.....32

FIGURA II. 5. VALORES MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA DENSIDAD APARENTE (G/CM3) DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LOS VALORES MEDIOS, LOS PUNTOS ROJOS INDICAN EL VALOR MÁXIMO, LOS NARANJAS INDICAN EL VALOR MÍNIMO.....33

FIGURA II. 6. VALORES DE MEDIA, MÁXIMO Y MÍNIMO DE LAS CONSTANTES HÍDRICAS (CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE) DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO ANARANJADO INDICA EL VALOR MÍNIMO.....34

FIGURA II. 7. VALORES DE MEDIA, MÁXIMO Y DEL PORCENTAJE DE AGUA ÚTIL DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO ANARANJADO INDICA EL VALOR MÍNIMO. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA (MM) EN 1,2M DE PROFUNDIDAD DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO.....35

FIGURA II. 8. VALORES MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) Y SODIO INTERCAMBIABLE (NA I) DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO EN EL PERFIL. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO NARANJA INDICA EL VALOR MÍNIMO.....38

FIGURA II. 9. VALORES MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA VARIABLE CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) (MEQ/100G) DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO EN EL PERFIL. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO ANARANJADO INDICA EL VALOR MÍNIMO.....39

FIGURA II. 10. VALORES MEDIOS, MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE NITRÓGENO TOTAL (%) Y FÓSFORO DISPONIBLE (PPM) DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO ANARANJADO INDICA EL VALOR MÍNIMO.....40

FIGURA II. 11. VALORES MEDIOS**,** MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE POTASIO INTERCAMBIABLE (MEQ/100G) Y MATERIA ORGÁNICA TOTAL (%) DE LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO ROJO INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO ANARANJADO INDICA EL VALOR MÍNIMO.....41

FIGURA II. 12. UBICACIÓN DE LOS 18 SITIOS DE MUESTREO (PUNTOS AZULES) SOBRE LA ALTURA DEL MDE PARA CADA UNO DE LOS 3 PIVOTES BAJO ESTUDIO.....42

FIGURA II. 13. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP), OBTENIDO EN BASE A LA RELACIÓN DE VARIABLES EDÁFICAS (PERFIL HASTA 120 CM), ARENA, PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, SODIO INTERCAMBIABLE, FÓSFORO, CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO) MEDIDAS EN 18 SITIOS. BIPLOT PARA LOS EJES 1 Y 2.....44

FIGURA II. 14. VARIACIÓN TEMPORAL DEL PH EN LA ZONA DE ESTUDIO A DIFERENTES PROFUNDIDADES. **A)** 0-20 CM, **B)** 40-60 CM Y **C)** 80-100 CM.....45
FIGURA II. 15. VARIACIÓN TEMPORAL DE LA CE (DS/M) EN LA ZONA DE ESTUDIO EN 3 DIFERENTES PROFUNDIDADES.....46
FIGURA II. 16. VARIACIÓN TEMPORAL DEL % DE HUMEDAD EN LA ZONA DE ESTUDIO A DIFERENTES PROFUNDIDADES. **A)** 0-20 CM, **B)** 40-60 CM Y **C)** 80-100 CM.....47
FIGURA II. 17. PRODUCCIÓN PROMEDIA (KG/HA) DEL CULTIVO DE ALFALFA EN LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO Y SU UBICACIÓN EN EL LOTE EN CADA ZONA DE RIEGO. LOS CUADRADOS ROJOS INDICAN LA PRODUCCIÓN MÁXIMA MIENTRAS QUE LOS ROMBOS AMARILLOS INDICAN LA PRODUCCIÓN MÍNIMA. 48
FIGURA II. 18. ALTURA MEDIA (CM) DEL CULTIVO DE ALFALFA EN LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO Y SU UBICACIÓN EN EL LOTE. LOS CUADRADOS ROJOS INDICAN EL MAXIMO DE ALTURA (CM) Y LOS ROMBOS AMARILLOS INDICAN LOS MINIMOS DE ALTURA (CM). LAS LÍNEAS VERTICALES CORRESPONDEN A LOS DESVÍOS ESTÁNDARES.....49
FIGURA II. 19. CARACTERIZACIÓN DE LA COBERTURA VEGETAL MEDIA (%) EN EL CULTIVO DE ALFALFA EN LOS SITIOS DE ESTUDIO Y SU UBICACIÓN EN EL LOTE.....50
FIGURA II. 20. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR **(**IAF) EN EL CULTIVO DE ALFALFA EN LOS 18 SITIOS DE ESTUDIO Y SU UBICACIÓN EN EL LOTE.....50
FIGURA II. 21. CURVAS COMPARATIVAS DEL DESARROLLO PRODUCTIVO, ALTURA, COBERTURA VEGETAL E IAF DEL CULTIVO DE ALFALFA DESDE EL REBROTE HASTA EL MOMENTO DE CORTE. LAS CURVAS REPRESENTAN LOS PROMEDIOS DE LAS 3 CAMPAÑAS ANALIZADAS.....53
FIGURA II. 22. UBICACIÓN DE CADA UNO DE LOS SITIOS DIFERENCIADOS POR CATEGORÍAS. ROJO -> BAJA PRODUCCIÓN, ALTURA, COBERTURA VEGETAL E IAF; VERDE -> ALTA PRODUCCIÓN, ALTURA, COBERTURA VEGETAL E IAF.....54
FIGURA II. 23. VARIACIÓN DEL NDVI, EVI Y SAVI EN CADA UNA DE LAS FECHAS ANALIZADAS. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO VERDE INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO AMARILLO INDICA EL VALOR MÍNIMO Y LA LÍNEA SOBRE LAS BARRAS MARCA EL DESVÍO ESTÁNDAR.....57
FIGURA II. 24. NDVI, EVI Y SAVI PROMEDIO DE TODOS LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO, VARIACIÓN, MÁXIMO Y MÍNIMO DE CADA UNA DE LAS CAMPAÑAS ANALIZADAS.....59
FIGURA II. 25. VALOR DE MEDIA, MÁXIMO, MÍNIMO Y DESVÍO ESTÁNDAR DEL NDVI, EVI Y SAVI OBTENIDO A PARTIR DE 27 IMÁGENES ANALIZADAS DESDE 2014 A 2017 EN CADA UNO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA, EL PUNTO VERDE INDICA EL VALOR MÁXIMO, EL PUNTO AMARILLO INDICA EL VALOR MÍNIMO Y LA LÍNEA SOBRE LAS BARRAS MARCA EL DESVÍO ESTÁNDAR.....61
FIGURA II. 26. VALOR DE MEDIA Y DESVÍO ESTÁNDAR DEL NDVI, EVI Y SAVI OBTENIDO A PARTIR DE 27 IMÁGENES ANALIZADAS DESDE 2014 A 2017. **A)** VARIACIÓN DEL NDVI, EVI Y SAVI EN CADA UNA DE LAS FECHAS ANALIZADAS. **B)** NDVI, EVI Y SAVI DE CADA UNA DE LAS CAMPAÑAS ANALIZADAS. **C)** NDVI, EVI Y SAVI DE CADA UNO DE LOS SITIOS DE ESTUDIO. LAS BARRAS INDICAN LA MEDIA Y LA LÍNEA SOBRE LAS BARRAS MARCA EL DESVÍO ESTÁNDAR.....63

CAPITULO III

FIGURA III. 1. ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN EN 3 CUANTILES MOSTRADO A TRAVÉS DEL HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE LOS VALORES DEL NDVI (IMAGEN A MODO DE EJEMPLO). EL EJE Y REPRESENTA LAS FRECUENCIAS DE LOS VALORES DE NDVI, Y EL EJE X REPRESENTA LOS VALORES DEL NDVI.....73
FIGURA III. 2. VARIACIÓN DEL CONTENIDO EN % ARENA (A), % A+L (B) Y DA (C) CON LA PROFUNDIDAD EN SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN.....75
FIGURA III. 3. A. VARIACIÓN DE CAPACIDAD DE CAMPO (CC), **B.** PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP) Y **C.** AGUA ÚTIL (AU) EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD (120 CM) PARA LOS SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN. **D.** CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA (MM) PARA LOS SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN.....76
FIGURA III. 4. VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL PERFIL EN SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN.....77

FIGURA III. 5. VARIACIÓN DEL PH (**A**), CE (**B**), NA_I (**C**) Y CIC (**D**) CON LA PROFUNDIDAD EN SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN.....80
FIGURA III. 6. CONTENIDO PROMEDIO DE N T (A), P DISP. (B), K I (C) Y MO T (D) CONFORME A PROFUNDIDAD (0-120 CM) EN SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN DE ALFALFA.....81
FIGURA III. 7. RELACIÓN ENTRE EL MDE (M) Y LA PRODUCCIÓN (KG MS/HA) PARA LOS 18 SITIOS MUESTREADOS EN LOTES DE ALFALFA BAJO RIEGO POR PIVOTE.....85
FIGURA III. 8. UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO SOBRE LA CLASIFICACIÓN DEL MDE PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO.....86
FIGURA III. 9. A. INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE NDVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2014-2015. **B.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE NDVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2015-2016. **C.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE NDVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2016-2017. **D.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE NDVI PROMEDIO PARA LAS CAMPAÑAS 2014 A 2017 DE LOS 3 PIVOTES BAJO ESTUDIO.....87
FIGURA III. 10. A. INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE EVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2014-2015. **B.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE EVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2015-2016. **C.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE EVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2016-2017. **D.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE EVI PROMEDIO PARA LAS CAMPAÑAS 2014 A 2017 DE LOS 3 PIVOTES BAJO ESTUDIO.....88
FIGURA III. 11. A. INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE SAVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2014-2015. **B.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE SAVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2015-2016. **C.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE SAVI PROMEDIO PARA LA CAMPAÑA 2016-2017. **D.** INTEGRACIÓN DE IMÁGENES DE SAVI PROMEDIO PARA LAS CAMPAÑAS 2014 A 2017 DE LOS 3 PIVOTES BAJO ESTUDIO.....89
FIGURA III. 12. A. CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2014-2015. **B.**CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2015-2016. **C.**CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2016-2017. **D.** CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2014-2017 PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO....90
FIGURA III. 13. A. CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2014-2015. **B.**CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2015-2016. **C.**CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2016-2017. **D.** CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2014-2017 PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO....91
FIGURA III. 14. A. CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2014-2015. **B.**CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2015-2016. **C.**CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2016-2017. **D.** CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL PROMEDIO DE NDVI DE IMÁGENES DE LA CAMPAÑA 2014-2017 PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO....92
FIGURA III. 15. RELACIÓN ENTRE EL NDVI, EVI, SAVI Y LA PRODUCCIÓN (KG MS/HA) PARA LOS 18 SITIOS MUESTREADOS EN LOTES DE ALFALFA BAJO RIEGO POR PIVOTE EN 3 TEMPORADAS CONSECUTIVAS (TEMPORADA 2014-2015, TEMPORADA 2015-2016 Y TEMPORADA 2016-2017).....95
FIGURA III. 16. RELACIÓN ENTRE EL NDVI, EVI, SAVI Y LA PRODUCCIÓN (KG MS/HA) PARA LOS 18 SITIOS MUESTREADOS EN LOTES DE ALFALFA BAJO RIEGO POR PIVOTE. MODELO GENERAL DE PRODUCCIÓN EN FUNCIÓN A NDVI, EVI Y SAVI, Y GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE LOS 3 ÍNDICES ESPECTRALES.....97
FIGURA III. 17. CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL MDE PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO CON LA DISTRIBUCIÓN DE LOS SITIOS SEGÚN SU PRODUCCIÓN (ALTA Y BAJA). 99
FIGURA III. 18. CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL EVI PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO.....100
FIGURA III. 19. CLASIFICACIÓN OBTENIDA A PARTIR DEL MDE Y EVI PARA CADA UNO DE LOS PIVOTES BAJO ESTUDIO, REPRESENTANDO LAS ZONAS DE ALTA SENSIBILIDAD Y ZONAS MODERADAMENTE SENSIBLES. 101

INDICE DE TABLAS

CAPITULO I

TABLA I. 1. PARÁMETROS CLIMÁTICOS MEDIOS MENSUALES (TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C), TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA (°C), TEMPERATURA MÍNIMA ABSOLUTA (°C), HELIOFANÍA RELATIVA (%). HUMEDAD RELATIVA (%), PRECIPITACIÓN MEDIA (MM)) DE COLONIA 25 DE MAYO, PERÍODO 1971-2007 (AUMASSANE Y FONTANELLA, 2020).....14

CAPITULO II

TABLA II. 1. FECHA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 PARA LAS TRES CAMPAÑAS AGRÍCOLAS ANALIZADAS: 2014-2015, 2015-2016 Y 2016-2017.....26

TABLA II. 2. VALORES PROMEDIOS DE LAS VARIABLES EDÁFICAS ANALIZADAS PARA LAS PROFUNDIDADES (0-30; 30-60;60-90;90-120 CM). VARIABLES: % ARCILLA, % LIMO, % ARENA, % ARCILLA + LIMO (A+L), DENSIDAD APARENTE (DA), CAPACIDAD DE CAMPO (CC), PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP), PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE), CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC), NA INTERCAMBIABLE (NA I), K INTERCAMBIABLE (K I), P DISPONIBLE (P DISP.), % NITRÓGENO TOTAL (N T) Y % MATERIA ORGÁNICA TOTAL (MOT).....30

TABLA II. 3. AUTOVALORES OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. SE INDICA LA PROPORCIÓN DE LA VARIABILIDAD EXPLICADA EN FORMA ACUMULADA.....42

TABLA II. 4. APORTE INDIVIDUAL DE LAS VARIABLES: PROFUNDIDAD DEL PERFIL LIBRE DE GRAVAS Y RODADOS, ARENA, PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, SODIO INTERCAMBIABLE, FÓSFORO, CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO A LOS AUTOVECTORES E1 Y E2.....43

TABLA II. 5. MEDIAS Y DESVÍO ESTÁNDAR DEL NDVI, EVI Y SAVI EN CADA UNA DE LAS FECHAS ANALIZADAS. 55

CAPITULO III

TABLA III. 1. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PEARSON ENTRE DISTINTAS VARIABLES EDÁFICAS PARTICIONADO POR PROFUNDIDAD Y LA PRODUCCIÓN PROMEDIO (KG/HA) DE LOS SITIOS CLASIFICADOS COMO DE **ALTA PRODUCCIÓN**. ALFA: 0,05.....82

TABLA III. 2. COEFICIENTES DE CORRELACIÓN PEARSON ENTRE DISTINTAS VARIABLES EDÁFICAS PARTICIONADO POR PROFUNDIDAD Y LA PRODUCCIÓN PROMEDIO (KG/HA) DE LOS SITIOS CLASIFICADOS COMO DE **BAJA PRODUCCIÓN**. ALFA: 0,05.....83

TABLA III. 3. VALORES MEDIOS DE LAS VARIABLES EDÁFICAS ANALIZADAS EN SITIOS DE ALTA Y BAJA PRODUCCIÓN. VARIABLES: % ARCILLA, % LIMO, % ARENA, % ARCILLA + LIMO (A+L), DENSIDAD APARENTE (DA), CAPACIDAD DE CAMPO (CC), PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP), PH, CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE), COMPLEJO DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC), NA, K, P DISPONIBLE EN PPM, % NITRÓGENO TOTAL (N TOTAL) Y % MATERIA ORGÁNICA TOTAL (MOT).....84

TABLA III. 4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL PARA LA RELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN E ÍNDICES ESPECTRALES. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL CON CADA UNO DE LOS ESTIMADORES DE LA PRODUCCIÓN DE ALFALFA BAJO RIEGO POR PIVOTE CENTRAL.....97

ABREVIATURAS

A+L: Arcilla más limo

AU: Agua útil

CE: Conductividad eléctrica

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico

CC: Capacidad de campo

CRA: Capacidad de retención de agua

Da: Densidad aparente

EUA: Eficiencia en el uso del agua

EVI: Índice de Vegetación Mejorado

ET: Evapotranspiración

GPS: Geoposicionamiento global

Ha: Hectáreas

IAF: Índice de área foliar

K: Potasio

MDE: Modelo digital de elevación

MO: Materia orgánica

MO t: Materia orgánica total

MS: Materia seca

Na: Sodio

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

NIR: Infrarrojo cercano

N t: Nitrógeno total

P: Fosforo

P disp.: Fosforo disponible

PMP: Punto de marchitez permanente

PR: Percepción remota

S: Azufre

SAVI: Índice de Vegetación Ajustado del Suelo

SIG: Sistema de información Geográfica

Resumen

Influencia de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de alfalfa (*Medicago sativa L.*) bajo riego. Una aproximación utilizando herramientas de teledetección y agricultura de precisión

En la zona de riego de 25 de mayo (La Pampa), los suelos presentan escaso desarrollo, lo cual está condicionado por las condiciones áridas del clima de la zona. Los suelos ubicados en la zona bajo riego, poseen origen aluvial lo cual ha dado lugar a una importante heterogeneidad espacial edáfica en la región, lo que se traduce en variabilidad en la producción de los cultivos dentro de los lotes. Por lo anterior, el objetivo de esta Tesis fue describir y estudiar la variabilidad espacial y temporal de la producción del cultivo de alfalfa bajo riego por pivotes, y su relación con las principales propiedades de los suelos, a partir del uso de herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). Las variables edáficas analizadas mostraron gran heterogeneidad espacial. La textura, el pH, la CE y la ubicación relativa en el paisaje presentaron mayor heterogeneidad. Por el contrario, aquellas variables edáficas asociadas a la fertilidad, tales como los contenidos de N, P y de MO presentaron menor variación. La variabilidad edáfica registrada se vio reflejada en la producción/rendimiento del cultivo de alfalfa. Conforme al periodo analizado, se identificaron dos categorías productivas del cultivo de alfalfa, sitios de alta y baja producción, siendo el punto de inflexión entre dichas categorías de 2000 kg MS/ha por corte. Otras variables asociadas al cultivo también mostraron diferencias, lo que permitió también establecer dos categorías de altura, cobertura vegetal e índice de área foliar. Los sitios de baja producción mostraron correlación negativa con la CE, el Na intercambiable y el AU en los 90 cm del perfil. Estos sitios están ubicados a mayores alturas relativas del paisaje. Por el contrario, los sitios de alta producción se encuentran en las zonas de menor altura relativa del paisaje. Estos mostraron correlación positiva con el contenido de arcilla+limo y negativa con el de arena y la CE en los primeros 30 cm del perfil.

El análisis espacial mediante la utilización de los índices permitió corroborar la diferenciación espacial en la productividad de la biomasa del cultivo de alfalfa. La producción estuvo altamente relacionada con los índices espectrales NDVI, EVI y SAVI (R^2= 0,54; 0,57 y 0,58; respectivamente). Por lo tanto, todos los índices espectrales

estudiados poseen el potencial para delimitar zonas de manejo, ya que tienen elevado poder predictor para identificar zonas con distinta calidad de suelo y, por ende, de diferente productividad, siendo una metodología propicia para el manejo del cultivo de alfalfa mediante un sistema más eficiente de aplicación espacio-temporal de agua y nutrientes. Esta Tesis es el primer avance en el desarrollo de zonas de manejo para el cultivo de alfalfa bajo riego en ambientes de diferente potencial productivo a nivel de lote, siendo importante el uso de indicadores fáciles de obtener como los índices espectrales y con alto poder predictivo de las diferencias productivas. A partir de este estudio, se abren nuevas perspectivas para otros trabajos que permitan la delimitación de ambientes en función de otras variables edáficas e índices espectrales.

Palabras claves: heterogeneidad, índices espectrales, *Medicago sativa*, suelos de regiones áridas y semiáridas, zonas de manejo.

Abstract

Influence of spatial variability of soil properties on the yield of lucerne (*Medicago sativa L.*) under irrigation. An approach using remote sensing and precision agriculture tools

In the irrigation zone of La Pampa, soils are weakly developed, which is conditioned by the climatic arid conditions of the area. The soils located in this area have alluvial origin, which has led to significant spatial heterogeneity in the region, which, in turn, is reflected in variability of crop production. For this reason, the principal aim of this Thesis was to describe and study the spatial and temporal variability of alfalfa crop production, and the relationship between its forage production and main edaphic properties by using remote sensing tools and geographic information systems (GIS). The edaphic properties analyzed showed great spatial heterogeneity. The texture, pH, EC (electrical conductivity) and the relative location in the landscape showed greater heterogeneity. In contrast, those edaphic variables associated with fertility, such as the contents of N (nitrogen), P (phosphorus) and OM (organic matter) presented less variation. The edaphic variability is detected in the forage production of the lucerne pasture. According to the period analyzed, two productive zones were identified: sites of high and low forage production. The inflection point between these two categories

was 2000 kg DM/ha for cut. Other variables associated with the crop also showed differences, which allowed to establish two categories of height, vegetation cover and leaf area index. The low production sites showed a negative correlation with the EC, Na exchangeable and the UW in the 90 cm of the profile. These sites are located at high altitudes relative to landscape. In contrast, high production sites are found in low-altitude areas. These areas showed a positive correlation with clay + silt content and a negative correlation with sand and EC, in the first 30 cm of the profile.

It was shown that it is possible to estimate the variability of lucerne pasture through spectral indices. Production was highly related to NDVI, EVI and SAVI (R^2 = 0.54; 0.57 and 0.58; respectively). Therefore, all the spectral index here studied have the potential to delimit management areas, since they have high predictive power to identify areas with different soil quality and, therefore, different productivity. This results in a favorable methodology for crop management of alfalfa through a more efficient system of spatial-temporal application of water and nutrients. This study represents the first advance in the development of management zones for lucerne pastures under irrigation in environments with different productive potential at the paddock level. It highlights the importance of using easy-to-measure indicators such as spectral indices and with high predictive power of productive differences. Results here obtained bring new perspectives for future studies that allow the delimitation of zones based on other edaphic properties and spectral indices.

Keywords: arid and semi-arid regions soils, heterogeneity, alfalfa, spectral indices, management zones.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

I.1.Introducción

I.1.1 Características de zonas áridas y semiáridas

Las zonas áridas y semiáridas ocupan en la actualidad más del 47 % de la superficie emergida del planeta (UNEP, 1997). Las mismas se encuentran geográficamente distribuidas en todos los continentes, esto significa que casi la mitad de los países del mundo están, de alguna forma, relacionados con el concepto de aridez (Gratzfeld, 2003). En lo referido a Argentina, considerando las zonas xéricas, hiperáridas, áridas, semiáridas y subhúmedas como tierras con cierto grado de aridéz, posee el 69 % de su superficie bajo este tipo de ambientes (UNESCO, 2010).

A pesar de su importancia, el estudio de la hidrología en las zonas áridas y semiáridas no ha recibido tanta atención como en otras regiones climáticas (Scanlon et al., 1997). Sin embargo, en los últimos años, se está haciendo un gran esfuerzo para entender la variabilidad en los flujos y procesos que ocurren en este tipo de ambientes (Nash, 1999) con ambiciosos estudios a mediana y gran escala (e.g. Desconnets et al., 1997; Abu-Awwad y Shatanawi, 1997; Cattle, 1999), o desarrollando modelos que permiten explicar su comportamiento (e.g. Gore et al., 1998; Giao et al., 1999).

El principal factor limitante en zonas de clima árido y semiárido es la disponibilidad de agua. La cantidad y disponibilidad estacional de dicho recurso son primordiales para la supervivencia de la vegetación tanto en el corto como en el largo plazo. Tradicionalmente, la clasificación de zonas áridas, semiáridas y húmedas se ha basado sólo en la precipitación anual media (Lloyd, 1986). En la actualidad, esta clasificación se realiza en base a la relación entre la precipitación y la evapotranspiración. Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por tener una relación de precipitación media anual y evapotranspiración potencial inferior a 0,65 (UNEP, 1997). Esto indica un desbalance entre la cantidad de agua que potencialmente puede pasar a la atmósfera por evapotranspiración y la cantidad de agua de lluvia que realmente reciben estas tierras producto de la alta demanda atmosférica (depende fundamentalmente de la radiación solar, la presión de vapor del aire y la velocidad del viento) y las escasas precipitaciones. Estas ultimas, además, presentan una alta variabilidad tanto espacial como temporal, agravando aún más la problemática, ya que, en ocasiones, con tormentas de alta intensidad descargan la mayor parte de la lluvia anual en un breve periodo de tiempo. Así durante la mayor parte del tiempo, este desbalance da lugar a flujos de agua

de pequeña magnitud, pero de una gran importancia para el comportamiento del sistema (Mazuela Águila, 2013).

Asimismo, la disponibilidad de agua no sólo depende del balance entre lluvias y evapotranspiración sino también de las características edaficas. Los suelos de zonas áridas y semiáridas pueden tener profundidad variable con texturas desde arenosas hasta arcillosas y con pH y fertilidad variable. En lo que respecta al desarrollo, son perfiles incipientes o poco desarrollados. Estos tipos de suelos pueden presentar acumulación de sales solubles en el perfil, aunque la profundidad, distribución, cantidad y tipo de sales acumuladas están condicionadas por la composición del agua que alcanza el perfil. Otra característica importante de los suelos de zonas áridas y semiáridas es la presencia de un horizonte cálcico formado por acumulación de carbonatos que, en algunos casos, pueden llegar a formar lo que se conoce como plancha de tosca, el cual posee baja o nula permeabilidad. (Consejo Federal de Inversiones, 1982)

I.1.2. El cultivo de alfalfa

La alfalfa (*Medicago sativa L.*) es una de las principales especies forrajeras del país y es un recurso importante en la producción de carne y leche en la Región Pampeana. La difusión del cultivo se apoya en sus altos rendimientos de materia seca (MS) por hectárea, su excelente calidad forrajera y su gran adaptabilidad a diversas condiciones ambientales (suelo, clima y manejo). A su vez, su capacidad para la fijación del nitrógeno atmosférico la convierte también en un importante componente de la sustentabilidad de los sistemas productivos (Basigalup, 2007).

Para una alta producción de forraje, la alfalfa requiere suelos profundos (>1,2 m), bien aireados, pH neutros (6,5 a 7,5) y buena fertilidad [especialmente fósforo (P) y en menor proporción azufre (S)] y que no haya excesos hídricos ya que no tolera anegamientos. A medida que las condiciones no cumplan con estos requerimientos, tanto el rendimiento como su persistencia se ven afectados.

En muchos casos, las deficiencias nutricionales se pueden cubrir con fertilizaciones y la acidez de los suelos con enmiendas cálcicas. En los casos de salinidad moderada pueden sembrarse cultivares con cierto grado de tolerancia y/o implementarse una sistematización del terreno que incluya la construcción de drenajes para el lavado de los suelos. Sin embargo, en las situaciones de salinidad excesiva o presencia de alcalinidad por alto contenido de sodio

(Na), es probable que la alfalfa no prospere y que la siembra no sea económicamente rentable. En esos casos es aconsejable la implantación de otras alternativas forrajeras (Basigalup, 2007).

Superada la implantación (etapa en la cual la disponibilidad de humedad es fundamental) la alfalfa está morfológica y fisiológicamente adaptada para tolerar períodos de deficiencia hídrica de moderada duración. De no existir impedimentos en el perfil (piso de arado, capa de tosca, horizontes muy densificados, etc.), sus raíces pueden extraer humedad desde los 2 m de profundidad a los dos años y desde los 4 m a los tres años de vida (Kiesselbach et al., 1929). No obstante, para mantener altas producciones de forraje, la especie requiere de altos contenidos de humedad. Algunos autores (Sammis, 1981; Donovan y Meek, 1983) han estimado que para producir 1000 kg MS/ha en zonas semiáridas se necesitan 83 mm de agua. En Argentina, trabajando en la zona central de Córdoba bajo condiciones de regadío, López et al. (1997) indicaron que se requirió un promedio de 1.550 mm de agua para producir 28000 kg MS/ha. Por su parte, Spada (2015) cita que en el INTA-Catamarca los mejores cultivares del ensayo ALFASR 2002, luego de recibir 1500 mm durante el ciclo de crecimiento, tuvieron rendimientos de más de 40000 kg MS/ha durante la tercera temporada de evaluación.

Sin embargo, también es importante tener presente que el cálculo de la productividad en función de la humedad disponible puede llevar a la comisión de errores significativos, dado que el crecimiento de las plantas varía grandemente con las las prácticas culturales. Por ejemplo, trabajando en un suelo de mediana fertilidad en el norte de la provincia de Buenos Aires, Romero et al. (1977) midieron producciones de 9 kg y 14 kg MS/ha por cada mm de lluvia en los tratamientos testigo (sin fertilizar) y fertilizado con P y S, respectivamente.

La producción de los cultivos fluctúa dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan diversos factores, entre ellos las propiedades del suelo (Godwin & Miller, 2003; Taylor et al., 2003) y la topografía (Kravchenko et al., 2005; Reyniers et al., 2006). La topografía es uno de los principales factores que determina el rendimiento (Kravchenko y Bullock, 2000). Su efecto puede variar espacial y temporalmente. Además de ser un factor formador del suelo, la topografía a escala de lote puede llegar a definir la variabilidad de la humedad, la materia orgánica, nutrientes, composición textural, entre otras propiedades del suelo (Kravchenko y Bullock, 2002; Kaspar et al., 2003; Kravchenko et al.,

2005).El avance de tecnologías geoespaciales, tales como Sistemas de Información Geográfico y GPS de alta precisión, ha hecho posible la implementación de análisis digital de terreno, a partir de modelos digitales de elevación (MDE).

Conocer la variabilidad de los factores mencionados y su relación con la producción, es la base de la agricultura de precisión y es fundamental para establecer sistemas de producción más sostenibles y eficientes en el uso de los insumos, por ejemplo, mediante aplicaciones diferenciales de fertilizantes.

I.1.3. Herramientas de teledetección

La teledetección es definida por algunos autores como la observación a distancia de los objetos. Esta técnica permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados sobre distintas plataformas (e.g. plataformas satelitales), y en este aspecto, suministra información periódica y actualizada a partir de la medición de la intensidad de diferentes longitudes de onda de energía electromagnética que se reflejan o emiten desde la superficie terrestre. La intensidad con la que la energía electromagnética es reflejada o emitida, varía de acuerdo con la naturaleza física y propiedades ópticas de la superficie (Chuvieco, 1996).

En los últimos años las mejoras tecnológicas en instrumentos de teledetección aumentaron la disponibilidad de información de elevada calidad sobre el estado de la vegetación (Van Leeuwen et al., 2006, Miura et al., 2008, Segarra et al., 2020, Sishodia et al., 2020). Actualmente existen satélites con sensores espectrales que generan información a escalas temporales y espaciales adecuadas para realizar un seguimiento de la vegetación a escala de unidad de manejo. También las plataformas de procesamiento y accesibilidad de las imágenes satelitales han mostrado avances sustanciales, fundamentalmente basados en la generación de productos con correcciones y georreferenciación, y en su distribución a partir de portales web interactivos (por ejemplo: http://lpdaac.usgs.gov/main.asp, http://glovis.usgs.gov).

El desarrollo de la teledetección solo ha sido posible gracias a una mejora de la capacidad de procesado y análisis de datos, en particular mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), que amplían las posibilidades de tratamiento, la simplificación de los procedimientos y la mayor potencia y rapidez de las plataformas de proceso que están permitiendo abordar problemas más complejos. Por otro lado, el procesamiento de las

imágenes es necesario para convertir la información de los sensores en un documento cartográfico (correcciones geométricas y atmosféricas principalmente), lo que obliga a un cuidadoso pre-procesado de la información espectral para obtener como resultado un documento auténticamente cartográfico (García-Ferrer, 2013).

Los sistemas agrícolas, ganaderos y forestales son particularmente propicios para la aplicación de estas tecnologías (García-Ferrer, 2013). En este sentido, la aplicación de técnicas geomáticas como percepción remota (PR), sistemas de información geográfica (SIG) y geoposicionamiento global (GPS) en el contexto de la agricultura de precisión, tienen la ventaja según Ustin et al. (2010) de integrar información procedente de disciplinas como climatología, edafología, agronomía, fisiología vegetal, etc. y es potencialmente útil en: 1) clasificación, mapeo y cartografía de cultivos con información georeferenciada; 2) identificación de etapas fenológicas y grados-día de crecimiento; 3) discriminación de variedades; 4) monitoreo del riego y estrés nutricional; 5) detección de daños por insectos plaga y enfermedades; y 6) predicción de rendimientos con el objetivo de incrementar la productividad (rendimientos, y calidad de la cosecha) con la reducción de los costos de producción para mercados competitivos (Seelan et al., 2003; Meng et al., 2011; Mahlein et al., 2012; Mulla, 2013; Vibhute y Gawali, 2013). Sin embargo, a pesar de las ventajas que presentan, los agricultores todavía se basan en la tradición sin la interacción de consultores profesionales y/o de extensión universitaria.

Por otro lado, los cultivos, en particular aquellos de alta producción, demandan una cantidad creciente de agua en un contexto de mayor escasez de este recurso, lo que exige herramientas y métodos para la planificación hidrológica y gestión del agua, recurso estratégico y escaso sin el cual no existiría el regadío. La teledetección permite conocer la relación entre la demanda hídrica de las plantas, el estado vegetativo de los cultivos y la programación y eficiencia de los riegos. A través de índices se puede conocer la actividad de las plantas y, a partir de ellos, generar mapas de demanda hídrica y estado vegetativo que permiten detectar cambios en el estado del cultivo, programación temporal de riego, deficiencias de riego, plagas y características del suelo. Así, las técnicas de teledetección permiten obtener información precisa de la superficie terrestre y de las condiciones atmosféricas, siendo una alternativa relevante y satisfactoria para establecer las necesidades

de los cultivos, lo que permite mejorar la gestión de los recursos (Echeverría Obanos, 2017; Sartor et al., 2018, Méndez-Jocik et al., 2021)

I.1.4. Planteamiento del problema

El recurso suelo-agua en regiones áridas y semiáridas se caracteriza por su elevada heterogeneidad, con complejas interacciones tanto internas como en la interfase y donde los procesos tienen lugar en escalas de tiempo bastante lentas, salvo en ocasiones puntuales donde las precipitaciones aceleran los acontecimientos. El suelo y el agua representan recursos de incuestionable importancia, por lo que han sido y son objeto de estudio en multitud de disciplinas. Sin embargo, existe escasa información de este recurso en regiones áridas y semiáridas, representando éstas el mayor porcentaje de superficie emergida y donde su entorno es aún más crítico (González Rebollar y Chueca Sancho, 2010).

En la zona de 25 de mayo, provincia de La Pampa, el río Colorado es el recurso hídrico más importante. Sus aguas se utilizan tanto para consumo urbano en gran parte de la provincia, como para abastecer los sistemas de riego en la actividad agrícola que se desarrolla en la Cuenca (Michelini, 2010).

Las pasturas de alfalfa adquieren gran importancia productiva y económica por ser el principal recurso forrajero del área en la cuenca media del río Colorado. Dado la variabilidad espacio-temporal de la región árida y semiárida, se infiere que la producción de forraje de esta especie fluctúa principalmente por las características y propiedades del suelo y las condiciones climáticas. Este último factor se ve subsanado cuando el sistema productivo se encuentra bajo riego. La viabilidad del uso, manejo y conservación del suelo y su relación con el manejo del agua y rendimiento de los cultivos en regiones semiáridas con riego, depende de la disponibilidad de información cuantitativa y cualitativa de los procesos del medio edáfico. Para la zona, no se han encontrado estudios que demuestren e identifiquen los principales factores determinantes de la heterogeneidad espacial en el rendimiento de alfalfa, y son muchas las variables edáficas que se presume que podrían relacionarse con esta variabilidad. Teniendo en cuenta que no todos estos factores o variables tienen la misma relevancia o influyen de la misma manera en la determinación la variabilidad antes mencionada es que se planteó el siguiente objetivo general.

I.2. Objetivo general

Describir y estudiar la variabilidad espacial y temporal de la producción del cultivo de alfalfa, y su relación con cambios en las principales propiedades de los suelos a partir del uso de herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica.

I.2.1. Objetivos específicos

1- Estudiar y cuantificar las variables edáficas y su heterogeneidad en suelos bajo riego del sudoeste pampeano bajo clima semiárido, analizando su relación con el rendimiento de alfalfa;

2- Determinar la variabilidad espacial del desarrollo del cultivo a partir de diferentes metodologías (teledetección -índices de vegetación-, imágenes aéreas, posición topográfica, entre otras) en Entisoles bajo riego del sudoeste pampeano en relación con el rendimiento de alfalfa.;

3- Estimar la correlación entre los diferentes índices de vegetación y el rendimiento del cultivo de alfalfa, identificando el que presente una mejor capacidad predictiva del rendimiento en dicho cultivo;

4- Establecer relaciones entre la información derivada de imágenes satelitales y rasgos edáficos analizadas.

I.2.2. Hipótesis

- La posición relativa en el paisaje y limitaciones en la profundidad del perfil para la exploración de raíces afectan de manera diferencial al rendimiento del cultivo de alfalfa.

- El rendimiento de alfalfa bajo riego se relaciona con los índices de vegetación y permitirá crear modelos para la región bajo estudio para estimar y predecir el rendimiento del cultivo y características del suelo asociadas.

- La utilización de información derivada de herramientas de teledetección permite identificar y diferenciar zonas productivas homogéneas en lotes de alfalfa (zonas de manejo).

I.3. Materiales y métodos

I.3.1. Ubicación área de estudio

El área de estudio involucra el margen derecho del río Colorado y sus zonas de influencia, en el sudoeste de la provincia de La Pampa (Fig. I.1).

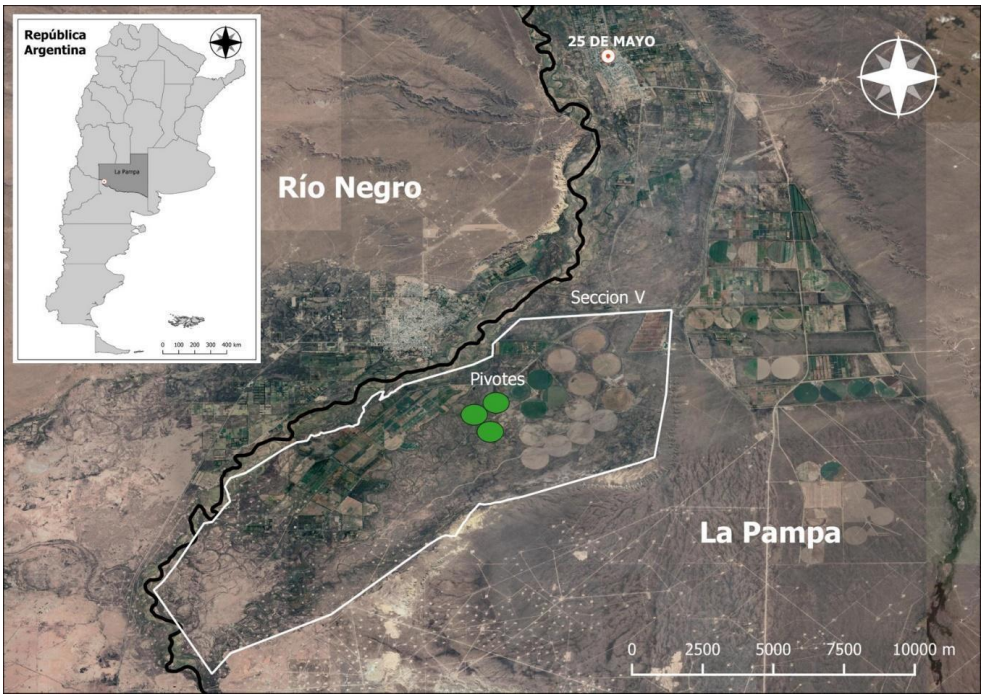

Figura I.1. Ubicación del área de estudio en la provincia de la Pampa. Los circulos verdes indican los 3 pivotes de muestreo.

El trabajo se llevó a cabo en el establecimiento Zille Agro S.A., ubicado a 37º 54` 53,28``S y 67º 46` 16,55``O, en una alfalfa (grupo 8) sembrada en primavera de 2013 y regada por aspersión con tres equipos de pivot central (superficie aproximada 70 ha cada uno) (Fig. I.1). En el area bajo riego se seleccionaron 18 sitios de muestreos (Fig. I.2). Respecto a la selección de los mismos, se realizó mediante el análisis de fotografias aéreas, información del productor y recorridas de campo con el objetivo de obtener niveles contrastantes de producción del cultivo.

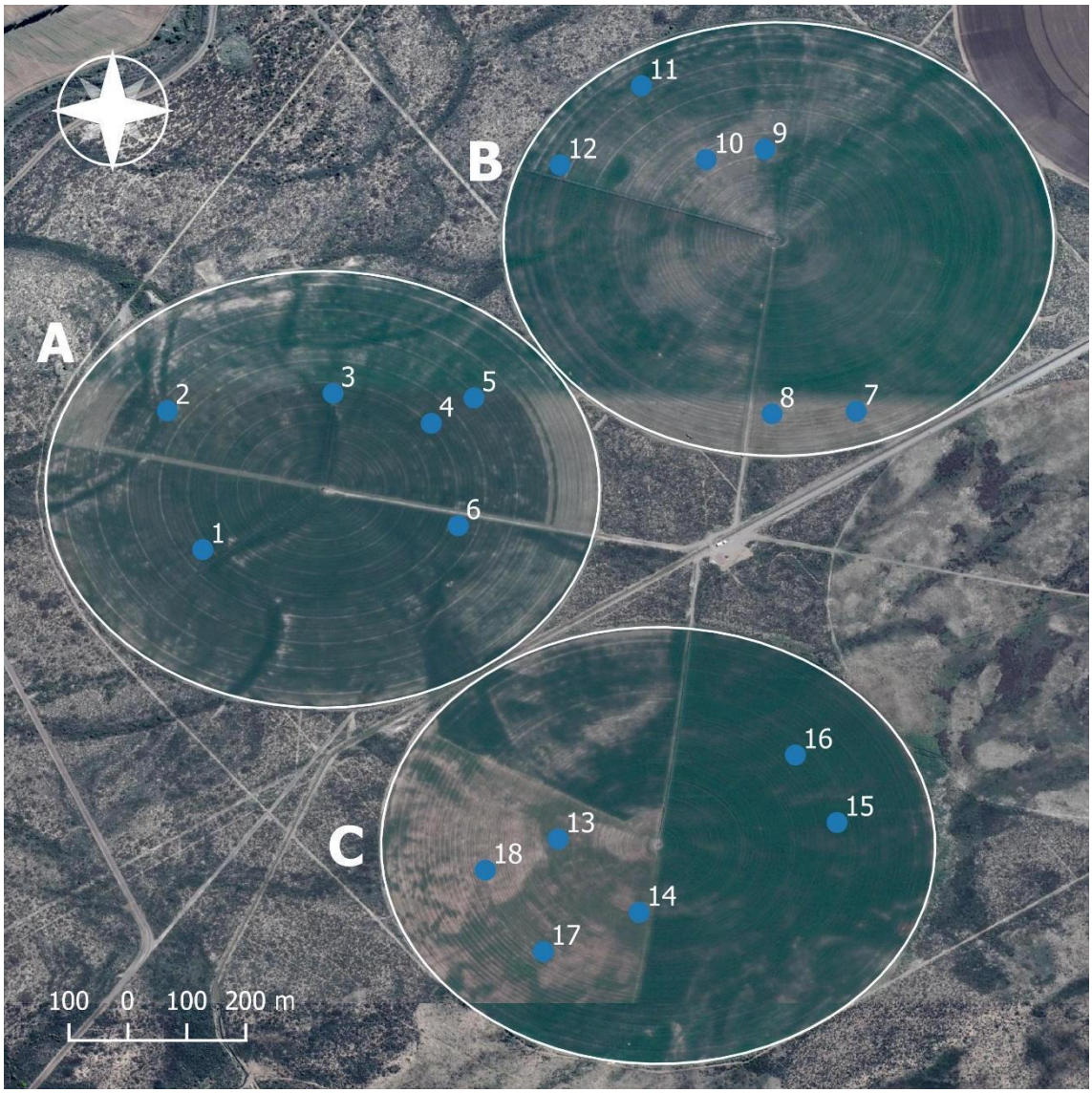

Figura I.2. Ubicación de los 18 sitios de muestreo en 3 zonas del establecimiento Zille Agro S.A. con cultivo de alfalfa bajo riego por pivote central (indicados con A, B y C).

I.3.2. Descripción del área de estudio

El clima de la zona de 25 de mayo puede definirse como templado continental y árido, con un déficit hídrico del orden de los 550 mm (Tabla I.1).

Tabla I. 1. Parámetros climáticos medios mensuales (Temperatura media mensual (°C), Temperatura máxima absoluta (°C), Temperatura mínima absoluta (°C), Heliofanía relativa (%). Humedad relativa (%), Precipitación media (mm)) de Colonia 25 de mayo, período 1971-2007 (Aumassane y Fontanella, 2020).

Parámetros climáticos	*Meses*											
	J	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**E**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**
Temp. Media mensual (°C)	6,2	8	11	14,8	19,2	22	23,5	21,4	18,4	14	10,1	6,3
Temp. Max. Absoluta (°C)	27	27,5	34,5	36,5	37,5	39,4	39,5	38,8	38,5	32,5	28	29,3
Temp. Min. Absoluta (°C)	-10,1	-9,4	-7,9	-1,2	-0,5	5,4	0,6	0,5	-3,5	-4,7	-8,2	-7,5
Heliofania relativa (%)	51	53	56	60	67	68	73	75	69	65	56	51
Humedad relativa (%)	69	60	57	54	48	46	44	48	56	62	70	71
Precipitación media (mm)	13	14	20	32	29	34	24	16	28	20	14	19

La precipitación media anual es de 263 mm, llegando a cubrir aproximadamente solo el 20 % de las necesidades potenciales de agua de la zona. La época de mayor precipitación es el semestre cálido (octubre a marzo), con picos máximos al principio y al fin del periodo (Fig. I.3). Estos valores indican claramente que la única agricultura posible, es la agricultura bajo riego.

La temperatura media anual es de 14,6 ºC. El mes más cálido es enero, con una temperatura media de 23,5 ºC y los meses más fríos son junio y julio con una temperatura media de 6,2 ºC (Tabla 1.1), con un periodo medio libre de heladas de 158 días. La velocidad media del viento es de 6,18 km/h, con dirección dominante sudoeste. Los vientos intensos empiezan a ser frecuentes en agosto-septiembre y siguen hasta marzo, que resultan nocivos para la agricultura bajo riego (Consejo Federal de Inversiones, 1982).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área de estudio se encuentra ubicada en lo que se denomina Planicie de Colonia 25 de mayo, extendiéndose desde las inmediaciones de la localidad de 25 de mayo hasta la presa de embalse Casa de Piedra. Está constituida por un complejo de terrazas aluviales del río Colorado, correspondientes a un periodo de caudales mucho mayores a los actuales, dejando un relieve formado por una asociación de paleo cauces (diseño de la red de tipo trenzado) y lomadas. Sobre este modelo de origen paleo fluvial se ha desarrollado en etapas posteriores una fuerte actividad eólica geológicamente contemporánea que ha modificado el relieve anterior (Consejo Federal de Inversiones, 1982).

Los suelos ubicados en la zona de estudio presentan como principal característica la presencia de un manto de grava de espesor variable, conocido comúnmente como los rodados patagónicos, que a veces se presenta cementado por yeso y/o carbonato de calcio. Todos los suelos de la zona estudiada descansan a una cierta profundidad sobre un manto de ripio

(rodados) mezclado con un material que por lo menos en su parte superior varían texturalmente desde arenosos hasta franco arcillo-arenoso; presentando un tamaño dominante de 2-5 cm, aunque llegan a 10-12 cm, siendo de naturaleza muy variada. En general, no llega a constituir un impedimento para la penetración de raíces ni tampoco para el agua, sin embargo, tiene una influencia remarcable sobre las propiedades físicas y productivas de los suelos (Consejo Federal de Inversiones, 1982).

I.3.3. Datos y análisis

Los datos de suelos obtenidos a distintas profundidades (0-30 cm, 30-60 cm, 60-90 cm y 90-120 cm) fueron: distribución de tamaño de partículas y textura resultante (% de arena, % de limo y % de arcilla, y % de arcilla más limo), densidad aparente (Da), constantes hídricas (capacidad de campo, CC; punto de marchitez permanente, PMP), pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), sodio (Na^+) y potasio (K^+) intercambiables, fósforo disponible (P disp.), nitrógeno total (N t) y materia orgánica total (MO t). Además, se incorporó como dato la posición relativa de los sitios de muestreo en el paisaje tomado de un modelo digital de elevación (MDE) y la profundidad de suelo.

Los parámetros de cultivo utilizados fueron: la estimación de la producción (kg de materia seca por ha -kg MS/ha-), la altura del cultivo, el % de cobertura vegetal del cultivo y el índice de área foliar (IAF). En cuanto a la información espectral, se utilizaron 3 índices de vegetación: NDVI, EVI y SAVI.

Para el análisis de los datos se utilizó InfoStat (Di Renzo, 2011), Can-Eye (INRA, https://www4.paca.inra.fr/can-eye) y Quantum GIS 3.8.

I.4. Estructura y organización de la tesis

En el capítulo I se presenta una introducción, en la cual se establece el marco teórico y la motivación de la presente tesis, así como sus objetivos e hipótesis y la metodología general empleada.

En el capítulo II se abordaron de manera parcial objetivos específicos 1 y 2, lo cual implicó la cuantificación y descripción de las variables edáficas, parámetros de cultivo e índices espectrales. Además, se describió la dinámica espacial y temporal de las variables estudiadas en cada uno de los sitios muestreados dentro de los lotes agrícolas.

El capítulo III, muestra los análisis de las relaciones entre las variables estudiadas, involucrando todos los objetivos específicos planteados y las hipótesis correspondientes. En primera instancia, se analizaron las relaciones entre las variables edáficas y el rendimiento del cultivo, luego se analizaron las relaciones entre los índices espectrales de vegetación y el rendimiento, y finalmente se establecieron las relaciones entre las variables del suelo e índices espectrales para la delimitación de zonas de manejo.

En el capítulo IV, se presenta una síntesis de los resultados más relevantes, conclusiones y consideraciones finales de esta Tesis.

Los datos analíticos completos de varias de las determinaciones aquí consideradas se presentan en las tablas incluidas en la sección Anexo.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE VARIABLES EDÁFICAS, PARÁMETROS DE CULTIVO E INFORMACIÓN DERIVADA DE SENSORES REMOTOS

II.1. Introducción

II.1.1. Información edafica

En un perfil pedológico de la zona de estudio de esta Tesis se puede observar que, con excepción de las lomas con ripio, los suelos de las demás geoformas presentan una sucesión de estratos constituidos por arenas eólicas depositadas sobre un material aluvial. Por debajo se distinguen un manto de ripio y un estrato impermeable subyacente al ripio (Fig. II.1). El material eólico arenoso es no carbonatado y no salino. El estrato aluvial posee una textura que varía desde franco arenosa a arenosa. El mismo es de color pardo rojizo claro, presenta además contenidos de carbonatos y contenido de sales en paleocauces. En cambio, en las formas positivas del relieve, generalmente no presentan un importante contenido de sales. Tanto el color, como las acumulaciones salinas son características heredadas de los sedimentos que transporta el río Colorado. En términos generales, los suelos de la zona de estudio descansan sobre un manto de ripio, mezclado con un material que, por lo menos en su parte superior, varía entre texturas arenosas hasta franco arcillo arenosas (Consejo Federal de Inversiones, 1982) (Fig. II.1).

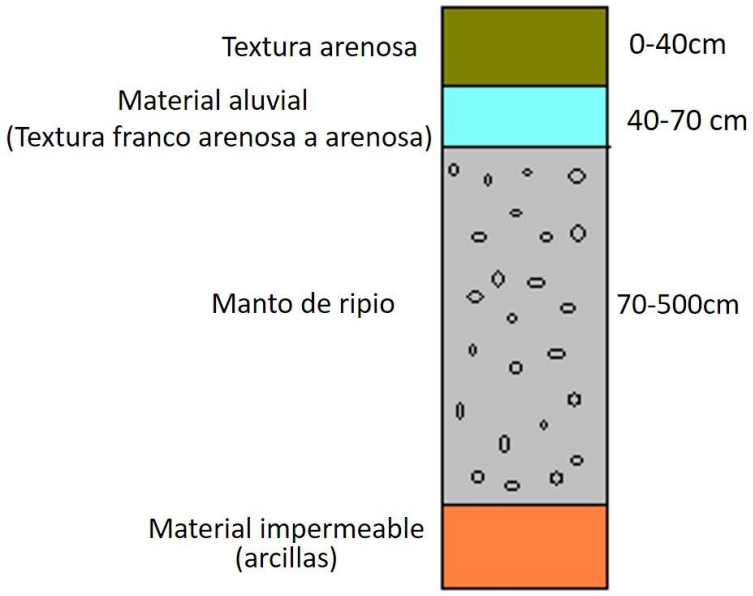

Figura II. 1. Esquema de perfil típico de suelos de la zona de estudio (Consejo Federal de Inversiones, 1982).

Desde el punto de vista de los procesos pedogenéticos, es decir aquellos factores que conducen a la formación del suelo, el factor climático caracterizado por la baja cantidad de

agua de precipitación, el régimen térmico, los vientos fuertes y el balance hídrico deficitario, determinan un escaso desarrollo de los perfiles edáficos. Dadas las condiciones detalladas previamente, el proceso de lixiviación es casi nulo ya que la poca cantidad de lluvia no alcanza a lixiviar las sales más solubles. El proceso de pedogénesis está en su fase inicial, por lo cual los contenidos de materia orgánica y nitrógeno son bajos. Los suelos formados en las condiciones climáticas especificadas anteriormente pertenecen al orden Entisoles y se clasifican como Torripsammentes Tipicos y Torriortentes (Cano et al., 1980). La producción de los cultivos varía dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan diversos factores, entre ellos, principalmente las propiedades del suelo (Godwin y Miller, 2003; Taylor et al., 2003).

En la zona bajo riego de La Pampa, los suelos presentan poco desarrollo debido a las condiciones climáticas particulares mencionadas (aridez, vientos fuertes, balance hídrico deficitario, salinidad). Se caracterizan por carecer de horizontes definidos, por la sedimentación de grandes cantidades de arena, la baja concentración de arcilla y el escaso contenido de materia orgánica (MO) (Panigatti, 2010). Por estas particularidades es que se definen como suelos áridos, no desarrollados, de muy baja fertilidad y con problemas de salinidad (Soil taxonomy, 2006). Dichas condiciones y, consecuentemente, la cantidad y calidad de la cobertura vegetal, han sido insuficientes para modificar sus propiedades originales. En términos espaciales, su origen aluvial ha dado lugar a una importante heterogeneidad en los suelos de la región, lo que origina variabilidad en la producción de los cultivos dentro de los lotes (Panigatti, 2010).

Una problemática frecuente de la zona bajo riego de La Pampa es la aparición de sectores donde los cultivos implantados presentan un menor desarrollo de la parte aérea vegetal. Estas zonas, con una producción reducida alternan con áreas donde la vegetación presenta mayor desarrollo. Una de las características sobresalientes de este fenómeno es el abrupto cambio entre la superficie “afectada” y la “no afectada” siendo las dimensiones de las áreas de baja productividad del orden de metros.

II.1.2. Alfalfa como recurso forrajero

Las pasturas de alfalfa constituyen la base de la producción ganadera de carne y leche de la región pampeana y de las zonas regadas del país. En la cuenca media del río Colorado

tienen gran importancia en los sistemas pecuarios de la region por ser el principal recurso forrajero. La expansión de la producción del cultivo de alfalfa se debe a sus altos rendimientos de materia seca, su alta calidad forrajera y su gran adaptabilidad a diversas condiciones ambientales de suelo, clima y manejo (Bertín, 2006; Basigalup et al., 2007).

Dado que el cultivo de alfalfa se adapta prácticamente a todas las regiones de la Argentina, las principales áreas de producción de secano se localizan en las provincias de Córdoba, Santa Fe, Buenos Aires y La Pampa. La región se localiza entre los 30° y 40º de latitud sur, y representa más del 90 % de la superficie con alfalfa de la Argentina. La alfalfa en condiciones de riego predomina en Cuyo (Mendoza y San Juan), sur de Buenos Aires, Santiago del Estero y los valles patagónicos de Río Negro, Neuquén, Chubut (Hijano y Basigalup, 1995), y también en la zona bajo riego de La Pampa. Los rendimientos de alfalfa son muy fluctuantes. Resultados de los últimos 10 años muestran que la producción promedio de forraje para cultivares en grupos con reposo intermedio, varía de 5000 kg MS/ha año en Anguil (5 cortes - Región de Semiárida Pampeana) a 24000 kg MS/ha año en Marcos Juárez (6 cortes -Región Subhúmeda Pampeana) en condiciones de secano; y de 17200 kg MS/ha año en Hilario Ascasubi (6 cortes - Región Pampeana Sur-6) a 20000 kg MS/ha año en Viedma (6 cortes – Región Patagonia Norte) bajo riego. Para los cultivares no latentes, la producción de forraje varía desde 5300 kg MS/ha año en Anguil (5 cortes) hasta 25200 kg MS/ha año en Marcos Juárez (8 cortes) bajo condiciones de secano; 17300 kg MS/ha año en Catamarca (8 cortes - Región Noroeste) a 23000 kg MS/ha año en Santiago del Estero (8 cortes – Región Noroeste) bajo riego (Arolfo y Odorizzi, 2017). Esta elevada variabilidad en la producción de forraje del cultivo de alfalfa, para una condición hídrica determinada, se debe a el tipo de suelo donde se produce y a la variación de radiación y temperatura (Basigalup et al., 2007).

Asimismo, el rendimiento potencial de forraje en un determinado ambiente es aquel que se puede obtener sin limitantes bióticas y abióticas controlables (plagas, enfermedades, malezas, deficiencias de nutrientes, agua etc.) pero bajo las condiciones de radiación, fotoperiodo y temperatura de ese ambiente y el rendimiento posible es aquel que se onbtiene cuando el agua es una limitante (Collino et al., 2007).

El cultivo de alfalfa para heno se puede hacer bajo condición de secano o por irrigación. En la Región Pampeana, la producción de esta forrajera es mayoritariamente en

secano. Por el contrario, en las regiones Noroeste, Cuyo y Patagonia predominan sistemas de producción bajo riego con agua proveniente de ríos o pozos de agua subterránea. El sistema de irrigación más común es el riego por inundación, pero la utilización de sistemas presurizados (como el pivote central) está aumentando debido a su mayor eficiencia en el uso del agua (EUA). Sin embargo, el potencial para aumentar significativamente esas áreas en un futuro cercano es muy alto. En general, el rendimiento promedio de la alfalfa varía mucho, según las condiciones climáticas y del suelo, las prácticas de manejo y la disponibilidad de agua (lluvia o riego). Para condiciones de secano, la producción oscila entre 4000-6000 kg MS/ha año con 3-5 cortes en La Pampa, y 10000-12000 kg MS/ha año con 4-5 cortes en el sur de La Pampa en condiciones de riego (Basigalup et al., 2018).

La viabilidad del uso, manejo y conservación del suelo y su relación con el manejo del agua y rendimiento de los cultivos en regiones semiáridas con riego depende de la disponibilidad de información cuantitativa y cualitativa de los procesos del medio en que se encuentran. El seguimiento, relevamiento o monitoreo de los cultivos a lo largo del ciclo constituye una práctica agronómica habitual que se realiza de manera más o menos sistemática y objetiva para obtener información cuali y cuantitativa sobre la evolución de la cosecha. De esta forma, es posible detectar oportunamente los factores limitantes de distinta índole (de carácter sanitario, nutricional, etc) que pueden restringir la productividad de los cultivos. A modo de una evaluación diagnóstica, dicha tarea debe identificar el factor que opera de manera restrictiva y decidir, en tiempo y forma, sobre la intervención agronómica correctiva (Teal et al., 2006).

Cuando el seguimiento de un cultivo se realiza en forma tradicional, es decir a través de una recorrida a campo, el mismo tiene las limitaciones propias del alcance visual y el nivel de experiencia de quien lo realiza, lo que le confiere un carácter absolutamente subjetivo y cualitativo. En la actualidad, el seguimiento de los cultivos sobre una base cuantitativa se puede efectuar también a partir de distintas tecnologías que la investigación agronómica ha ido desarrollando, en procura de alcanzar mayor objetividad en las evaluaciones. Estas tecnologías pueden ser: a) teledetección satelital (Elwadie et al., 2005; Di Bella et al., 2009), b) modelado de cultivos (Thornley y Johnson, 2000) o, la integración de ambas (Doraiswamy et al., 2003).

II.1.3. Uso de teledetección como herramienta alternativa

El avance de la tecnología satelital abrió la posibilidad de emplear datos radiométricos, no sólo para identificar cultivos y cuantificar la extensión territorial que ocupan en una región, sino también a fin de estimar el rendimiento alcanzado (Dawbin et al., 1980). Los índices espectrales de vegetación más utilizados para monitorear la vegetación a escala global y local son el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) (Matsushita et al., 2007; Lijun et al., 2008; Wardlow y Egbert, 2010; Hereher, 2013; Garroutte et al., 2016). Sin embargo, debido al efecto del factor de corrección aplicado para considerar el fondo del dosel y los efectos atmosféricos, el EVI recibió una aplicación más amplia que el NDVI para monitorear condiciones sensibles y de alta biomasa (Huete et al., 2002). Otra alternativa para el seguimiento y estimación de biomasa es el Índice de Vegetación Ajustado del Suelo (SAVI), el cual minimiza la influencia del suelo como información de fondo, obteniendo mayor sensibilidad a la señal recibida de la vegetación (Qi et al., 1994; Trotter et al., 2010).

Los datos radiométricos que producen los sistemas de teledetección, debidamente sistematizados e interpretados, se utilizan desde las décadas finales del siglo XX para múltiples propósitos agronómicos (Hatfield et al., 2008). Algunos de estos usos son: determinar diferentes propiedades biofísicas del cultivo, como el índice de área foliar (IAF), el cual es una variable adimensional, definida por Watson (1947) como el área total de una cara del tejido fotosintético (adaxial) por unidad de terreno. También puede ser definido como la cantidad de superficie foliar soportada (m^2) por una determinada superficie de terreno (m^2) (Aguirre Salado et al., 2011). El IAF es un parámetro dinámico y depende de la especie, la etapa de desarrollo, las condiciones del lugar, la estacionalidad y las prácticas de manejo, por lo que se necesita de mediciones intensivas para dar cuenta de su variabilidad espacial y temporal.

Las mediciones de IAF pueden subdividirse en dos grandes categorías: directas e indirectas (Gower et al., 1999; Breda, 2003; Jonckheere et al., 2004). Las mediciones directas involucran, en la mayoría de los casos, técnicas de recolección destructiva, requiriendo mayor tiempo y costos. Las técnicas indirectas son más utilizadas, ya que sirven para el muestreo de grandes áreas de forma más rápida (Baret et al., 2010). Ambas técnicas están basadas en la transmitancia de la luz dentro del cultivo (Jonckheere et al., 2004; Weiss et al., 2004),

donde a través de la ley de Beer-Lambert, la cantidad total de radiación interceptada por una capa del cultivo depende de la radiación incidente, la estructura de la cubierta y las propiedades ópticas del tejido foliar (Jockheere et al., 2004). Junto con el IAF, determinar el porcentaje de cobertura vegetal y suelo aplicando técnicas de interpretación de imágenes, es posible realizar actualmente el seguimiento del desarrollo del cultivo por medio de fotografías digitales (Rodríguez et al., 2000).

Otros autores han utilizado diferentes variables para el monitoreo del cultivo: la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (Gitelson, 2004; Jiang et al., 2006); evaluar el estado fenológico del cultivo (e.g. Zhang et al., 2003; Viña et al., 2004); estimar el contenido de agua de la vegetación, para establecer su estado de hidratación y eventualmente la condición de estrés hídrico subyacente (e.g. Fensholt y Sandholt, 2003; Jackson et al., 2004; Chen et al., 2005); desarrollar cartografía sobre el uso de la tierra y establecer patrones estacionales de la cubierta vegetal (e.g. Cihlar, 2000; Wardlow et al., 2007), estimar el consumo de agua o evapotranspiración (ET) del cultivo (e.g. Zhang y Wegehenkel; 2006; Venturini et al., 2008); evaluar los requerimientos de fertilización nitrogenada (e.g. Blackmer et al., 1996) y establecer el momento de aplicación más oportuno (e.g. Clay et al., 2006; Teal et al., 2006), etc.

Todas estas aplicaciones se proyectan de manera directa al objetivo de producir herramientas científicas y técnicas destinadas a realizar el seguimiento de los cultivos y determinar su estado durante el ciclo de crecimiento de este, sin embargo, estas herramientas resultan complementarias al trabajo de campo, de monitoreo y muestreos en lotes, contribuyendo al manejo del mismo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, y los objetivos específicos de esta tesis, los cuales resultan transversales entre sí y mantienen una relación estrecha, para una mejor organización se abordarán de manera parcial los mismos, resultando como objetivo para este capítulo el análisis y descripción de las variables edáficas, del cultivo y de las variables satelitales.

II.2. Materiales y métodos

II.2.1. Información de suelo y métodos de análisis

El muestreo de suelos en las diferentes zonas homogéneas identificadas a través de la información georreferenciada se realizó en sitios representativos del comportamiento de cultivo de cada zona estudiada (D. Fontanella, Comunicación Personal). Respecto a la selección de los mismos, se realizó mediante el análisis de fotografias aéreas de google earth (resolución espacial de aproximadamente 15m), información del productor y recorridas de campo con el objetivo de obtener niveles contrastantes de producción del cultivo. En cada uno de los sitios seleccionados, que representan unos 100 m^2, se realizó el muestreo de los perfiles de los suelos para su caracterización (Soil Survey Staff, 1993). Se tomó 1 muestra simple cada 0,30 m hasta 1,20 m de profundidad. Las variables determinadas fueron: textura por el método de la pipeta de Robinson (Buol et al., 1973), densidad aparente por el método del cilindro (Da) (Blake y Hartge, 1986), constantes hídricas por medio de las ollas de Richards (Richards, 1948), materia orgánica total (MOt) (Walkley y Black, 1934), pH en pasta saturada de suelo, conductividad eléctrica en extracto de pasta de saturación (CE) (Rhoades, 1996), fósforo disponible (P disp.) (Olsen et al., 1954), nitrógeno total (Nt) (Bremner, 1996), capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Sumner et al., 1996), sodio (Nai) y potasio (Ki) (Helmke et al., 1996). Asimismo, se determinó también la profundidad de suelo. Para el seguimiento temporal, el período de estudio abarcó desde octubre de 2016 a agosto de 2017, realizando un muestreo periódico bimensual en los 18 sitios con determinaciones de pH, conductividad eléctrica y humedad gravimétrica a tres profundidades (0-0,2m, 0,4-0,6m y 0,8-1m).

Los análisis fueron realizados en los laboratorios de suelos de la Estación Experimental de INTA Anguil “Guillermo Covas” (Pcia. de La Pampa) y el Instituto de Suelos de INTA Castelar (Pcia. de Buenos Aires).

II.2.2. Información del cultivo y técnicas de muestreo

Las tres campañas agrícolas de seguimiento del cultivo fueron las correspondientes a los años 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017. En cada una de las campañas se realizó un muestreo semanal del cultivo (corte manual de materia seca, altura de cultivo y seguimiento con metodología de cámara digital) para la obtención de la curva de crecimiento, teniendo

especial cuidado en el muestreo final de cada rebrote del periodo de crecimiento del cultivo a fin de obtener el valor de máxima producción, altura y demás parámetros estimados con metodología de cámara digital. En todas las campañas, se realizó el muestreo en todo el período de crecimiento del cultivo (de octubre a abril de cada año).

Para la estimación del rendimiento a campo, se cuantificó la producción de materia seca (MS) por corte manual sobre cada sitio de muestreo. Se tomó una muestra de 0,2 m x 1 m de manera perpendicular a las hileras de siembra. Luego se cortó cuando el cultivo de alfalfa alcanzó el 10 % de floración o cuando los rebrotes de la corona midieron aproximadamente 5 cm. Las muestras se secaron durante 48 hs en estufa y pesaron expresando su valor en kg MS/ha (Ed. INTA, 2014).

Además, sobre cada zona de estudio, se determinó la cobertura de la vegetación e índice de área foliar (IAF). Para ello se tomaron 20 fotografías digitales en cada muestreo desde el inicio del desarrollo del cultivo de alfalfa hasta la acumulación de máxima materia seca, utilizando una cámara digital compacta Panasonic Lumix (DMC-LZ8) de 8,1 megapíxeles, posicionada aproximadamente a 1 m por encima de la parte superior del cultivo. Para la estimación de la fracción cubierta, se tomaron 10 fotos con la cámara en dirección cenital, paralela al suelo. En el caso de la estimación del IAF se montó la cámara a una plataforma inclinada utilizando un nivel de burbuja, con la cámara direccionada hacia el cultivo con una inclinación de 57,5º y se tomaron 10 fotos (Baret et al., 2010).

II.2.3. Información satelital

Se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8 sensor OLI, libres de nubosidad (90%), y con una resolución temporal de 16 días. Las imágenes en formato Geotiff fueron obtenidas desde el sitio web USGS (*https://glovis.usgs.gov/*). Las mismas tienen un nivel de procesamiento “Level 1T”, lo cual requirió corrección geométrica (Xabier Pons, 2013) en proyección UTM y sistema de referencia WGS 84.

Para las tres campañas bajo estudio se obtuvieron imágenes de 26 fechas (tabla II.1). Las imágenes seleccionadas coinciden con el período de crecimiento del cultivo (de octubre a abril de cada año).

Tabla II. 1. Fecha de adquisición de imágenes satelitales Landsat 8 para las tres campañas agrícolas analizadas: 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017.

Campaña 2014-2015	Campaña 2015-2016	Campaña 2016-2017
04-11-2014	07-11-2015	22-09-2016
22-12-2014	23-11-2015	08-10-2016
07-01-2015	25-12-2015	09-11-2016
23-01-2015	10-01-2016	11-12-2016
08-02-2015	11-02-2016	27-12-2016
24-02-2015	30-03-2016	12-01-2017
04-03-2015		28-01-2017
28-03-2015		13-02-2017
21-04-2015		17-03-2017
		02-04-2017
		18-04-2017

Una vez obtenidas cada una de las imágenes se filtró la información de las áreas de estudio de los pivotes centrales y se eliminaron aquellos pixeles que pudieran tener información no correspondiente al área neta del cultivo; como son los bordes de la circunferencia de riego y áreas dentro del pivote sin cultivo por problemas de voladuras de suelo. Finalmente se calcularon los siguientes índices espectrales de vegetación:

II.2.3.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Es un índice que permite identificar la presencia de vegetación fotosintéticamente activa en la superficie y caracterizar su distribución espacial (Huete, 1988; Huete et al., 1992). Se calcula como la diferencia normalizada entre la reflectancias captadas en la porción del rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético.:

$$NDVI= (NIR-R) / (NIR+R)$$

Donde:

NIR (Infrarrojo Cercano) = banda 5, R (Rojo)= banda 4

II.2.3.2. Índice de Vegetación Mejorado (EVI)

Este índice incorpora un valor “L” para realizar un ajuste en relación al canopeo, un valor “C” como coeficiente de resistencia de la atmósfera, y a la reflectancia captada en la porción del azul (B) del espectro electromagnético. Teniendo en cuenta estos coeficientes se realiza una corrección del índice reduciendo los ruidos producto de la interferencia de la atmósfera, el suelo desnudo y la saturación.

$$EVI= (NIR-R)/(NIR+C1*R-C2*B+L)$$

Donde:

NIR= banda 5, R= banda 4, B= banda 2, L= 1, C1=6, C2=7.5

II.2.3.3. Índice de Vegetación ajustado con el suelo (SAVI)

Entre los factores que modifican el comportamiento del NDVI está la proporción de vegetación/suelo observada por el sensor. Para incluir "explícitamente" el factor suelo, clave cuando se trabaja en zonas áridas con un alto porcentaje de suelo desnudo, se propuso incluir en la fórmula del NDVI un parámetro "L", que ajuste el índice a una reflectividad promedio del fondo (Huete, 1988; Huete et al., 1992). Este índice se calcula como la diferencia normalizada entre la banda roja (R) y la banda del infrarrojo cercano (NIR) ajustado con un factor "L", que es la componente de brillo del suelo que se define con un valor de 0.5, ya que se ajusta mejor a todo tipo de cobertura.

$$SAVI= [(NIR-R)/(NIR+R +L)]*(1+L)$$

Donde:

NIR= banda 5, R= banda 4, L=0.5

La información acerca de la elevación del terreno se obtuvo de datos digitales procedentes del satélite Terra del sensor A*dvanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) (1999) a través de *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Las imágenes ASTER se obtuvieron de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (*https://earthexplorer.usgs.gov/*), las cuales poseen una resolución espacial de 30 metros por píxel, lo que permitió la construcción de un modelo digital de elevación (MDE) de los pivotes en estudio como una representación del relieve.

II.2.4. Análisis estadísticos

Los análisis de datos de suelo se realizaron mediante el uso de InfoStat (Di Renzo, 2011), calculando medidas resumen de cada variable edáfica (máximo, minimo, media y error). Para el análisis de componentes principales de las variables estudiadas, se excluyeron

aquellas que presentaban correlaciones significativas entre ellas. Las propiedades seleccionadas fueron profundidad del perfil, % arena, pH, CE, Nai, P y CC, las cuales fueron estandarizadas previamente a fin establecer una escala comparable entre sí. Además, se realizo un seguimiento temporal bimensual del pH, CE y % humedad para todos los sitios de estudio durante 2 años consecutivos (octubre de 2016 a agosto de 2018) a 3 profundidades diferentes (0-20 cm, 40-60 cm y 80-100cm). Para dichos resultados se utilizaron los promedios de todos los sitios.

Para los datos de desarrollo del cultivo, referidos a producción (kg/MS ha), altura (cm), índice de área foliar (IAF) y cobertura vegetal (en %) se tomaron las medidas resumen de los mismos (programa estadístico InfoStat) para expresar los resultados de todos los sitios de estudio. Para el preprocesamiento y procesamiento de fotografías digitales, se utilizó el programa gratuito Can-Eye (INRA, https://www4.paca.inra.fr/can-eye). Para el seguimiento temporal de las variables asociadas al cultivo, las mismas fueron tomadas de manera simultanea cada semana de muestreo durante las 3 campañas agrícolas. Dicha información se expreso en forma de promedios semanales para el ciclo del cultivo (desde rebrote a cosecha, semana 1 a 4) de todos los sitios en su respectivo grupo, alta y baja producción.

Los datos resultantes de la información satelital, MDE y de los 3 índices verdes (NDVI, EVI y SAVI) de cada pixel en las 17 fechas se procesaron con el software libre Quantum GIS. Para este conjunto de datos se calculó los valores máximos, mínimos y promedios para cada una de las fechas analizadas en planillas de cálculo.

II.3. Resultados y discusión

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, y los objetivos específicos de esta tesis, los cuales resultan transversales entre sí y mantienen una relación estrecha, se abordarán parcialmente los mismos, resultando para este capítulo el *análisis descriptivo de las variables edáficas, producción del cultivo y variables derivadas de información satelital*.

II.3.1. Descripción y análisis de los perfiles de suelo estudiados

Los suelos estudiados en esta tesis se caracterizan por el escaso desarrollo, con una profundidad promedio de 100 cm. En algunos sectores se detectó pedregosidad entre 20 y 120 cm, lo cual podría ofrecer alguna restricción a las raíces de la planta de alfalfa (Fig. II.2).

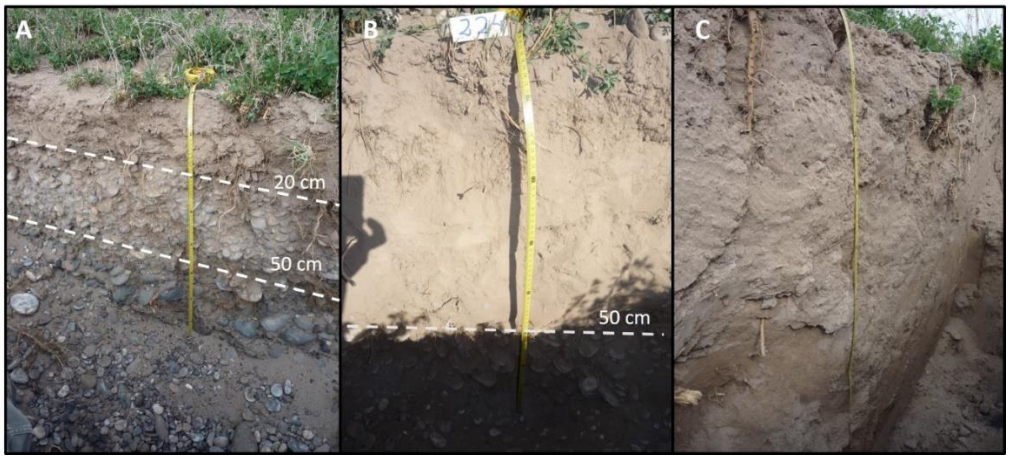

Figura II. 2. Variabilidad de perfiles representtivos de la zona de estudio. **A.** Presencia de gravas desde la superficie con cantos rodados en profundidad (sitio 12). **B.** Presencia de gravas y cantos rodados a partir de los 50cm de profundidad (sitio 16). **C.** Perfil sin presencia gravas (Sitio 4).

Presentan variabilidad en la ubicación del paisaje, en bajos y lomas con pendientes poco pronunciadas (+/- 2 m de diferencia altitudinal). Son suelos de permeabilidad moderadamente rápida (bien a excesivamente drenados en superficie). Respecto a la fertilidad química, poseen escaso contenido de nitrógeno (menos de 0,07 % de nitrógeno total), fósforo (menos de 9 ppm de fósforo disponible por el método Olsen) y potasio (menos de 0,75 cmol/kg). Presentan bajo contenido de materia orgánica (menos de 0,75 %) y fuerte reacción de los carbonatos libres en la masa en todo el perfil. Los valores de conductividad eléctrica indican que a partir de los 0,30 m hasta el 1,20 m son suelos salinos. Los valores bajos de CIC se corresponden con la escasa materia orgánica de estos suelos y por el bajo contenido de arcillas. Respecto al pH, son suelos ligeramente alcalinos con valores superiores a 8 (Tabla II.2).

Respecto al análisis granulométrico, los suelos estudiados presentaron más del 60 % de arena en todo el perfil. En los primeros 30 cm, la textura varió entre franco, franco-arenoso a areno-franco. No presentaron características salinas ni sódicas. En profundidad, las clases texturales que predominaron variaron de franco-arenoso a areno-franco. En términos generales, la descripción del paisaje y los valores analíticos medios de las diferentes variables físicas y químicas coincidieron con lo informado en el Inventario de Recursos Naturales de La Pampa (1980).

Tabla II. 2. Valores promedios de las variables edáficas analizadas para las profundidades (0-30; 30-60;60-90;90-120 cm). Variables: % arcilla, % limo, % arena, % arcilla + limo (A+L), densidad aparente (Da), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), Na intercambiable (Na i), K intercambiable (K i), P disponible (P disp.), % nitrógeno total (N t) y % materia orgánica total (MOt).

Profundidad (cm)	% arcilla	% limo	% arena	% A+L	Da (g/cm^3)	CC (%)	PMP (%)	pH (1:2,5)	CE (dS/m)	CIC (meq/100g)	Na i (meq/100g)	PSI	K i (meq/100g)	P disp. (ppm)	N t (%)	MO t (%)
0-30	10.17	17.2	72.62	27.38	1.43	13.43	6.06	8.06	1.73	12.3	0.8	6.09	0.54	8.75	0.06	0.75
30-60	12.97	24.69	62.34	37.66	1.42	16.62	9.38	8.14	4.75	15.08	2.07	13.44	0.71	7.61	0.05	0.71
60-90	11.93	22.25	65.83	34.18	1.41	15.45	8.11	8.14	6.12	13.02	2.26	19.14	0.57	6.09	0.03	0.49
90-120	10.67	20.67	68.66	31.34	1.43	15.41	6.81	8.13	6.21	10.23	2.66	22.87	0.38	6.17	0.02	0.33

(Tabla completa en Anexo)

Al considerar cada uno de los perfiles de los 18 sitios de manera individual, se obtuvieron los siguientes resultados:

II.3.1.1. Análisis Físicos

La composición granulométrica presentó, para todos los casos estudiados una alta variabilidad espacial. Teniendo en cuenta todas las profundidades, el contenido de arena en todo el perfil varió entre 23,5 % a un máximo de 89,21 %, teniendo una media general de 67,52 %; y de la misma manera sucede en las demás fracciones texturales de arcilla y limo, variando su contenido de 3,54 % a 26,1 %, con una media de 11,4 % y de 5,6 % a 67,99, con media de 21,08 % respectivamente (Fig. II.4, Tabla II.3 en Anexo).

A pesar de que todos los perfiles presentan alto contenido de arena, se observaron grandes diferencias entre las fracciones texturales de cada uno de los sitios, predominando las texturas areno-franca y franco-arenosa, y solo unos pocos de textura franca (Fig. II.1). Como se observa en el triángulo textural (Figura II.3), en general los suelos estudiados se agrupan en el extremo inferior izquierdo en el cual predominan granulometrías gruesas. La distribución textural de particulas no es homogénea en profundidad.

Resultados similares se encontraron en Entisoles de la cuenca baja de la provincia de Río Negro, con porcentajes de arena un poco mayores, alrededor del 80 % debido a que se muestrearon zonas de costa de rio (Consejo Federal de Inversiones, 2010). Del mismo modo, en suelos del alto valle de Río Negro y Neuquén se encontraron suelos de texturas franco-arenosas y areno francas, como la mayoría de los sitios que fueron muestreados en este estudio (Bestvater C.R. y Casamiquela C. H., 1983). Suelos de similares características se encuentran en el noroeste de la provincia de Buenos Aires y este de La Pampa (INTA, 2005).

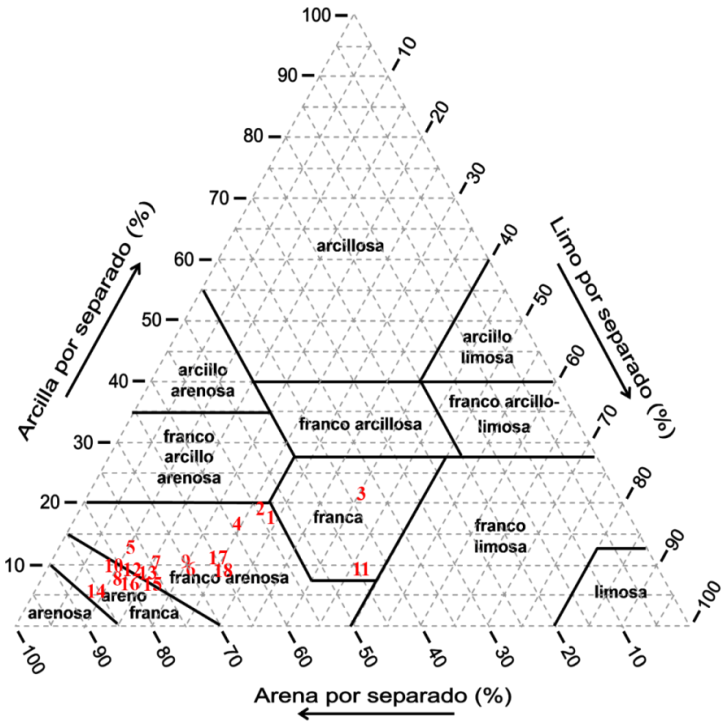

Figura II. 3. Ubicación de los 18 sitios de estudio en el triángulo textural de acuerdo a su composición porcentual de arena, arcilla y limo.

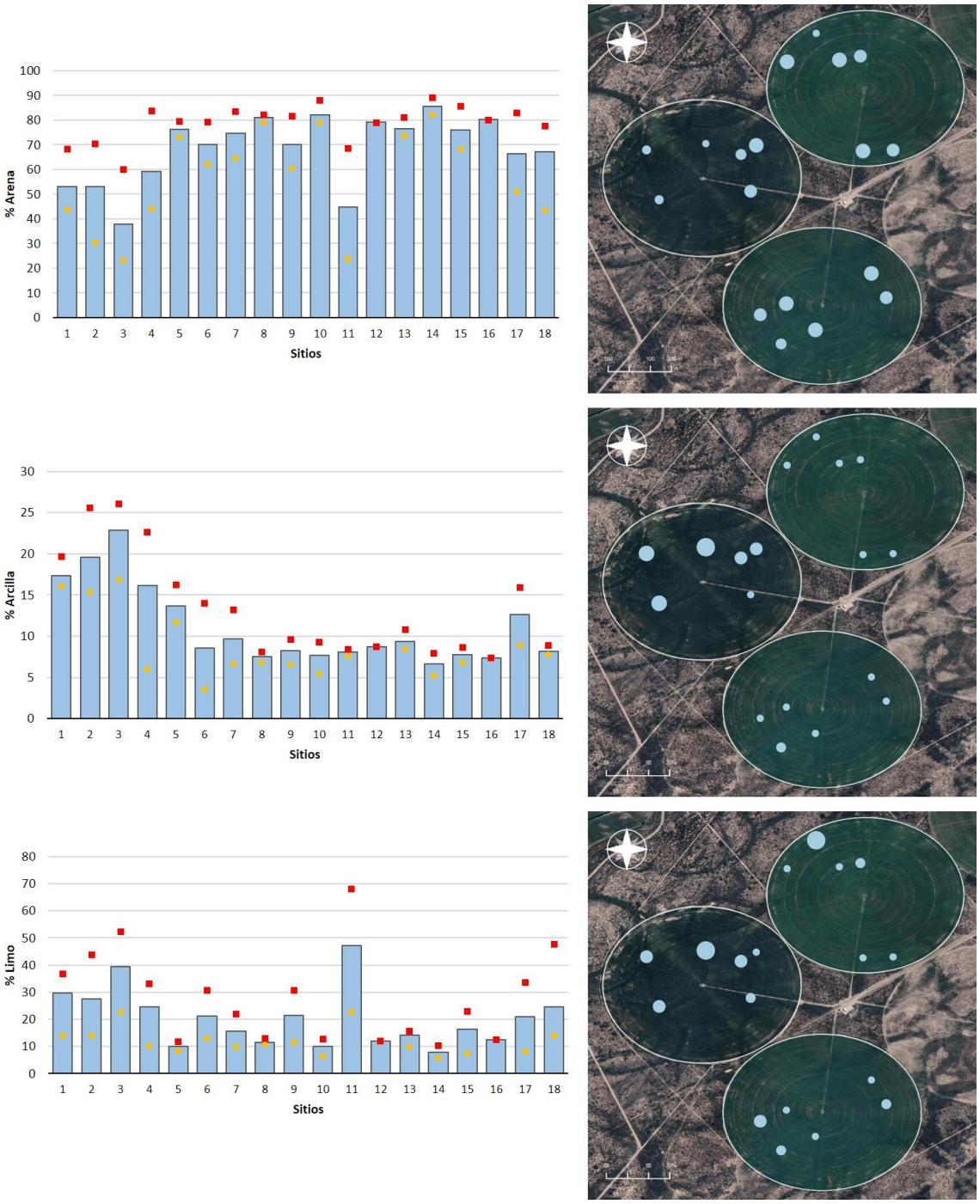

Figura II. 4. Valores de medios, máximos y mínimos de la composición granulométrica de cada uno de los sitios de estudio (n=18) para las variables Arena (%), Arcilla (%) y Limo (%). Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto naranja indica el valor mínimo.

Las condiciones de aireación y drenaje están ligadas directamente con la disponibilidad de agua, oxígeno y nutrientes para las plantas. De acuerdo con la textura de los suelos bajo estudio, los mismos presentaron una elevada permeabilidad al agua y, por

ende, una escasa retención de agua y nutrientes. En los sitios de estudios, tal como se indicó previamente, se detectaron altos contenidos de arena, lo cual representa uno de los principales factores que determina la disponibilidad de agua para las plantas en esta zona. El riego en dichos sitios fue el principal aporte y se utilizó una lamina constante de 10 mm/día en todas zonas. Estas variaciones en la textura de nuestros sitios de estudio condicionan el régimen hídrico de los suelos, lo cual incide en la productividad del cultivo.

La composición granulométrica de los suelos estudiados permitió visibilizar la heterogeneidad del ambiente que se manifiesta a escala del paisaje en el plano horizontal, como a escala vertical (e.g. Goldberg, 1990).

La densidad aparente (Da) presentó una media general de 1,42 g/cm^3, variando entre 1,14 g/cm^3 y 1,68 g/cm^3 (Fig. II.5, Tabla II.4 en Anexo). En términos generales, los valores hallados de esta variable fueron similares entre los sitios estudiados.

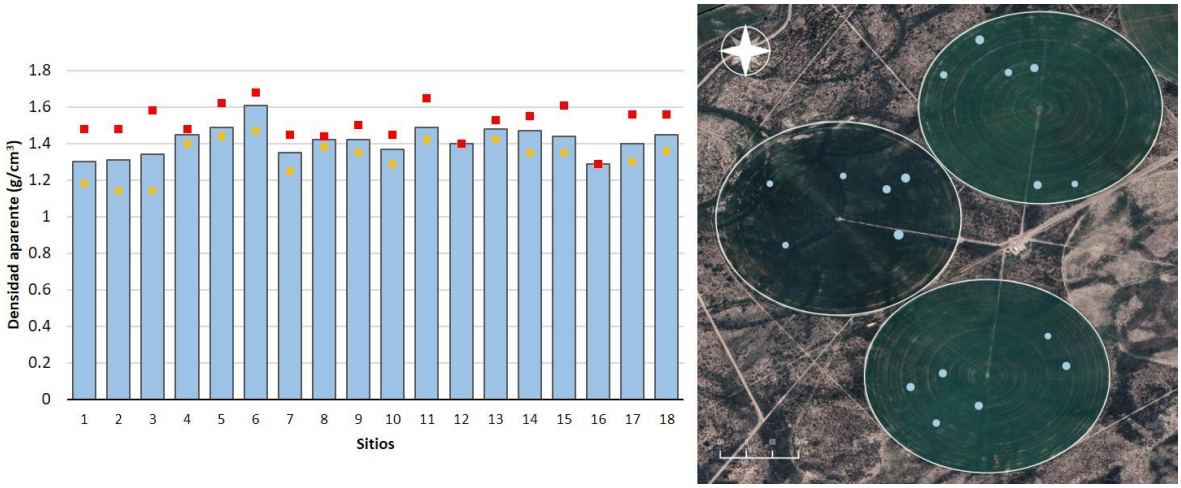

Figura II. 5. Valores medios, máximos y mínimos de la densidad aparente (g/cm3) de los 18 sitios de estudio. Las barras indican los valores medios, los puntos rojos indican el valor máximo, los naranjas indican el valor mínimo.

El tipo de manejo de suelo contribuye a la variabilidad espacio-temporal de las propiedades edáficas. Por ejemplo, la labranza cero favorece el incremento de la conectividad de los macroporos y de la conductividad hidráulica saturada, mientras que el efecto sobre la porosidad total y la densidad aparente es más bien errático comparado con la labranza convencional (Strudley et al., 2008). Respecto a la densidad aparente, es importante recalcar que guarda una estrecha relación con otras propiedades edáficas, pudiendo influir en la productividad de los cultivos ya que se asocia a la disponibilidad de agua y difusión de los

nutrientes. Suelos de características similares con textura arenosa del valle de Rio Negro y Neuquén presentaron valores de Da semejantes (1,4 g/cm^3) a los presentados en esta tesis (Consejo Federal de Inversiones, 2010; Bestvater y Casamiquela, 1983). Para suelos arenosos, la Da puede variar entre 1,2 y 1,6 g/cm^3 (Dick, 2004; Farias, 1994), siendo los valores similares a los informados en este trabajo.

Asimismo, en algunos sitios se detectaron valores de Da entre 1,29 a 1,31 g/cm^3, los cuales puede asociarse a la presencia de arenas muy gruesas y gravas. El porcentaje de estas partículas en la masa del suelo no se determinaron en este trabajo.

Respecto a las constantes hídricas analizadas, los valores promedios encontrados para capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron: 15,17 % y 7,54 %, respectivamente. La CC varió entre 2,61 % y 36,5 %. mientras que el PMP osciló entre 1,3 % y 18,81 % (Fig. II.6, Tabla II.5 en Anexo).

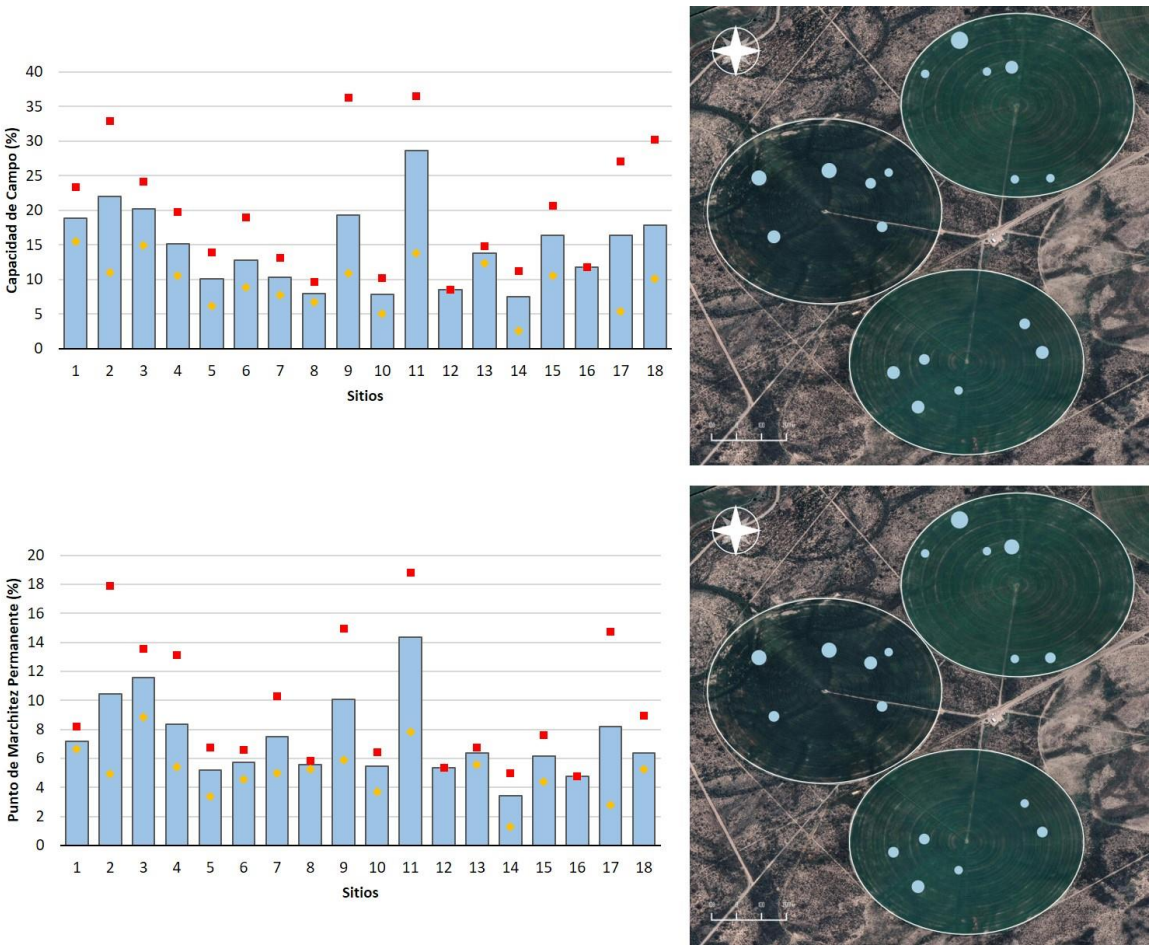

Figura II. 6. Valores de media, máximo y mínimo de las constantes hídricas (Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente) de los 18 sitios de estudio. Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto anaranjado indica el valor mínimo.

Los valores de CC y PMP hallados para esta Tesis son similares a los encontrados en suelos ubicados en el valle de Rio Negro y Neuquén (14-17 % para CC y 7-9 % para PMP) (Consejo Federal de Inversiones, 2010; Bestvater y Casamiquela, 1983).

A partir de los datos de CC y PMP determinados, se realizó el cálculo de agua útil (AU) en los perfiles de cada uno de los sitios de estudio (Tabla II.6 en Anexo). El valor medio de AU para los 18 sitios estudiados, fue de 7,37 %. Los valores para este parámetro variaron entre 2,21 % y 11,63 % (Fig II.7).

Los valores de AU encontrados en los suelos analizados ponen de manifiesto la importancia del uso eficiente del agua de riego para la obtención de rendimientos adecuados del cultivo de alfalfa en la zona bajo estudio. Los bajos valores de AU de los suelos bajo estudio están relacionados fundamentalemente con los alttos contenidos de arena, presencia de partículas gruesas, bajos contenido de arcilla y bajo contenido de MO.

Respecto a la capacidad de almacenaje de agua, el promedio estuvo cercano a los 100 mm. Sin embargo, varios sitios presentan una capacidad de almacenaje de 150 mm (sitio 1, 2, 15 y 18), otros alrededor de 40 mm (sitio 7, 8, 10, 12 y 16) e incluso el sitio 11 puede almacenar hasta 213.36 mm (Fig. II.7). Sin embargo, reviste interés determinar que porcentaje de agua es realmente aprovechable por las plantas.

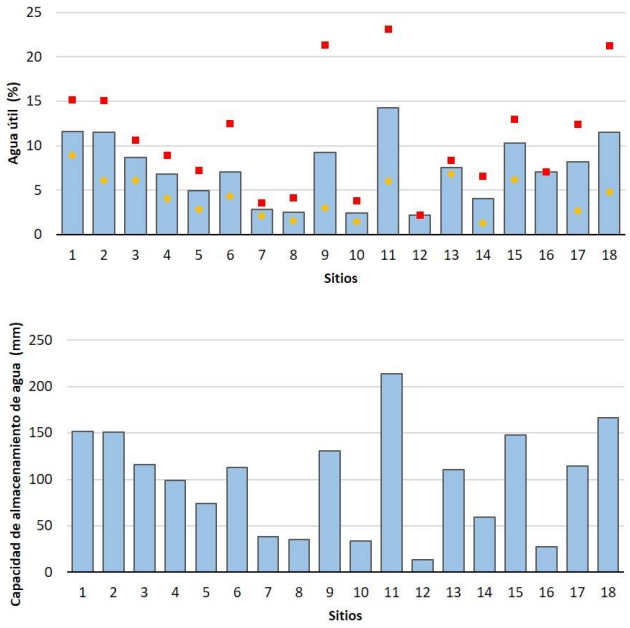

Figura II. 7. Valores de media, máximo y del porcentaje de agua útil de los 18 sitios de estudio. Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto anaranjado indica el valor mínimo. Capacidad de almacenamiento de agua (mm) en 1,2m de profundidad de los 18 sitios de estudio.

El contenido de agua retenida en el suelo varía de acuerdo tanto a las características y propiedades del suelo, como es la textura y la presencia de gravas en los sitios de estudio analizados, como así también en su distribución espacial y temporal (Cantón et al., 2004; Hébrard et al., 2006; Brocca et al., 2009). Conforme a lo anterior, la distinta organización y disponibilidad espacial del agua y asociado a otras condiciones como pendientes inclinadas y suelo desnudo se pueden generar escurrimientos sensiblemente diferentes ante la ocurrencia de tormentas con similares características (McNamara et al., 2005; Takagi & Lin, 2012). La consecuencia de esto es que el agua de escurrimiento superficial deja de estar disponible para las plantas, lo cual agudiza la falta de agua en suelos de estas características.

Los mecanismos que controlan la heterogeneidad en el contenido de agua del suelo pueden ser distintos de acuerdo con la escala analizada (Western et al., 2002). Por lo tanto, para la comprensión de los procesos agronómicos, es de especial importancia el estudio de la variabilidad espacial del contenido de agua edáfica a diferentes escalas (Hu et al., 2011). Todavía es poco comprendida la importancia relativa de los factores que controlan la distribución espacial del contenido de agua (Wilson et al., 2004). Algunos investigadores han verificado la dificultad en identificar una sola variable como reguladora, indicando que existe una interacción compleja de los factores incidentes (Zhao et al., 2010; Zhu & Lin, 2011). Como consecuencia, los resultados en general son propios de cada sitio analizado, siendo difícil llegar a conclusiones generales (Baroni et al., 2013) y extrapolables entre distintas zonas de estudio. Por ello surge la necesidad de hacer estimaciones precisas en lo que respecta al contenido y disponibilidad de agua en el suelo, y conduce a una adecuada toma de decisiones y riego del cultivo.

II.3.1.2. Análisis químicos

Los valores hallados de pH oscilaron entre 7,62 y 8,58, siendo la media de 8,11. Son suelos básicos, esto se debe principalmente a la presencia de calcio en el complejo de cambio (Fig. II.8, Tabla II.7 en Anexo). La importancia de la determinación del pH del suelo radica en que controla muchos procesos químicos, afecta la disponibilidad de nutrientes y la forma en cómo los nutrientes reaccionan entre sí. Por ejemplo, en los suelos estudiados, el 80 % del fósforo se encuentra formando fosfatos cálcicos insolubles, y no es aprovechable por las plantas. Gran parte de los micronutrientes son poco absorbidos en este tipo de pH, incidiendo negativamente en las funciones y los procesos de crecimiento de los cultivos. Es conocido

que las características de los suelos pueden afectar el crecimiento y desarrollo de los vegetales, no permitiendo en algunos casos la máxima expresión del potencial genético de los mismos.

Los valores de CE variaron entre 0,42 y 18,11 dS/m, siendo la media de 4,61 dS/m. Los resultados hallados muestran suelos con bajos contenidos de salinidad y otros fuertemente salinos. Los sitios 1, 2 y 18 son los que presentan los mayores niveles de CE en el perfil (Fig. II.8, Tabla II.7 en Anexo), y del mismo modo los sitios 2, 11 y 18 presentan los valores más elevados de Na. Esto expone la importancia de analizar tanto el contenido de sodio intercambiable como de sales en el suelo, ya que eso influye, junto a la textura, en la disponibilidad real de agua en el perfil para el cultivo.

Esto puede afectar el crecimiento inicial de las plántulas de alfalfa, ya que es un cultivo sensible a las sales durante la germinación. Sin embargo, cuando la planta crece aumenta su resistencia a la salinidad (INTA, 1973). Según Taboada y Lavado (2009), Argentina es el tercer país, luego de Rusia y Australia, con mayor superficie de suelos afectados por sales. En ambientes áridos y semiáridos, como la zona de estudio de esta Tesis, presenta una significativa proporción de estos suelos salinos a fuertemente salinos. Por otro lado, en ambientes húmedos también son comunes los suelos salinos sódicos y sódicos.

Los valores de sodio intercambiable oscilaron entre 0,23 a 11,46 meq/100g, cuya media fue de 1,91 meq/100g. Los resultados hallados para el sodio siguen un comportamiento similar a los valores de CE (Fig. II.8, Tabla II.7 en Anexo). Los altos valores de sodio pueden provocar la disminución de la infiltración y movimiento de agua dentro del perfil del suelo. La importancia de detectar los contenidos de sodio y sales radica en que altos contenidos de estos tienen influencias negativas sobre el desarrollo vegetal, siendo la magnitud del efecto mayor en suelos sódicos que en salinos, esto es debido a la naturaleza química del Na. Es importante destacar, que un rasgo que caracteriza a estos suelos es la gran heterogeneidad que presentan en poca distancia (INTA, 1973). Si bien estos suelos reciben bajas dosis de Na y sales por aportes del agua de riego, los contenidos hallados en los perfiles de suelos analizados, están dados por las características del relieve, del material parental de los mismos y al efecto de las bajas precipitaciones (INTA, 1973).

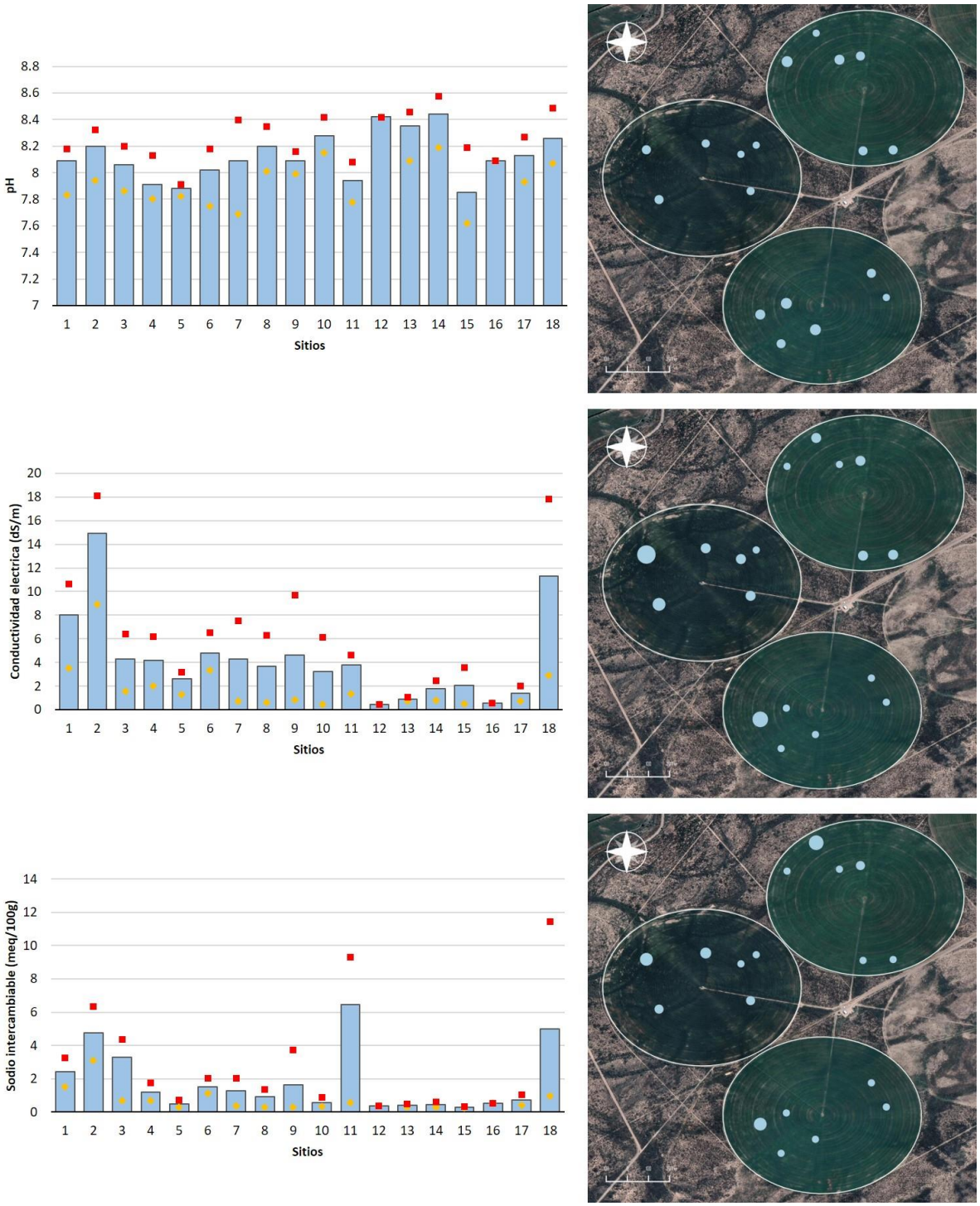

Figura II. 8. Valores medios, máximos y mínimos de pH, conductividad eléctrica (CE) y sodio intercambiable (Na i) de los 18 sitios de estudio en el perfil. Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto naranja indica el valor mínimo.

Los resultados de los análisis de CIC oscilaron entre 1,61 meq/100g y 39,39 meq/100g, siendo 12,65 meq/100g su valor promedio (Fig. II.9, Tabla II.8 en Anexo).

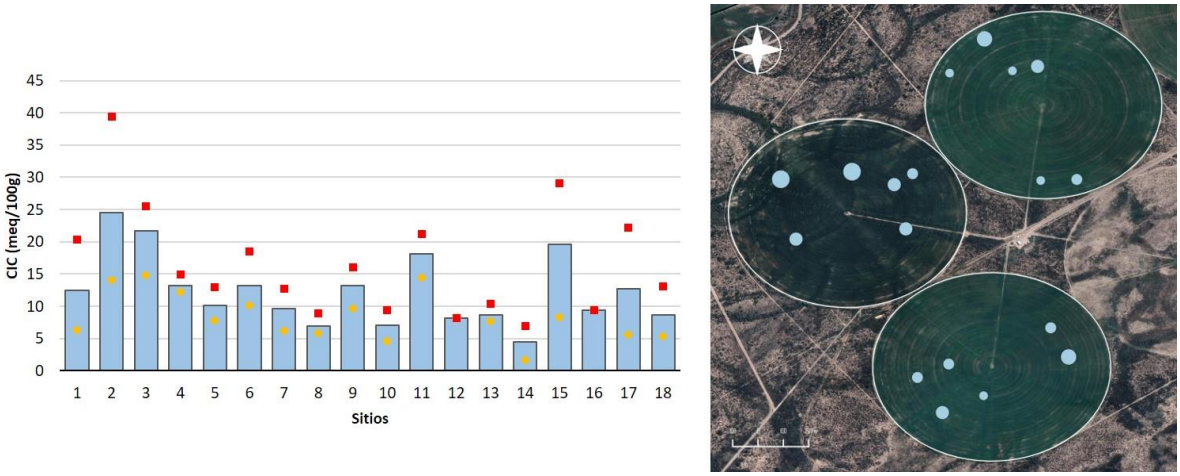

Figura II. 9. Valores medios, máximos y mínimos de la variable capacidad de intercambio catiónico (CIC) (meq/100g) de los 18 sitios de estudio en el perfil. Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto anaranjado indica el valor mínimo.

Esta propiedad química del suelo se refiere al número total de cationes intercambiables que este es capaz de retener. Por lo tanto, conocer la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de un suelo indica el potencial de un suelo para retener e intercambiar nutrientes. Además, la CIC afecta directamente la cantidad y frecuencia de aplicación de fertilizantes. En suelos como los estudiados, dadas las características texturales, se puede inferir que la CIC es baja.

Los valores medios obtenidos de nitrógeno total (%) (N t) y P disponible (P disp) fueron 0,04 % y 7,2 ppm, respectivamente. En ambos nutrientes estos valores resultan bajos para el desarrollo adecuado de la alfalfa. Los valores de porcentajes de Nt oscilaron entre 0,15 y 0,1 %. Para el contenido de fósforo disponible, los valores obtenidos también fueron numéricamente bajos, mostrando un rango de variación entre 17,8 y 1,55 ppm (Fig. II.10, Tabla II.9 en Anexo).

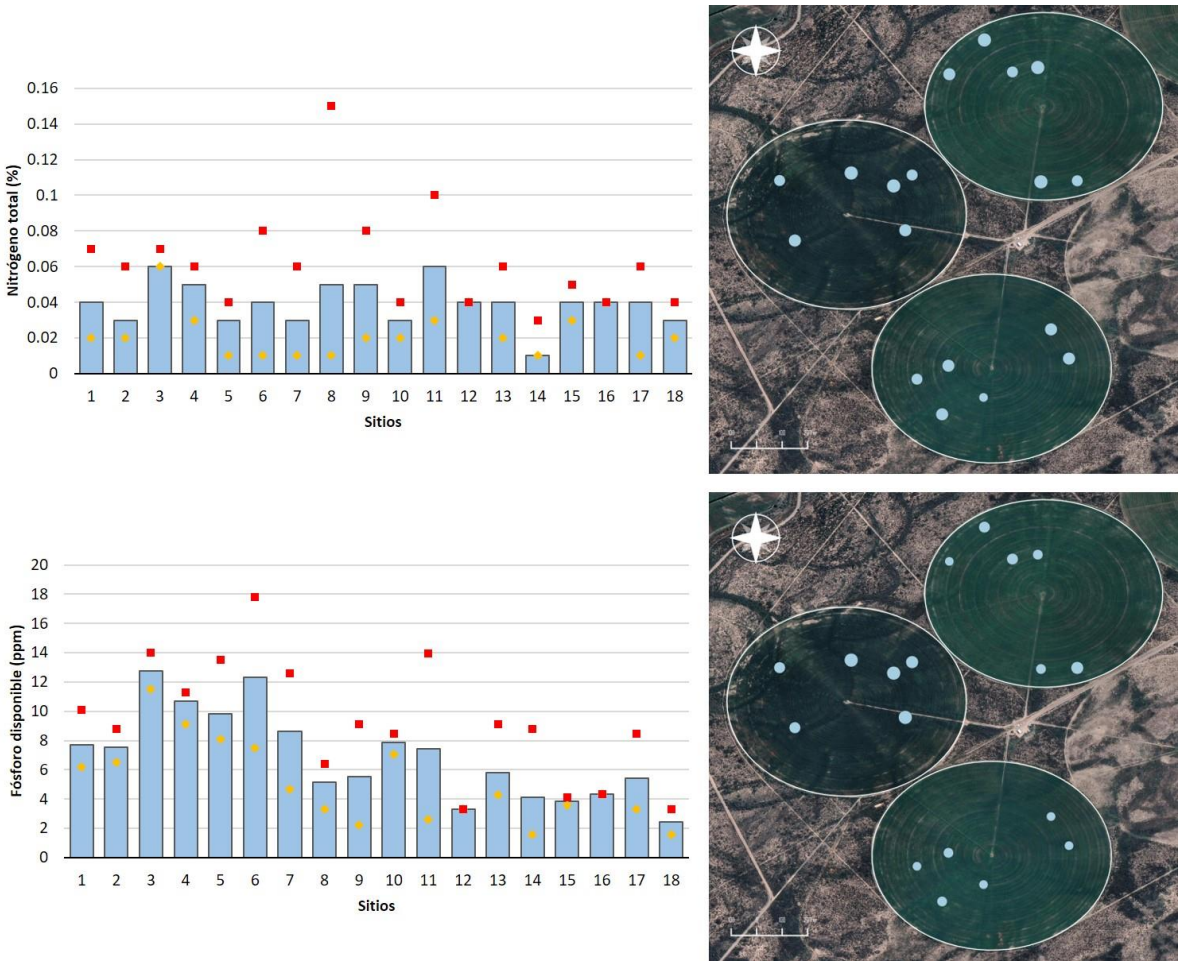

Figura II. 10. Valores medios, máximos y mínimos de nitrógeno total (%) y fósforo disponible (ppm) de los 18 sitios de estudio. Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto anaranjado indica el valor mínimo.

Los valores obtenidos para el contenido de potasio intercambiable (meq/100g) (Ki) mostraron un rango de variación entre 0,001 hasta 2,18 meq/100g, con una media general de 0,55 meq/100g. El porcentaje de materia orgánica total (MOt), también manifestó valores bajos, de 0,15 % a 1,71 %, y una media general de 0,58 % (Fig. II.11, Tabla II.10 en Anexo). Los valores registrados de esta última variable coinciden con lo reportado bibliográficamente (Consejo Federal de Inversiones, 1982).

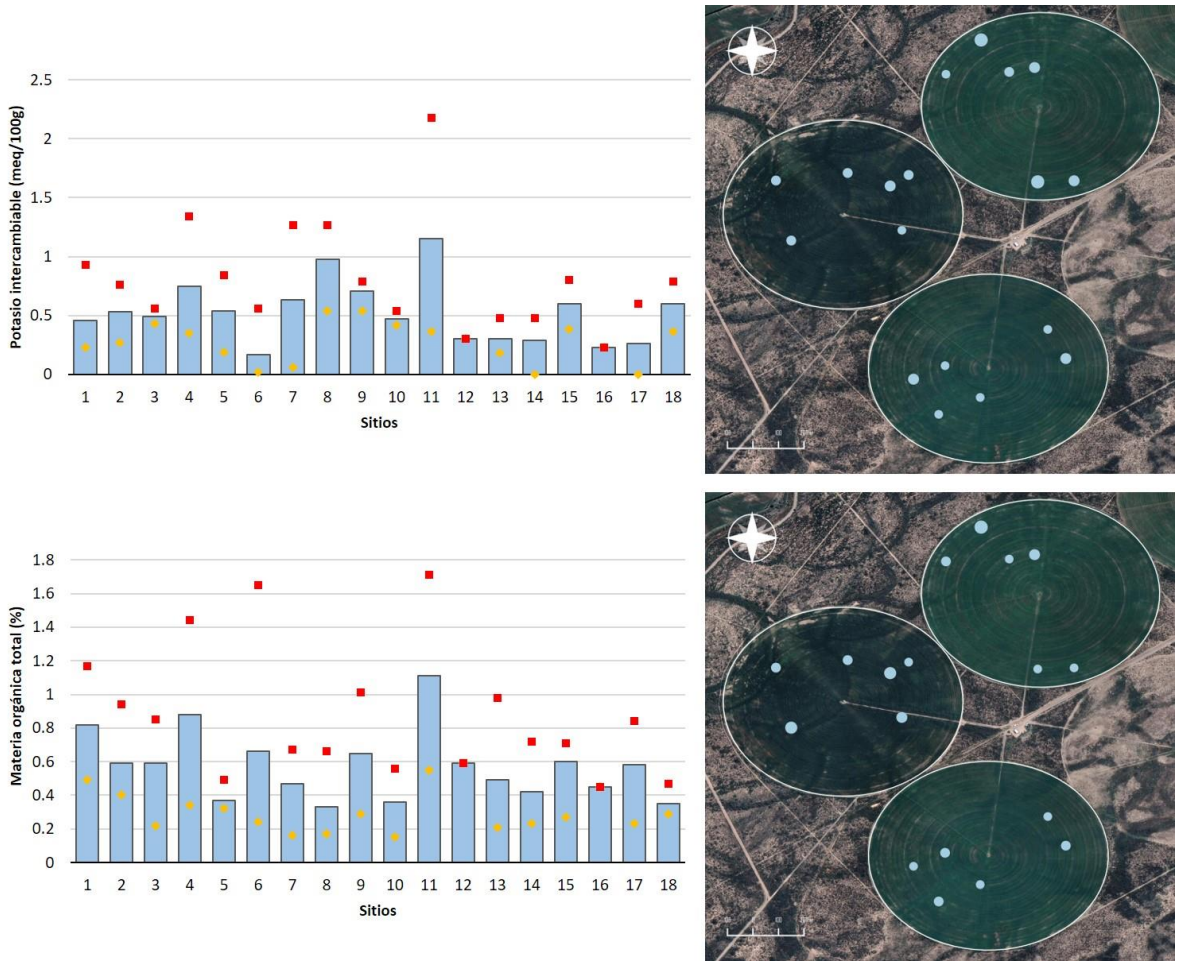

Figura II. 11. Valores medios**,** máximos y mínimos de potasio intercambiable (meq/100g) y materia orgánica total (%) de los 18 sitios de estudio. Las barras indican la media, el punto rojo indica el valor máximo, el punto anaranjado indica el valor mínimo.

Otro aspecto importante es la caracterización de la configuración del terreno, es decir el relieve. Para ello se utilizó un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución espacial de 30 m (ASTER 1999, *https://earthexplorer.usgs.gov/*). Los valores de altura del terreno variaron entre 314 m hasta 324 m sobre el nivel del mar, en los cuales los sitios de estudio se distribuyeron en todo el rango de variación de la altura. Esto expone las variaciones en el micro-relieve, el cual es característico de estos suelos de origen paleofluvial con grandes deposiciones de arena y rodados, asociadas a paleocauces, y que claramente podrían influir en las características productivas asociadas a los mismos (Fig. II.12).

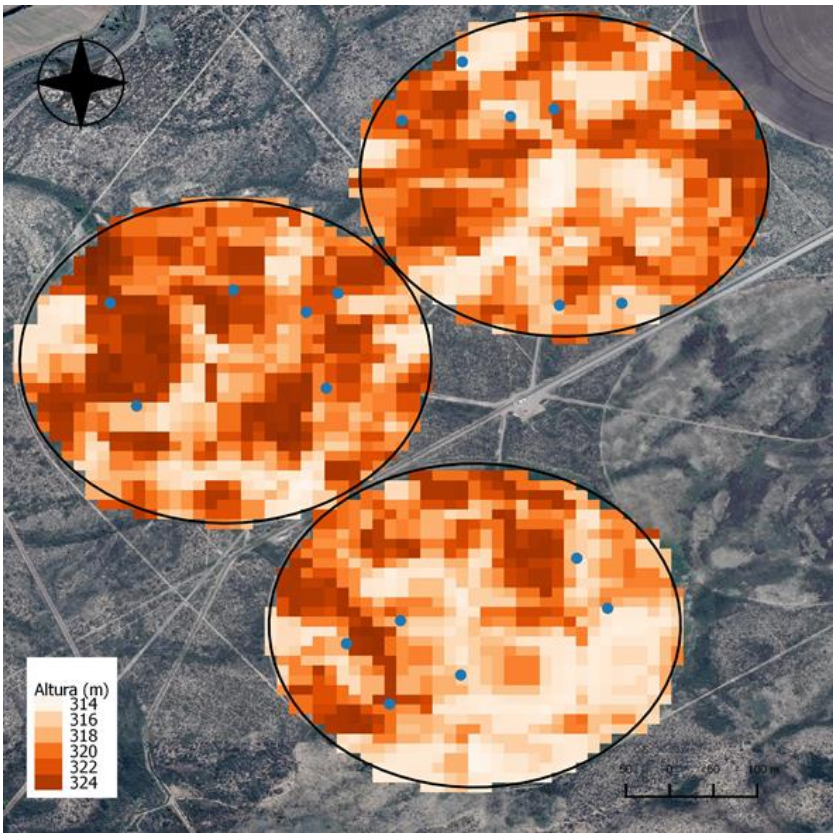

Figura II. 12. Ubicación de los 18 sitios de muestreo (puntos azules) sobre la altura del MDE para cada uno de los 3 pivotes bajo estudio.

Se realizó un análisis de componentes principales. La variabilidad total explicada por los dos primeros componentes fue del 71 %. El primer eje (CP1) capturó un 51 % de la misma, en tanto que el segundo (CP2) explicó el 20 % restante (Tabla II.11).

Tabla II. 3. Autovalores obtenidos en el Análisis de Componentes Principales. Se indica la proporción de la variabilidad explicada en forma acumulada.

Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acumulada
1	3,54	0,51	0,51
2	1,41	0,2	0,71
3	0,91	0,13	0,84
4	0,66	0,09	0,93
5	0,32	0,05	0,98
6	0,13	0,02	0,99
7	0,04	0,01	1

Los coeficientes de las variables en los 2 primeros ejes explican el 71 % de la variabilidad. El CP1 acumuló un 51 % de variabilidad, y estuvo definido en forma positiva por la variable arena, y de forma negativa por CC y Nai. Es decir, el eje 1 está fuertemente condicionado por el contenido de arena del perfil, y por eso se ubican hacia el extremo derecho del gráfico aquellos sitios con mayores contenidos de arena, en contraposición a los que se ubican a la izquierda del gráfico. A su vez, las variables de CC y Nai que están vinculadas con el contenido de arena, se encuentran ubicados en sentido opuesto a esta fracción granulométrica, pero con una magnitud similar. En términos generales, esto expone que los suelos con altos porcentajes de arena poseen escasa CC y pocos problemas con el sodio.

En tanto que, el CP2 que reunió el 20 % de la variabilidad estuvo definido de forma positiva por P, y de forma negativa por las variables pH y CE (Tabla II.12). Este eje está determinado principalmente por el contenido de P en la parte superior y el pH en la parte inferior. Además, la CE sería importante en la explicación de la variabilidad en este eje (Fig. II.13).

Tabla II. 4. Aporte individual de las variables: profundidad del perfil libre de gravas y rodados, arena, pH, conductividad eléctrica, sodio intercambiable, fósforo, capacidad de intercambio catiónico a los autovectores e1 y e2.

Variables	e1	e2
Prof. perfil	-0,29	-0,07
% arena	0,48	-0,11
pH	0,26	-0,6
CE	-0,37	-0,4
Na i	-0,46	-0,31
P	-0,23	0,61
CC	-0,47	-0,08

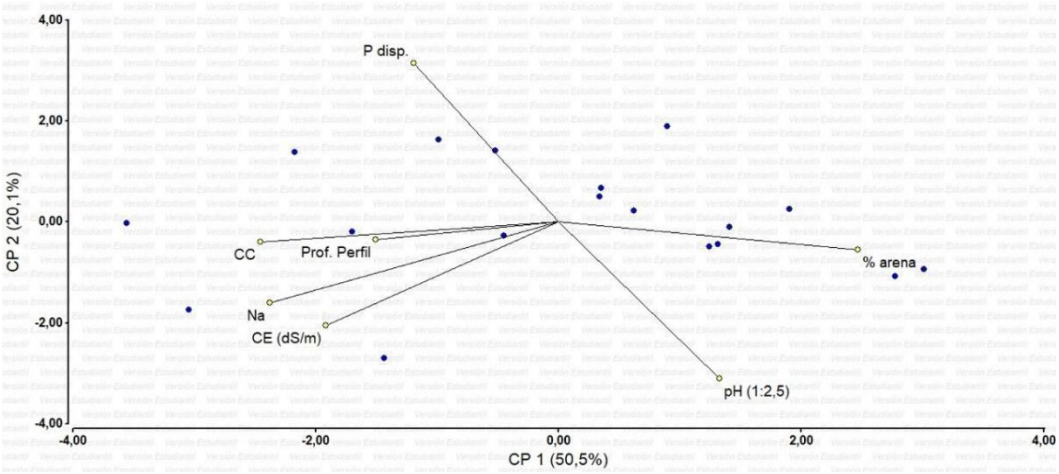

Figura II. 13. Análisis de componentes principales (ACP), obtenido en base a la relación de variables edáficas (perfil hasta 120 cm), arena, pH, conductividad eléctrica, sodio intercambiable, fósforo, capacidad de intercambio catiónico) medidas en 18 sitios. Biplot para los ejes 1 y 2.

II.3.1.3. Análisis de temporal de variables dinámicas

Al analizar la variación temporal del pH desde octubre de 2016 a agosto de 2018 a tres profundidades diferentes, 0-20 cm, 40-60 cm y 80-100 cm (Fig. II.14 a, b y c), se encontró un promedio de las 3 profundidades en el área de estudio de 8,16 en los valores de pH, siendo el rango de variación de 7,9 a 8,3. En términos generales, los valores de pH no mostraron aumentos considerables (Fig. II.14 a). Las variaciones de pH en profundidad de 40-60 cm fueron similares a la presentadas en la capa más superficial, con promedio de 8,21 y un rango de variación 8 a 8,3, y un leve incremento también en el mes de abril de 2017 que alcanzó un valor de 8,43 (Fig. II.14, b). A la profundidad de 80-100 cm, el pH fue también estable con pequeñas variaciones en el tiempo de 8 a 8,3 (Fig. II.14, c).

Tanto en profundidad como en el análisis temporal, los valores de pH se mantuvieron dentro de un mismo rango sin grandes variaciones entre las fechas estudiadas.

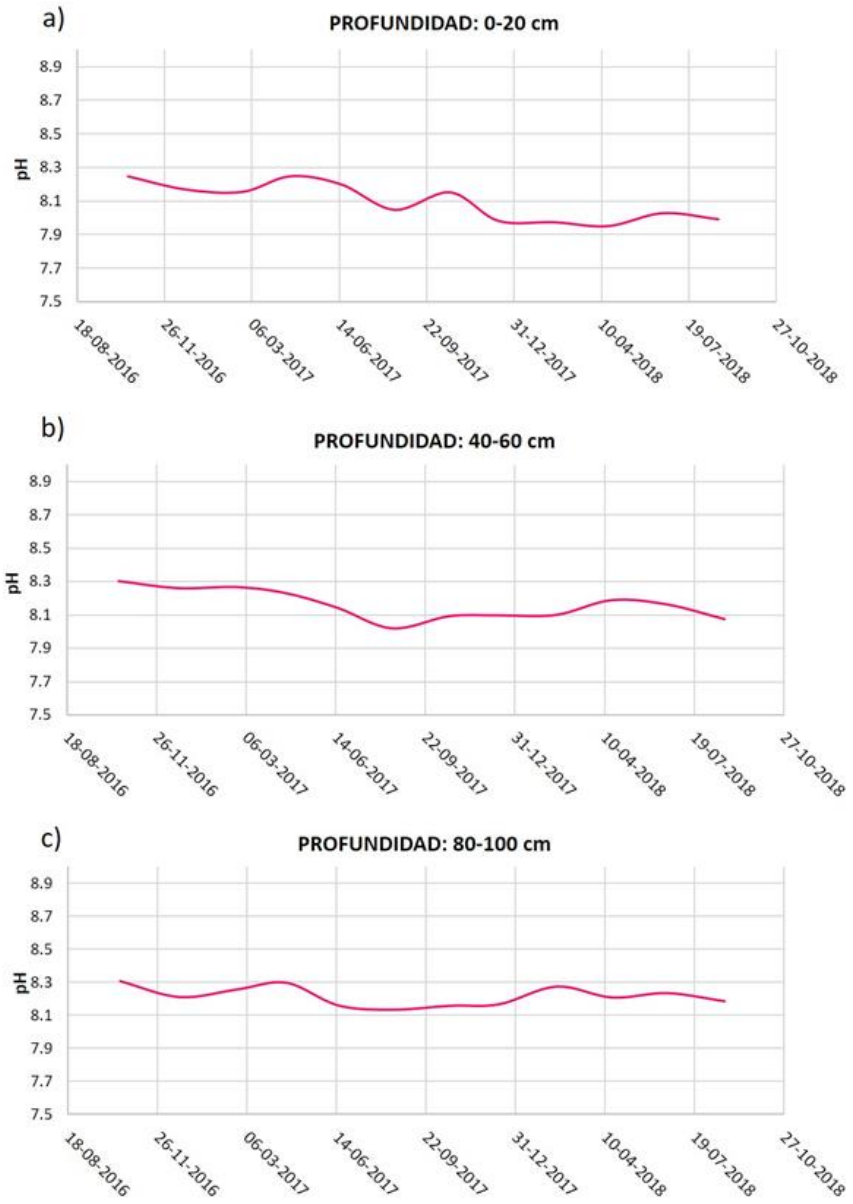

Figura II. 14. Variación temporal del pH en la zona de estudio a diferentes profundidades. **a)** 0-20 cm, **b)** 40-60 cm y **c)** 80-100 cm.

Respecto a la CE, se detectaron diferencias significativas entre profundidades ($p < 0,05$) y un aumento de los valores conforme aumentaba la profundidad. A nivel superficial (0-20 cm) se registraron valores de CE entre 1 y 2 dS/m con un promedio de 1,6 dS/m mientras que entre los 40 y 60 cm los valores estuvieron en un rango de 2 a 5,1 dS/m promediando 4,1 dS/m. Finalmente, en la capa más profunda se obtuvieron valores entre 5 y 8 dS/m; con un promedio superior a 6,3 dS/m. Estas variaciones en la concentración de sales en profundidad podrían deberse principalmente a que en profundidad hay aporte de sales por

parte de la capa freática que se encuentra muy próxima a la superficie (entre 1,2 y 1,4 m, aproximadamente). Debido a la textura arenosa de los suelos, el ascenso capilar por parte de la napa es limitado, por lo cual no llega a afectar demasiado en los registros de CE en los 40-60 cm del perfil de suelo. En tanto que, a nivel superficial, además de lo antes mencionado, el riego constante de 1700 mm evita la concentración de sales (Fig. II.15).

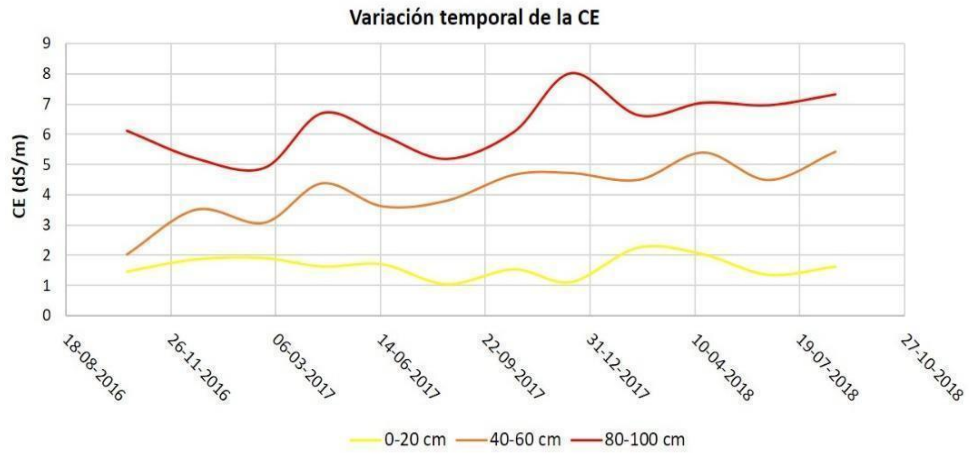

Figura II. 15. Variación temporal de la CE (dS/m) en la zona de estudio en 3 diferentes profundidades

El contenido gravimétrico de agua en el suelo expresado como porcentaje de agua en el suelo (% Humedad) de los sitios de estudio durante el periodo evaluado a 3 profundidades diferentes se muestra en las figuras II.16 (a, b y c). Los valores hallados de humedad en las 3 profundidades analizadas fueron similares, y no mostraron diferencias significativas para los factores analizados ($p > 0,05$).

Tanto a profundidad de 0-20 cm como de 40-60 cm, el % de humedad varió entre 10 y 16 %. Al inicio, en donde no se lleva a cabo el riego el % de humedad es menor y comienza a aumentar desde el mes de agosto, coincidiendo con el comienzo de la temporada de riego. A finales de la temporada de riego (abril y mayo), nuevamente se observa una disminución del % de humedad. En los 80-100 cm de profundidad, la humedad varía de 12 a 15 %, y sus fluctuaciones se deben principalmente a la dinámica de la capa freática.

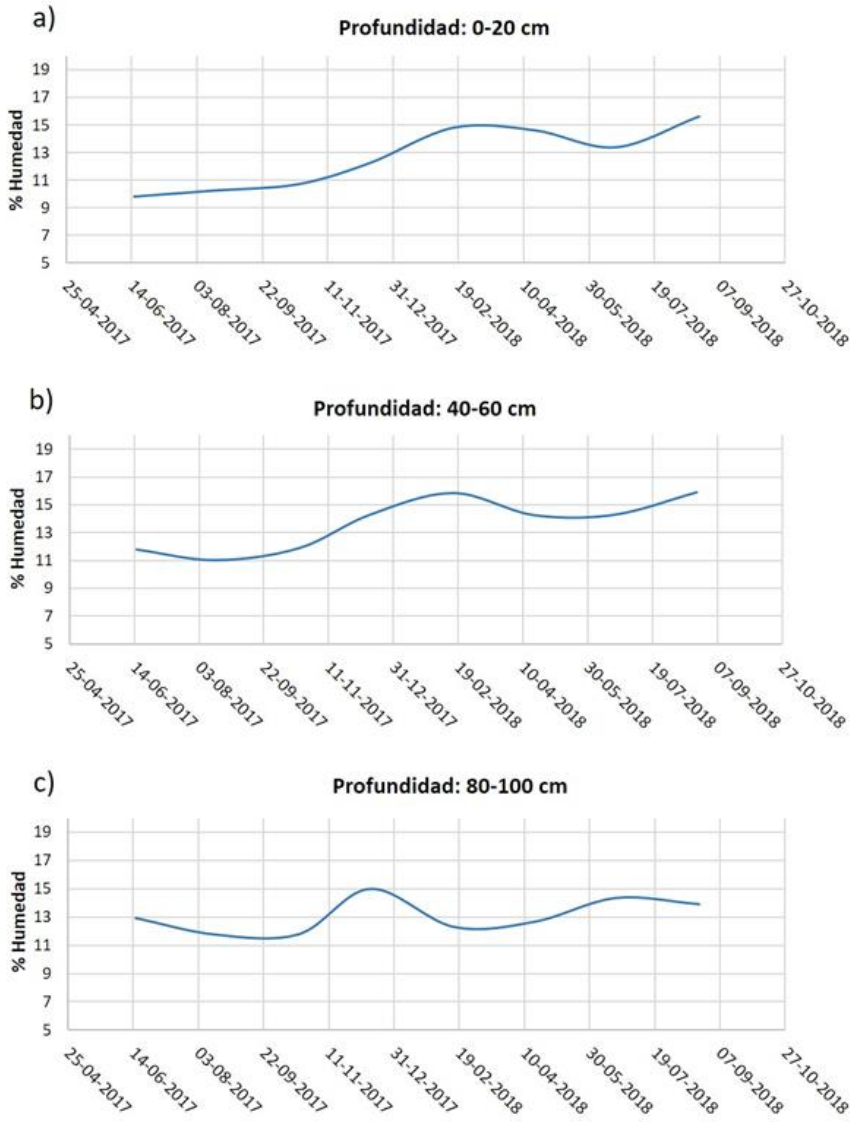

Figura II. 16. Variación temporal del % de Humedad en la zona de estudio a diferentes profundidades. **a)** 0-20 cm, **b)** 40-60 cm y **c)** 80-100 cm.

II.3.2. Rendimiento del cultivo de alfalfa

II.3.2.1. Análisis espacial de variables asociadas al cultivo

De acuerdo con los análisis de la producción de materia seca (kg/ha), los sitios presentaron una media general de 1949,2 kg MS/ha por corte. Los resultados de cada uno de los sitios muestran diferencias entre los mismos, con sitios cuya producción promedio (estimada a partir de las 3 campañas) es cercana o superior a los 3000 kg MS/ha y otros, en los cuales los valores de producción promedio apenas superan los 1000 kg MS/ha. La media

general de producción es similar a la que obtienen los productores locales (2000 kg MS/ha). Sin embargo, hay 8 sitios con una producción media superior a los 2000 kg MS/ha, y los restantes con una producción media inferior a los 2000 kg MS/ha (Fig. II.17). Los 8 sitios de mayor producción fueron el 1, 4, 7, 9, 11, 13, 15 y 17, y se encontraron distribuidos en los 3 pivotes; de la misma manera, los restantes 10 sitios con producciones menores se encontraron en todos los pivotes.

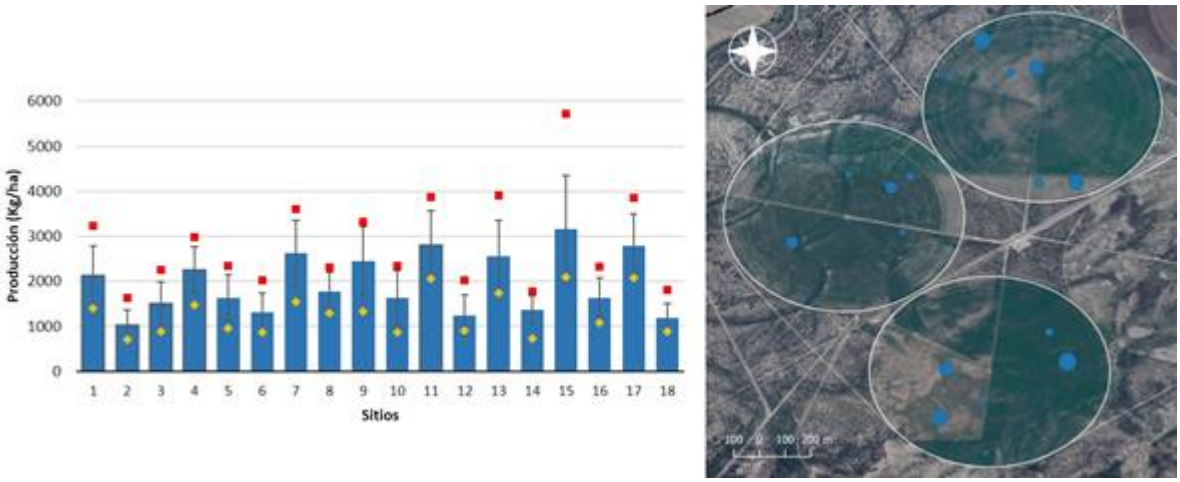

Figura II. 17. Producción promedia (kg/ha) del cultivo de alfalfa en los 18 sitios de estudio y su ubicación en el lote en cada zona de riego. Los cuadrados rojos indican la producción máxima mientras que los rombos amarillos indican la producción mínima.

El rendimiento promedio de alfalfa encontrado en esta Tesis fue similar a lo reportado por productores de la zona de estudio. Sin embargo, resultaron inferiores a los reportados en la bibliografía (2500 kg MS/ha) (Spada, 2018). Estas diferencias en las producciones encontradas se atribuyen principalmente a que las mediciones de este trabajo se realizaron bajo condiciones adoptadas por el productor, mientras que Spada (2018) evaluó los rendimientos en microparcelas con condiciones nutricionales óptimas.

La producción de primavera y verano representó aproximadamente el 85 % de lo acumulado en las temporadas, mientras que el resto fue producción de otoño. Las diferencias encontradas entre las estaciones del año podrían ser explicadas por las mejores condiciones de temperatura y fotoperíodo (Quiroga Garza, 2013). En este sentido, en otras zonas bajo riego de la Patagonia, precisamente en Viedma, Arolfo y Odorizzi (2015 y 2016) también se determinaron las mayores producciones en primavera y verano. El acortamiento del

fotoperiodo y descenso de la temperatura, como sucede en el otoño, disminuyen el crecimiento del cultivo (Ponce, 2014).

Los resultados de altura, presentaron una media general de 48,35 cm, y además un patrón similar al de producción, en el cual se observa un grupo de sitios que presentaron una altura superior a los 50 cm (1, 4, 7, 9, 11, 13, 15 y 17), diferenciándose del otro grupo de sitios con una altura que no alcanza los 40 cm (Fig. II.18).

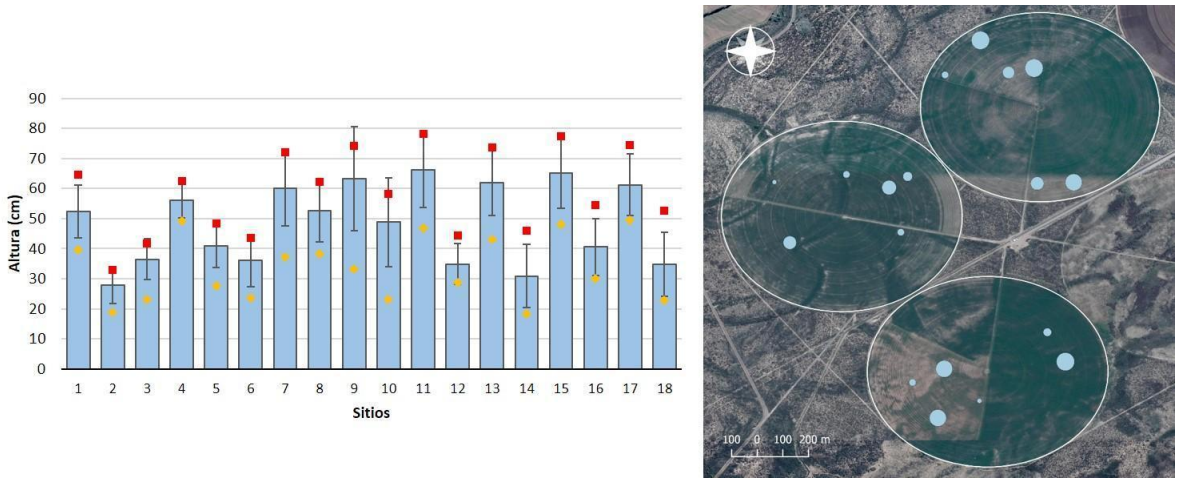

Figura II. 18. Altura media (cm) del cultivo de alfalfa en los 18 sitios de estudio y su ubicación en el lote. Los cuadrados rojos indican el maximo de altura (cm) y los rombos amarillos indican los minimos de altura (cm). Las líneas verticales corresponden a los desvíos estándares.

Los datos del porcentaje de cobertura vegetal muestran una media general del 72 %, con máximos del 90 %. Los mayores valores se registraron al momento próximo al corte para henificación, mientras que los mínimos del orden del 35 % fueron en días posteriores a haberse realizado el corte del cultivo. Sin embargo, al comparar valores de medias, mínimos y máximos se observan variaciones entre los sitios de estudio. Algunos presentan coberturas de más del 80 % como los sitios 1, 9, 11, 13, 15 y 17, otros con coberturas por debajo del 60 %, sitios 2, 12, 14 y 18, y algunos otros sitios como el 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 y 16 con porcentaje de cobertura intermedia (Fig. II.19).

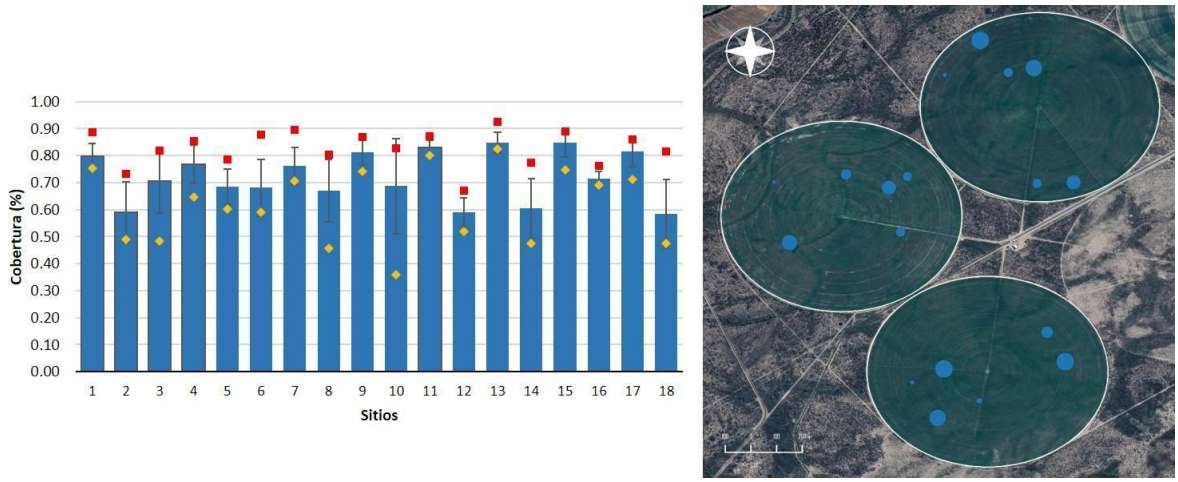

Figura II. 19. Caracterización de la cobertura vegetal media (%) en el cultivo de alfalfa en los sitios de estudio y su ubicación en el lote.

El análisis de los datos de IAF presentó variaciones entre los sitios de estudio. La media general de los valores fue de 1,8; con máximos que alcanzaron valores de 3,5, y mínimos de 0,5. Estos valores extremos se deben principalmente a registros en diferentes estados fenológicos del cultivo. Por otra parte, comparando valores de medias, mínimos y máximos se visualizan algunos con valores promedio de 2 y otros con valores de IAF promedio por debajo de 1,5 (Fig. II.20).

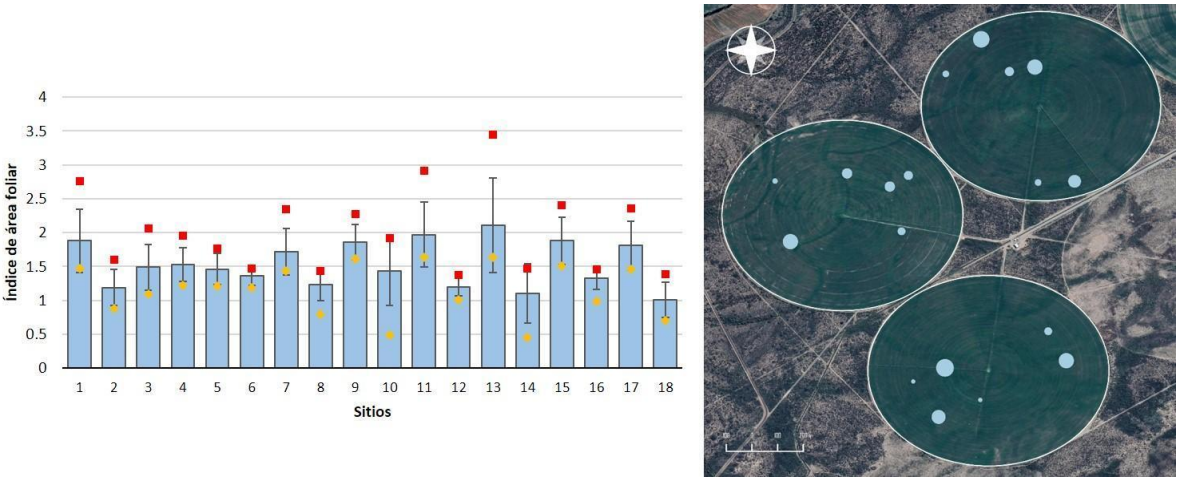

Figura II. 20. Índice de área foliar **(**IAF) en el cultivo de alfalfa en los 18 sitios de estudio y su ubicación en el lote.

La metodología presentada en esta Tesis demuestra que es posible generar estimaciones de IAF y % de cobertura vegetal a través del uso de una cámara digital comercial en cultivos de alfalfa bajo riego. Si bien, existen mayores errores en comparación

con cámaras profesionales con lentes para fotos hemisféricas utilizadas en estudios similares (López-Lozano et al., 2009; Verger et al., 2011), sí es posible generar estimaciones de IAF y % de cobertura de forma simple a través de una cámara de uso masivo.

Si bien el uso de las técnicas de fotografía digital hemisférica permite generar un monitoreo de IAF y cobertura vegetal de forma más versátil y simple que otros métodos, aún existe un elevado costo en la tecnología utilizada debido a la necesidad de una cámara más un lente ojo de pez (Lang et al., 2010; Li et al., 2015; Nestola et al., 2017; Verger et al., 2011). Por lo tanto, con el uso de una cámara digital convencional sería posible generar estimaciones de IAF y % de cobertura vegetal comparables con otras tecnologías disponibles a solo una fracción del costo de ellas.

Por otro lado, al igual que en la presente Tesis, Uribe et al. (2018) muestran que con una cámara GoPro es posible estimar el IAF y cobertura vegetal de alfalfa (entre otros cultivos) de forma similar con los de una cámara de características mas sofisticadas. Asimismo, Aumassane et al. (2018) y Camacho et al. (2014), en trabajos realizados en la zona bajo riego de 25 de mayo utilizando una cámara digital convencional y una cámara hemisférica para cultivos de alfalfa y maíz respectivamente, encontraron resultados similares a los reportados en esta Tesis. Es decir que la metodología utilizada permite describir la cobertura vegetal, IAF y desarrollo de los cultivos.

II.3.2.2. Análisis temporal de variables asociadas al cultivo

Las figuras relacionadas a la producción de materia seca entre la semana 1 y 4, altura del cultivo, porcentaje de cobertura vegetal e IAF por cada uno de los sitios en las 3 temporadas analizadas se presentan en la sección ANEXO (Fig. II.21). A continuación, se agrega una descripción breve de las mismas. La producción de MS presentó fundamentalmente 2 etapas: la primera es la correspondiente a la etapa de crecimiento y la segunda se registra al final del ciclo de corte donde la producción de MS se estabiliza. En general, las curvas de producción de las temporadas en cada uno de los sitios tuvieron un comportamiento similar, no se detectaron diferencias entre temporadas. No obstante, al comparar las curvas de producción entre sitios, se observan diferencias. En la primera semana la producción varió de 500 kg MS/ha a 1200 kg MS/ha, y a partir de la segunda semana y hasta la cuarta semana las diferencias en los valores de producción resultaron de mayor magnitud, variando de unos 1000 kg MS/ha a 3100 kg MS/ha en la última semana.

Como las mediciones de altura del cultivo fueron tomadas en simultáneo con las mediciones para producción de MS, las curvas de altura presentan gran similitud con las curvas de producción. Se puede apreciar que las curvas de altura presentan en general valores crecientes desde su inicio hasta el final del ciclo antes de ser cortado, en donde la altura se estabiliza. Sin embargo, comparando las curvas de altura entre sitios, si se pueden apreciar diferencias. En la primera semana, la altura varió aproximadamente de 10 a 20 cm, y a partir de la segunda semana y hasta la última semana las diferencias en los valores de producción resultan más evidentes, variando de 30 a 65 cm.

Respecto a las curvas de cobertura vegetal de la alfalfa, de cada una de las temporadas en todos los sitios, manifestaron diferencias. Esto puede estar relacionado a errores propios de la metodología y/o de implementación de la misma. Sin embargo, los valores encontrados fueron en general los esperados. Además, comparando las curvas entre sitios, se observan diferencias desde la primera semana hasta la última. Como en las variables anteriores analizadas, las diferencias son menores en la primera semana, donde el porcentaje varía del 20 al 35%, incrementando estas diferencias en las siguientes semanas, siendo la última semana la que presentó mayor diferencia de cobertura en el cultivo, variando desde el 60 al 85%.

De la misma manera que en las curvas de cobertura del cultivo, las curvas de IAF de la alfalfa de cada una de las temporadas en todos los sitios manifestaron diferencias, pudiendo deberse estas a error en la metodología e implementación de la misma. Además, comparando las curvas entre sitios, se observan diferencias desde la primera semana hasta la última. Como en las variables anteriores analizadas, las diferencias son menores en la primera semana, incrementándose en las siguientes semanas.

A partir de los resultados de corte de biomasa en el cual se estimó la producción de kg MS/ha, se observaron sitios con una producción media superior a los 2000 kg MS/ha (valor de producción promedio del productor) y sitios con una media de producción por debajo. De este modo, los sitios fueron agrupados en 2 categorías, alta producción (aquellos sitios caracterizados con una producción superior a la media local) y baja producción (sitios caracterizados con producción menor a la media local), quedando 8 sitios como de alta producción (1, 4, 7, 9, 11, 13, 15 y 17) y 10 sitios como de baja producción (2, 3, 5, 6, 8, 10,

12, 14, 16 y 18). Sobre esta segregación y categorización se realizó ANOVA, resultando diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambos grupos.

Los promedios de producción, altura, cobertura vegetal y IAF del cultivo para las categorías de alta y baja producción conforme a las semanas 1 a la 4 se presentan en la figura II.19. De ella se desprende que todas las curvas presentan en general valores crecientes desde su inicio hasta el final del ciclo previo a la realización del corte.

En general, las curvas fueron similares en su evolución temporal. Sin embargo, comparando las curvas de ambas categorías, se observan diferencias que se manifiestan a partir de la segunda semana de desarrollo del cultivo desde el momento de corte. Estas diferencias, en la primera semana resultaron no significativas, y a partir de la segunda semana (excepto cobertura vegetal) y hasta la última semana las diferencias resultaron significativas (Fig. II.21).

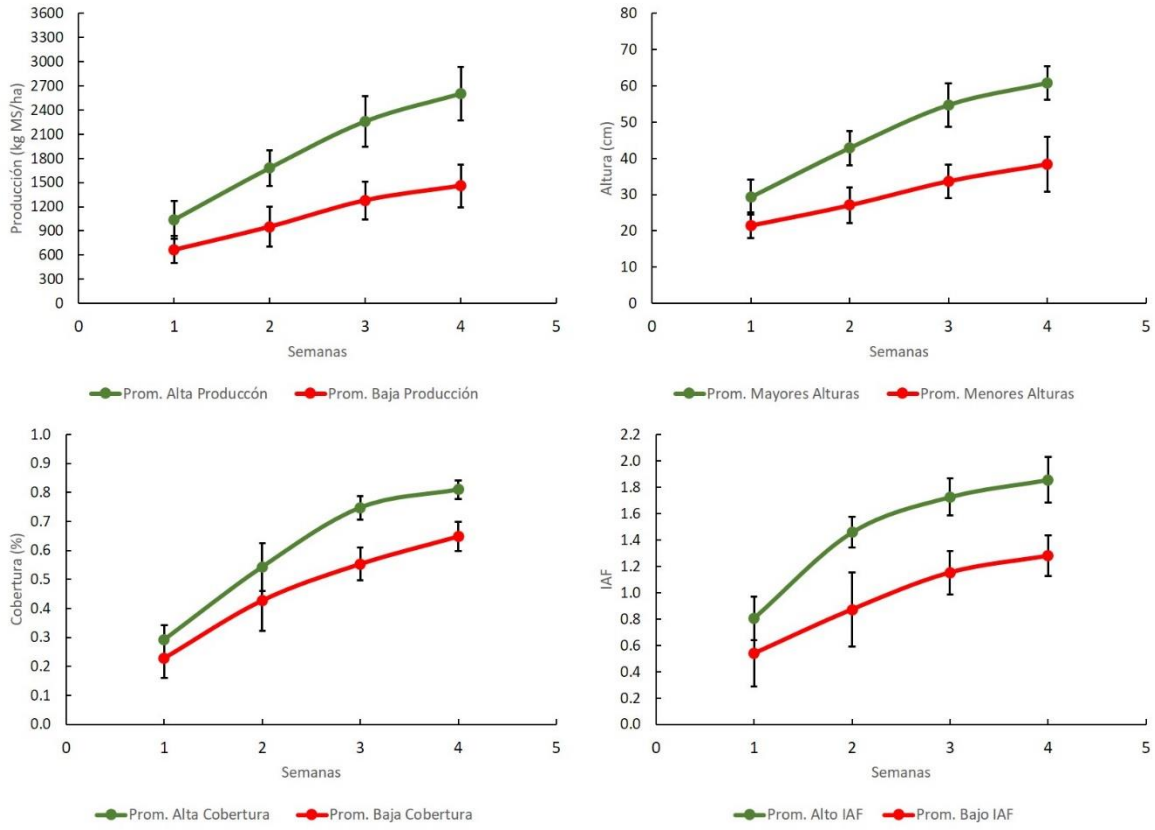

Figura II. 21. Curvas comparativas del desarrollo productivo, altura, cobertura vegetal e IAF del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Las curvas representan los promedios de las 3 campañas analizadas.

La distribución espacial de cada uno de los sitios caracterizados en relación a la producción, altura, cobertura vegetal e IAF se presentan en la figura II.22. De esto se desprende que se detectan suelos con altos y bajos valores de producción bajo el mismo pivot. Este comportamiento refleja una elevada varaibilidad espacial en la producción de forraje lo cual pone en relieve la importancia de analizar la heterogeneidad espacial edáfica.

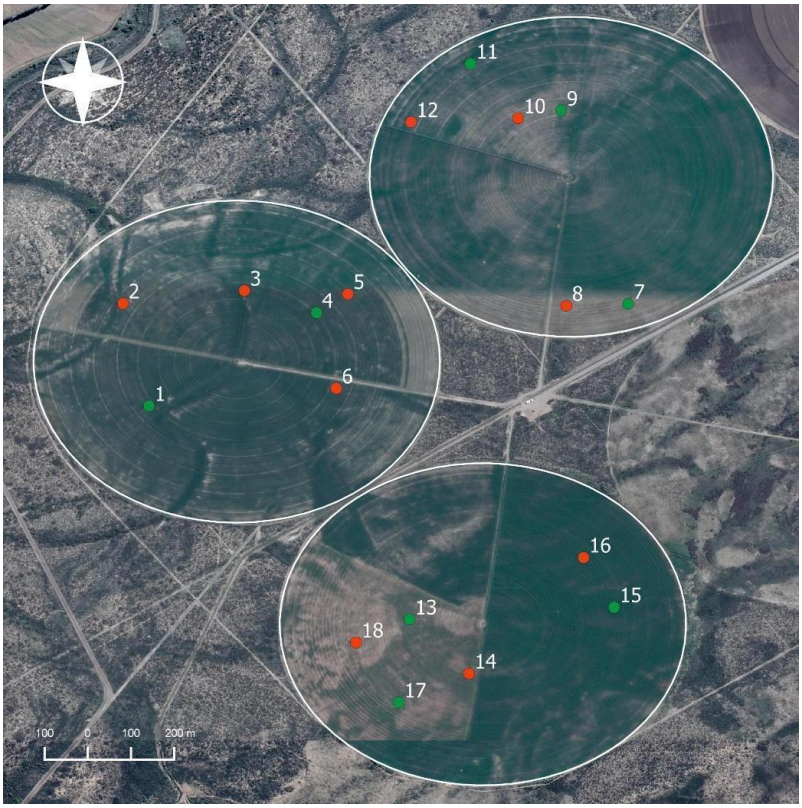

Figura II. 22. Ubicación de cada uno de los sitios diferenciados por categorías. Rojo -> baja producción, altura, cobertura vegetal e IAF; Verde -> alta producción, altura, cobertura vegetal e IAF.

II.3.3. Índices verdes derivados de información espectral

II.3.3.1. Análisis del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Mejorado (EVI) e Índice de Vegetación ajustado con el suelo (SAVI)

Los valores mínimos registrados para cada uno de los 3 índices espectrales se observaron principalmente posteriores a los cortes del cultivo de alfalfa y en los bordes de los pivotes. En este último caso, se debió principalmente a la cercanía del camino destinado al tránsito de la maquinaria agrícola. Por el contrario, los valores máximos se encontraron en

aquellos pivotes en los cuales el cultivo se encontraba en un estado avanzado de desarrollo, próximo a su corte para la henificación.

Los valores de NDVI, EVI y SAVI registrados presentaron grandes variaciones tanto dentro de una misma fecha como entre fechas. El mínimo registrado se observó el 4 de marzo de 2015, mientras que el máximo registro fue el 21 de abril de 2015 (Tabla II.13, Ver Anexo). Estas variaciones se deben principalmente a los diferentes estados fenológicos del cultivo en los 3 pivotes, ya que, en los mismos, los cortes se realizaron de manera consecutiva, cortando medio pivote por vez. A pesar de esto, los valores medios registrados fueron 0,41, 0,47 y 0,47 para NDVI, EVI y SAVI respectivamente (Tabla II.13, Ver Anexo).

Tabla II. 5. Medias y desvío estándar del NDVI, EVI y SAVI en cada una de las fechas analizadas.

	Fecha	NDVI		EVI		SAVI	
		Media	D.E.	Media	D.E.	Media	D.E.
Camp. 2014-2015	04-11-2014	0.41	0.15	0.44	0.19	0.44	0.17
	22-12-2014	0.46	0.10	0.53	0.14	0.51	0.12
	07-01-2015	0.45	0.12	0.51	0.16	0.49	0.14
	23-01-2015	0.34	0.11	0.37	0.15	0.38	0.13
	08-02-2015	0.43	0.10	0.49	0.14	0.49	0.12
	24-02-2015	0.44	0.13	0.51	0.19	0.51	0.16
	04-03-2015	0.25	0.09	0.30	0.11	0.29	0.10
	28-03-2015	0.37	0.07	0.44	0.11	0.45	0.09
	21-04-2015	0.55	0.10	0.60	0.15	0.57	0.12
Camp. 2015-2016	07-11-2015	0.43	0.08	0.47	0.11	0.47	0.09
	23-11-2015	0.39	0.13	0.56	0.10	0.56	0.09
	25-12-2015	0.40	0.08	0.43	0.11	0.44	0.10
	10-01-2016	0.51	0.06	0.58	0.09	0.56	0.08
	11-02-2016	0.45	0.08	0.52	0.12	0.50	0.10
	30-03-2016	0.39	0.07	0.46	0.10	0.47	0.09
Camp. 2016-2017	22-09-2016	0.39	0.06	0.44	0.08	0.45	0.08
	08-10-2016	0.38	0.06	0.42	0.08	0.43	0.07
	09-11-2016	0.52	0.05	0.60	0.08	0.57	0.06
	11-12-2016	0.43	0.10	0.48	0.13	0.47	0.11
	27-12-2016	0.39	0.11	0.43	0.15	0.43	0.13
	12-01-2017	0.41	0.11	0.45	0.15	0.46	0.13
	28-01-2017	0.44	0.12	0.49	0.17	0.50	0.15
	13-02-2017	0.34	0.13	0.38	0.17	0.39	0.15
	17-03-2017	0.41	0.10	0.49	0.14	0.49	0.13
	02-04-2017	0.27	0.07	0.36	0.11	0.33	0.09
	18-04-2017	0.36	0.06	0.48	0.10	0.46	0.09

En algunas fechas particulares, como son el 23 de enero de 2015, 4 de marzo de 2015, 13 de febrero de 2017 y el 2 de abril de 2017, se registraron promedios bajos de NDVI, EVI y SAVI. Esto coincide con sitios en los cuales recientemente se había cortado el cultivo y recién comenzaba a rebrotar. De manera opuesta, fechas como el 21 de abril de 2015, 10 de enero de 2016 y 9 de noviembre de 2016, registraron valores de medios-altos de los 3 índices espectrales analizados, debido a que el cultivo de los tres pivotes estaba en un desarrollo avanzado, próximos a realizarse su corte para henificación (Fig. II.23).

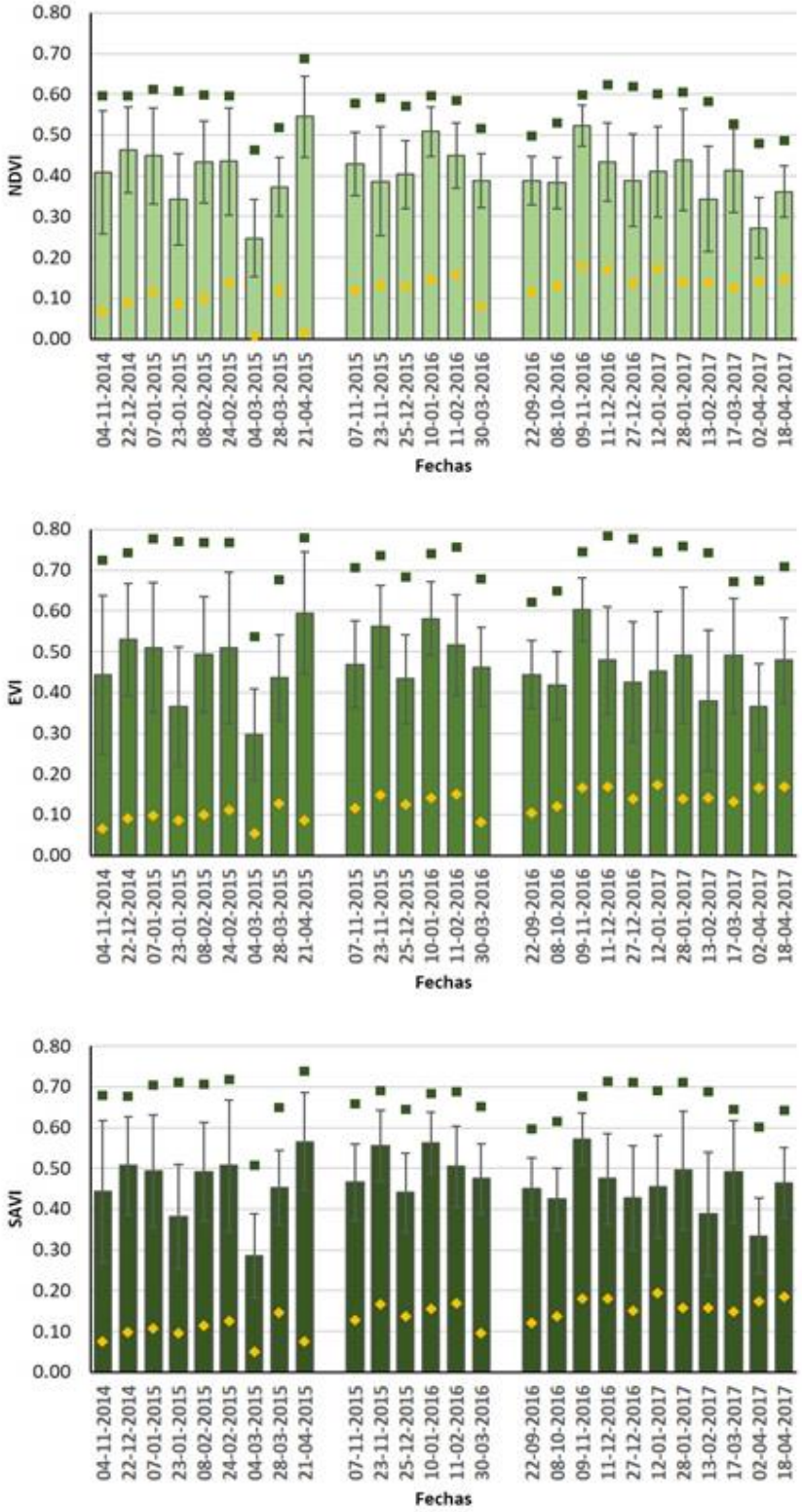

Figura II. 23. Variación del NDVI, EVI y SAVI en cada una de las fechas analizadas. Las barras indican la media, el punto verde indica el valor máximo, el punto amarillo indica el valor mínimo y la línea sobre las barras marca el desvío estándar.

El comportamiento de cultivo en cada una de las campañas analizadas a través de los índices espectrales fue semejante. La media de NDVI varió desde 0,40 a 0,43, con un mínimo registrado en la campaña 2014-2015 de 0,13, y un máximo registrado en la misma campaña de 0,55. De la misma manera, EVI varió desde 0,46 a 0,50, con un mínimo registrado en la campaña 2014-2015 de 0,11, y un máximo registrado en la campaña 2015-2016 de 0,67. En cuanto a SAVI, el mismo varió desde 0,45 a 0,499, con un mínimo registrado en la campaña 2014-2015 de 0,12, y un máximo registrado en la campaña 2015-2016 de 0,64. En general, el desarrollo de cada una de las campañas en estudio fue similar. La campaña 2015-2016 fue la que registró una media de superior en los 3 índices espectrales analizados, seguida de la campaña 2014-2015 y finalmente, con los valores más bajos de media fue la campaña 2016-2017 (Fig. II.24).

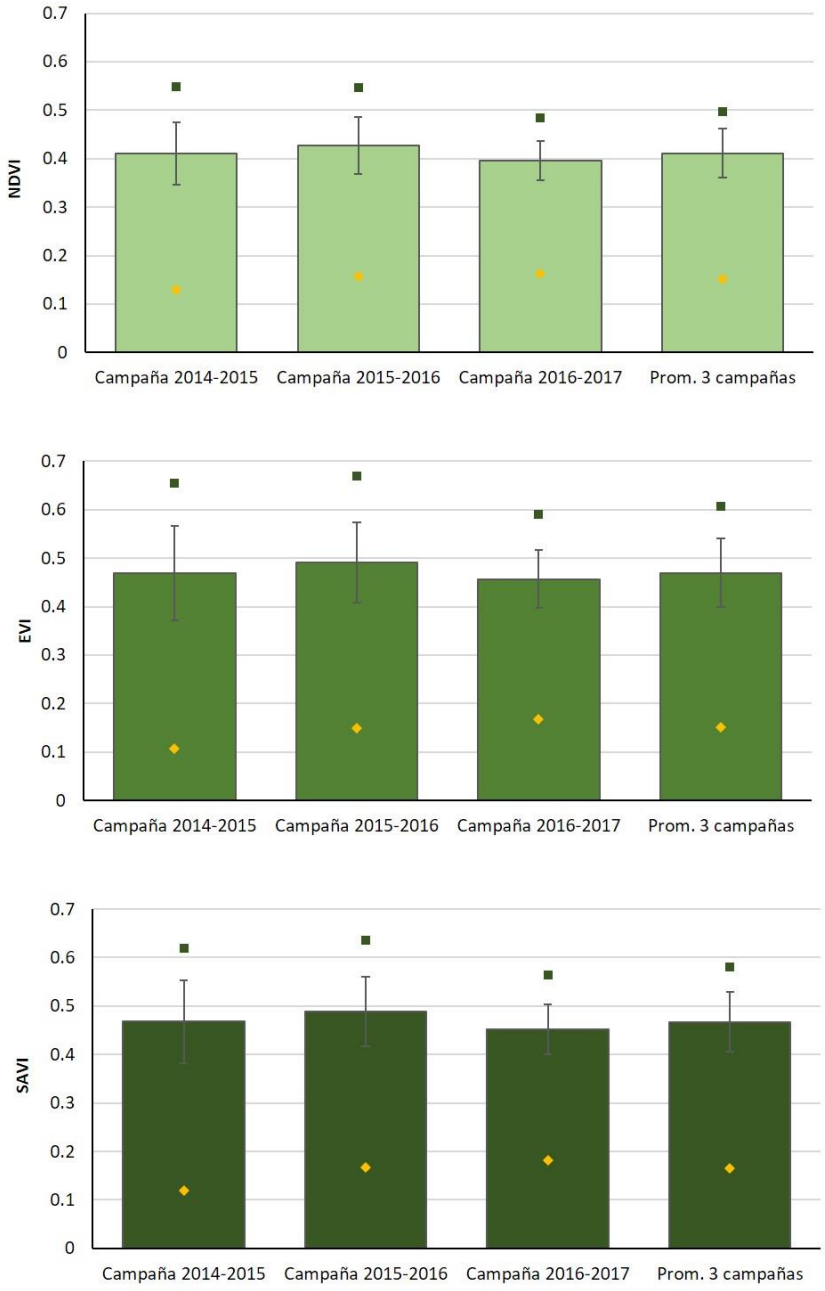

Figura II. 24. NDVI, EVI y SAVI promedio de todos los pivotes bajo estudio, variación, máximo y mínimo de cada una de las campañas analizadas.

Los valores registrados de NDVI, EVI y SAVI de cada uno de los sitios presentaron variaciones, observándose diferencias entre los mismos. Algunos sitios, como el número 2, 6, 8, 12, 14 y 18 se encuentran por debajo de la media general, mientras que otros sitios, como el número 1, 9, 13, 15 y 17 se encuentran por encima de la misma.

Para el NDVI puede observarse un rango de variación de media entre 0,35 (correspondiente al sitio 12) y 0,50 (correspondiente al sitio 13). El valor mínimo de 0,05 se dio en el sitio 15, mientras que el máximo se encontró en el sitio 9 con un valor de 0,67. En relación a EVI, la media varía entre 0,382 (correspondiente al sitio 12) y 0,597 (correspondiente al sitio 13). El valor mínimo de 0,041 se dio en el sitio 16, mientras que el máximo se encontró en el sitio 13, con un valor de 0,762. Finalmente, la media de SAVI varía entre 0,386 (correspondiente al sitio 12) y 0,572 (correspondiente al sitio 13). El valor mínimo de 0,046 se dio en el sitio 15, mientras que el máximo se encontró en el sitio 10, con un valor de 0,703 (Ver Anexo).

Estos resultados, ponen en evidencia las diferencias entre sitios en el desarrollo del cultivo (Fig. II.25).

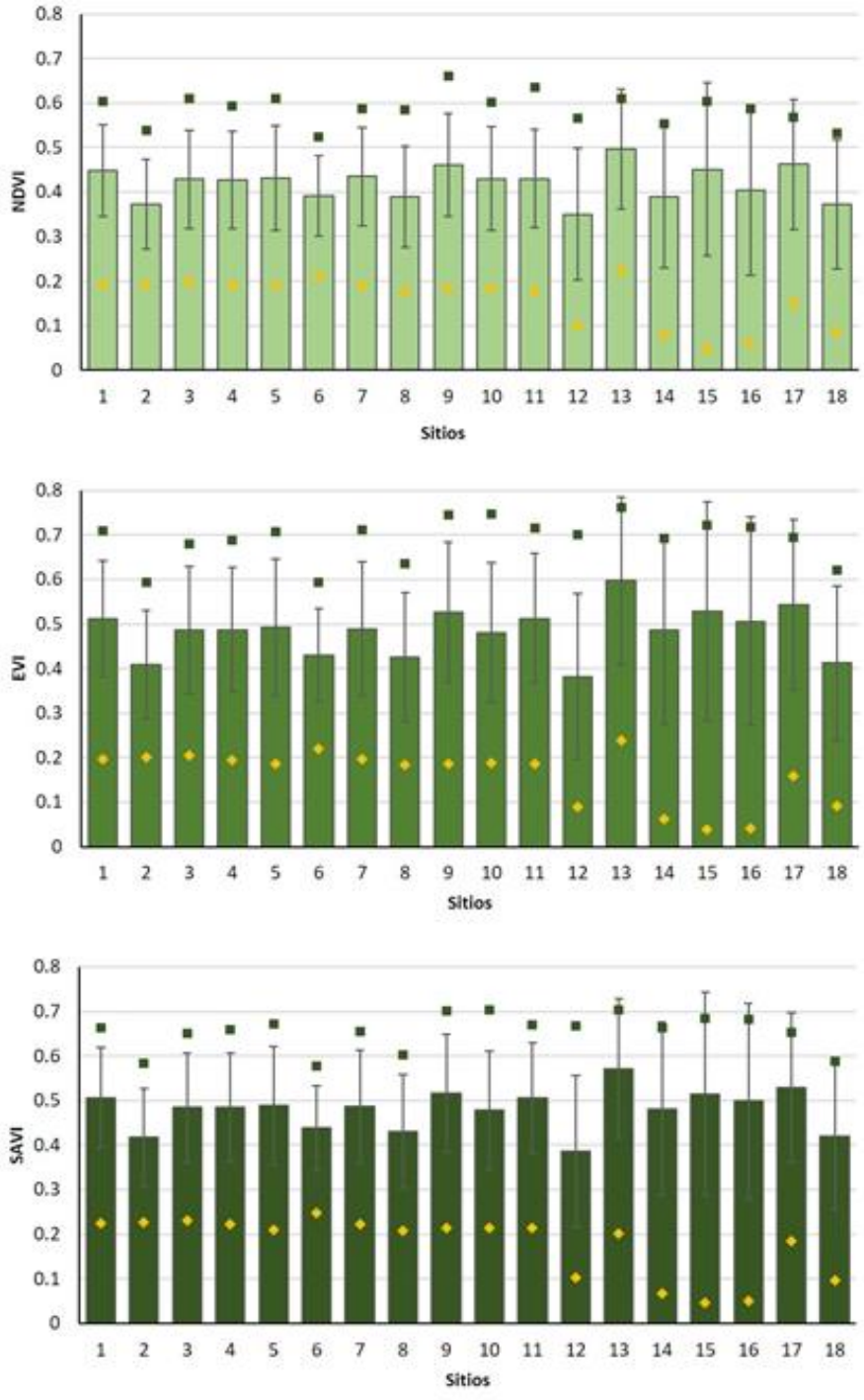

Figura II. 25. Valor de media, máximo, mínimo y desvío estándar del NDVI, EVI y SAVI obtenido a partir de 27 imágenes analizadas desde 2014 a 2017 en cada uno de los sitios de estudio. Las barras indican la media, el punto verde indica el valor máximo, el punto amarillo indica el valor mínimo y la línea sobre las barras marca el desvío estándar.

Aunque, como se ha dicho, el NDVI ha sido uno de los índices más utilizados, está bien documentado el efecto que produce en sus valores la sensibilidad del índice a las distintas proporciones entre vegetación y suelo presentes en el pixel, lo que ha generado un amplio interés en desarrollar otros índices que reduzcan este efecto (Schmidt y Karnieli, 2001; Chuvieco, 2002). Así, Huete (1988) introdujo el SAVI, el cual incluye una constante (L) ajustada al suelo, lo que minimiza el efecto de la reflexión provocada por el suelo. Por su parte, el EVI, agrega a las bandas infrarroja cercana y del rojo, la banda azul, junto con coeficientes de corrección atmosférica y del efecto de suelo desnudo. Este índice es un buen complemento al NDVI, puesto que, si este último es esencialmente sensible a las variaciones de la banda roja, el EVI es más sensible a la banda infrarroja cercana, lo que lo hace diferenciar de mejor forma las variaciones estructurales de la vegetación (Gao et al., 2003).

Respecto al comportamiento de los índices, se puede observar que EVI y SAVI tienen una mayor semejanza entre sí. Si se hace la distinción por cada una de las fechas, en las campañas y también a nivel de sitios, la menor similitud entre los índices se produce con el NDVI. Esta situación parece hacerse más evidente ante valores más elevados de los otros índices. De manera general, las tendencias se mantienen similares para todos los índices estudiados. El EVI y el SAVI parecen ser los índices que demuestran un comportamiento más homogéneo con respecto al NDVI. Esto puede deberse a que las constantes de ajuste, incorporación de otras bandas o parámetros de calibración específicos para ellos, se ajustan adecuadamente a las condiciones locales del área de estudio (Fig II.26).

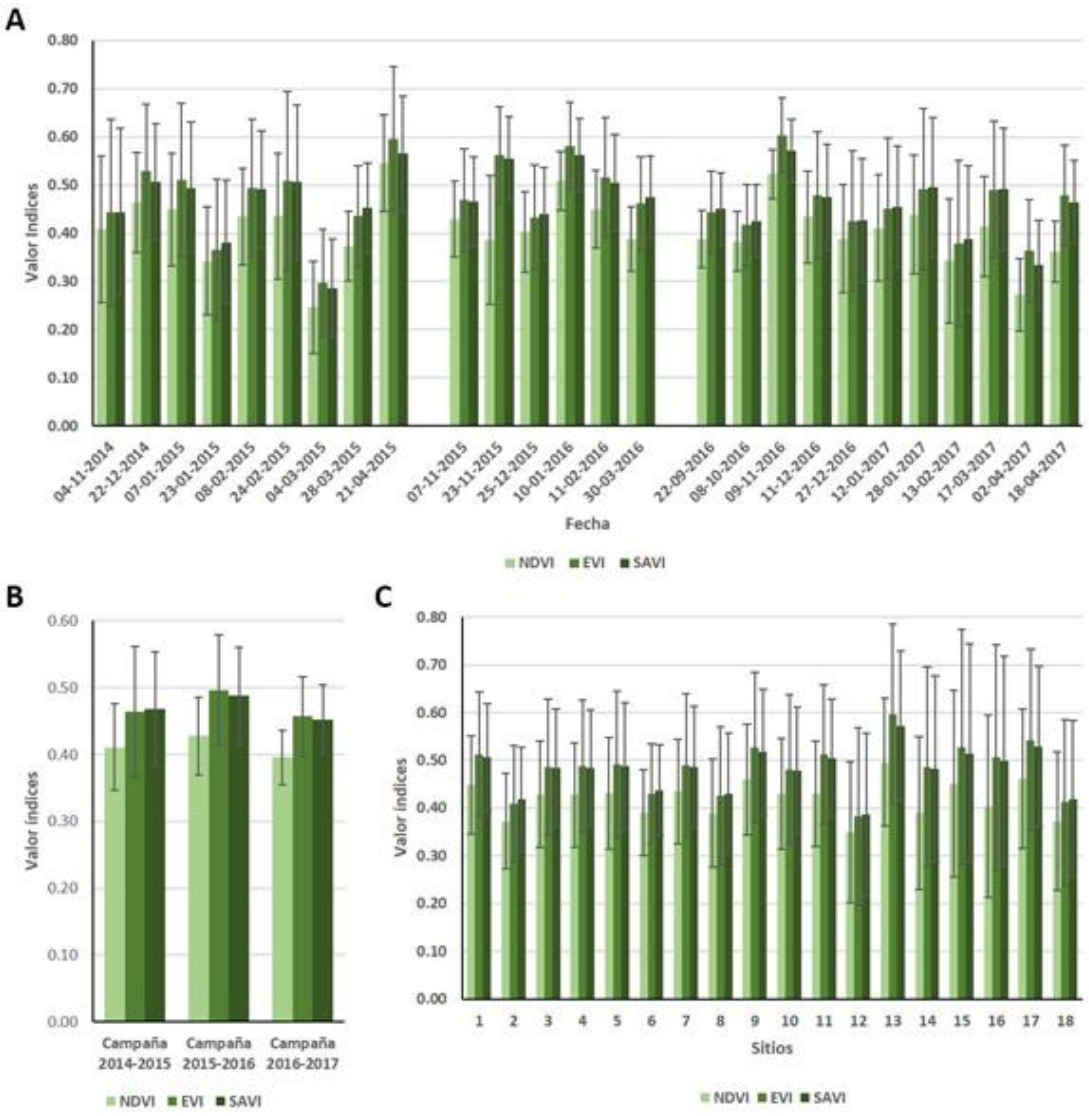

Figura II. 26. Valor de media y desvío estándar del NDVI, EVI y SAVI obtenido a partir de 27 imágenes analizadas desde 2014 a 2017. **A)** Variación del NDVI, EVI y SAVI en cada una de las fechas analizadas. **B)** NDVI, EVI y SAVI de cada una de las campañas analizadas. **C)** NDVI, EVI y SAVI de cada uno de los sitios de estudio. Las barras indican la media y la línea sobre las barras marca el desvío estándar.

Aunque el uso de los índices espectrales, como los indicados, en el estudio de la vegetación, de sus características y de su estado son ampliamente conocidas, tal como señalan Wardlow y Egbert (2010) no existen tantos estudios o publicaciones dedicados a la determinación y evaluación de los resultados que entregan los diferentes índices. Las investigaciones de este tipo realizan comparaciones entre dos o más índices espectrales obtenidos desde imágenes proporcionadas por un mismo sensor y también por sensores diferentes; toman distintas áreas de estudio y comparan el comportamiento de los índices

espectrales entre diversas cubiertas. Conforme con esto, resulta de interés conocer el grado de diferencia y de similitud entre los valores de vigor vegetal que entregan los distintos índices espectrales expuestos (NDVI, EVI y SAVI), determinando las características de sus comportamientos frente al cultivo de alfalfa.

II.4. Conclusiones

En general, los suelos presentan escaso desarrollo y gran variabilidad en la mayoría de las variables analizadas. La profundidad efectiva para exploración de raíces fue limitante en algunos sectores (sitio 3, 5, 12, 14, 16 y 17) por presencia de gravas de diferentes dimensiones, la cual varió entre 30 y 120 cm, También, por las geoformas propias del terreno se presentó variabilidad en la ubicación en el paisaje de los sitios analizados, en bajos y lomas poco pronunciadas (+/- 2 m). Son suelos de permeabilidad moderadamente rápida (bien a excesivamente drenados en superficie).

Respecto a la fertilidad química, es muy escasa, con niveles bajos de contenido de nitrógeno (menos de 0,07 % de nitrógeno total), fósforo (menos de 9 ppm de fósforo disponible) y potasio (menos de 0,75 cmol/kg). Además, presentan bajo contenido de materia orgánica (menos de 0,75 % de MOT) y fuerte reacción de los carbonatos libres en la masa en todo el perfil. Los valores de conductividad eléctrica y pH indican que a partir de los 0,30 m hasta el 1,20 m son suelos salinos-sódicos. Los valores bajos de CIC se corresponden con la escasa materia orgánica de estos suelos y por el bajo contenido de arcillas.

Todas estas variables edáficas de cada uno de los sitios, analizadas de manera conjunta muestran gran heterogeneidad espacial, siendo las que presentaron mayor variabilidad, la textura, pH, CE y la ubicación relativa en el paisaje. Por el contrario, aquellas variables con menor variación corresponden a lo que respecta a fertilidad, como el N, P y MOT. Todas estas variaciones a nivel del suelo antes mencionadas, podría traducirse a niveles del cultivo, impactando en una producción diferencial del mismo.

Conforme al periodo analizado, se obtuvieron 2 ambientes o zonas productivas del cultivo de alfalfa, sitios de alta y baja producción, siendo el umbral de corte 2000 kg/MS. Del mismo modo que la producción expresada en kg/MS, otras variables asociadas al cultivo mostraron diferencias pudiendo establecer 2 categorías, de altura, cobertura vegetal e índice de área foliar.

Los resultados obtenidos en este capítulo destacan la efectividad de la información espectral para seguimiento del cultivo, así como también para detectar zonas productivas diferentes dentro de cada lote. Si bien existen algunas diferencias en los resultados obtenidos de acuerdo con el índice espectral aplicado, en general, los índices presentaron resultados satisfactorios y muy similares dentro de los lotes, ofreciendo mucha información a escala temporal y espacial. La variación espacial en el cultivo se observó claramente a través de diferentes índices, los cuales mostraron una gran heterogeneidad. La información derivada de los índices espectrales ofreció una buena capacidad para discriminar estas zonas, demostrando el potencial y utilidad del uso de estos en agricultura.

Conforme a la metodología utilizada es posible generar estimaciones de IAF y % de cobertura vegetal a través del uso de una cámara digital comercial en cultivos de alfalfa bajo riego. Si bien, existen mayores errores en comparación con cámaras profesionales con lentes para fotos hemisféricas utilizadas en estudios similares (López-Lozano et al., 2009; Verger et al., 2011), sí es posible generar estimaciones de IAF y % de cobertura de forma simple a través de una cámara de uso masivo.

Esta parte del trabajo establece un potencial para la integración de datos de suelo, cultivo e información remota para realizar un seguimiento de la alfalfa. Estos métodos podrían aplicarse dentro de los lotes, otras grandes superficies y múltiples campos para informar decisiones económicamente eficientes con respecto al cultivo. La creciente resolución espectral y temporal, y la disponibilidad de datos espectrales medidos por satélite también facilitan la evaluación del estado de los cultivos en grandes regiones geográficas para informar y tomar decisiones de manejo y gestión. Como la teledetección y las tecnologías de modelado predictivo de cultivos continúan desarrollándose y aplicándose, las eficiencias generales en el uso de los recursos mejorarán las industrias agrícolas para una mayor rentabilidad y resiliencia del sistema.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RELACIONES: VARIABLES EDÁFICAS-RENDIMIENTO DE CULTIVO, ÍNDICE ESPECTRALES-RENDIMIENTO DE CULTIVO, Y DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO

III.1. Introducción

Una gran proporción de la variabilidad del rendimiento de los cultivos puede explicarse por la variabilidad espacial en las propiedades del suelo (Bramley, 2009). La misma puede ser modificada mediante perturbaciones naturales y antropogénicas, especialmente por prácticas agrícolas (Fraterrigo y Rusak, 2008). El material parental y el uso del suelo tienden a ser factores constantes a escala de campo, mientras que las propiedades del suelo afectadas por procesos continuos suelen ser más variables y están básicamente afectadas por la erosión del agua (Van den Bygaart et al., 2012), o por diferencias en la humedad del suelo asociada con la topografía (Peralta et al., 2013).

En este sentido, se ha reportado que la variación espacial, tanto de las características (textura y espesor de horizontes de suelo) como de las propiedades (contenido de nutrientes y disponibilidad de agua), son determinantes de las diferencias en los rendimientos que se observaron en un cultivo para una misma condición de clima (Terra et al., 2006; Gregoret et al., 2006; Wong y Asseng, 2006). Otros autores han observado diferencias en el contenido de nutrientes, en la materia orgánica (Zubillaga et al., 2006a) y en la textura (Di Pietro et al., 1986) dentro del lote, como así también en procesos como la mineralización (Zubillaga et al., 1991; Zubillaga et al., 2005; Zubillaga et al., 2006b; Zubillaga et al., 2009) y retención de agua (Gregoret et al., 2005). Chamran et al., 2002, asociaron estas variaciones de las propiedades físicas y químicas de los suelos con la topografía del terreno.

Es importante cuantificar la variabilidad en las propiedades de los suelos y la topografia, ya que, como mencionó anteriormente, los cultivos responden con diferentes comportamientos en su desarrollo y crecimiento dando lugar a la aplicación de diferentes prácticas de manejo, aún dentro de un mismo lote (Timlin et al., 1998; Miao et al., 2006b).

. El punto de partida para aplicar practicas de manejo diferencial es delimitar zonas homogéneas de producción dentro de los lotes. Estas subregiones constituyen áreas con características similares, tales como textura, topografía, estado hídrico y niveles de nutrientes del suelo (Moral et al., 2010) en las que resulta apropiada una única proporción de insumos (Doerge, 1999), de esta manera se logrará un uso más eficiente de los recursos (Urricariet et al., 2011). Por ello, las propiedades físicas y químicas del suelo y la topografía son frecuentemente utilizadas para delimitar zonas de manejo. Otro parámetro usado frecuentemente para delimitar zonas es la conductividad eléctrica aparente, ya que su

variabilidad es indicadora de la distribución espacial de otras propiedades de suelo (Cicore et al., 2019; Corwin y Lesch, 2010; Moral et al., 2010; Rodríguez-Pérez et al., 2011).

Para la región semiárida pampeana, las propiedades edáficas que más varían espacialmente son la textura, y asociado a ella la capacidad de retención de agua (Fernandez et al., 2008; Pachepsky et al., 2006), afectando de manera directa la productividad de los cultivos, más aún en regiones con limitantes hídricas. La eficiencia de uso de agua de los cultivos en regiones semiáridas es la clave para el diseño de sistemas de producción sustentables (Noellemeyer et al., 2013), y la estrecha relación entre la textura del suelo y la eficiencia de uso de agua (Katerji & Mastrorilli, 2009) predestina a este parámetro como primordial para la definición de zonas de manejo (Gregory et al., 2000). Asi mismo, la topografía también jugaría un rol fundamental en la variabilidad de los rendimientos (Cicore et al., 2017), ya que en general los bajos representan las zonas de alto rendimiento por poseer una mayor retención de agua y de nutrientes (Kumhálová et al., 2011), debido al aporte de materiales por erosión y por escurrimiento. De esta manera, las zonas bajas tienden a tener texturas más finas que las lomas. Sin embargo, surge la necesidad de identificar adecuadamente las características edaficas y topográficas que determinan la variabilidad productiva en los ambientes de la región semiárida.

Si bien el conocimiento de la variabilidad de rendimientos y la caracterización de los factores que la originan dentro de áreas delimitadas por su uniformidad relativa permiten la planificación de estrategias de manejo de los cultivos, las metodologías para la delimitación de las zonas de manejo no han sido consistentes. Entre las metodologías empleadas con mayor frecuencia encontramos los muestreos intensivos y mapas de suelos, fotointerpretación de imágenes satelitales y análisis de índices de imágenes satelitales. Asimismo, el mapeo de la variabilidad del rendimiento es una herramienta útil para que los administradores de fincas comprendan la variabilidad dentro de sus campos y, posteriormente, respalden sus decisiones de manejo (Maughan, 2012).

En línea con lo anterior, una herramienta como la teledetección ha aportado grandes cambios en el sector agrícola, ya que es la columna vertebral de la agricultura de precisión (Anastasiou et al., 2018). En teledetección multiespectral e hiperespectral, las imágenes satelitales juegan un papel importante en el manejo de cultivos; su capacidad para representar el crecimiento de los cultivos a escala espacial y temporal es notable (Awad, 2019).

En la actualidad, se ha adoptado una amplia gama de aplicaciones de teledetección por satélite para diferentes propósitos, como el monitoreo ambiental, la meteorología y la agricultura. Teniendo en cuenta las grandes explotaciones comerciales con grandes superficies, los métodos convencionales de seguimiento del rendimiento pueden resultar ineficaces. Por lo tanto, la aplicación de la teledetección para estimar el rendimiento de los cultivos ha ganado importancia y popularidad debido a las mejoras en la resolución espacial y espectral, y la alta revisión temporal de los satélites usados.

La mayoría de los estudios de investigación dirigidos a la predicción del rendimiento a través de datos de detección remota tienen dos estrategias principales. Una estrategia es involucrar los datos de sensores remotos con modelos fisiológicos y meteorológicos de las plantas para predecir el desarrollo y el rendimiento de los cultivos. La segunda estrategia; sin embargo, se basa en predecir el rendimiento directamente a partir de los datos de RS, que funciona solo si existe una relación directa entre la biomasa u hoja total y el índice de cosecha, como el rendimiento de grano (Ferencz et al., 2004).

El uso de la teledetección para la estimación del rendimiento se basa en las propiedades espectrales de los cultivos, que varían según la etapa de crecimiento, tipo de cultivo y estado sanitario. Durante la década de 1970, campañas de teledetección aerotransportadas se llevaron a cabo para monitorear la vegetación y el rendimiento de los cultivos (Collins, 1978; Tucker, 1979; Tucker y Maxwell, 1976). Estos esfuerzos resultaron en el desarrollo de índices de vegetación, que son funciones de reflectancia espectral de longitudes de onda específicas (registradas por el control remoto sensor). Específicamente, se encuentró que la vegetación es muy reflectante y absorbente en las bandas roja e infrarroja cercana (NIR). Por lo tanto, alguna combinación de estas reflectividades de estas dos bandas será sensible a la dinámica de la vegetación (Sellers, 1987; Tucker, 1979).

Entre estos índices, el NDVI es un buen estimador de productividad, y se usa comúnmente para este propósito (Rouse et al., 1974). Tiene alta correlación con la clorofila foliar, índice de biomasa verde y área foliar (LAI) (Zhang y Guo, 2008; He et al., 2009; Trotter et al., 2010; Dusseux et al., 2015). Sin embargo, en muchos casos, la estimación de la producción de pastos con el NDVI es limitado debido a su saturación a medida que aumenta la biomasa de los pastos (Frield et al., 1994). Flynn et al. (2008) informaron que NDVI solo se puede usar cuando LAI es menor que tres o cuando la fracción de radiación

incidente interceptada es menor de 0,95. Por esta razón, índices de vegetación alternativa han sido desarrollados y evaluados. Trotter et al. (2010) utilizaron el SAVI para estimar la producción de biomasa de un pasto perenne. Este índice tiene la ventaja de aumentar el rango dinámico de la señal de vegetación minimizando aún más la influencia del suelo como información de fondo. Como resultado, tiene mayor sensibilidad a la señal recibida de la vegetación (Qi et al., 1994). Otro, es el EVI, que utiliza un índice optimizado diseñado para mejorar la señal de vegetación con mejoras en la sensibilidad cuando los valores de biomasa son altos (Wang y Li, 2013).

Conocer la productividad de cada uno de los lotes de un establecimiento resulta de gran importancia e interés, así como poder identificar, categorizar y jerarquizar los factores edáficos/topograficos/climáticos que condicionan la productividad observadas entre ellos (caracterizar las variaciones en productividad asociada al ambiente). La relación espacial entre la producción y las propiedades del suelo se ha explorado en diferentes cultivos como mango, maíz y papa (Valbuena et al., 2008; Miao et al., 2006a; Persson et al., 2005), asi como también para cultivos forrajeros (Bélanger et al., 2017; Bernardi et al., 2016; Cicore et al., 2016) lo que ha permitido identificar las variables edáficas que tienen mayor impacto en la producción de cada lote, y a través del análisis espacial se han podido delimitar zonas de manejo diferencial para cada variable. Este método ha mostrado ser amigable con el ambiente puesto que permite optimizar el uso de los insumos (Ritter et al., 2008), y es una de las estrategias básicas para lograr mayor eficiencia en la producción agrícola (Cassel et al., 2000). Asimismo, la teledetección ha tenido un considerable avance en los últimos 30 años para identificar la variabilidad de los cultivos y detectar eventuales problemas de productividad. Sin embrago, la técnica no puede ser utilizada completamente independiente de la información de campo y, de esta forma, ambos procedimientos coexisten, se precisan mutuamente y retroalimentan.

Lo mencionado anteriormente es de relevancia productiva y económica en pasturas de alfalfa (*Medicago sativa* L.) por ser éste el principal recurso forrajero en la cuenca media del Río Colorado.

Los resultados obtenidos en el capítulo anterior, mostraron la variación espacial del cultivo, observada tanto en mediciones de producción a campo como a través de información derivada de los índices espectrales. Además, pudo determinarse una elevada varibilidad de

las propiedades de suelo. Por lo tanto, de acuerdo a los objetivos específicos de esta tesis, los cuales resultan transversales entre sí y mantienen una relación estrecha, se abordarán parcialmente los mismos, resultando para este capítulo el *análisis de las relaciones entre el conjunto de las variables edáficas, producción del cultivo y variables derivadas de satelitales*.

III.2. Materiales y métodos

La metodología utilizada en este capítulo es similar a la implementada en el capítulo 2, por lo cual, a fin de no incurrir en repetición de información, la misma no se incluye en este apartado. Para más detalles de este punto, se recomienda revisar el apartado II.2 del Capítulo 2.

III.2.1. Información y datos de suelo

Los datos de suelos utilizados fueron: textura por el método de la pipeta de Robinson (Boul et al., 1973), densidad aparente por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), constantes hídricas (Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente) por medio de las ollas de Richards (Richards, 1948), pH (dilución 1:2,5), conductividad eléctrica en extracto de pasta de saturación (Rhoades, 1996), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (Sumner y Miller, 1996), sodio y potasio (Helmke et al., 1996), fósforo disponible (Olsen et al., 1954), nitrógeno total (Bremner, 1996) y materia orgánica total (Walkley y Black, 1934).

A partir de las 2 categorias productivas halladas anteriormente (Cap. II) en los sitios analizados, es que se utilizaron para agrupar las variables de suelo, a fin de analizar diferencias en los diferentes grupos productivos en cuanto a las características de suelo analizadas.

Los análisis fueron realizados en los laboratorios de suelos de la Estación Experimental de INTA Anguil "Guillermo Covas" y el Instituto de Suelos de INTA Castelar.

III.2.2. Cultivo de alfalfa

Las campañas en las cuales se estimó la producción del cultivo fueron los años 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017. Dentro de cada campaña se tomaron 3 fechas. El muestreo se

concentró en el final del periodo de crecimiento del cultivo a fin de obtener el valor de máxima producción.

En cuanto a la información del cultivo, solamente se utilizó la estimación de la producción (kg de materia seca por ha -kg MS/ha-). Para la estimación del rendimiento a campo, se cuantificó la producción de materia seca (MS) por corte manual sobre cada sitio de muestreo. Se tomó una muestra de 0,2m x 1m de manera perpendicular a las hileras de siembra. Luego se cortó cuando el cultivo de alfalfa alcanzó el 10 % de floración o cuando los rebrotes de la corona midieron aproximadamente 5 cm. Las muestras se secaron y pesaron expresando su valor en kg MS/ha (Ed. INTA, 2014).

El punto de referencia para establecer los niveles de producción fue la producción promedio de la zona, siendo 2000 kg/ha de promedio por corte, es decir que por debajo del promedio de producción se los clasificó como de baja producción, y aquellos que superaron el promedio se los clasificó como de alta producción.

III.2.3. Datos espectrales

A partir de la información del MDE y los distintos índices espectrales de vegetación (NDVI, EVI y SAVI) se procedió a generar diferentes zonas productivas dentro del área de estudio. Para ello, se utilizó el método de Cuantiles, el cual permite crear zonas en base a un criterio de intervalos regulares de frecuencia (método estadístico).

A partir de la información suministrada, tanto para el MDE y los distintos índices espectrales de vegetación (promedio anual), se procedió a la zonificación del área de estudio (Fig III. I). La característica principal de este método es que define áreas de superficie similar. Es decir, los cuantiles son aquellos valores de la variable (MDE e índices verdes en este caso) que ordenados de menor a mayor dividen a la distribución en partes, de tal manera que cada una de ellas contiene igual proporción de dichos valores. Para dicha zonificación, se analizó el histograma de frecuencias acumuladas de los valores de las variables, lo que condujo a una reclasificación en tres grupos o clases, separados por los cuantiles Q33 y Q66 (Fig. III.1).

Los mapas temáticos más importantes para la representación de la tendencia espacial de una variable, son el mapa de cuantiles y el mapa de la desviación típica (Chasco Yrigoyen, 2003).

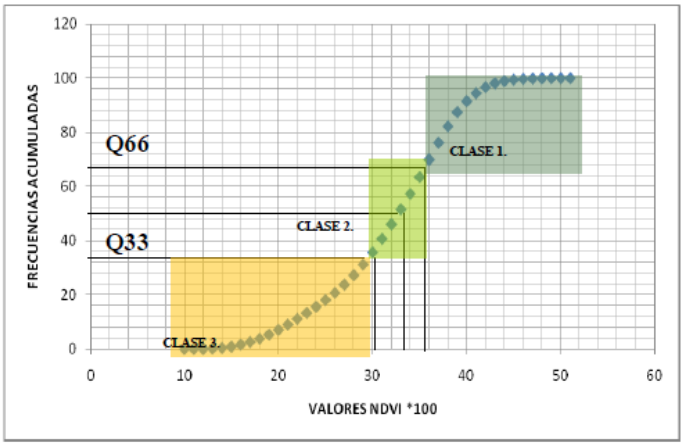

Figura III. 1. Esquema de clasificación en 3 cuantiles mostrado a través del histograma de frecuencias de los valores del NDVI (Imagen a modo de ejemplo). El eje y representa las frecuencias de los valores de NDVI, y el eje x representa los valores del NDVI.

III.2.4. Análisis y estadística

Los análisis de datos de suelo, producción del cultivo, modelo digital de elevación (MDE) e índices espectrales fueron los utilizados en el Capítulo II. Todos los análisis de correlación y regresión entre las variables anteriormente mencionadas se realizaron con el programa InfoStat (Di Renzo, 2011). Los datos resultantes de la información satelital, MDE y de los 3 índices verdes (NDVI, EVI y SAVI) de cada pixel en las 17 fechas, y todos los geoprocesos implicados en la delimitación de zonas de manejo se procesaron con el software libre Quantum GIS 3.8.

III.3. Resultados y discusión

III.3.1. Relaciones entre producción (kg MS/ha) y las variables edáficas

De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo 2 se identificaron sitios con 2 niveles de producción, alta y baja (Fig. II.19). A partir de estas clases, el análisis de comparación de medias (promedio de los 3 años de campaña) de rendimiento arrojó diferencias significativas ($p < 0,0001$) entre los grupos de producción, donde la media para "baja producción" fue de 1458,08 Kg Ms/ha y de 2603,62 Kg MS/ha para "alta producción".

III.3.1.1. Análisis Físicos

De acuerdo al análisis de datos de la textura del suelo, no se hallaron diferencias estadísticas entre ambos grupos ($p > 0,05$). Sin embargo, más allá del análisis anterior, se observó que los sitios considerados como de baja producción presentaron mayor contenido de arena hasta los 90 cm de profundidad respecto al grupo de sitios clasificados como de alta producción. Para ambos grupos, el contenido de arena varía con la profundidad y oscilan entre un mínimo promedio de 59 % y un máximo promedio de 70 % para sitios de alta producción, y un mínimo promedio de 66% y máximo promedio de 75 % para sitios de baja producción. En tanto que, en ambos grupos, el mayor contenido de arena se encuentra en superficie (0-30cm) (Fig. III.2.A).

Los suelos de los sitios de alta producción presentan mayores contenidos de arcilla + limo en todo el perfil estudiado respecto al grupo de sitios de baja producción. Para ambos grupos, los porcentajes del contenido de arcilla +limo varían con la profundidad y oscilan entre un mínimo promedio de 30 % y un máximo promedio de 41 % para sitios de alta producción, y un mínimo promedio de 25 % y máximo promedio de 34 % para sitios de baja producción. En ambos grupos, el mayor contenido de arcilla + limo se encuentran en las capas medias (Fig. III.2.B).

Se observaron diferencias en las variables, las cuales pueden manifestarse en la capacidad para retener agua y aire, porosidad y velocidad de infiltración del agua, ya que las mismas están ligadas a la textura del suelo (FAO, 2009). El grupo de sitios de baja producción, con mayor predominio de arena, posee poros de mayor tamaño, menor capacidad de retención de agua, permeabilidad excesiva, poca cohesión y plasticidad, además de limitadas reservas de nutrientes. En cambio, el grupo de alta producción, con menor contenido de arena, retiene más humedad y es menos permeable.

Los resultados obtenidos para la variable Da fueron analizados en cuanto a su comportamiento en profundidad en ambos grupos de producción. Se observa muy poca variación de la Da en profundidad, con valores que van de 1,40 g/cm^3 a 1,44 g/cm^3 en sitios de alta producción, y de 1,40 g/cm^3 a 1,46 g/cm^3 en sitios de baja producción (Fig. III.2.C).

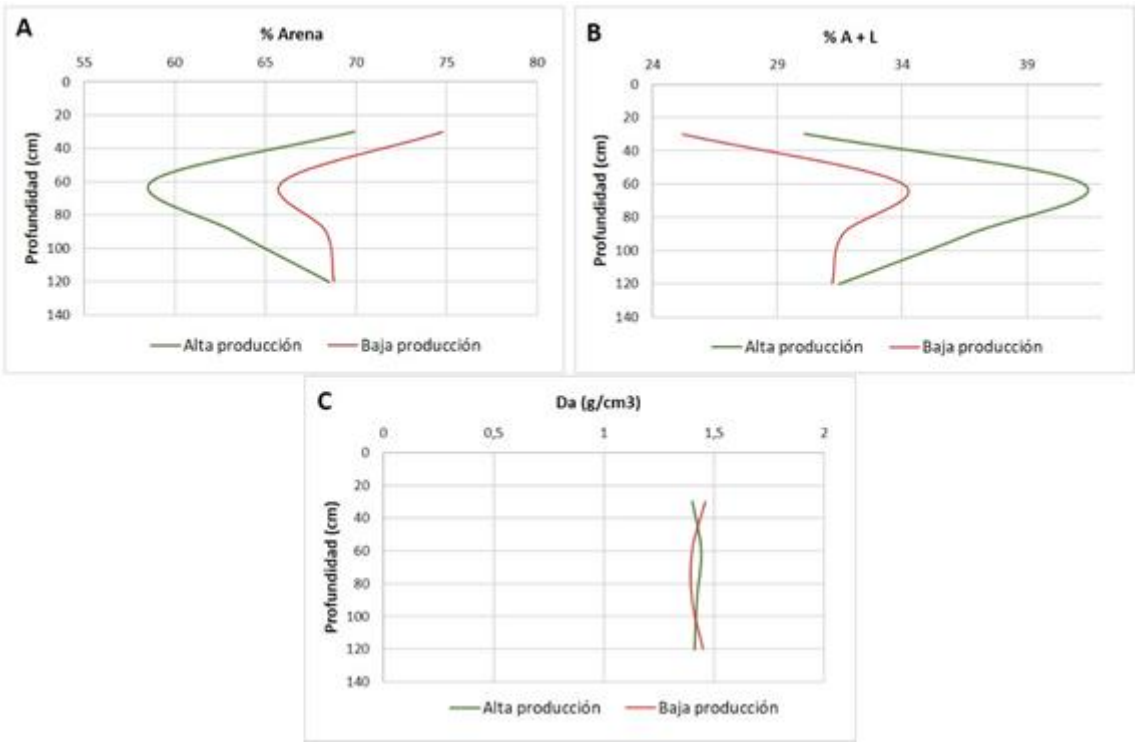

Figura III. 2. Variación del contenido en % arena (A), % A+L (B) y Da (C) con la profundidad en sitios de alta y baja producción.

En cuanto a las variaciones de las constantes hídricas, tanto para la capacidad de campo (CC) como el punto de marchitez permanente (PMP) se observan valores más elevados en todo el perfil para los sitios de alta producción (Fig. III.3.A y III.3.B). Los mayores valores en ambos grupos se observan entre los 30 y 60 cm de profundidad para las 2 variables analizadas, 14% y 19% en CC (Fig. III.3.A), y 8 % y 11 % en PMP (Fig. III.3.B). para sitios de baja y alta producción, respectivamente.

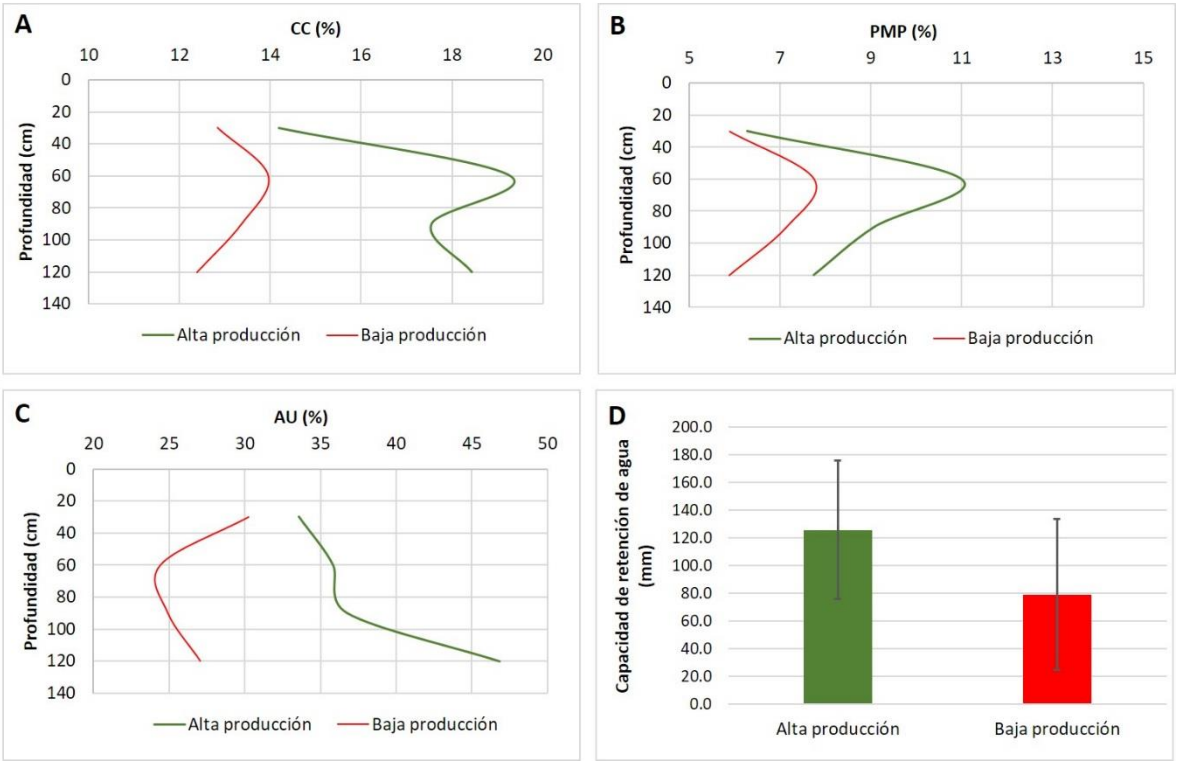

Figura III. 3. A. Variación de capacidad de campo (CC), **B.** Punto de marchitez permanente (PMP) y **C.** Agua útil (AU) en función de la profundidad (120 cm) para los sitios de alta y baja producción. **D.** Capacidad de almacenamiento de agua (mm) para los sitios de alta y baja producción.

La cantidad de riego tiene un efecto significativo sobre el rendimiento del cultivo de alfalfa (Li et al., 2017; Cavero et al., 2017) y en otros estudios similares en donde se evaluó el rendimiento en función de la cantidad de riego (Ismail et al., 2013, Li et al., 2015). En esta Tesis, el riego es similar en todo el pivote, y por lo tanto en todos los sitios de estudio, las constantes hídricas propias de cada sitio definen su capacidad de retención y aprovechamiento del agua del suelo, estando en relación estrecha con la textura de los mismos, y en el cual se observan las diferencias.

Los contenidos medios de AU registrados fueron mayores en los sitios de alta producción que en los de baja producción, lo cual valida la relación positiva entre la producción y el agua disponible en el suelo (Fig. III.3.C). Se observa, además, que si bien existen diferencias numéricas en el contenido de almacenamiento de agua entre zonas de alta y baja producción, la variabilidad dentro de la zona es alta (Fig. III.3.D).

Si bien el cultivo de alfalfa puede extraer agua por debajo de 1,2 metros de profundidad (Dardanelli et al., 1997), muchos trabajos han encontrado que bajo riego la mayor parte del agua se toma de los perfiles de suelo menos profundos (Kipnist et al., 1989; Sheaffer et al., 1988), e incluso otros autores, en alfalfa, no han encontrado respuesta al riego a mayores profundidades (Geerts y Raes, 2009; Montazar y Sadeghi, 2008).

La respuesta del rendimiento de alfalfa bajo riego está relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo y con el desarrollo de las raíces (Bai y Li, 2003; Lindenmayer et al., 2011), y en nuestro estudio consideramos que estos factores son aquellos que influyen en las diferencias encontradas en los grupos de alta y baja producción. De acuerdo a los valores observados de capacidad de almacenamiento de agua, el cultivo no estaría expresando todo su potencial de rendimiento, principalmente debido a un riego deficiente (escasa lámina de agua aplicada).

Los perfiles evaluados como de alta producción, generalmente, se ubican en posiciones bajas del paisaje, y prácticamente no poseen restricciones para la exploración de las raíces hasta 1,2 m de profundidad (12,5 % de los sitios poseen limitaciones físicas en el perfil). En cambio, los perfiles de baja producción se encuentran en zonas altas del paisaje y presentan restricciones de profundidad variable (50 % de los sitios poseen limitaciones físicas en el perfil por presencia de gravas y/o rodados) (Fig. III.4).

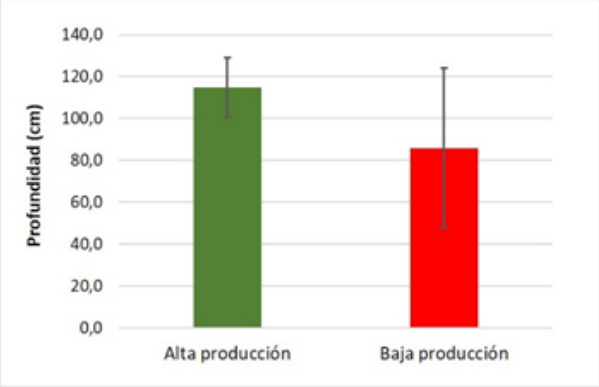

Figura III. 4. Variación de la profundidad del perfil en sitios de alta y baja producción.

III.3.1.2. Análisis Químicos

En los primeros estratos de suelo se encuentran valores similares de pH, los mismos resultaron entre 8 y 8,1 en la capa más superficial, y entre 8,1 y 8,2 desde los 30 a 60 cm. A medida que aumenta la profundidad, aparecen diferencias más notables entre los distintos

grupos. Aunque el valor de pH en ambos grupos es de carácter básico, se observa que los perfiles de sitios de alta producción registran valores menores de pH (Fig. III.5.A). De acuerdo a los resultados anteriormente mencionados, ante elevados valores de pH, la disponibilidad de la mayor parte de los nutrientes baja, por lo cual estaría condicionando el rendimiento y la salud de la alfalfa, debido a su impacto en la dinámica de los nutrientes (fundamentalmente, en el calcio y el fósforo) y al determinar la viabilidad de la nodulación (Duarte, 2007).

Los valores de CE en los sitios de alta y baja producción presentan menor contenido de sales en las capas más superficiales. Los valores promedios arrojados fueron de 1,3 y 2,1 dS/m para los grupos de alta y baja producción respectivamente. El contenido promedio de sales aumenta en profundidad. En este último aspecto se registra la mayor diferencia entre los grupos de producción siendo, 4,8 dS/m en grupos de alta producción y 7,6 dS/m en grupos de baja producción (Fig. III.5.B). El exceso de sales en el suelo, afecta principalmente a la capacidad de producción vegetal, ya que al aumentar el potencial osmótico del suelo y somete a la planta a una sequía fisiológica al retener el agua y no dejarla disponible para el cultivo, esto quiere decir, que cuánto más sales estén en la solución del suelo, menos agua tendrán disponible. Kovda (1973), Maas y Hoffman (1977) y Doorenbos y Kassam (1979) consideraron al cultivo de alfalfa como moderadamente sensible a la salinidad del suelo expresada por CE, la cual incluye el complejo total de sales disueltas en la solución del suelo. De acuerdo a lo anterior, indicaría que la reducción de rendimiento en relación con la CE, es de 0 % para valores menores que 2 dS/m y hasta de 25 % para valores de 5,4 dS/m, por lo que gran parte de la zona bajo riego de 25 de mayo podría verse afectada con reducciones de rendimiento potencial de acuerdo a los valores de CE encontrados en esta Tesis. No obstante, en este trabajo la producción de MS es aceptable con valores superiores a los 2 dS/m de CE propuestos por Maas (1987). Del mismo modo, investigaciones recientes han puesto en evidencia que la alfalfa es más tolerante a la salinidad de lo reportado hasta el momento y diversos estudios lo confirman (Cornacchione y Suarez, 2015, 2017; Putnam et al., 2017; Díaz et al., 2018). Según Lus (2015), en el cultivo de alfalfa, una CE de 6 dS/m implica una reducción del 25 % en el rendimiento potencial, siendo del 50 % para 8 dS/m y prácticamente nula la posibilidad de producción para valores superiores a 10 dS/m. Desde que el grado de salinización del suelo es variable, dependiendo de la disponibilidad de agua y manejo (Prieto

et al., 2008), también lo es la producción de biomasa de alfalfa y su persistencia (Cornacchione, 2015).

Para ambos grupos de producción, el patrón de distribución en profundidad del contenido de Nai es similar. De esta manera, los menores contenidos se registraron en superficie, aumentando a mayores profundidades. En general, los sitios de baja producción registraron valores más elevados de Nai en todo el perfil. Al analizar los niveles de Nai en superficie se pudieron observar diferencias de 1 meq/100g en sitios de baja producción contra 0,56 meq/100g en sitios de alta producción. Luego, en la zona media los valores son similares en ambos grupos, cercanos a 2 meq/100g. Por último, en profundidades mayores las diferencias vuelven a observarse con valores de entre 2,5-2,8 meq/100g en sitios de baja producción y 2-2,5 meq/100g en sitios de alta producción (Fig. III.5.C). En general, los suelos con alto contenido de Na están sujetos a la pérdida de estructura edáfica severa en condiciones de alto pH, presentando exceso de Na intercambiable y baja concentración de electrolitos con arcillas que tienden a dispersarse. El nivel crítico de Na intercambiable que separa suelos con tendencia a la dispersión no está aún bien precisado y depende del tipo de suelo (Shainberg & Letely, 1984). Un suelo se considera sódico desde el punto de vista taxonómico (Soil Survey Staff, 2003) cuando el porcentaje de Na intercambiable (PSI) es superior al 15% respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), que en nuestro caso se observó principalmente en el perfil de los sitios de baja producción a partir de los 60 cm, y en los sitios de alta producción, valores por encima del 15 % de PSI se observó a partir del metro de profundidad. Sin embargo, menores umbrales de sodicidad, como por ejemplo 6 % de PSI, son citados como umbrales para suelos australianos (Rengasamy, 1997), como así también, para la región de Villa María y Río Cuarto, Pcia. de Córdoba (Milán et al., 2016). Este umbral más bajo se debe a la menor cantidad de sales solubles en algunos suelos que conducen a un menor estado de floculación (Northcote y Skene, 1972) o a un efecto de mayor dispersión en suelos de baja estabilidad estructural (Milán et al., 2016).

En cuanto a la CIC, en todos los perfiles estudiados los sitios de alta producción presentaron mayores valores. De 30 a 60 cm es donde se encuentra la mayor acumulación de arcillas, observándose los mayores valores de CIC para sitios de baja producción (13,8 meq/100g) y alta producción (16,4 meq/100g). A medida que se avanza en profundidad los

valores de CIC disminuyen, registrando valores de 10 meq/100g en ambos grupos (Fig. III.5.D).

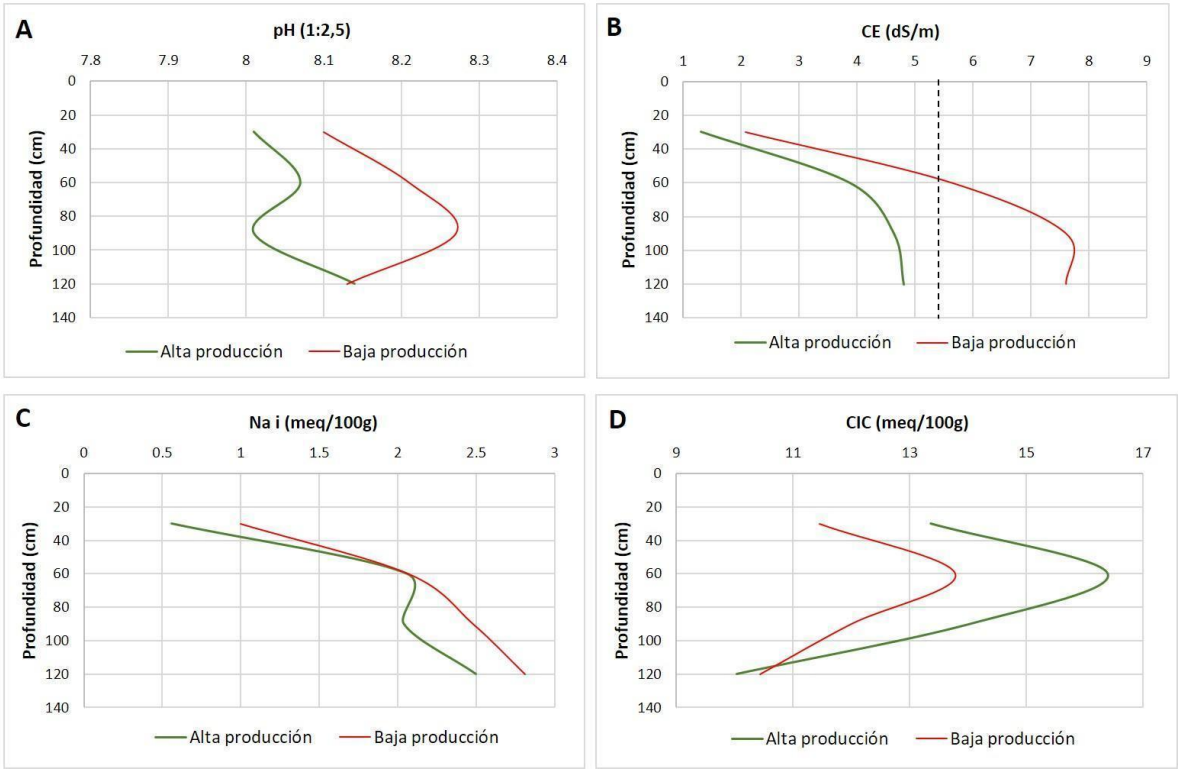

Figura III. 5. Variación del pH (**A**), CE (**B**), Na_i (**C**) y CIC (**D**) con la profundidad en sitios de alta y baja producción.

Los valores de Nt (%) obtenidos a diferente profundidad, muestran que en sitios de alta producción son ligeramente mayores en todo el perfil, respecto a los sitios de baja producción. En los primeros 60 cm del perfil, la diferencia entre los 2 grupos es mayor, y luego a profundidad los valores resultan similares, esto indica un patrón de variación semejante en ambos grupos de producción (Fig. III.6.A).

Los resultados de P disponible (ppm) con la profundidad muestran el bajo contenido que se encuentra en los suelos de esta región con poca variación en profundidad entre los 2 grupos estudiados. Los valores más altos se dan en superficie, oscilando entre 8,3 y 9,2 ppm y disminuyen en profundidad, encontrándose valores de 5,5 a 7,7 ppm (Fig. III.6.B).

Al analizar los niveles de Ki en los diferentes perfiles, se pudo observar mayor variación entre los sitios de baja y alta producción en las capas más superficiales, en donde los grupos de suelos presentan contenidos diferentes de potasio con una separación clara entre ambos, siendo similares en profundidad. Por otra parte, los valores más elevados de los 2 grupos se dan en las capas de profundidad media, los mismos oscilan entre 0,54 y 0,87 meq/100g, para el grupo de baja producción y alta producción, respectivamente. En profundidad, los contenidos de Ki disminuyen en ambos grupos (Fig. III.6.C).

Los resultados analíticos obtenidos correspondientes al contenido de MOt de los suelos estudiados muestran que en la capa superficial y subsuperficial, el perfil de sitios de alta producción es el que presenta mayores contenidos (0,93 % y 0,92 %). A su vez, la variación del contenido de MOt (%) con la profundidad presenta un patrón similar en ambos grupos, y a partir del metro de profundidad los grupos presentan contenidos similares (Fig. III.6.D).

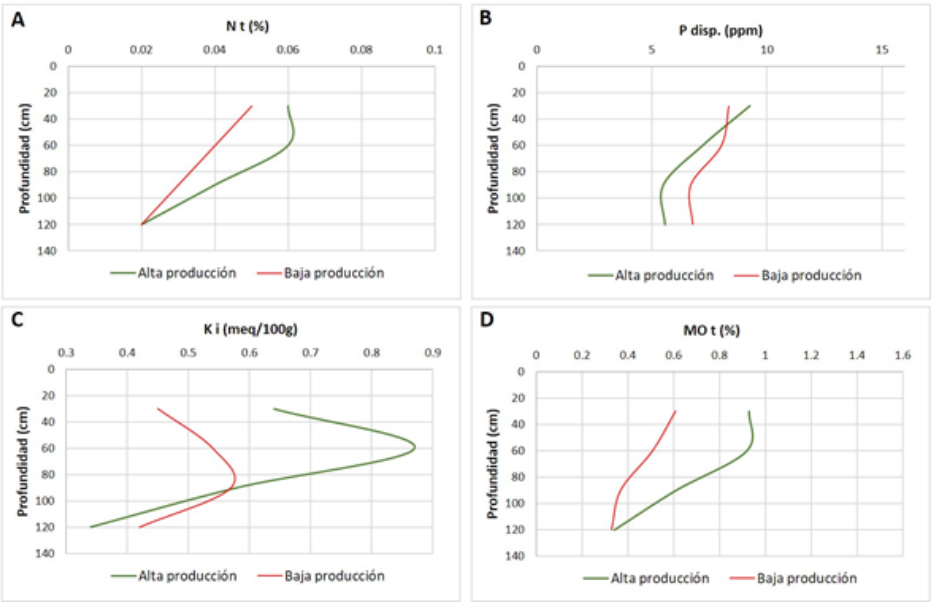

Figura III. 6. Contenido promedio de N t (A), P disp. (B), K i (C) y MO t (D) conforme a profundidad (0-120 cm) en sitios de alta y baja producción de alfalfa.

Los suelos bajo estudio poseen bajos contenidos de nutrientes, lo cual sería el factor determinante de la producción de materia seca. Sin embargo, esto expone la necesidad de fertilización con los principales nutrientes para poder obtener una producción aceptable de alfalfa en términos económicos y técnicos. Los valores hallados en esta Tesis, tal como se

indicó oportunamente denotan un escaso contenido de MO y muy baja fertilidad conforme de acuerdo a los contenidos de N y P principalmente, lo cual coincide con la bibliografía (Panigatti, 2010). Los nutrientes provistos por el suelo, la fertilización y otros procesos biológicos tienen un papel preponderante en la determinación del destino productivo de una pastura. Del total de nutrientes consumidos por la alfalfa, el N, el P y, con menor frecuencia, el azufre y el boro son los elementos que usualmente (en ausencia de restricciones hídricas severas) limitan su producción (Barrigi et al., 1975; Darwich, 1992). En consecuencia, una estrategia eficiente en el manejo nutricional de esta especie debe contemplar, siempre que fuere necesario, una adecuada fertilización (Quintero et al., 1999; Melgar et al, 2000). Se estudiaron las relaciones entre las variables estudiadas y la producción promedio de materia seca (kg/ha) medida a campo de los sitios agrupados en alta y baja producción.

En la Tabla III.2 se muestran las correlaciones (Pearson) entre las variables edáficas y la producción promedio de sitios con alta producción estimada a campo que mostraron una correlación significativa. En la profundidad de 0-30 cm, el % Arena y la CE mostraron una correlación negativa significativa. Esto expone que ambas variables van a condicionar fuertemente la producción de MS. Para la profundidad de 60-90 cm, la CIC fue la variable que presentó correlación con los sitios de alta producción, es decir que a esta profundidad la producción está influenciada por la fertilidad natural del suelo en mayor medida que por el contenido de sales y clase textural como ocurre a una profundidad menor.

Tabla III. 1. Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables edáficas particionado por profundidad y la producción promedio (kg/ha) de los sitios clasificados como de **alta producción**. Alfa: 0,05.

Profundidad	Variable	r	p-valor
0-30cm	% A+L	0,75	0,03
	% Arena	-0,75	0,03
	CE	-0,76	0,03
60-90cm	CIC	0,77	0,02

La Tabla III.3 muestra las correlaciones (Pearson) entre las variables edáficas y la producción promedio de las 3 campañas de sitios con baja producción estimada a campo. En general, para las 3 profundidades analizadas las variables CE, Na, AU y CC mostraron una correlación negativa significativa. Estos resultados indican que estos parámetros son los que

condicionan la producción en estos sitios, por lo cual es fundamental prestar atención en los planes de manejo de suelos para poder lograr una producción acorde a la inversión realizada. En estos sitios, la baja producción de MS responde a la influencia "negativa" del contenido de CE, Na, AU en todo el perfil. Por ello, es importante la evaluación de la factibilidad técnica y económica de realizar cultivos de alto costo como es el de alfalfa en sitios con estas características que conducen a una baja producción de MS.

Tabla III. 2. Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables edáficas particionado por profundidad y la producción promedio (kg/ha) de los sitios clasificados como de **baja producción**. Alfa: 0,05.

Profundidad	Variable	r	p-valor
0-30cm	CE	-0,72	0,02
	Na	-0,67	0,03
	AU	-0,63	0,05
	CC	-0,64	0,04
30-60cm	CE	-0,83	0,01
	Na	-0,70	0,05
	AU	-0,73	0,04
60-90cm	CE	-0,76	0,03
	Na	-0,72	0,04
	AU	-0,78	0,02

En la tabla III.4 se muestran las medidas resumen de las variables edáficas analizadas sobre sitios clasificados como de alta y baja producción del cultivo de alfalfa a diferentes profundidades. Los suelos descritos como de alta producción se ubican en las posiciones bajas del paisaje (asociadas al drenaje y flujos de escurrimiento natural), generalmente sin limitación para la exploración de las raíces por presencia de gravas hasta el metro de profundidad. Los perfiles de este tipo de suelos poseen un desarrollo incipiente, de permeabilidad moderadamente rápida, y en función del drenaje se clasifican como bien drenados a excesivamente drenados. Se caracterizan por un bajo contenido de materia orgánica (menos del 1 %) y fuerte reacción de los carbonatos libres en la masa. En superficie, los suelos son no salino-no sódico y de textura franca, mientras que en profundidad son arenosos y a partir de los 60 cm de profundidad son salinos-sódicos.

Los perfiles evaluados como de baja producción poseen un incipiente desarrollo y se distribuyen en las posiciones altas del paisaje, generalmente poseen restricciones para la

exploración de las raíces de profundidades variables (en algunos casos con gran presencia de gravas en superficie y a partir de los 30cm). Los suelos son clasificados, generalmente como excesivamente drenado y con permeabilidad rápida a muy rápida. En superficie poseen textura franco-arenosa y areno-franca en profundidad. Por otra parte, la mayoría de los suelos de estos sitios, no son salino ni sódicos en superficie, mientras que en profundidad (a partir de los 30 cm) son salinos-sódicos.

Tabla III. 3. Valores medios de las variables edáficas analizadas en sitios de alta y baja producción. Variables: % arcilla, % limo, % arena, % arcilla + limo (A+L), densidad aparente (DA), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), pH, conductividad eléctrica (CE), complejo de intercambio catiónico (CIC), Na, K, P disponible en ppm, % nitrógeno total (N total) y % materia orgánica total (MOT).

		Alta producción	*Baja producción*		*Alta producción*	*Baja producción*
Variable	**Prof. (cm)**	**Media**	**Media**	**Prof. (cm)**	**Media**	**Media**
% arcilla	0 - 30	10.96	9.54	60 - 90	11.70	12.16
% limo		19.13	15.67		25.02	19.48
% arena		69.91	74.79		63.30	68.36
% A+L		30.09	25.21		36.72	31.64
pH (1:2,5)		8.01	8.10		8.01	8.27
CE (dS/m)		1.30	2.08		4.64	7.60
CIC (meq/100g)		13.36	11.45		14.04	11.99
Na i (meq/100g)		0.56	1.00		2.04	2.48
PSI		4.04	7.73		14.71	23.58
K i (meq/100g)		0.64	0.45		0.58	0.57
P disp. (ppm)		9.25	8.35		5.49	6.69
N t (%)		0.06	0.05		0.04	0.03
MO t (%)		0.93	0.61		0.61	0.37
Da (g/cm^3)		1.40	1.46		1.42	1.40
CC (%)		14.18	12.83		17.55	13.36
PMP (%)		6.28	5.89		9.07	7.14
% arcilla	30 - 60	12.70	13.24	90 - 120	9.33	12.02
% limo		28.58	20.80		22.15	19.20
% arena		58.72	65.96		68.52	68.79
% A+L		41.28	34.04		31.48	31.21
pH (1:2,5)		8.07	8.21		8.14	8.13
CE (dS/m)		3.87	5.63		4.81	7.60
CIC (meq/100g)		16.39	13.78		10.04	10.43
Na i (meq/100g)		2.06	2.07		2.50	2.81
PSI		12.24	14.64		21.57	24.18
K i (meq/100g)		0.87	0.54		0.34	0.42
P disp. (ppm)		7.20	8.03		5.56	6.77
N t (%)		0.06	0.04		0.02	0.02
MO t (%)		0.92	0.51		0.34	0.33
Da (g/cm^3)		1.44	1.40		1.41	1.45
CC (%)		19.29	13.95		18.44	12.38
PMP (%)		10.99	7.76		7.74	5.88

III.3.2. Información derivada de sensores remotos (Modelo Digital de elevación e Índices Espectrales) y su relación con la producción (kg MS/ha)

Los MDE y la producción promedio (kg MS/ha) de las 3 campañas de cada uno de los sitios se correlacionaron de manera significativa (r=-0,56 p=0,016). El modelo de regresión lineal entre producción en todas las temporadas y MDE fue significativo y su pendiente fue negativa (R^2=0,31 p=0,016). Esto estaría indicando, que a medida que aumenta la altura en el terreno, disminuye la producción del cultivo (Fig. III.7). Esto está íntimamente relacionado con la profundidad efectiva que tienen las raíces para explorar, la cual al disminuir condiciona la producción de la pastura de alfalfa (Fig III.4). Por lo tanto, el MDE podría ser de utilidad para delimitar las zonas más productivas de las menos productivas y de esa manera obtener mayor rédito económico y sin duda hacer un mejor uso de los recursos involucrados como agua de riego, suelo, semillas, fertilizantes, etc.

La mayor variabilidad se registró para niveles de producción entre 1500-2000 kg MS/ha mientras que la menor variabilidad se observó para las producciones extremas, asociadas a los sitios de alta y baja producción (Fig. III.7). Un aspecto fundamental que favorece a la alta variabilidad de los resultados hallados es el número de muestras recolectadas en un ambiente con alta variabilidad intrínseca, fundamentalmente asociada al suelo. Sin embargo, y más allá de lo expresado previamente, hay que recalcar que se priorizó la especificidad de realizar muestreos en sitios determinados en detrimento de un incremento del n.

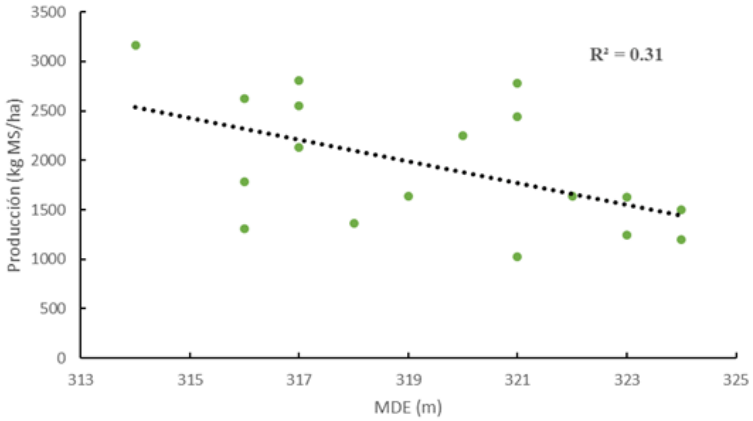

Figura III. 7. Relación entre el MDE (m) y la producción (kg MS/ha) para los 18 sitios muestreados en lotes de alfalfa bajo riego por pivote.

A partir del MDE se realizó una clasificación de las alturas en 3 clases (zona baja, zona media y zona alta) como posición relativa del paisaje. La zona baja quedó definida con alturas menores de 317 m, la zona media con alturas entre los 317 y 321 m, y finalmente la zona alta abarca valores mayores a los 321 m de altura (Fig. III.8).

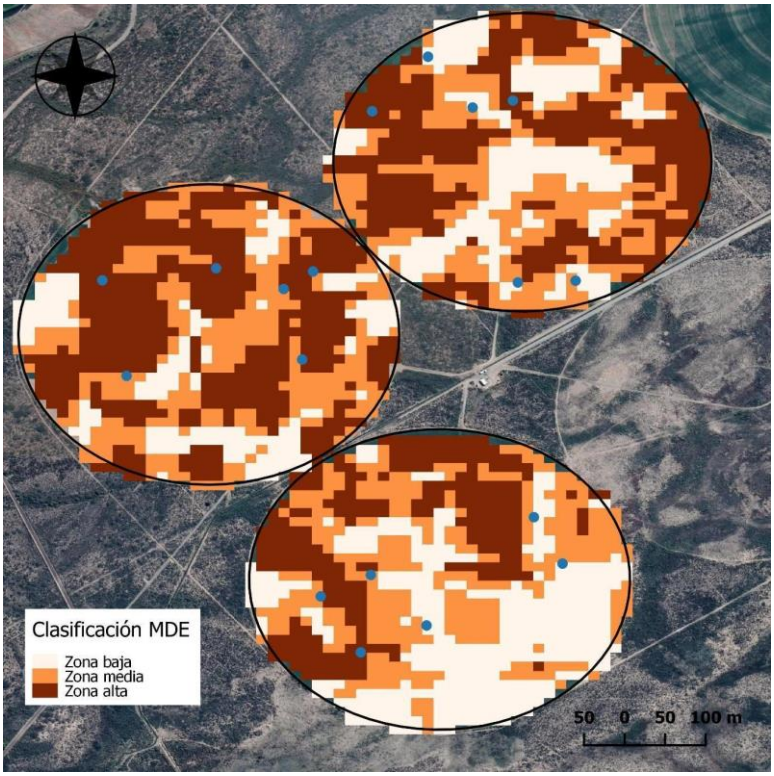

Figura III. 8. Ubicación de los sitios de muestreo sobre la clasificación del MDE para cada uno de los pivotes bajo estudio.

En resumen, la biomasa acumulada en los sitios de baja producción correlacionó de manera negativa con la CE, Na y AU en los 90 cm del perfil (Tabla III.3) y se corresponden con los sitios ubicados a mayores alturas relativas del paisaje (Fig. III.8). De manera contraria, los sitios de alta producción se encuentran en las zonas de menores alturas relativas del paisaje (Fig. III.7). En estos sitios de alta producción se correlaciona de manera positiva con la arcilla+limo y negativamente con la arena y CE en los primeros 30 cm del perfil (Tabla III.2).

Las siguientes imágenes de NDVI (Figura III.10. A-D), EVI (Figura III.11. A-D) y SAVI (Figura III.12. A-D) representan el promedio para cada una de las campañas, integrando así la totalidad de las imágenes de la campaña correspondiente.

De manera visual se observa un amplio rango de variación de los 3 índices espectrales en cada uno de los pivotes y en cada una de las campañas estudiadas (NDVI 0,13 a 0,55; EVI

0,11 a 0,67 y SAVI 0,12 a 0,64). Espacialmente, las diferencias más notorias se hacen evidentes sobre los bordes de cada pivote respecto de las zonas más internas. Si bien las diferencias intra pivote se manifiestan de manera clara, los patrones de distribución espacial dentro de cada uno de los pivotes se mantienen de una campaña a otra.

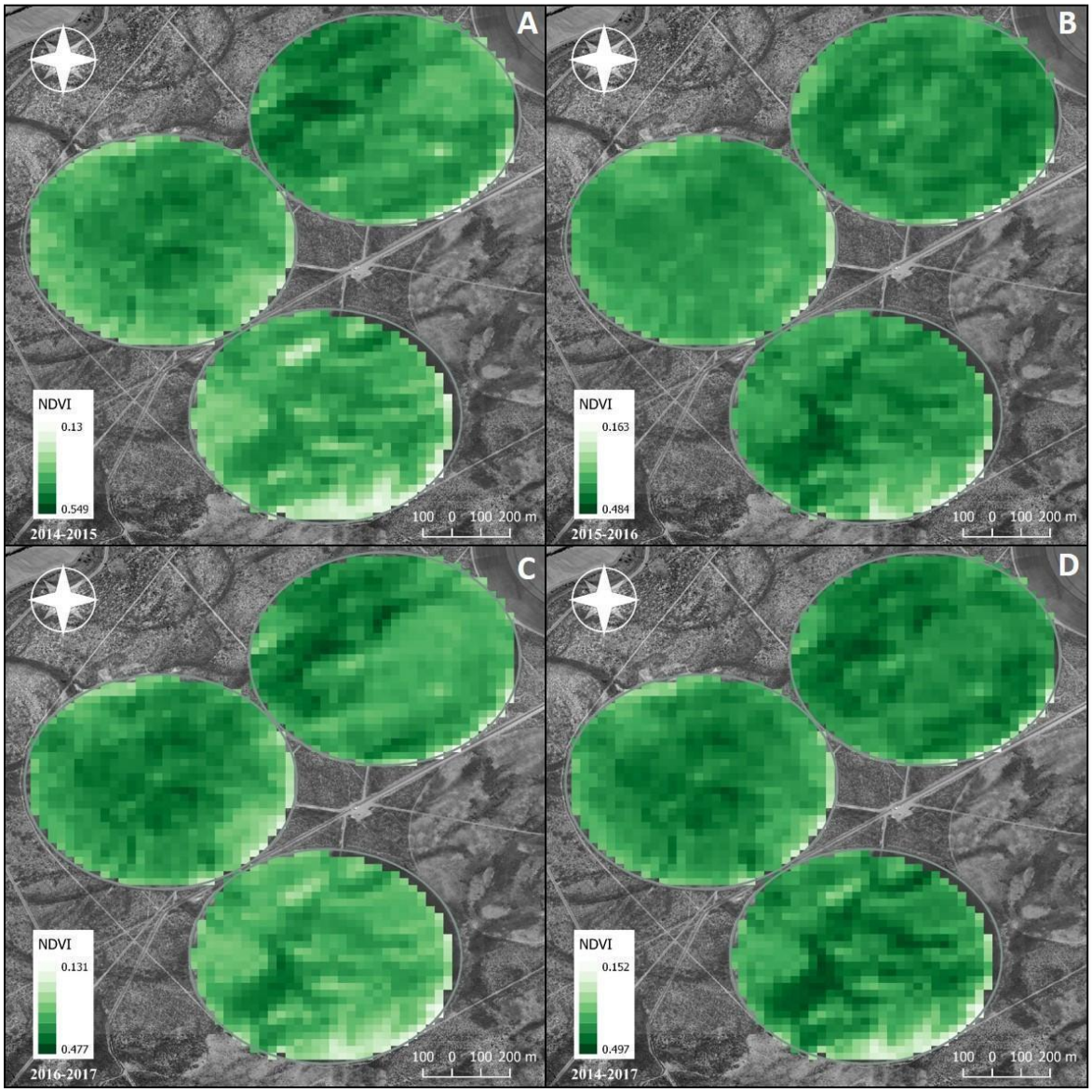

Figura III. 9. A. Integración de imágenes de NDVI promedio para la campaña 2014-2015. **B.** Integración de imágenes de NDVI promedio para la campaña 2015-2016. **C.** Integración de imágenes de NDVI promedio para la campaña 2016-2017. **D.** Integración de imágenes de NDVI promedio para las campañas 2014 a 2017 de los 3 pivotes bajo estudio.

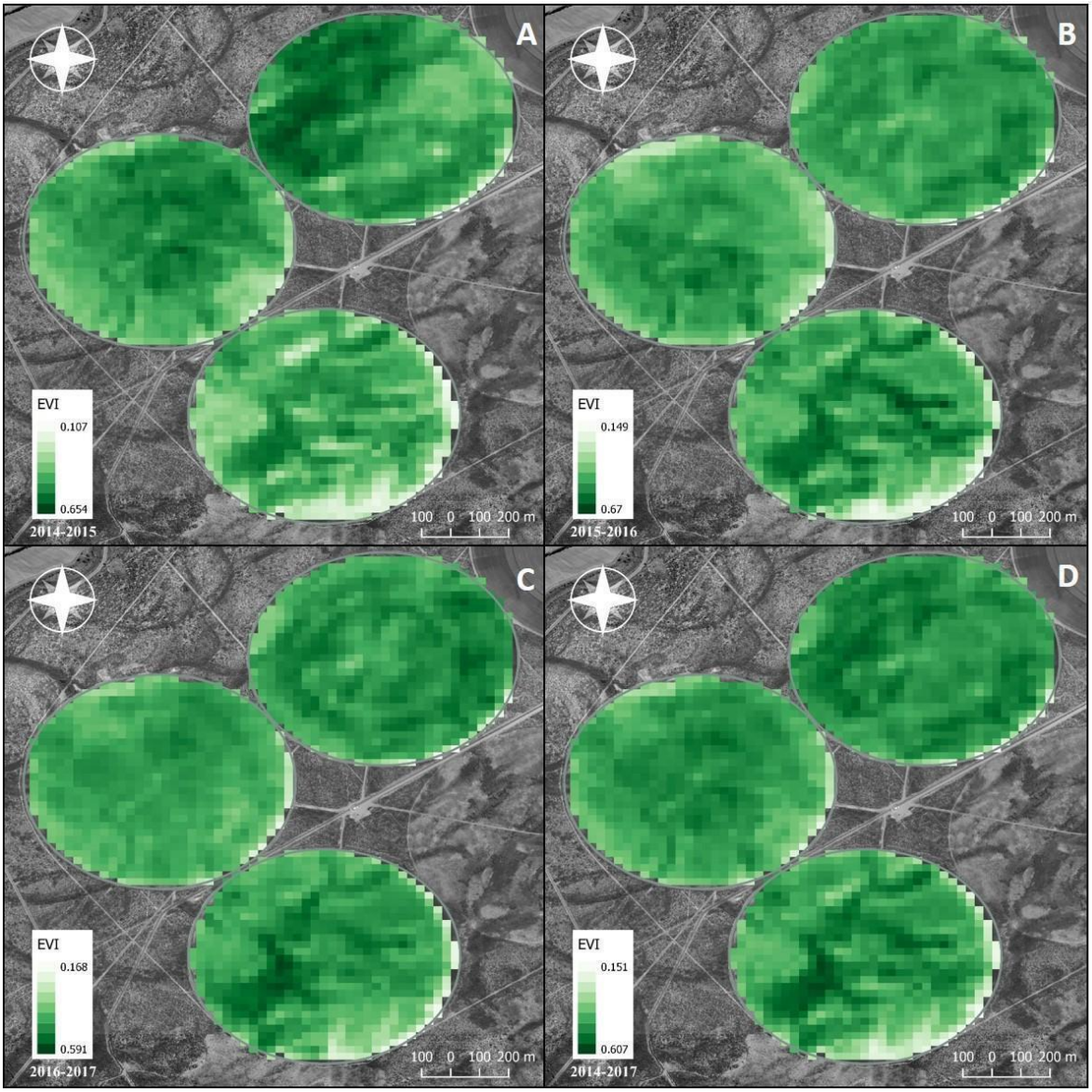

Figura III. 10. A. Integración de imágenes de EVI promedio para la campaña 2014-2015. **B.** Integración de imágenes de EVI promedio para la campaña 2015-2016. **C.** Integración de imágenes de EVI promedio para la campaña 2016-2017. **D.** Integración de imágenes de EVI promedio para las campañas 2014 a 2017 de los 3 pivotes bajo estudio.

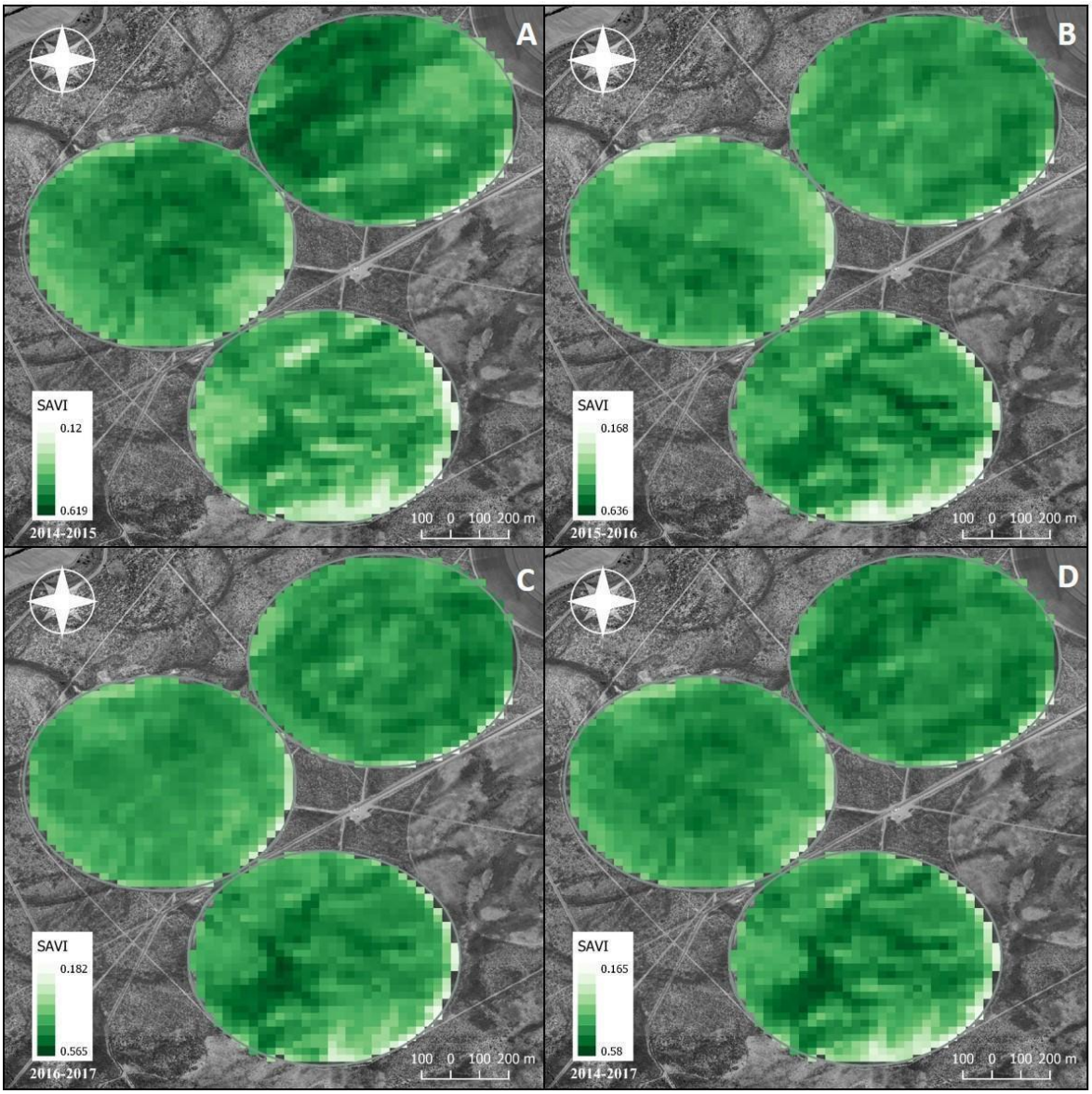

Figura III. 11. A. Integración de imágenes de SAVI promedio para la campaña 2014-2015. **B.** Integración de imágenes de SAVI promedio para la campaña 2015-2016. **C.** Integración de imágenes de SAVI promedio para la campaña 2016-2017. **D.** Integración de imágenes de SAVI promedio para las campañas 2014 a 2017 de los 3 pivotes bajo estudio.

En las imágenes promedio de cada campaña se identificaron 3 clases en las diferentes campañas, las cuales agruparon píxeles de cada imagen a una de clases. En todas las clasificaciones de NDVI (Fig. III.13. A-D), EVI (Fig. III.14. A-D) y SAVI (Fig. III.15. A-D), las principales clases fueron: bajo, medio y alto, respecto a los valores de los correspondientes índices.

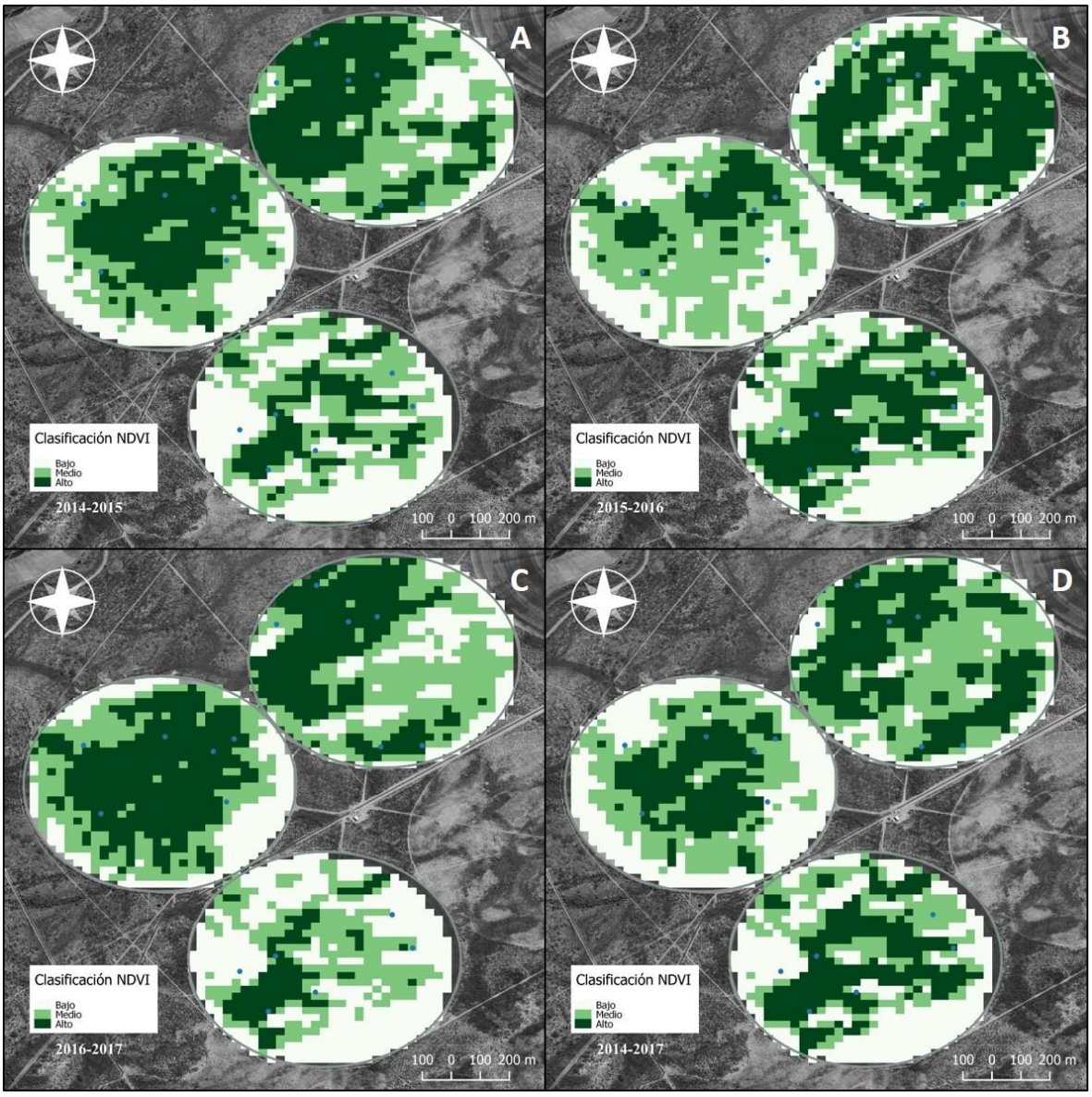

Figura III. 12. A. Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2014-2015. **B.**Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2015-2016. **C.**Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2016-2017. **D.** Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2014-2017 para cada uno de los pivotes bajo estudio.

Otros autores, los cuales utilizaron el NDVI identificaron área o zonas homogéneas que contenían características similares en cuanto a productividad, y este índice resumió el comportamiento general de la vegetación a lo largo del año, en donde estos valores fueron muy útiles para caracterizar rápidamente la dinámica y fenología de la vegetación (Reed et al., 1994; Posse y Cingolani, 2000; Posse et al., 2005, Di Bella et al., 2009).

Por otro lado, las zonas clasificadas como alto NDVI, fueron más estables en sus valores, respecto a las restantes zonas. Un patrón similar fue encontrado por otros autores en otras regiones (e.g. Jobbagy et al., 2002). Debido a que NDVI, EVI y SAVI se derivaron de las mismas bandas espectrales y difieren sólo en constantes arbitrarias, no es sorprendente que generalmente estuvieran estrechamente relacionados, y los resultados obtenidos de las clasificaciones también sean muy parecidas.

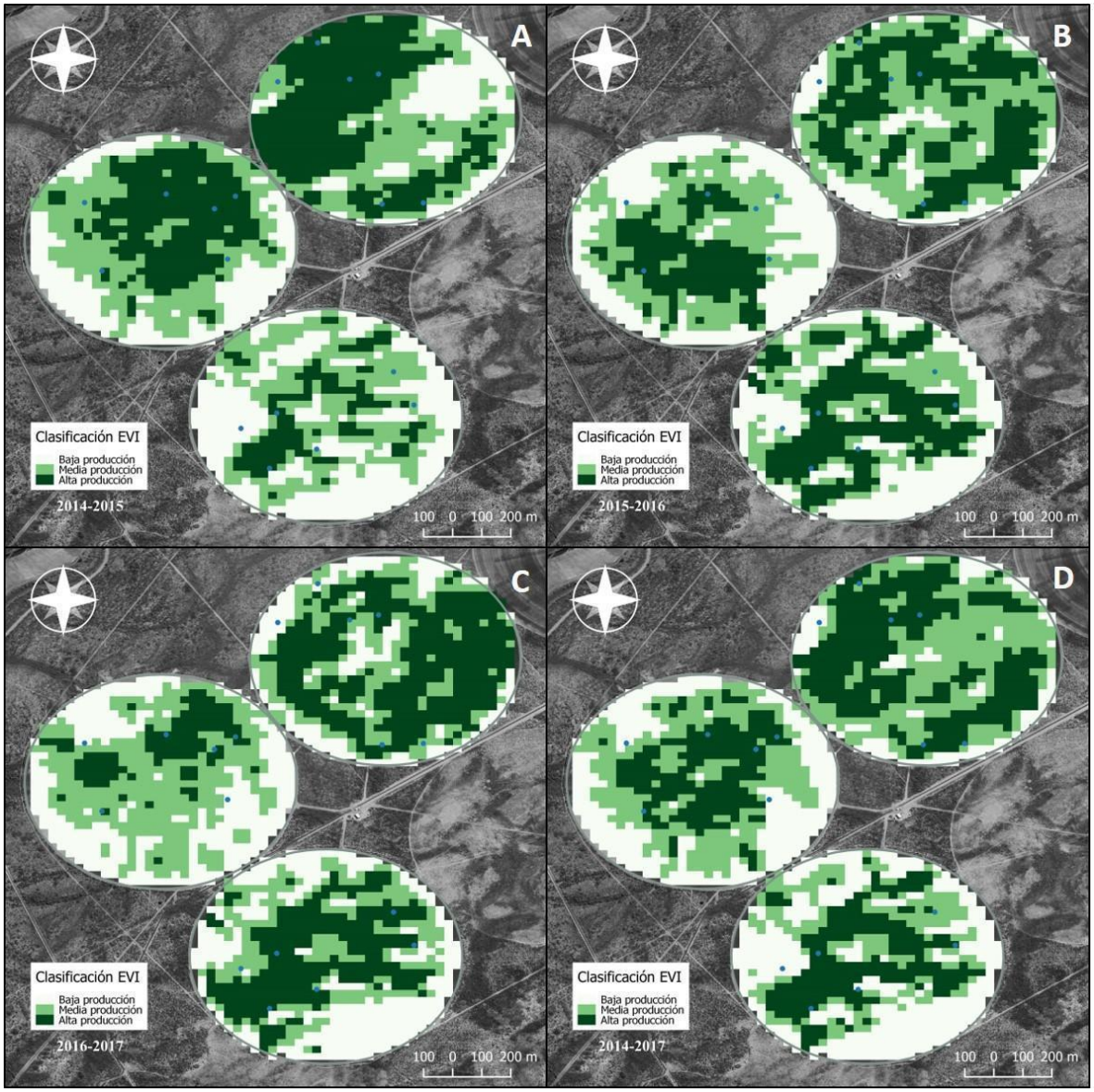

Figura III. 13. A. Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2014-2015. **B.**Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2015-2016. **C.**Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2016-2017. **D.** Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2014-2017 para cada uno de los pivotes bajo estudio.

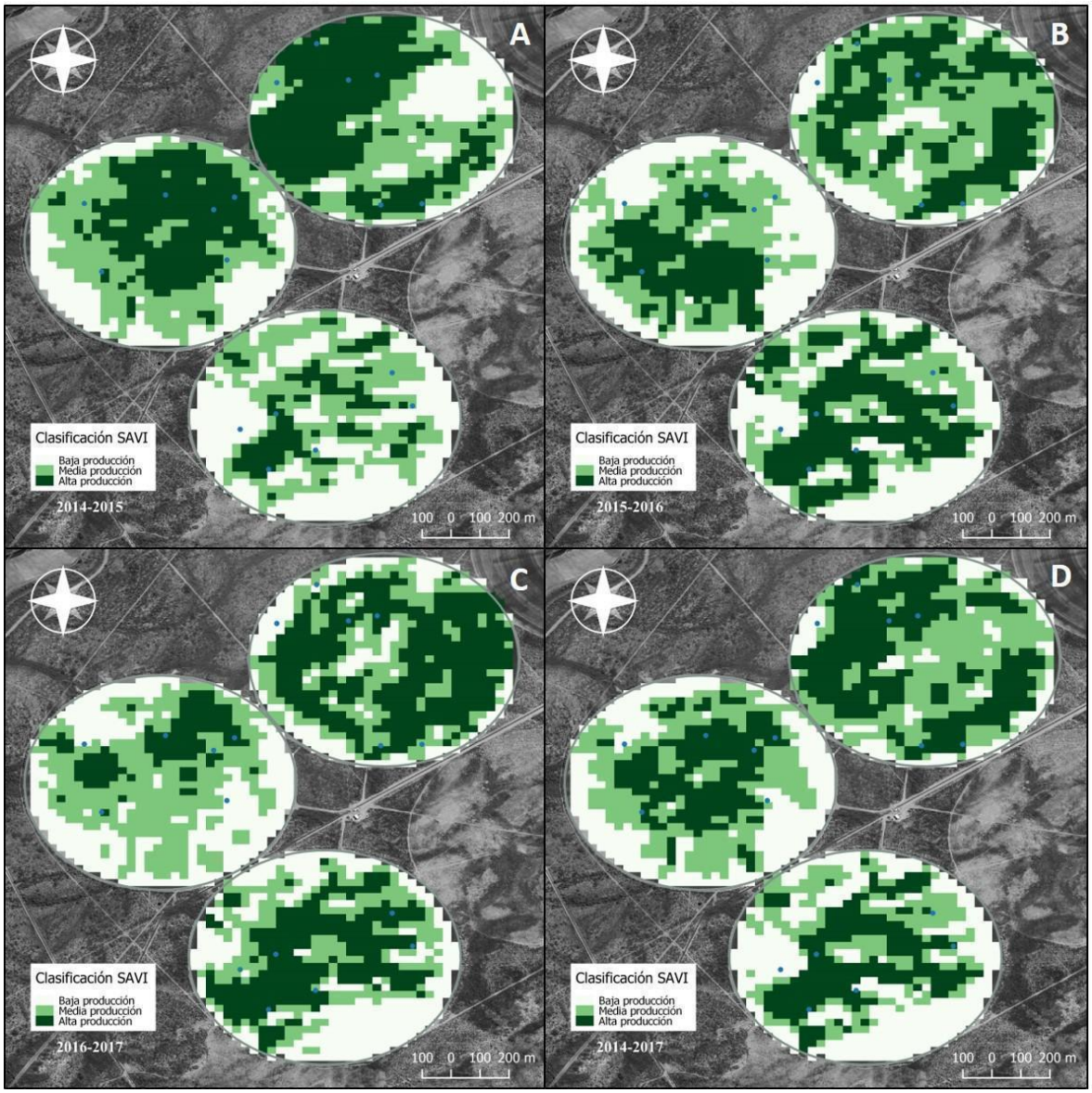

Figura III. 14. A. Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2014-2015. **B.**Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2015-2016. **C.**Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2016-2017. **D.** Clasificación obtenida a partir del promedio de NDVI de imágenes de la campaña 2014-2017 para cada uno de los pivotes bajo estudio.

Por otra parte, se estudiaron las relaciones entre los índices de vegetación derivados de sensores remotos y la producción promedio (kg MS/ha por corte) medida a campo de los sitios estudiados. Las correlaciones analizadas mostraron que la producción de alfalfa (kg MS/ha) estuvo asociada fuertemente a los 3 índices de vegetación ($p<0,05$), aunque el EVI fue el que mostró mayor asociación ($r=0,76$ $p<0,0001$), seguido del SAVI ($r=0,75$ $p<0,0001$) y finalmente el NDVI ($r=0,73$ $p<0,0001$), es decir, independientemente del índice utilizado,

la informacióon espectral obtenida de sensores remotos se asocio a la biomasa del cultivo (Tabla III.5 Anexo).

En un estudio realizado en Arabia Saudita (Kayad et al., 2016) en el cual evaluaron diferentes índices como el EVI, SAVI y NDVI (entre otros) para explorar el potencial predictivo del rendimiento de alfalfa bajo riego con pivote, los mismos mostraron diferentes niveles de correlación. De manera similar al estudio realizado en esta tesis, tanto SAVI como NDVI mostraron un buen R^2 con valores de 0,56 y 0,53 respectivamente. En tanto que para EVI, el nivel de correlación resultó mucho menor y no significativo. Algunas de estas diferencias encontradas quizá se deban a los métodos de cosecha utilizados, ya que en esta tesis todos los cortes evaluados se realizaron al 10 % de floración, mientras que en el trabajo citado se utilizaron cosechas 10 %, 30 % y 50 % de floración, en donde a niveles mayores de floración puede haber saturación en los índices calculados.

Sin embargo, en un trabajo más reciente del mismo autor (Kayad et al., 2018) los resultados de las correlaciones entre SAVI y NDVI con los rendimientos reales de alfalfa resultaron con un R^2 de 0,68 y 0,63, respectivamente. Otros autores han tenido una pobre correlación con SAVI (Hanna et al., 1999; Trotter et al., 2008), mencionando la misma razón de saturación de la reflectancia de las bandas espectrales utilizadas en los cálculos de los índices, lo cual no coincide con los encontrados en esta tesis. Ferencz et al. (2004), no pudo obtener una buena correlación entre el rendimiento de alfalfa e índices verdes a escala de lote, pero reportó buenas correlaciones para otros cultivos, como maíz, trigo, girasol, remolacha azucarera, etc.

Las correlaciones significativas encontradas entre la producción y los datos del NDVI, EVI y SAVI (Tabla III.5) confirmaron que estos índices calculados a partir de imágenes de satélite se pueden utilizar como parámetro para delimitar zonas de manejo de cultivo. Estos resultados coinciden con Zhang et al., (2010), que trabajando en una estepa semiárida también encontraron correlación entre la productividad y los índices calculados a partir de imágenes de satélite, lo que indica la fuerte relación entre la reflectancia espectral de los cultivos que se puede utilizar para mapear su productividad.

El NDVI en todas las temporadas aumentó de forma lineal con la producción de alfalfa. En la primera temporada (2014-2015) se registró una producción promedio de 2124 kg MS/ha (±537), con un rango entre 820 y 3000 kg MS/ha, en la segunda temporada se

registró una producción promedio de 2226 kg MS/ha (±575), variando entre 889 y 3228 kg MS/ha, y finalmente la tercera temporada registró una producción promedio de 2107 kg MS/ha (±529), con un mínimo de 802 kg MS/ha y un máximo de 2961 kg MS/ha. Por su parte, en la primera temporada el NDVI presentó valores entre 0,35 y 0,60, en la segunda temporada los valores fueron de 0,28 y 0,59 y en la tercera temporada los valores registrados fueron de 0,28 y 0,64. El modelo de regresión lineal entre producción y NDVI en todas las temporadas fue significativo y su pendiente fue positiva (Temporada 2014-2015: R^2=0,64 n=54 p<0,0001; Temporada 2015-2016: R^2=0,65 n=56 p<0,0001; Temporada 2016-2017: R^2=0,65 n=66 p<0,0001). El EVI, en cada una de las temporadas aumentó de forma lineal con la producción de alfalfa. En la primera temporada se registraron valores de EVI entre 0,38 y 0,76, en la segunda temporada los valores fueron de 0,32 y 0,72 y en la tercera temporada los valores registrados fueron de 0,29 y 0,76. El modelo de regresión lineal entre producción y EVI en cada una de las temporadas fue significativo y su pendiente fue positiva (Temporada 2014-2015: R^2=0,66 n=54 p<0,0001; Temporada 2015-2016: R^2=0,67 n=56 p<0,0001; Temporada 2016-2017: R^2=0,66 n=66 p<0,0001). Con respecto a SAVI, este índice al igual que los demás, en cada una de las temporadas aumentó de forma lineal con la producción de alfalfa. En la primera temporada se registraron valores de SAVI entre 0,40 y 0,70, en la segunda temporada los valores fueron de 0,35 y 0,67 y en la tercera temporada los valores registrados fueron de 0,32 y 0,70. El modelo de regresión lineal entre producción y SAVI en todas las temporadas analizadas fue significativo y con pendiente positiva (Temporada 2014-2015: R^2=0,65 n=54 p<0,0001; Temporada 2015-2016: R^2=0,66 n=56 p<0,0001; Temporada 2016-2017: R^2=0,64 n=66 p<0,0001) (Fig. III.16).

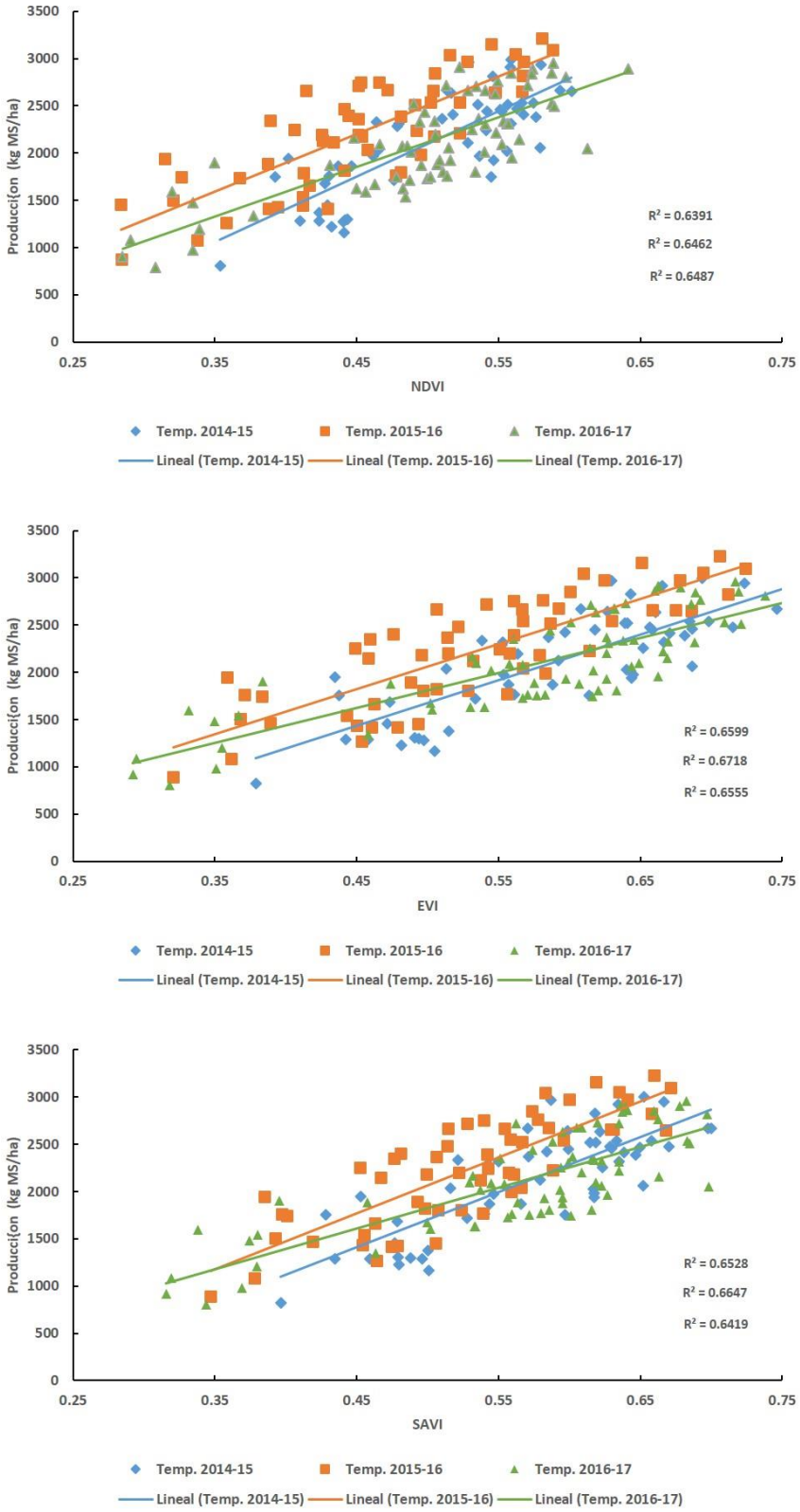

Figura III. 15. Relación entre el NDVI, EVI, SAVI y la producción (kg MS/ha) para los 18 sitios muestreados en lotes de alfalfa bajo riego por pivote en 3 temporadas consecutivas (temporada 2014-2015, temporada 2015-2016 y temporada 2016-2017).

A partir de los análisis de regresión entre los índices espectrales y datos de producción, los cuales mostraron una buena relación positiva, se realizaron nuevamente análisis de regresión a fin de construir un modelo general en la cual se incluyeron todas las campañas para cada uno de los índices y observar aquel que presente mejor ajuste.

El modelo general entre la producción de alfalfa (kg MS/ha) y NDVI, resultó significativo ($p<0,0001$) y presentó un ajuste directo y lineal ($R^2=0,54$), es decir que el aumento de NDVI fue de forma lineal con la producción de alfalfa. Se registró una producción promedio de 2150 kg MS/ha (±546), con un rango entre 802 y 3228 kg MS/ha, y un NDVI promedio de 0,49 con un mínimo de 0,28 y un máximo de 0,64.

En cuanto al modelo general entre la producción de alfalfa (kg MS/ha) y EVI, resultó significativo ($p<0,0001$) y presentó un buen ajuste lineal ($R^2=0,58$), al igual que lo observado con NDVI. El aumento de EVI fue de forma lineal con la producción de alfalfa. Se registró un valor de EVI promedio de 0,57 con un mínimo de 0,29 y un máximo de 0,76. El modelo de regresión lineal entre producción y EVI fue significativo y su pendiente fue positiva. Finalmente, el modelo general entre la producción de alfalfa (kg MS/ha) y SAVI, también resultó significativo ($p<0,05$) y presentó un buen ajuste lineal ($R^2=0,57$), es decir que el aumento de SAVI fue de forma lineal con la producción de alfalfa. Se registró un valor de SAVI promedio de 0,56 con un mínimo de 0,32 y un máximo de 0,70. El modelo de regresión lineal entre producción y SAVI fue significativo y su pendiente fue positiva (Fig. III.17)

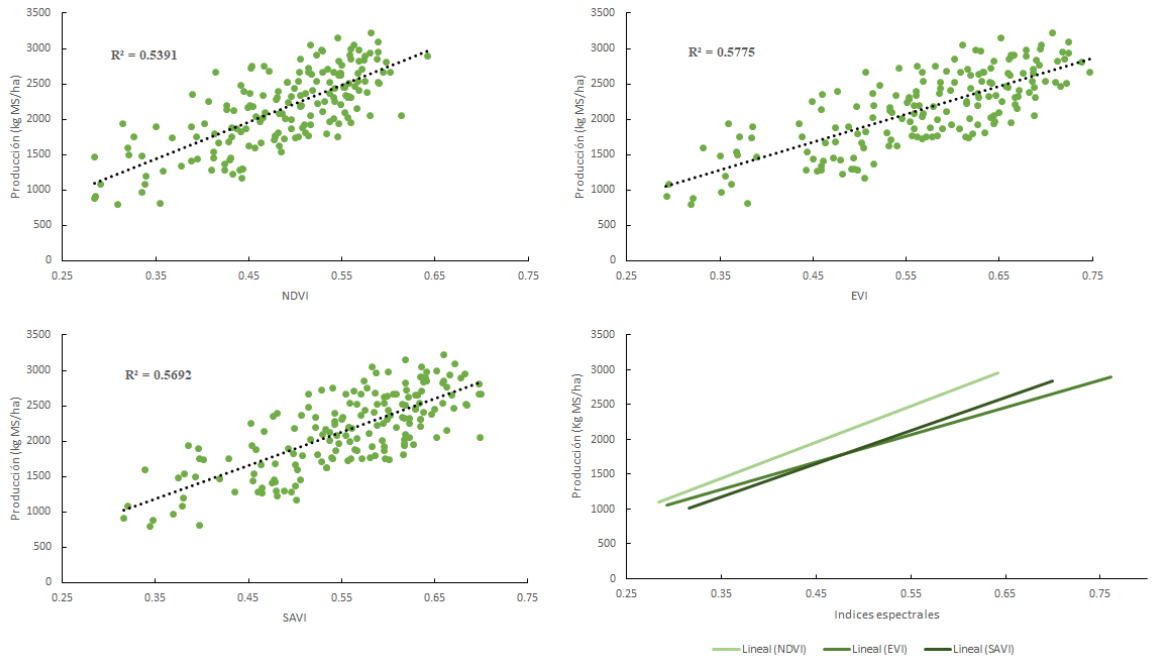

Figura III. 16. Relación entre el NDVI, EVI, SAVI y la producción (kg MS/ha) para los 18 sitios muestreados en lotes de alfalfa bajo riego por pivote. Modelo general de producción en función a NDVI, EVI y SAVI, y gráfico comparativo entre los 3 índices espectrales.

Si bien el grado de ajuste de los modelos entre los índices espectrales y las producciones fueron altos (Tabla III.6), todos los índices mostraron rangos de variación más bajos que los observados para la producción. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en otros estudios (Zerbato et al., 2016; Barbanti et al., 2017). Un factor que contribuye a una menor variación de los datos espectrales está asociado con las etapas fenológicas de cultivos en el momento de la adquisición de imágenes. En este estudio, la mayoría de las imágenes se obtuvieron cuando el cultivo presentaba buen desarrollo del área foliar, lo que resultó en una menor interferencia que afecte los valores espectrales.

Tabla III. 4. Análisis de regresión lineal para la relación entre la producción e índices espectrales. Modelos de regresión lineal con cada uno de los estimadores de la producción de alfalfa bajo riego por pivote central.

Indice	Modelo Lineal	R2	p - valor
NDVI	y = 5214,88 NDVI - 383,43	0,54	p<0,0001
EVI	y = 3931,2 EVI - 91,29	0,58	p<0,0001
SAVI	y = 4730,27 SAVI - 476,66	0,57	p<0,0001

III.3.3. Relación entre información de suelo e información derivada de sensores remotos (MDE y EVI)

En el apartado anterior se describió la relación entre el MDE y la producción del cultivo medida a campo, y a su vez esta producción fue clasificada como de alta y baja; la cual se relaciona con algunas variables de suelo, lo que manifiesta la asociación entre estas variables.Aquí se utilizaron 2 variables continuas que fueron las que surgen de: el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) como una medida de altura relativa del terreno; y el índice espectral EVI que permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial.

A partir de la asociación del MDE con la alta y baja producción medida a campo (Fig. III.7), es que se utilizó dicha variable para generar zonas de manejo. En cada uno de los lotes evaluados se delimitaron 3 zonas, de acuerdo a los rangos de valores de altura relativa en metros del MDE. Las clases delimitadas en los 3 pivotes fueron: zona baja, zona media y zona alta. La zona baja, asociada a sitios de alta producción se relaciona de manera positiva con el % A+L y de manera negativa con la CE en los primeros 30 cm; y la zona alta, asociada a sitios de baja producción se relaciona de manera negativa con CE, Na y AU en los 90 cm del perfil. De las 206 ha que suman en superficie los 3 pivotes, 56 ha corresponden a la zona baja, 69,5 has corresponden a la zona media y 80,5 ha corresponden a zonas altas. Esta última zona, en la cual los rendimientos serían menores, representa el 39 % de la superficie total en estudio. De los 10 sitios que fueron clasificados como de baja producción, 5 de estos se ubicaron en la zona alta, 4 en la zona media y solo 1 en la zona baja. Del mismo modo, de los 8 sitios clasificados como de alta producción, 3 se ubicaron en la zona baja, 3 en la zona media y 2 en la zona alta (Fig. III.18).

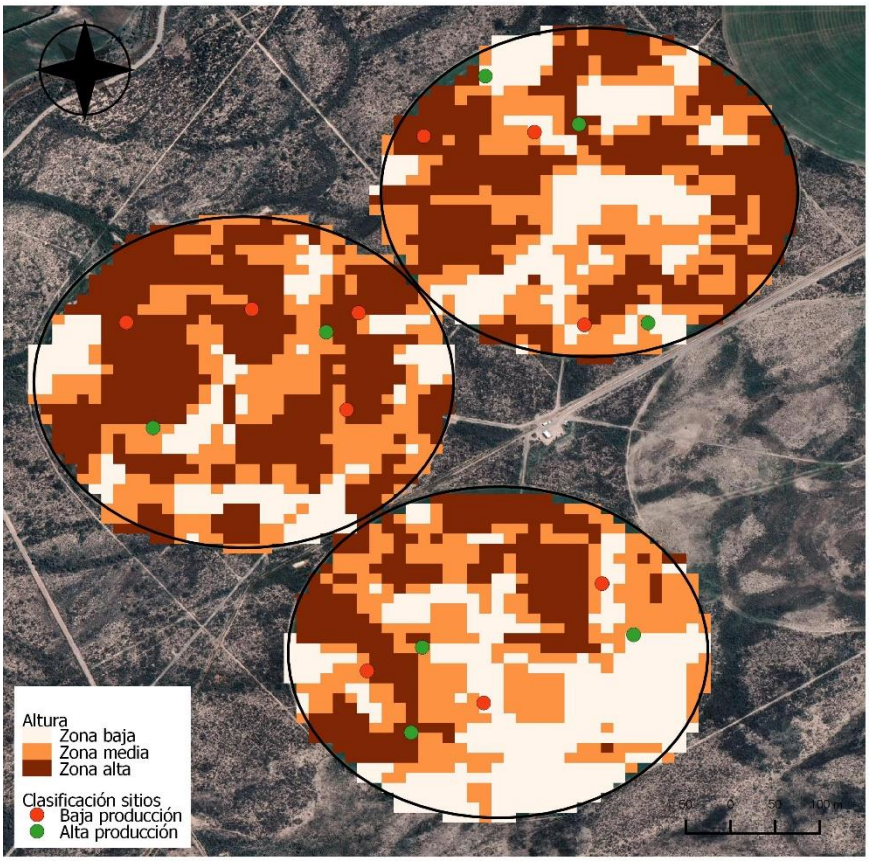

Figura III. 17. Clasificación obtenida a partir del MDE para cada uno de los pivotes bajo estudio con la distribución de los sitios según su producción (alta y baja). Altitud: zona baja (se corresponde con < cont de A+L en 0-30cm); zona media (se corresponde con áreas edaficas de transicion) y zona alta (< cont. CE y Na, > AU en 0-90cm).

La altimetría del terreno cuando se utiliza en combinación con otra información como son los índices espectrales, pueden mejorar la organización e información espacial del cultivo, como lo observó Kuiawski et al. (2017). La variación altimétrica del terreno, a su vez, está estrechamente relacionada con el suelo, ya que condiciona sus propiedades fisicoquímicas. Además, las características topográficas del terreno han demostrado que son un factor determinante en la heterogeneidad de áreas gestionadas con agricultura de precisión, en donde la altitud puede afectar la acumulación de agua y partículas (Kumhálová & Moudrý, 2014). Sin duda, que las variaciones del suelo causadas por procesos pedogenéticos y manejo agrícola podrían ser representados por áreas de manejo (Serrano et al., 2010).

Vale aclarar que los datos de EVI fueron los que mostraron mejor ajuste en los análisis de correlación y regresión con la producción del cultivo de los diferentes sitios, respecto al resto de los otros índices espectrales utilizados. Por ello, se realizó un análisis de correlación

entre EVI y las variables edáficas. De ella se desprende que existió una correlación significativa con la CE (r= -0,52; p-valor= 0,027). De acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto a la relación de EVI con los datos de producción de biomasa y CE, en cada uno de los lotes evaluados nuevamente se delimitaron 3 zonas, de acuerdo a los rangos de valores de dicho índice. Las clases delimitadas en los 3 pivotes (A, B y C) fueron: zona baja, zona media y zona alta de producción. De las 206 has que suman en superficie los 3 pivotes, 66,8 has corresponden a la zona de baja producción, 70,6 has corresponden a la zona de media producción, y 68,6 has corresponden a zonas de alta producción. La zona de baja producción, representa el 32,45 % de la superficie total en estudio. De los 10 sitios que fueron clasificados como de baja producción, 5 de estos se ubicaron en la zona de baja producción, 4 en la zona media de producción y solamente 1 en la zona de alta producción. Por otra parte, los 8 sitios clasificados como de alta producción se corresponden con la zona de alta producción (Fig. III.19).

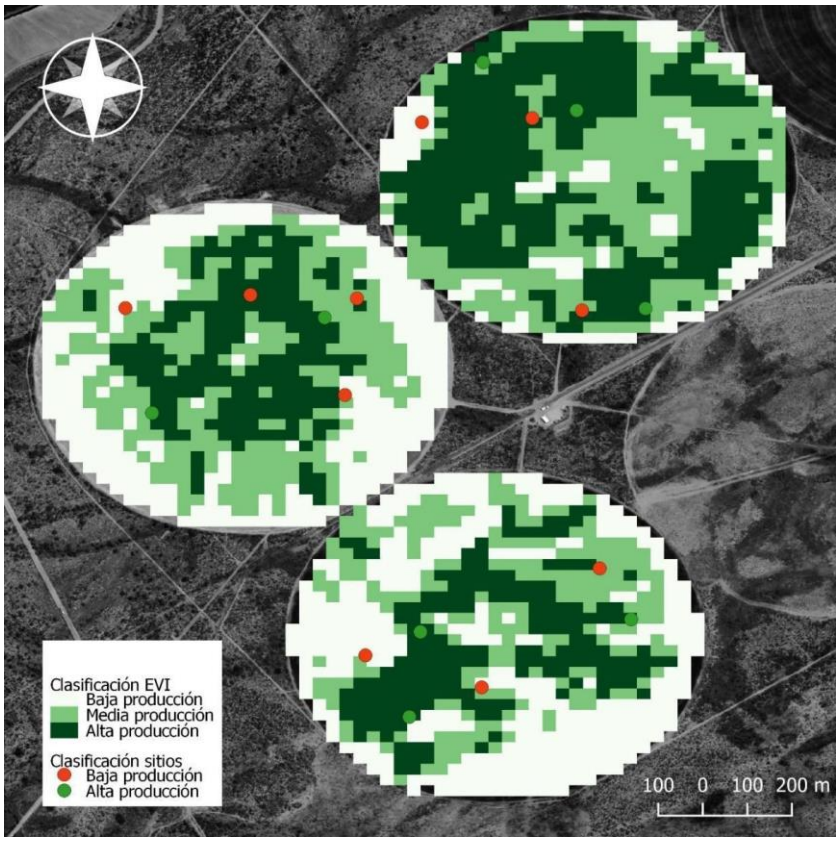

Figura III. 18. Clasificación obtenida a partir del EVI para cada uno de los pivotes bajo estudio.

A partir de las anteriores clasificaciones, dadas a partir del MDE y el EVI se delimitaron 2 zonas de manejo: una zona altamente sensible, la cual se corresponde con zonas altas del MDE (es decir mayor CE y Na, y menor AU en 90 cm de perfil) y valores bajos de EVI (lo que representa menor producción del cultivo); y zona moderadamente sensible, correspondiente a valores bajos de EVI (representado así, solo valores de producción bajos) (Fig. III.20).

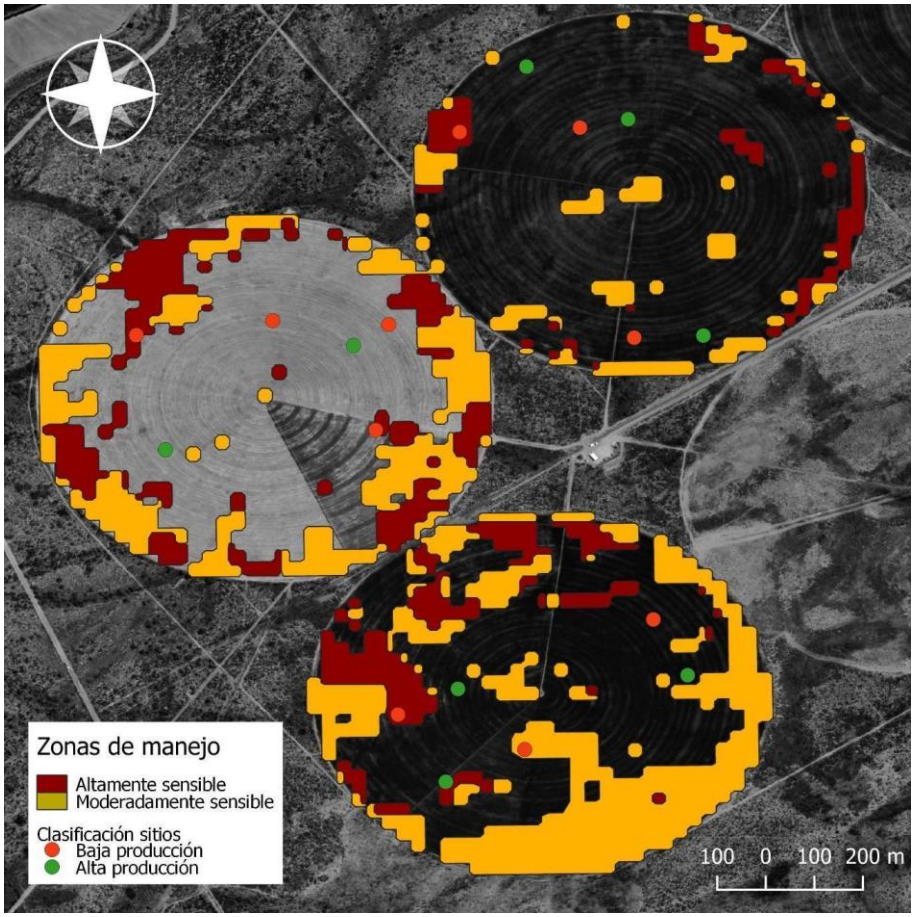

Figura III. 19. Clasificación obtenida a partir del MDE y EVI para cada uno de los pivotes bajo estudio, representando las zonas de alta sensibilidad y zonas moderadamente sensibles.

La zona altamente sensible abarca un área de 24,1 has, mientras que la zona moderadamente sensible suma 47,8 has, representando así entre las 2 zonas el 34,9 % de la superficie en estudio.

Los resultados muestran que de los 10 sitios que fueron clasificados como de baja producción, 5 de estos se ubicaron en las zonas de manejo, 4 en la zona altamente sensible y 1 en la zona moderadamente sensible. Por otra parte, de los 8 sitios clasificados como de alta

producción, ninguno fue incluido en las zonas altamente y moderadamente sensibles (Fig. III.20). Cabe señalar que otros atributos del suelo han contribuido a las variaciones de rendimiento. El contenido de micronutrientes, conductividad hidráulica, así como otros atributos físicos y químicos, pueden haber influido en el crecimiento del cultivo y no se han investigado en esta tesis. Otros fenómenos asociados con la relación suelo-planta-atmósfera también ejerce una fuerte influencia en la producción final. Por tanto, todavía quedan brechas para ser mejor investigadas, con respecto a los índices espectrales y zonas de manejo del cultivo de alfalfa en la zona.

III.4. Conclusiones

Con los avances en la teledetección y el estudio de los sistemas espaciales dentro del campo, se ha podido abordar con mayor detenimiento la variabilidad en la producción agrícola en los últimos años. En regiones áridas como la zona de estudio, la alfalfa es uno de los más importantes forrajes que se producen para el ganado. Sin embargo, hay poca información disponible sobre el grado de variabilidad del potencial de producción de este forraje dentro del campo.

Los análisis espaciales a través de los diferentes índices determinaron que existe diferenciación espacial en la productividad de la biomasa del cultivo de alfalfa. De acuerdo a esto, todos estos índices podrían ser útiles para estimar la productividad de la biomasa del cultivo de alfalfa, demostrando que es posible estimar su variabilidad espacial en pivotes bajo riego a través de índices de vegetación. La producción estuvo altamente relacionada con NDVI, EVI y SAVI (R^2 = 0,54, 0,57 y 0,58, respectivamente).

De esta manera, todos los índices espectrales estudiados tienen el potencial para delimitar zonas de manejo, siendo una metodología que es propicia para caracterizar la productividad del cultivo de alfalfa y en un futuro ser mas eficiente en la aplicación espacio-temporal de agua y nutrientes. Con ellos se pudo establecer 3 zonas de manejo. Este trabajo muestra que la producción de alfalfa fue mayor en la zona con índice verde alto que en la zona de índice verde baja, lo cual está asociado a las propiedades edáficas que limitan el crecimiento y desarrollo del cultivo, principalmente dados por CE, Na y AU en los primeros 90 cm del perfil, las cuales influyeron de manera negativa en los sitios de baja producción.

En cuanto a los nutrientes, los suelos presentan deficiencias y las limitantes para la alfalfa en pivotes bajo riego se manifiesta tanto en zonas de alta producción como en zonas de baja producción. El uso eficiente de fertilizantes es importante para la sostenibilidad económica y ambiental de los extensos sistemas de producción.

El adecuado manejo del agua de riego, principal insumo limitante en los sistemas de producción es determinante para aumentar la productividad de forraje. El manejo de riego variable por ambientes es una técnica disponible que podría satisfacer las necesidades hídricas a partir de la definición de ambientes como se describió anteriormente. En lugares de bajo potencial, explicados por alta CE de suelo, el uso de láminas importantes de lavado junto a cultivos de cereales de invierno como cobertura pueden ser una estrategia para mejorar las condiciones de infiltración y lavado de sales durante el período invernal siempre que se verifique una adecuada percolación profunda del exceso hídrico.

Por otro lado, este trabajo es un primer avance en el desarrollo de zonas de manejo para el cultivo de alfalfa bajo riego en ambientes de diferente potencial productivo a nivel de lote y también abre nuevas perspectivas para otros trabajos que permitan delimitación de ambientes en función de otras variables edáficas e índices espectrales.

CAPÍTULO IV

CONSIDERACIONES FINALES GENERALES

La zona bajo estudio en esta Tesis presenta características asociadas a suelos de poco desarrollo, escasa evolución y con profundidad de exploración de raíces variable. La utilización del riego es un factor fundamental que permite producir alfalfa en una zona árida. En la actualidad, el agua de riego tiene un costo relativamente bajo, sin embargo, con el paso del tiempo y asociado tanto a cuestiones de altas demandas como de variabilidad y cambio climático dicho costo tenderá a incrementarse tornándose aún más limitado. Por ello es importante este tipo de estudios, con el fin de ser más eficientes en la utilización del recurso agua.

En referencia al objetivo específico 1 ("Estudiar y cuantificar las variables edáficas y su heterogeneidad en suelos bajo riego del sudoeste pampeano bajo clima semiárido, analizando su relación con el rendimiento de alfalfa") y de acuerdo con los análisis y resultados de esta tesis, el mismo pudo cumplirse de manera completa.

La fertilidad química edáfica es la más restrictiva del área de estudio, principalmente debido al exceso de sales en el suelo y al complejo básico del mismo. El pH varía de moderado a muy básico, lo cual incide directamente en la disponibilidad de fósforo para la pastura. Sumado a esto, valores de CE elevados afectan principalmente la capacidad de producción de biomasa del cultivo (5,4 dS/m reducen el 25% del rendimiento, Fig. III.5 B).

De acuerdo con lo hallado en esta Tesis, las principales limitaciones físicas, son la presencia de gravas y/o cantos rodados, y posición relativa del paisaje dónde se realiza el cultivo en la zona bajo estudio, proporcionando características de baja retención hídrica, por lo cual, la hipótesis 1 no se rechaza (hipótesis 1: La posición relativa en el paisaje y limitaciones en la profundidad del perfil para la exploración de raíces afectan de manera diferencial al rendimiento del cultivo de alfalfa). No obstante, se debe realizar un manejo adecuado del recurso suelo en las zonas donde se presenten estas características, ya que, de manera conjunta con texturas arenosas y pH alcalino hace que la fertilidad del suelo sea un factor muy restrictivo. Bajo condiciones naturales, este suelo resulta marginal para cualquier cultivo.

Los resultados obtenidos en esta Tesis resultan de un alto valor para la zona dado que no se dispone de información previa actualizada referente a suelo y riego en relación al cultivo de alfalfa. Se requieren de estudios con mayor detalle y precisión para determinar la aptitud edáfica y su posterior manejo, aumentar el número de sitios a muestrear para tener

una representación espacial más precisa, y en base a ello, realizar análisis geo-estadísticos con niveles de predicción de la variabilidad aceptables en el del área de estudio.

El especifico 2 ("Determinar la variabilidad espacial del desarrollo del cultivo a partir de diferentes metodologías en Entisoles bajo riego del sudoeste pampeano en relación con el rendimiento de alfalfa") se cumplió de manera completa. El seguimiento del desarrollo del cultivo de alfalfa por medio del procesamiento de imágenes de fotografía digital facilitó realizar estimaciones rápidas, fiables y objetivas del IAF y cobertura, los cuales son esenciales para numerosos estudios de la vegetación, siendo estos a menudo parámetros críticos del proceso de respuesta en términos de desarrollo de la cubierta vegetal (Fig. II.17 y Fig. II.18). Sin embargo, su uso adecuado requiere de una alta intensidad de muestreo para un correcto seguimiento (muestreo semanal sobre cada uno de los sitios).

La reducción de datos utilizando un PCA combinado con técnicas de clasificación de imágenes satelitales (índices verdes y DEM) e imágenes aéreas capturan de manera efectiva la variabilidad de las características del paisaje del suelo en el área de estudio. Con respecto al objetivo 3 ("Estimar la correlación entre los diferentes índices de vegetación y el rendimiento del cultivo de alfalfa, identificando el que presente una mejor capacidad predictiva del rendimiento en dicho cultivo"). Mediante imágenes Landsat se ha conseguido describir la variabilidad del desarrollo del cultivo de alfalfa en diferentes lotes a partir de estimaciones de índices verdes (Fig. II.23 y Fig. II.24). Esta información ha permitido diferenciar dentro de los lotes sectores con comportamiento diferente en cuanto a desarrollo del cultivo. Se ha constatado que los índices verdes estimados a partir de imágenes Landsat guardan relación con la producción de MS del cultivo de alfalfa (R^2=0,54, R^2=0,58 y R^2=0,57, para NDVI, EVI y SAVI respectivamente con un $p<0,0001$), mostrando la utilidad de estas imágenes para pronosticar diferencias de rendimiento dentro de un lote (Fig. III.17, Tabla III.5 y Tabla III.6), lo que reafirma nuestra hipótesis 2 ("El rendimiento de alfalfa bajo riego se relaciona con los índices de vegetación y permitirá crear modelos para la región bajo estudio para estimar y predecir el rendimiento del cultivo y características del suelo asociadas"), siendo esta no rechazada.

Por último, el objetivo 4 ("Establecer relaciones entre la información derivada de imágenes satelitales y rasgos edáficos analizadas") también se cumplió, ya que las diferencias en el desarrollo de cultivos se han podido relacionar con características del suelo

(conductividad eléctrica, contenido de sodio intercambiable, pH y posición relativa en el paisaje) mediante el análisis conjunto de índices verdes y los rasgos edáficos estudiados. Todo ello resalta la utilidad de los sistemas de información geográfica y de la teledetección en el diagnóstico del cultivo y en la delimitación de zonas dentro de una parcela agrícola.

Se establecieron áreas de manejo en función a la productividad del cultivo de alfalfa, lo que reafirma nuestra hipótesis 3 (La utilización de información derivada de herramientas de teledetección permite identificar y diferenciar zonas productivas homogéneas en lotes de alfalfa -zonas de manejo-) la cual no fue rechazada, Esto permitiría hacer un uso más eficiente del suelo y sus propiedades físico-químicas, como así también del agregado de nutrientes y del agua de riego. Esto se traduciría en mejores relaciones de costos-beneficios. La categoría baja productividad se debe, principalmente, a las propiedades físicas del suelo relacionadas a la topografía y a la presencia de gravas. En términos generales, se puede decir que las áreas con mayor potencial para el cultivo de alfalfa se encuentran principalmente en zonas bajas del paisaje (Fig. III.18).

Este enfoque en el cual se identifican y pueden ser mapeadas las principales unidades de suelo resulta ser una técnica muy aplicable para producir mapas de manejo de suelo necesarios para la agricultura. Este tipo de estudio puede incorporar una amplia variedad de covariables para mejorar la predicción de las propiedades suelo-cultivo, reduciendo el tiempo y el dinero necesarios para proporcionar información detallada del suelo.

Los mapas de zonificación de los atributos del suelo desarrollados en base al método presentado pueden ayudar a determinar las ubicaciones apropiadas y la cantidad de sitios de muestreo cuando el tiempo y los recursos financieros son limitados. Esta metodología resulta de importancia particular en esta región, ya que carece de datos sobre el suelo y pueden usarse como un medio eficaz para pre-mapear un área dada y utilizada para diseñar eficientemente el muestreo a campo, fertilización, riego variable, etc. Esto constituirá el paso previo para implementar un manejo diferencial dentro de un lote.

Los análisis espaciales a través de los diferentes índices determinaron que existe diferenciación espacial en la productividad de biomasa del cultivo de alfalfa. Por tanto, el método de corte directo requeriría un muestreo más intensivo (tiempo y trabajo) para aumentar su sensibilidad. De acuerdo con esto, todos estos índices podrían ser útiles para

estimar la productividad de la biomasa del cultivo de alfalfa, demostrando que es posible estimar su variabilidad espacial en pivotes bajo riego a través de índices de vegetación.

La clasificación se dividió en tres posibles zonas de manejo usando estos índices. Este trabajo muestra que la producción de alfalfa fue mayor en la zona con índice verde alto que en la zona de índice verde baja, debido seguramente a propiedades edáficas que limitan el crecimiento y desarrollo del cultivo, principalmente dados por CE, Na y AU en los 90 cm del perfil, las cuales estuvieron muy asociadas a sitios con la baja producción del cultivo.

En cuanto a los nutrientes, los suelos presentan deficiencias y las limitantes para la alfalfa en pivotes bajo riego se manifiesta tanto en zonas de alta producción como en zonas de baja producción. El uso eficiente de fertilizantes es importante para la sostenibilidad económica y ambiental de los extensos sistemas de producción.

Por otro lado, este trabajo es un primer avance en el desarrollo de zonas de manejo para el cultivo de alfalfa bajo riego en ambientes de diferente potencial productivo a nivel de lote y también abre nuevas perspectivas para otros trabajos que permitan delimitación de ambientes en función de otras variables edáficas e índices espectrales. Conforme a los resultados obtenidos en esta Tesis se da una lista de recomendaciones con el objetivo de mejorar los niveles productivos en función de las características edáficas:

Recomendaciones prácticas de manejo de suelos

Se sugiere el uso herramientas de teledetección para diferenciar ambientes de diferente calidad de suelos y capacidad productiva, sin recurrir (o mínimamente) a muestreo directo, por su elevado costo económico y el tiempo que requiere. En ambientes con alta variabilidad espacial (también temporal), el uso de imágenes satelitales permitió diferenciar potenciales ambientes de manera relativamente sencilla, precisa y económica.

Zonas con elevada CE y Na

Ajustar el balance de agua en el suelo. Monitoreo periódico del perfil por zona de manejo, demandas del cultivo y atmosférica.

- Modificar dosis, frecuencia y momento de riego: se recomienda la aplicación de mayores láminas de riego con el objetivo de facilitar el lavado de las sales. Estos riegos

podrían realizarse en invierno con baja frecuencia y alta intensidad (300 mm aproximadamente), y asociar esta práctica con canales de drenaje.

- Mantener el suelo cubierto todo el año: los cultivos invernales podrían cumplir el rol (incorporación de gramíneas + raíces + MO). Esta práctica favorecería la macroporosidad a través de incremento de raíces y material superficial aumentando la infiltración de agua. También contribuiría a la mejora de la fertilidad a través del incremento de carbono orgánico. En tanto que podría mejorar el balance de C/reducción de los niveles de carbonatos en superficie, favoreciendo menor densificación superficial y encostramiento. En un suelo con cobertura, la proporción de la transpiración es mayor comparado con lo que sucede en un suelo desnudo donde los valores de pérdida de agua por evaporación y excurrimiento superficial, dos procesos que predominan en ambientes áridos en eventos intensos de lluvias/ escurrimiento de agua de riego.

Zonas con baja capacidad de retención de agua en el suelo

- Cuantificar la capacidad de almacenamiento de agua a través de un mapa de ambientes realizados de imágenes satelitales (Ej, Landsat) e índices espectrales + caracterización edáfica (profundidad de exploración de raíces, textura, CE, Na/pH, etc) y manejar la demanda de riego de acuerdo a la superficie más representativa (frecuencia y dosis).

- Monitorear los ambientes con sondas de humedad y definir la estrategia de riego a través de porcentajes de humedad críticas de producción. Esto evitaría incurrir en riegos poco precisos con altos consumos de energía y agua, aumento en el movimiento de nutrientes (N/S) por debajo de la zona radicular, producir erosión hídrica y transporte de agroquímicos a los canales de drenaje. El riego ineficiente altera la sustentabilidad del sistema, a nivel social, económico y ambiental.

- Manejo de riego variable: Al integrar variables dentro de una estructura espacial, podemos evaluar las necesidades por sectores generando mapas de necesidades espaciales (mapas confeccionados por medio de imágenes/monitores de rendimientos/características edáficas, etc). En sistemas de riego presurizados, existe la tecnología para poder ajustar el riego a estas necesidades, sistemas asociados a la aplicación variable de riego. Estos sistemas se basan en la definición de la variabilidad de suelo, como ya lo hemos descrito, sobre la cual

generan una segmentación por trazos del pivote para la aplicación de riego según tipo de suelo y necesidad de los cultivos. El uso de este tipo de tecnología nos permite un ajuste de las cargas de agua bastante cercanas a la variabilidad existente en el predio.

Este tipo de sistemas puede ser utilizado para gestar aplicaciones en función de diferentes parámetros (sondas/seguimiento hídrico)- ejemplo cuánta agua aplicar, momento, frecuencia por efecto de factores como topografía, textura, tipo de suelo, segmentar pivotes con dos cultivos o más, según fecha /densidad de siembra/ nutrición según necesidad del cultivo.

Este tipo estudios en ambientes áridos y uso de herramientas de teledetección mejorarían la eficiencia en la gestión y uso del recurso agua por ambiente, cultivo a través de estrategias de manejo diferenciales en función de imágenes y características edáficas. Entendiendo la variabilidad espacial para ser más eficiente en el uso de los recursos naturales en tecnologías de procesos e insumos.

ANEXO

Tabla II.2. Medidas resumen de las variables edáficas analizadas para las profundidades (0-30; 30-60;60-90;90-120 cm). Variables: % arcilla, % limo, % arena, % arcilla + limo (A+L), densidad aparente (Da), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), pH, conductividad eléctrica (CE), complejo de intercambio catiónico (CIC), Na intercambiable (Na i), K intercambiable (K i), P disponible, % nitrógeno total (N t) y % materia orgánica total (MO t).

Profundidad (cm)	Estadisticos	% arcilla	% limo	% arena	% A+L	Da (g/cm^3)	CC (%)	PMP (%)	pH (1:2,5)	CE (dS/m)	CIC (meq/100g)	Na i (meq/100g)	K i (meq/100g)	P disp. (ppm)	N t (%)	MO t (%)
0-30	n	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
	Media	10.17	17.2	72.62	27.38	1.43	13.43	6.06	8.06	1.73	12.3	0.8	0.54	8.75	0.06	0.75
	D.E.	5.03	8.63	12.27	12.27	0.1	4.17	1.2	0.22	2.05	3.96	1	0.19	4.16	0.03	0.41
	Mín	3.54	7.28	43.98	14.08	1.25	8.57	4.38	7.75	0.42	6.96	0.23	0.23	2.24	0.02	0.22
	Máx	20.74	36.35	85.92	56.02	1.62	23.36	8.82	8.42	8.9	20.29	4.55	0.93	17.8	0.15	1.71
30-60	n	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	Media	12.97	24.69	62.34	37.66	1.42	16.62	9.38	8.14	4.75	15.08	2.07	0.71	7.61	0.05	0.71
	D.E.	6.42	14.18	19.08	19.08	0.12	8.42	4.95	0.21	4.42	9.22	2.2	0.53	3.4	0.02	0.36
	Mín	7.14	10.38	23.5	17.52	1.14	6.15	3.35	7.84	0.83	5.36	0.33	0.06	2.59	0.01	0.24
	Máx	25.55	52.21	82.48	76.5	1.66	32.95	18.81	8.57	18.11	39.39	7.71	2.18	14.3	0.07	1.44
60-90	n	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	Media	11.93	22.25	65.83	34.18	1.41	15.45	8.11	8.14	6.12	13.02	2.26	0.57	6.09	0.03	0.49
	D.E.	5.06	12.89	16.2	16.2	0.13	7.01	3.59	0.27	4.93	7.94	2.33	0.35	3.39	0.02	0.27
	Mín	6.15	6.29	30.03	12.44	1.14	7.01	2.77	7.69	1	3.75	0.3	0.04	1.55	0.01	0.17
	Máx	24.13	53.59	87.56	69.98	1.64	32.39	17.3	8.58	17.7	29.04	8.16	1.27	13.2	0.06	1.21
90-120	n	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	Media	10.67	20.67	68.66	31.34	1.43	15.41	6.81	8.13	6.21	10.23	2.66	0.38	6.17	0.02	0.33
	D.E.	5.42	17.33	19	19	0.13	10.75	3.7	0.2	4.63	5.51	3.3	0.34	3.31	0.01	0.14
	Mín	5.19	5.6	24.04	10.79	1.18	2.61	1.3	7.62	1.06	1.61	0.27	1.00E-03	1.55	0.01	0.15
	Máx	26.1	67.99	89.21	75.96	1.68	36.5	14.94	8.41	17.83	22.95	11.46	1.27	11.5	0.06	0.6

Tabla II.3. Medidas resumen del contenido de arena (%), arcilla (%), limo (%) y de A+L (%) en el perfil (120 cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	% arena	4	52.93	10.91	43.98	68.53	% arcilla	4	17.35	1.69	16.05	19.66	% limo	4	29.73	10.76	13.94	36.77	% A+L	4	47.07	10.91	31.47	56.02
2		4	52.99	17.64	30.62	70.78		4	19.56	4.4	15.34	25.55		4	27.45	13.3	13.87	43.82		4	47.01	17.64	29.22	69.38
3		4	37.85	16.05	23.5	60.34		4	22.85	4.07	16.9	26.1		4	39.3	12.8	22.77	52.21		4	62.15	16.05	39.66	76.5
4		4	59.24	17.88	44.3	83.89		4	16.19	7.45	6.03	22.66		4	24.55	10.43	10.08	33.04		4	40.75	17.87	16.11	55.7
5		4	76.32	2.9	73.34	79.84		4	13.67	1.89	11.71	16.24		4	10.02	1.42	8.45	11.76		4	23.68	2.9	20.16	26.66
6		4	70.25	7.6	62.5	79.34		4	8.57	4.3	3.54	13.98		4	21.18	7.73	12.86	30.75		4	29.75	7.6	20.66	37.49
7		4	74.77	8.03	64.76	83.63		4	9.67	2.84	6.68	13.22		4	15.57	5.2	9.69	22.02		4	25.23	8.03	16.37	35.24
8		4	81.01	1.33	79.26	82.48		4	7.51	0.56	6.8	8.07		4	11.48	1.01	10.72	12.93		4	18.99	1.33	17.52	20.74
9		4	70.15	10	60.8	81.85		4	8.28	1.27	6.55	9.62		4	21.57	9.5	11.6	30.73		4	29.85	10	18.15	39.2
10		4	82.18	4.08	79.29	88.19		4	7.7	1.77	5.47	9.27		4	10.12	2.79	6.34	12.82		4	17.83	4.08	11.81	20.71
11		4	44.79	18.84	24.04	68.8		4	8.09	0.39	7.59	8.43		4	47.12	18.97	22.77	67.99		4	55.21	18.84	31.2	75.96
12		1	79.26	0	79.26	79.26		1	8.74	0	8.74	8.74		1	12	0	12	12		1	20.74	0	20.74	20.74
13		4	76.54	3.37	73.76	81.35		4	9.36	1.05	8.4	10.77		4	14.1	2.8	9.91	15.66		4	23.47	3.37	18.65	26.24
14		4	85.6	3.3	82.48	89.21		4	6.61	1.2	5.19	7.95		4	7.8	2.24	5.6	10.38		4	14.41	3.3	10.79	17.52
15		4	76.01	7.56	68.49	85.92		4	7.8	0.82	6.8	8.67		4	16.24	6.78	7.28	22.84		4	24.04	7.59	14.08	31.51
16		1	80.19	0	80.19	80.19		1	7.36	0	7.36	7.36		1	12.45	0	12.45	12.45		1	19.81	0	19.81	19.81
17		4	66.48	13.69	51.08	83.08		4	12.66	3.5	8.91	15.92		4	20.87	10.59	8.01	33.57		4	33.52	13.69	16.92	48.92
18		4	67.15	15.84	43.59	77.84		4	8.2	0.49	7.78	8.85		4	24.65	15.45	13.85	47.56		4	32.85	15.84	22.16	56.41
Prom.	*% arena*	*66*	*67.52*	*16.8*	*23.5*	*89.21*	*% arcilla*	*66*	*11.4*	*5.48*	*3.54*	*26.1*	*% limo*	*66*	*21.08*	*13.46*	*5.6*	*67.99*	*% A+L*	*66*	*32.48*	*16.79*	*10.79*	*76.5*

Tabla II.4. Medidas resumen de la densidad aparente en el perfil (120 cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	Da (g/cm^3)	4	1.3	0.13	1.18	1.48
2		4	1.31	0.14	1.14	1.48
3		4	1.34	0.18	1.14	1.58
4		4	1.45	0.04	1.4	1.48
5		4	1.49	0.09	1.44	1.62
6		4	1.61	0.09	1.47	1.68
7		4	1.35	0.09	1.25	1.45
8		4	1.42	0.03	1.38	1.44
9		4	1.42	0.06	1.35	1.5
10		4	1.37	0.08	1.29	1.45
11		4	1.49	0.11	1.42	1.65
12		1	1.4	0	1.4	1.4
13		4	1.48	0.04	1.42	1.53
14		4	1.47	0.09	1.35	1.55
15		4	1.44	0.11	1.35	1.61
16		1	1.29	0	1.29	1.29
17		4	1.4	0.12	1.3	1.56
18		4	1.45	0.08	1.36	1.56
Prom.	*Da (g/cm3)*	66	1.42	0.12	1.14	1.68

Tabla II.5. Medidas resumen de las constantes hídricas, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) en el perfil (120 cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	CC (%)	4	18.82	3.49	15.55	23.36	PMP (%)	4	7.19	0.71	6.64	8.21
2		4	21.98	9.53	11	32.95		4	10.45	6.19	4.93	17.89
3		4	20.22	3.98	14.92	24.17		4	11.56	2.05	8.82	13.57
4		4	15.18	4.14	10.57	19.81		4	8.35	3.41	5.38	13.13
5		4	10.13	3.29	6.15	13.89		4	5.17	1.39	3.35	6.72
6		4	12.76	4.38	8.86	19.02		4	5.74	0.91	4.56	6.57
7		4	10.34	2.28	7.78	13.13		4	7.51	2.5	5	10.3
8		4	8.02	1.19	6.79	9.65		4	5.55	0.23	5.26	5.81
9		4	19.3	11.53	10.91	36.25		4	10.08	4.01	5.89	14.94
10		4	7.91	2.12	5.09	10.23		4	5.46	1.22	3.68	6.4
11		4	28.63	10.11	13.8	36.5		4	14.34	4.89	7.84	18.81
12		1	8.57	0	8.57	8.57		1	5.36	0	5.36	5.36
13		4	13.86	1.2	12.31	14.83		4	6.37	0.55	5.55	6.75
14		4	7.48	3.68	2.61	11.26		4	3.44	1.73	1.3	4.99
15		4	16.43	4.48	10.5	20.64		4	6.16	1.36	4.38	7.63
16		1	11.76	0	11.76	11.76		1	4.74	0	4.74	4.74
17		4	16.36	8.87	5.39	27.11		4	8.18	5.09	2.76	14.72
18		4	17.88	8.83	10.06	30.19		4	6.39	1.7	5.26	8.92
Prom.	*CC (%)*	*66*	*15.17*	*7.77*	*2.61*	*36.5*	*PMP (%)*	*66*	*7.54*	*3.72*	*1.3*	*18.81*

Tabla II.6. Valores medios de agua útil (AU) y capacidad de almacenamiento de agua en el perfil (120 cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	Media	Variable	mm
1	AU	11.63	Capacidad de retención de agua en perfil (mm)	151.28
2		11.53		150.58
3		8.67		116.10
4		6.82		98.65
5		4.96		73.93
6		7.01		113.12
7		2.83		38.32
8		2.47		34.91
9		9.22		131.02
10		2.45		33.57
11		14.3		213.36
12		2.21		13.52
13		7.5		110.73
14		4.04		59.59
15		10.27		148.09
16		7.02		27.15
17		8.18		114.29
18		11.49		166.51
Prom.	*AU (%)*	*7.367*		*99.71*

Tabla II.7. Medidas resumen de pH, conductividad eléctrica (CE) y sodio intercambiable (Na i) en el perfil (120 cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	pH (1:2,5)	4	8.09	0.17	7.83	8.18	CE (dS/m)	4	8.01	3.2	3.51	10.63	Na i (meq/100g)	4	2.41	0.78	1.52	3.26
2		4	8.2	0.18	7.94	8.32		4	14.93	4.25	8.9	18.11		4	4.77	1.35	3.08	6.34
3		4	8.06	0.16	7.86	8.2		4	4.27	2.11	1.56	6.43		4	3.29	1.75	0.67	4.38
4		4	7.91	0.15	7.8	8.13		4	4.17	1.7	2.02	6.19		4	1.18	0.44	0.67	1.74
5		4	7.88	0.04	7.82	7.91		4	2.64	0.91	1.28	3.17		4	0.48	0.22	0.27	0.71
6		4	8.02	0.19	7.75	8.18		4	4.79	1.62	3.34	6.54		4	1.53	0.4	1.12	2.01
7		4	8.09	0.3	7.69	8.4		4	4.29	2.82	0.74	7.52		4	1.26	0.7	0.35	2.04
8		4	8.2	0.15	8.01	8.35		4	3.67	2.61	0.59	6.31		4	0.92	0.49	0.3	1.34
9		4	8.09	0.09	7.99	8.16		4	4.62	3.72	0.85	9.68		4	1.63	1.47	0.29	3.72
10		4	8.28	0.11	8.15	8.42		4	3.23	2.74	0.42	6.12		4	0.58	0.22	0.33	0.86
11		4	7.94	0.15	7.78	8.08		4	3.81	1.65	1.33	4.64		4	6.44	3.98	0.55	9.32
12		1	8.42	0	8.42	8.42		1	0.43	0	0.43	0.43		1	0.37	0	0.37	0.37
13		4	8.35	0.17	8.09	8.46		4	0.9	0.16	0.71	1.06		4	0.39	0.09	0.28	0.47
14		4	8.44	0.18	8.19	8.58		4	1.77	0.78	0.77	2.44		4	0.43	0.17	0.29	0.61
15		4	7.85	0.25	7.62	8.19		4	2.07	1.5	0.5	3.55		4	0.29	0.04	0.23	0.33
16		1	8.09	0	8.09	8.09		1	0.54	0	0.54	0.54		1	0.54	0	0.54	0.54
17		4	8.13	0.16	7.93	8.27		4	1.38	0.55	0.72	2		4	0.71	0.28	0.42	1.05
18		4	8.26	0.17	8.07	8.49		4	11.32	7.36	2.92	17.83		4	5	4.81	0.97	11.46
Prom.	*pH (1:2,5)*	*66*	*8.11*	*0.22*	*7.62*	*8.58*	*CE (dS/m)*	*66*	*4.61*	*4.43*	*0.42*	*18.11*	*Na i (meq/100g)*	*66*	*1.91*	*2.38*	*0.23*	*11.46*

Tabla II.8. Medidas resumen del complejo de intercambio catiónico (CIC) en el perfil (120cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	CIC (meq/100g)	4	12.51	5.92	6.37	20.29
2		4	24.56	11.86	14.04	39.39
3		4	21.69	4.74	14.75	25.45
4		4	13.21	1.23	12.23	14.91
5		4	10.08	2.29	7.77	12.95
6		4	13.23	3.74	10.12	18.51
7		4	9.64	2.77	6.25	12.68
8		4	6.88	1.39	5.89	8.93
9		4	13.17	3.14	9.64	16.07
10		4	7.05	1.97	4.64	9.46
11		4	18.13	2.92	14.46	21.25
12		1	8.21	0	8.21	8.21
13		4	8.71	1.16	7.68	10.36
14		4	4.46	2.31	1.61	6.96
15		4	19.55	8.72	8.32	29.04
16		1	9.39	0	9.39	9.39
17		4	12.77	7	5.54	22.14
18		4	8.66	3.33	5.36	13.04
Prom.	*CIC (meq/100g)*	*66*	*12.65*	*6.94*	*1.61*	*39.39*

Tabla II.9. Medidas resumen del Nitrógeno total (%) y Fósforo disponible (ppm) en el perfil (120cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	N t (%)	4	0.04	0.02	0.02	0.07	P disp. (ppm)	4	7.68	1.7	6.2	10.1
2		4	0.03	0.02	0.02	0.06		4	7.54	0.99	6.5	8.8
3		4	0.06	0.01	0.06	0.07		4	12.75	1.08	11.5	14
4		4	0.05	0.02	0.03	0.06		4	10.7	1.07	9.1	11.3
5		4	0.03	0.01	0.01	0.04		4	9.8	2.54	8.1	13.5
6		4	0.04	0.03	0.01	0.08		4	12.3	4.64	7.5	17.8
7		4	0.03	0.02	0.01	0.06		4	8.62	3.59	4.66	12.59
8		4	0.05	0.07	0.01	0.15		4	5.17	1.34	3.28	6.38
9		4	0.05	0.03	0.02	0.08		4	5.52	3.79	2.24	9.14
10		4	0.03	0.01	0.02	0.04		4	7.84	0.59	7.07	8.45
11		4	0.06	0.03	0.03	0.1		4	7.41	4.8	2.59	13.97
12		1	0.04	0	0.04	0.04		1	3.3	0	3.3	3.3
13		4	0.04	0.02	0.02	0.06		4	5.78	2.29	4.31	9.14
14		4	0.01	0.01	0.01	0.03		4	4.14	3.27	1.55	8.79
15		4	0.04	0.01	0.03	0.05		4	3.84	0.28	3.57	4.11
16		1	0.04	0	0.04	0.04		1	4.33	0	4.33	4.33
17		4	0.04	0.02	0.01	0.06		4	5.43	2.44	3.28	8.45
18		4	0.03	0.01	0.02	0.04		4	2.41	0.72	1.55	3.28
Prom.	*N t (%)*	*66*	*0.04*	*0.02*	*0.01*	*0.15*	*P disp. (ppm)*	*66*	*7.2*	*3.7*	*1.55*	*17.8*

Tabla II.10. Medidas resumen del Potasio intercambiable y Materia Orgánica total en el perfil (120cm) de cada uno de los sitios analizados.

Sitio	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx	Variable	n	Media	D.E.	Mín	Máx
1	K i (meq/100g)	4	0.46	0.32	0.23	0.93	MO t (%)	4	0.82	0.28	0.49	1.17
2		4	0.53	0.2	0.27	0.76		4	0.59	0.24	0.4	0.94
3		4	0.49	0.05	0.43	0.56		4	0.59	0.27	0.22	0.85
4		4	0.75	0.47	0.35	1.34		4	0.88	0.53	0.34	1.44
5		4	0.54	0.29	0.19	0.84		4	0.37	0.08	0.32	0.49
6		4	0.17	0.26	0.02	0.56		4	0.66	0.66	0.24	1.65
7		4	0.63	0.52	0.06	1.27		4	0.47	0.24	0.16	0.67
8		4	0.98	0.35	0.54	1.27		4	0.33	0.23	0.17	0.66
9		4	0.71	0.11	0.54	0.79		4	0.65	0.34	0.29	1.01
10		4	0.47	0.06	0.42	0.54		4	0.36	0.19	0.15	0.56
11		4	1.15	0.77	0.36	2.18		4	1.11	0.53	0.55	1.71
12		1	0.3	0	0.3	0.3		1	0.59	0	0.59	0.59
13		4	0.3	0.13	0.18	0.48		4	0.49	0.34	0.21	0.98
14		4	0.29	0.22	1.00E-03	0.48		4	0.42	0.23	0.23	0.72
15		4	0.6	0.18	0.38	0.8		4	0.6	0.22	0.27	0.71
16		1	0.23	0	0.23	0.23		1	0.45	0	0.45	0.45
17		4	0.26	0.25	1.00E-03	0.6		4	0.58	0.3	0.23	0.84
18		4	0.6	0.19	0.36	0.79		4	0.35	0.08	0.29	0.47
Prom.	*K i (meq/100g)*	*66*	*0.55*	*0.38*	*1.00E-03*	*2.18*	*MO t (%)*	*66*	*0.58*	*0.35*	*0.15*	*1.71*

Curvas comparativas del desarrollo productivo, altura, cobertura vegetal e IAF del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

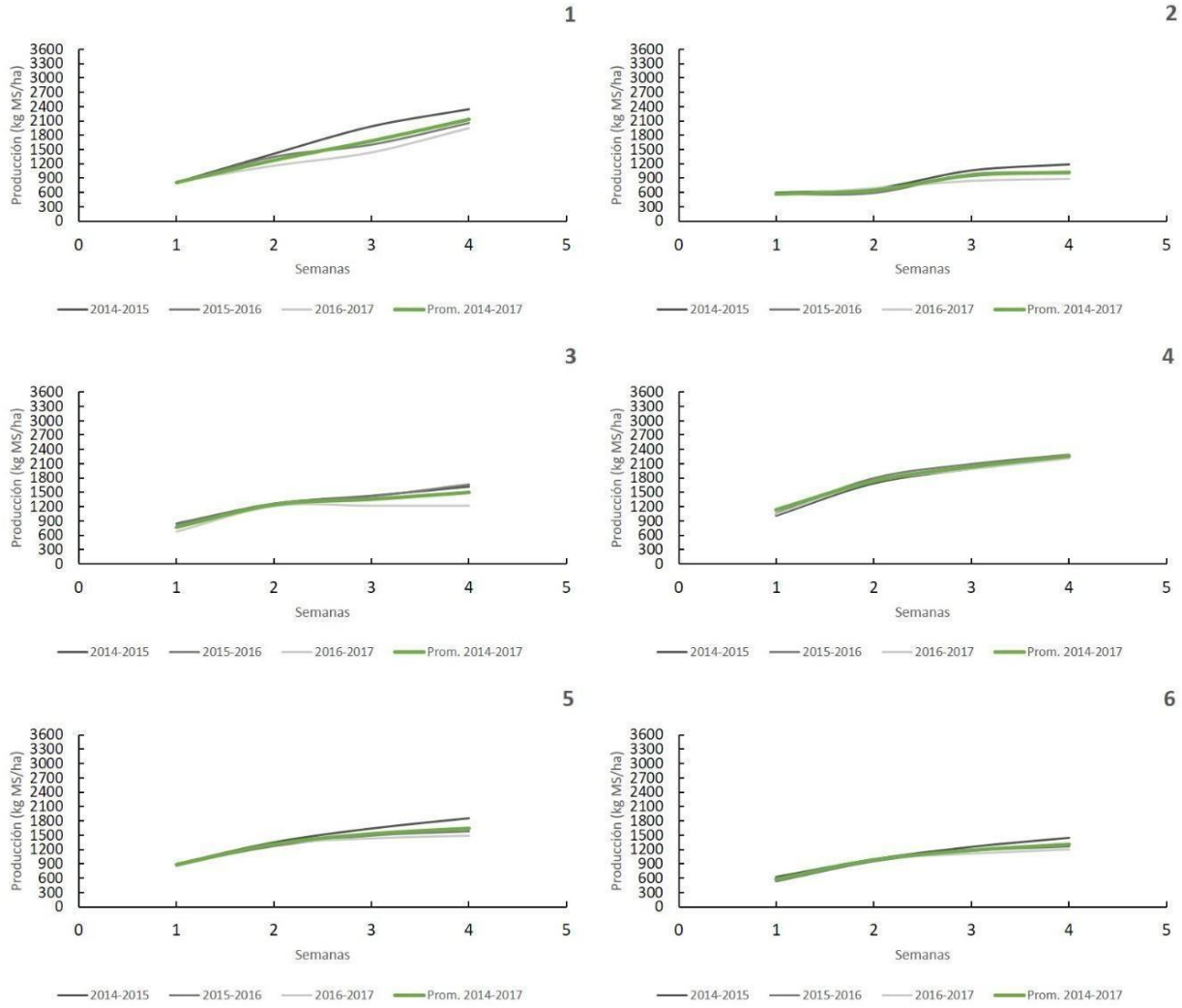

Figura II.21. Curvas de desarrollo de producción desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 1 al 6 (pivote A). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017

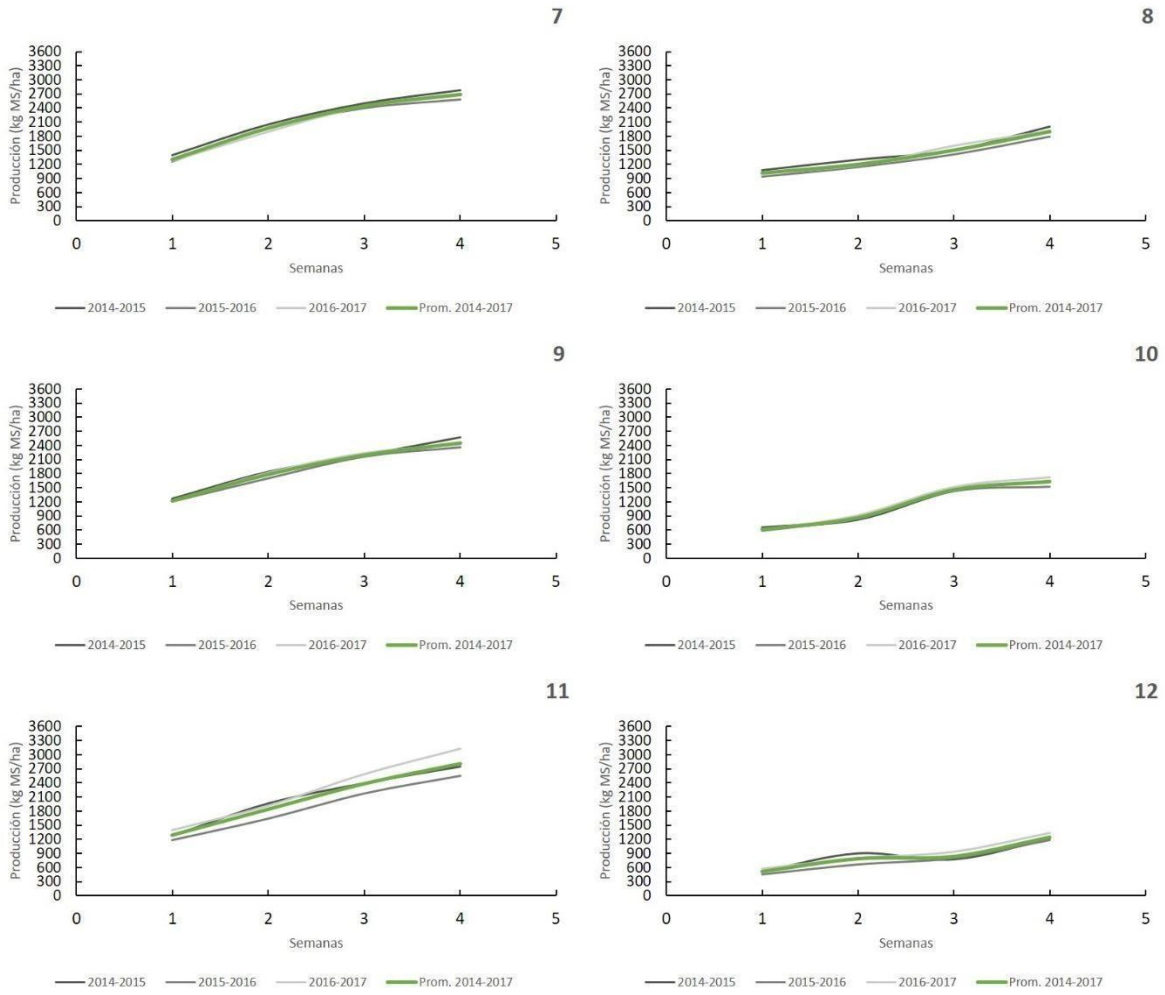

Figura II.21. Curvas de desarrollo de producción desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 7 al 12 (pivote B). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

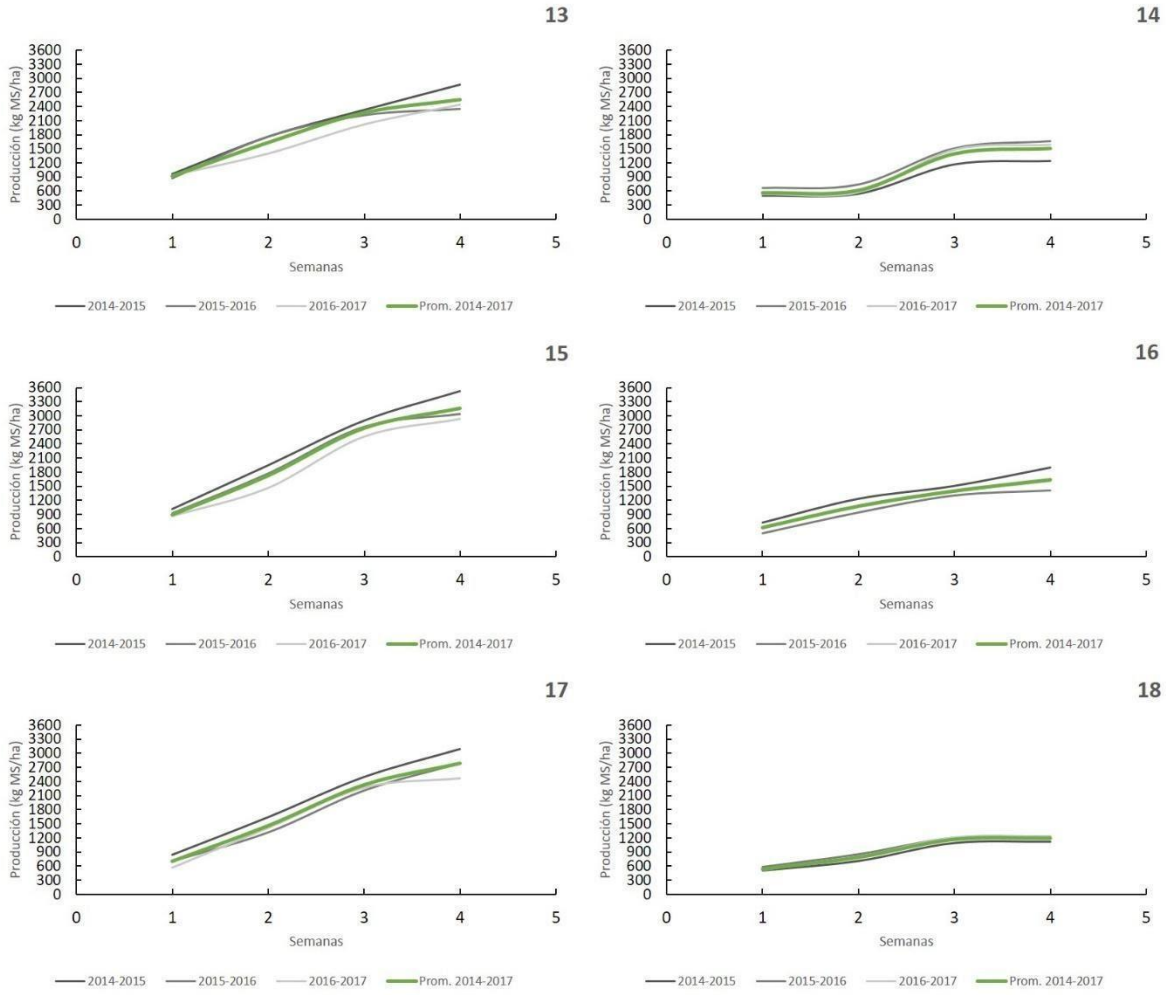

Figura II.21. Curvas de desarrollo de producción desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 13 al 18 (pivote C). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

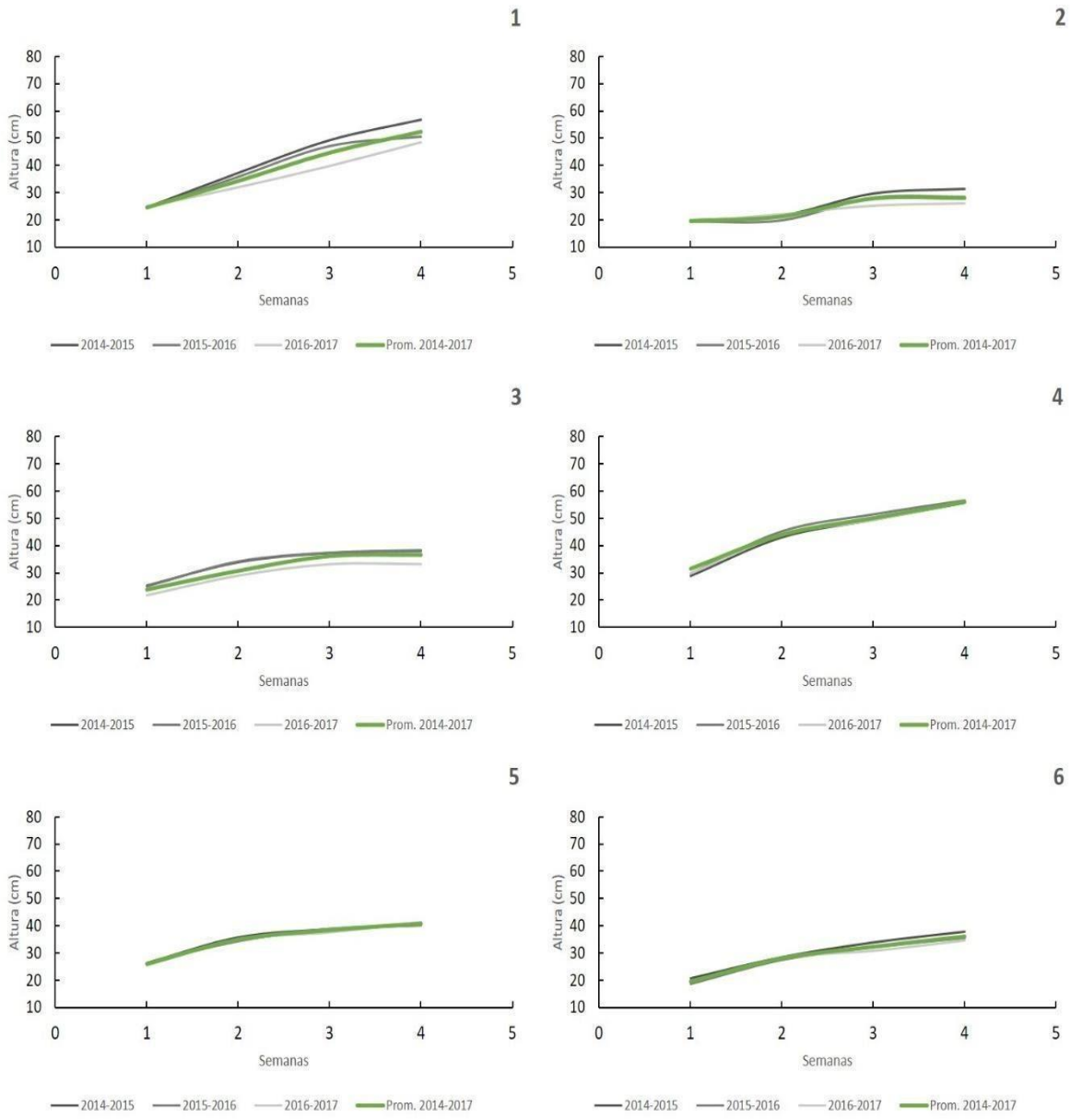

Figura II.21. Curvas de desarrollo de altura del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 1 al 6 (pivote A). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

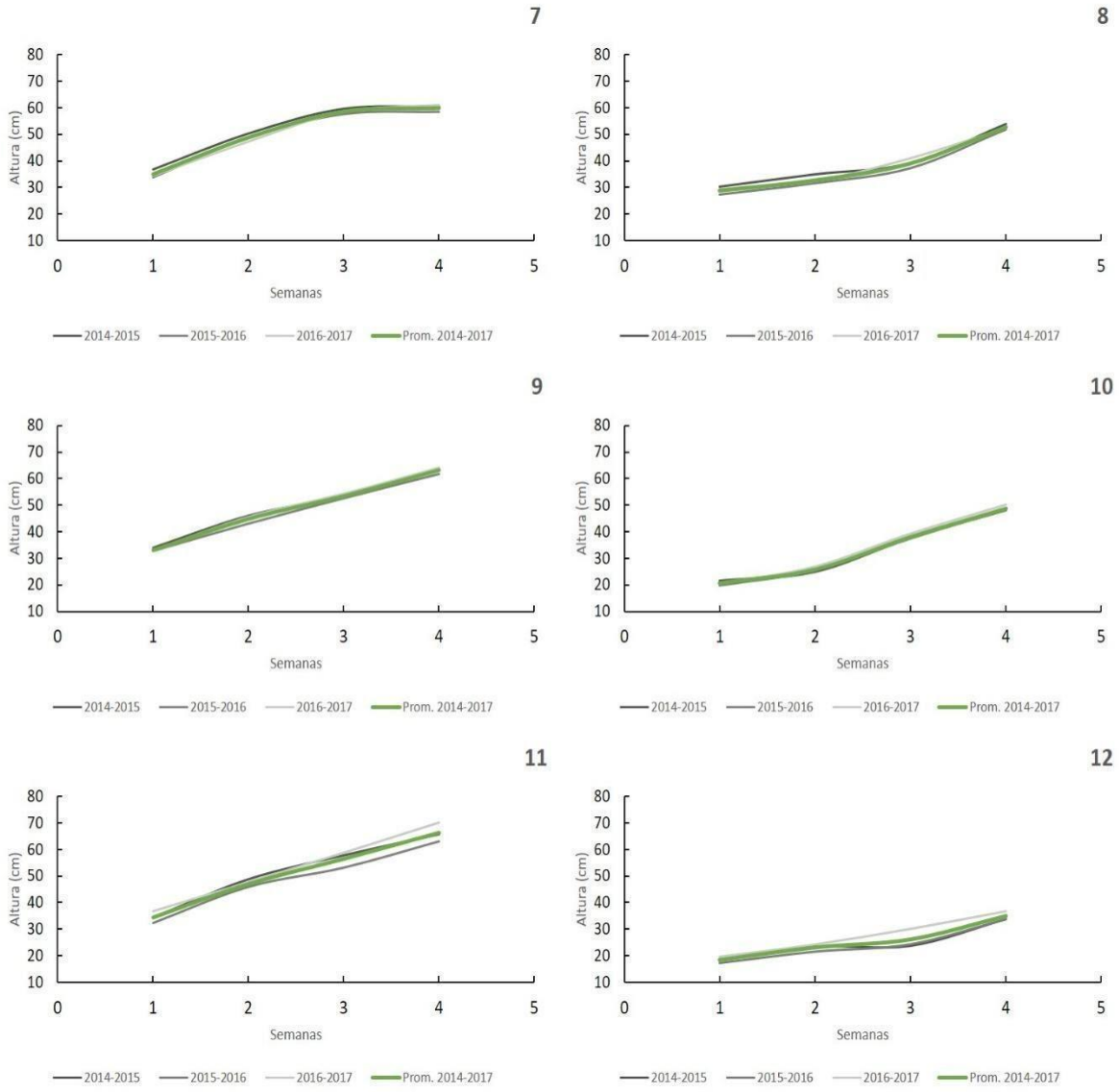

Figura II.21. Curvas de desarrollo de altura del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 7 al 12 (pivote B). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

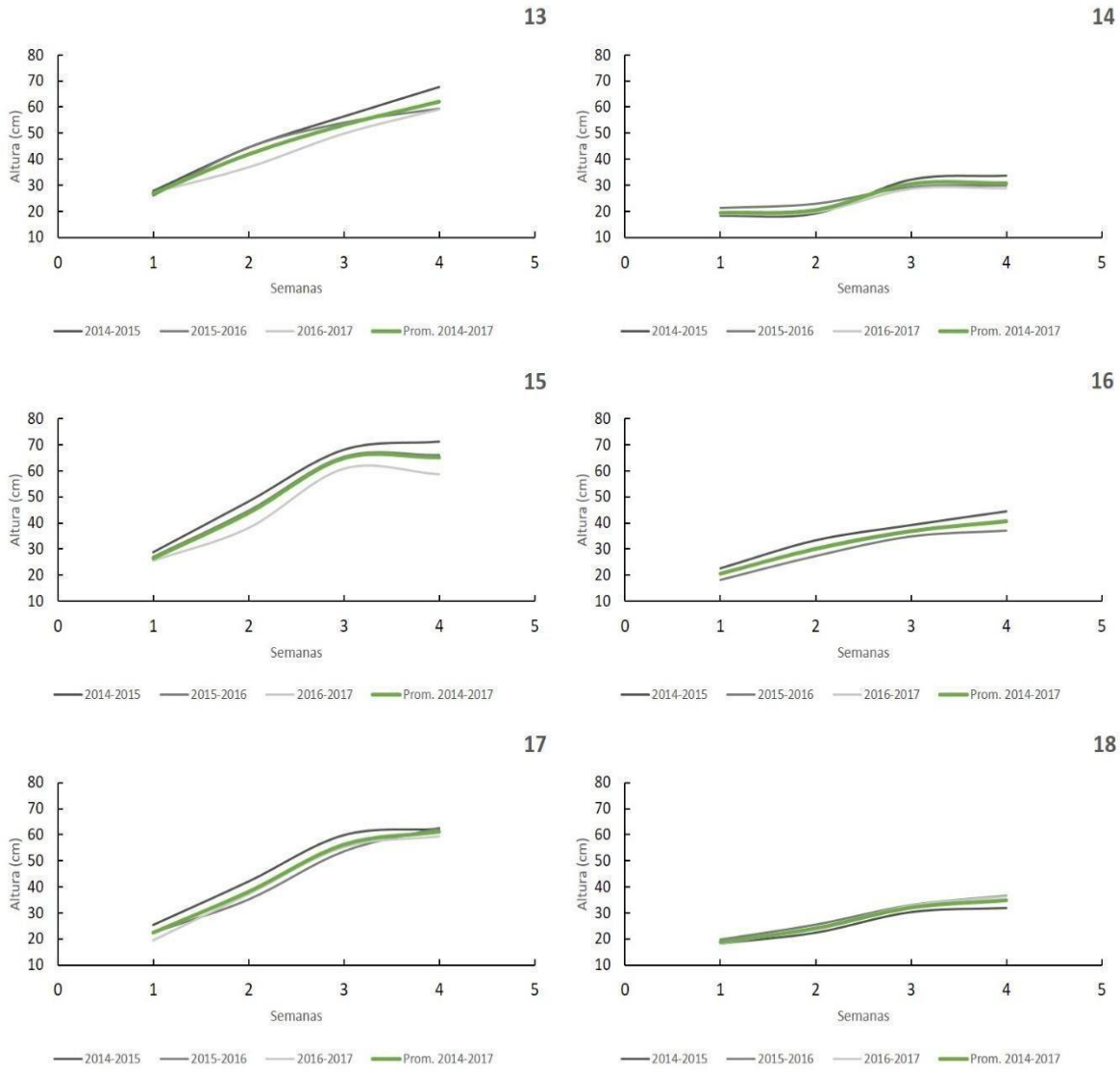

Figura II.21. Curvas de desarrollo de altura del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 13 al 18 (pivote C). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

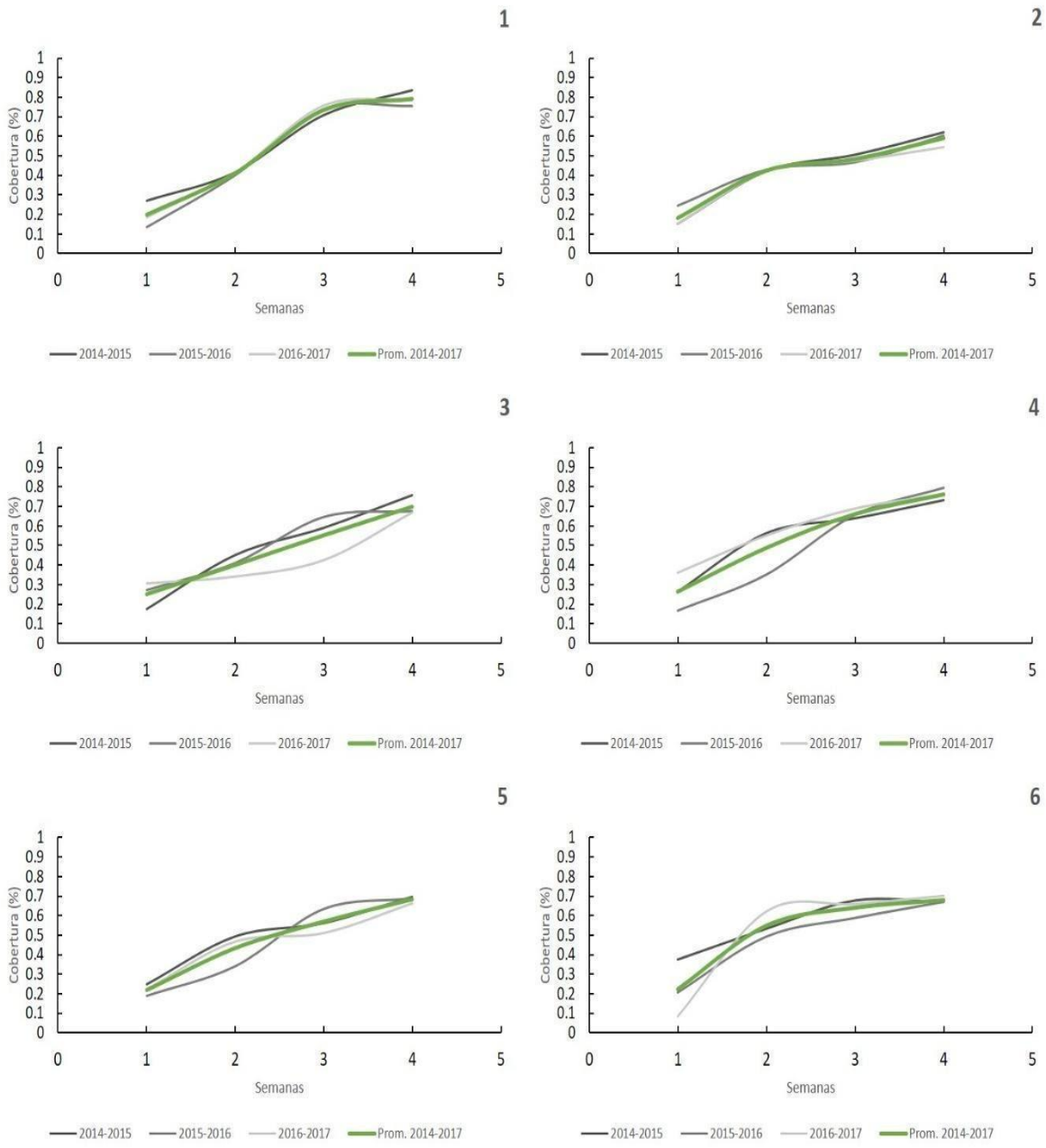

Figura II.21. Curvas de desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 1 al 6 (pivote A). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

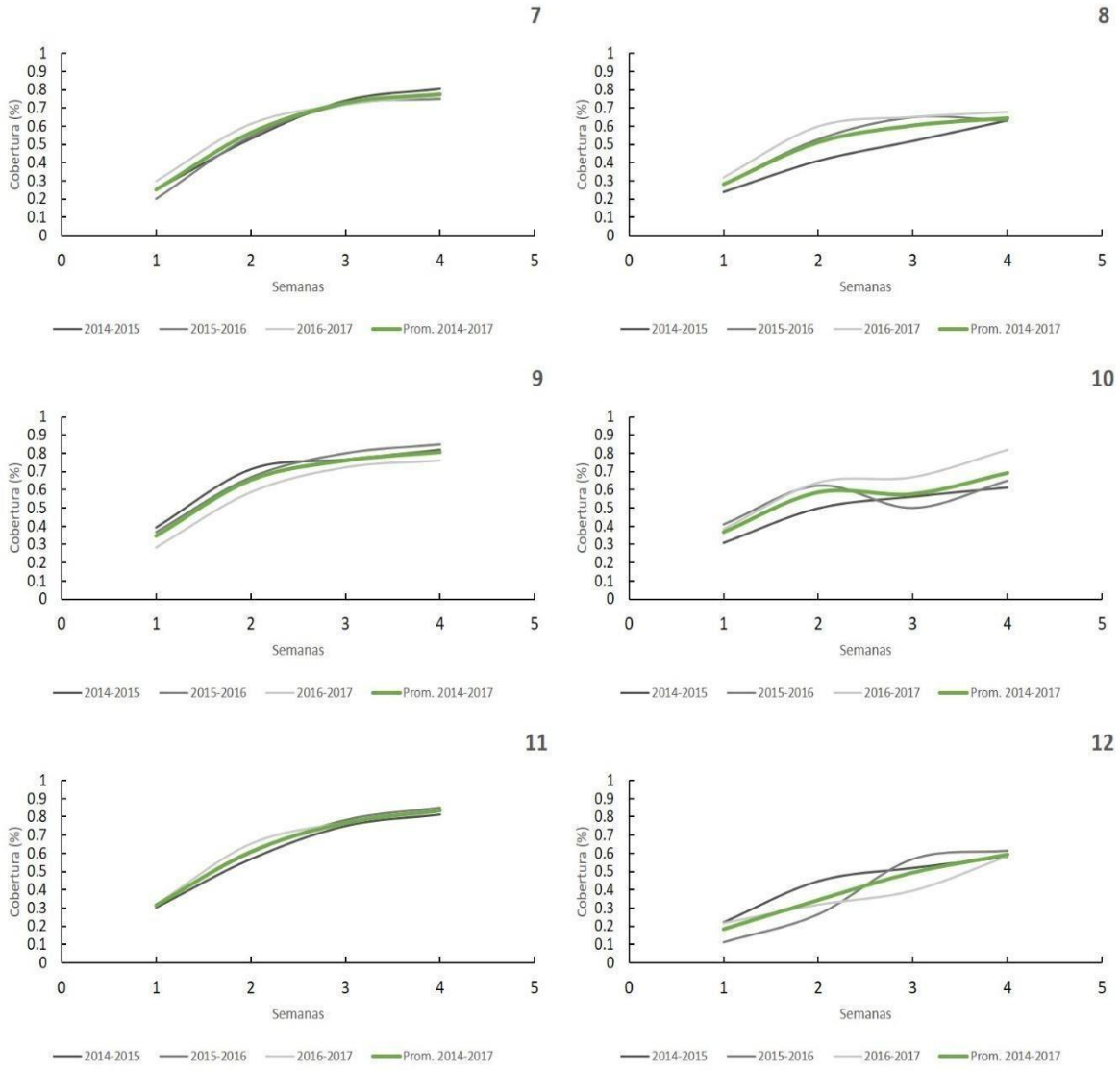

Figura II.21. Curvas de desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 7 al 12 (pivote B). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

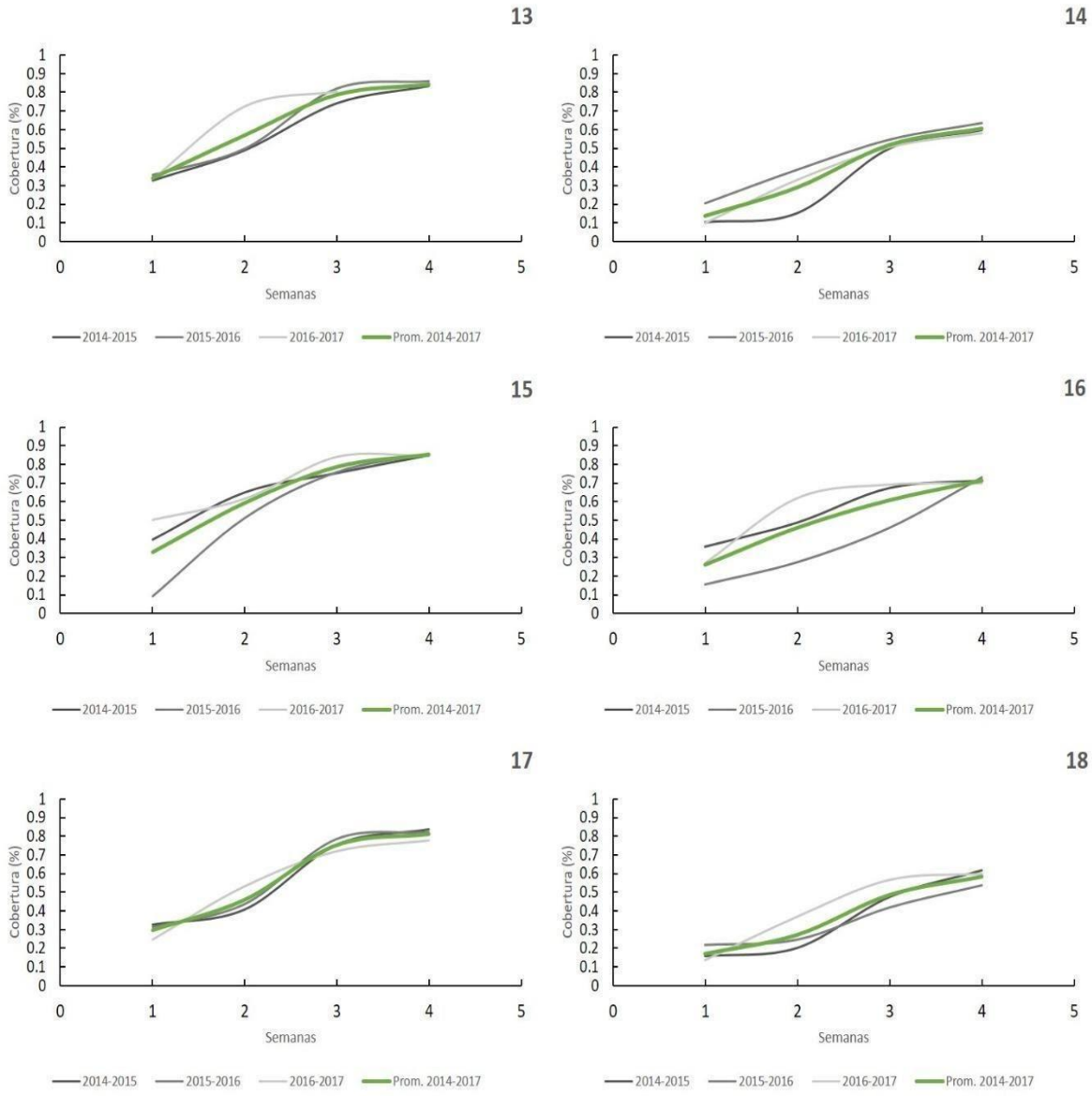

Figura II.21. Curvas de desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 13 al 18 (pivote C). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

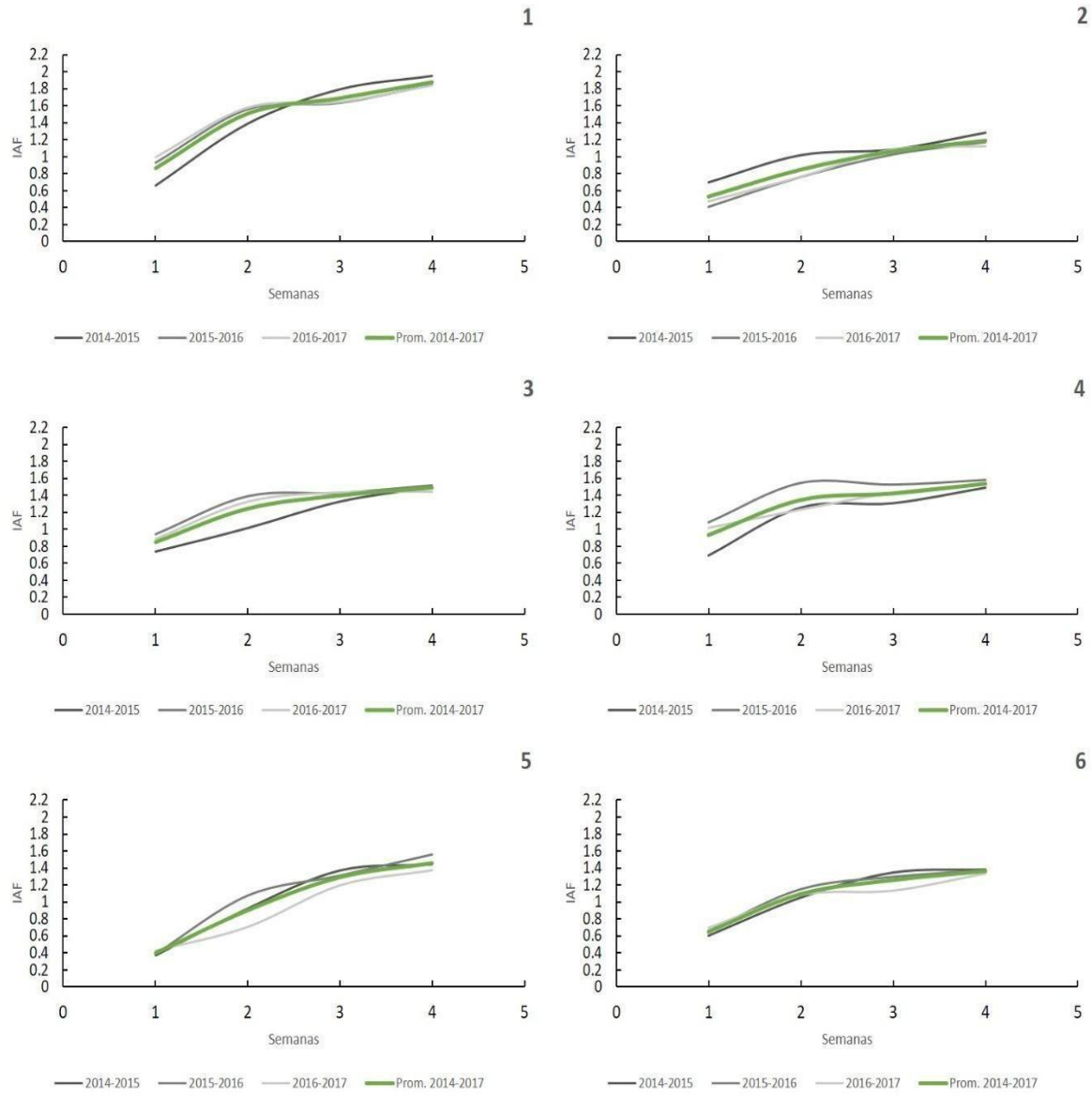

Figura II.21. Curvas de desarrollo del IAF del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 1 al 6 (pivote A). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

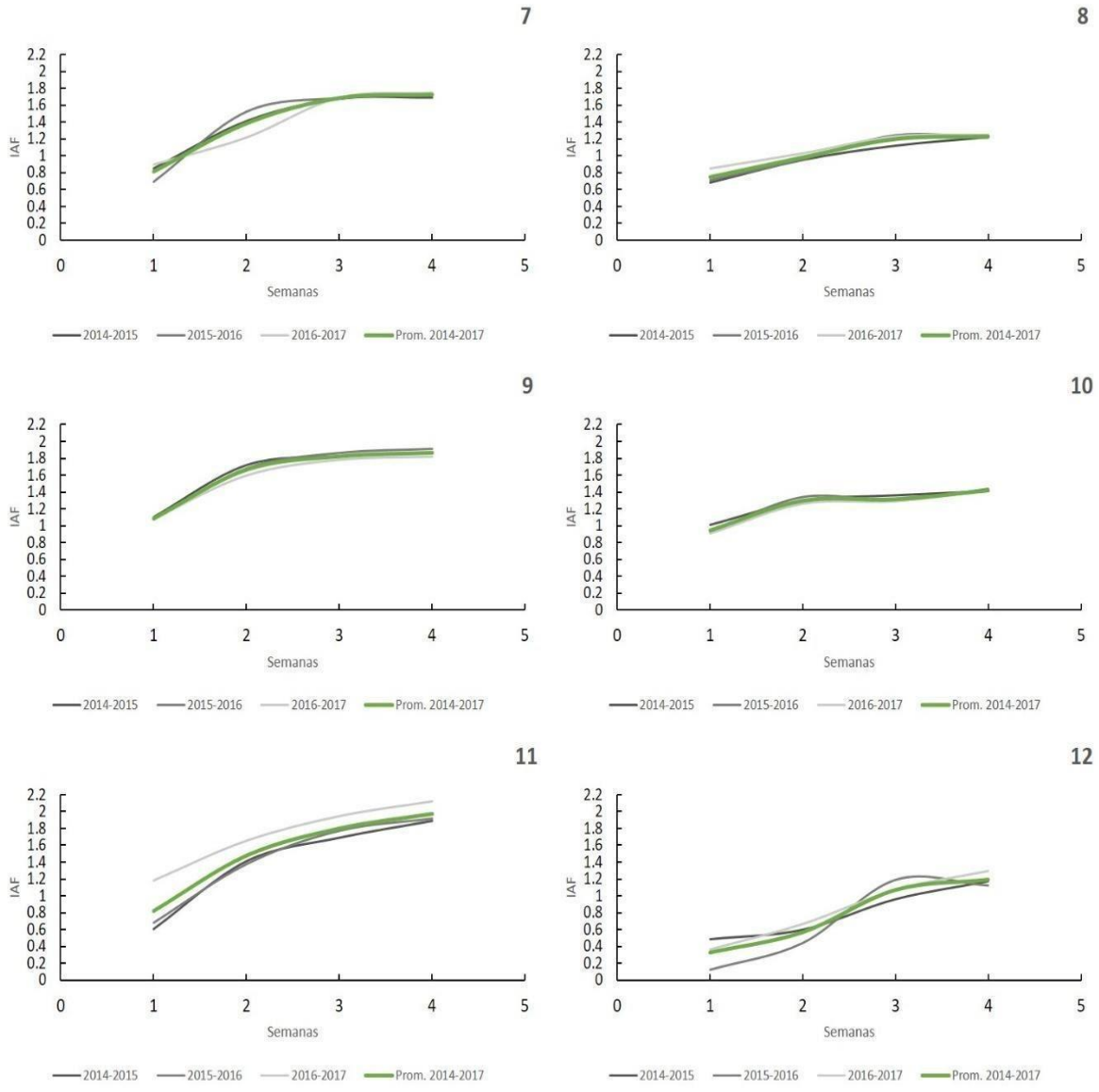

Figura II.21. Curvas de desarrollo del IAF del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 7 al 12 (pivote B). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

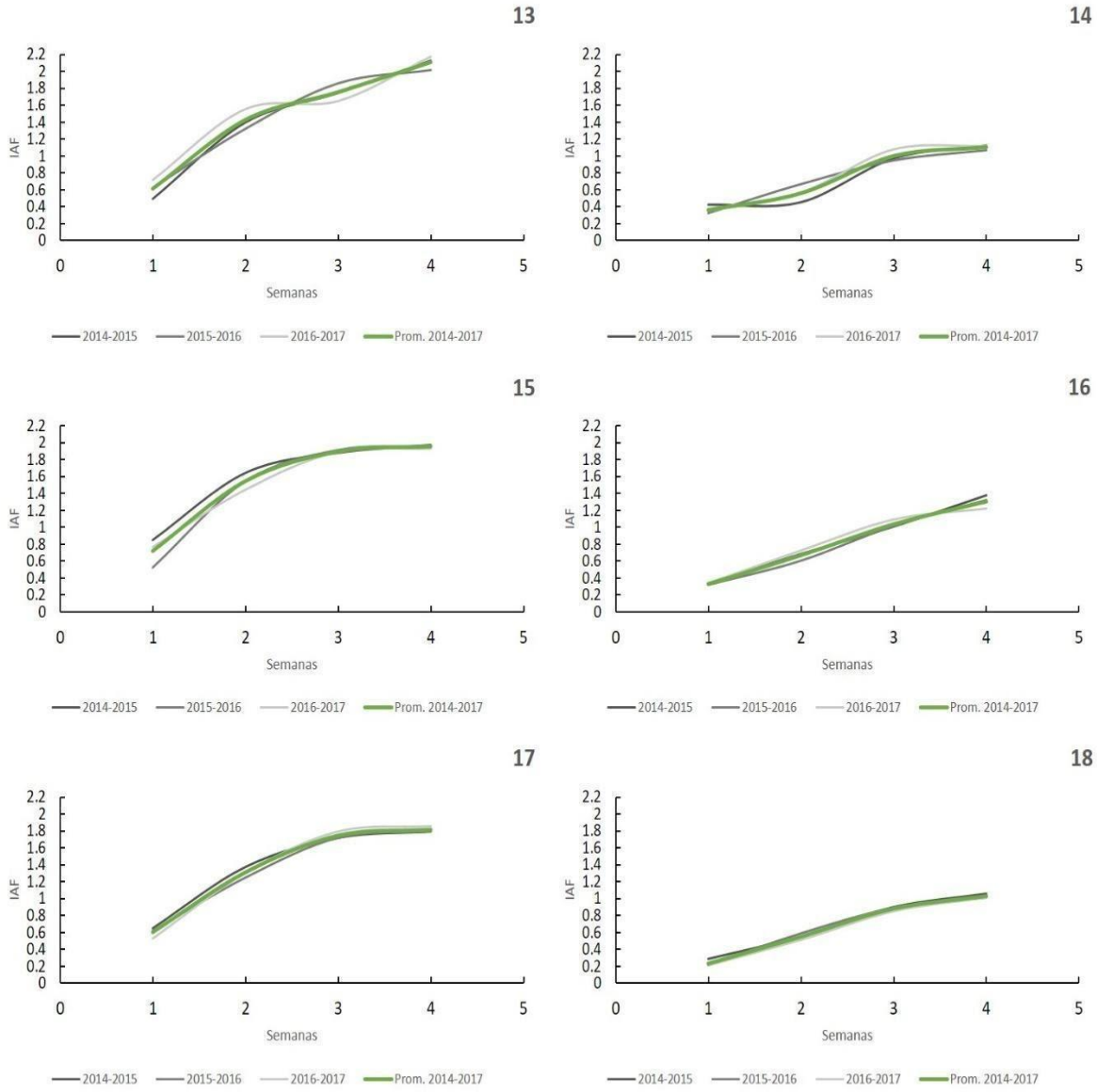

Figura II.21. Curvas de desarrollo del IAF del cultivo de alfalfa desde el rebrote hasta el momento de corte. Sitios 1 al 6 (pivote C). Temporadas 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017.

Tabla II.13. Medias, desvío estándar, mínimo y máximo del NDVI, EVI y SAVI en cada una de las fechas analizadas.

	Fecha	NDVI				EVI				SAVI			
		Media	*D.E.*	*Mín*	*Máx*	*Media*	*D.E.*	*Mín*	*Máx*	*Media*	*D.E.*	*Mín*	*Máx*
Camp. 2014-2015	04-11-2014	0.41	0.15	0.07	0.60	0.44	0.19	0.07	0.72	0.44	0.17	0.07	0.68
	22-12-2014	0.46	0.10	0.09	0.60	0.53	0.14	0.09	0.74	0.51	0.12	0.10	0.68
	07-01-2015	0.45	0.12	0.12	0.61	0.51	0.16	0.10	0.78	0.49	0.14	0.11	0.70
	23-01-2015	0.34	0.11	0.09	0.61	0.37	0.15	0.09	0.77	0.38	0.13	0.10	0.71
	08-02-2015	0.43	0.10	0.10	0.60	0.49	0.14	0.10	0.77	0.49	0.12	0.11	0.71
	24-02-2015	0.44	0.13	0.14	0.60	0.51	0.19	0.11	0.77	0.51	0.16	0.13	0.72
	04-03-2015	0.25	0.09	0.00	0.47	0.30	0.11	0.05	0.54	0.29	0.10	0.05	0.51
	28-03-2015	0.37	0.07	0.12	0.52	0.44	0.11	0.13	0.68	0.45	0.09	0.15	0.65
	21-04-2015	0.55	0.10	0.02	0.69	0.60	0.15	0.09	0.78	0.57	0.12	0.08	0.74
Camp. 2015-2016	07-11-2015	0.43	0.08	0.12	0.58	0.47	0.11	0.12	0.71	0.47	0.09	0.13	0.66
	23-11-2015	0.39	0.13	0.14	0.59	0.56	0.10	0.15	0.74	0.56	0.09	0.17	0.69
	25-12-2015	0.40	0.08	0.13	0.57	0.43	0.11	0.13	0.68	0.44	0.10	0.14	0.64
	10-01-2016	0.51	0.06	0.15	0.60	0.58	0.09	0.14	0.74	0.56	0.08	0.15	0.68
	11-02-2016	0.45	0.08	0.16	0.59	0.52	0.12	0.15	0.76	0.50	0.10	0.17	0.69
	30-03-2016	0.39	0.07	0.08	0.52	0.46	0.10	0.08	0.68	0.47	0.09	0.10	0.65
Camp. 2016-2017	22-09-2016	0.39	0.06	0.12	0.50	0.44	0.08	0.11	0.62	0.45	0.08	0.12	0.60
	08-10-2016	0.38	0.06	0.13	0.53	0.42	0.08	0.12	0.65	0.43	0.07	0.14	0.62
	09-11-2016	0.52	0.05	0.18	0.60	0.60	0.08	0.17	0.74	0.57	0.06	0.18	0.68
	11-12-2016	0.43	0.10	0.17	0.63	0.48	0.13	0.17	0.78	0.47	0.11	0.18	0.71
	27-12-2016	0.39	0.11	0.14	0.62	0.43	0.15	0.14	0.78	0.43	0.13	0.15	0.71
	12-01-2017	0.41	0.11	0.17	0.60	0.45	0.15	0.17	0.75	0.46	0.13	0.19	0.69
	28-01-2017	0.44	0.12	0.14	0.61	0.49	0.17	0.14	0.76	0.50	0.15	0.16	0.71
	13-02-2017	0.34	0.13	0.14	0.59	0.38	0.17	0.14	0.74	0.39	0.15	0.16	0.69
	17-03-2017	0.41	0.10	0.13	0.53	0.49	0.14	0.13	0.67	0.49	0.13	0.15	0.64
	02-04-2017	0.27	0.07	0.14	0.48	0.36	0.11	0.17	0.67	0.33	0.09	0.17	0.60
	18-04-2017	0.36	0.06	0.15	0.49	0.48	0.10	0.17	0.71	0.46	0.09	0.19	0.64

Tabla II.14. Medidas resumen del NDVI, EVI y SAVI (media, DE, mínimo y máximo) en cada una de las campañas estudiadas.

	NDVI				EVI				SAVI			
Sitio	Media	D.E.	Mín	Máx	Media	D.E.	Mín	Máx	Media	D.E.	Mín	Máx
Campaña 2014-2015	0.41	0.06	0.13	0.55	0.47	0.10	0.11	0.65	0.47	0.09	0.12	0.62
Campaña 2015-2016	0.43	0.06	0.16	0.55	0.49	0.08	0.15	0.67	0.49	0.07	0.17	0.64
Campaña 2016-2017	0.40	0.04	0.16	0.48	0.46	0.06	0.17	0.59	0.45	0.05	0.18	0.56
Campaña 2014 a 2017	0.41	0.05	0.15	0.50	0.47	0.07	0.15	0.61	0.47	0.06	0.17	0.58

Tabla II.15. Medidas resumen del NDVI (media, DE, mínimo y máximo) de todas las campañas en cada uno de los sitios de estudio.

	NDVI				EVI				SAVI			
Sitio	*Media*	*D.E.*	*Mín*	*Máx*	*Media*	*D.E.*	*Mín*	*Máx*	*Media*	*D.E.*	*Mín*	*Máx*
1	0.45	0.10	0.19	0.61	0.51	0.13	0.20	0.71	0.51	0.11	0.22	0.66
2	0.37	0.10	0.19	0.54	0.41	0.12	0.20	0.59	0.42	0.11	0.23	0.58
3	0.43	0.11	0.20	0.61	0.49	0.14	0.20	0.68	0.48	0.12	0.23	0.65
4	0.43	0.11	0.19	0.59	0.49	0.14	0.20	0.69	0.48	0.12	0.22	0.66
5	0.43	0.12	0.19	0.61	0.49	0.15	0.19	0.71	0.49	0.13	0.21	0.67
6	0.39	0.09	0.21	0.52	0.43	0.10	0.22	0.59	0.44	0.10	0.25	0.58
7	0.43	0.11	0.19	0.59	0.49	0.15	0.20	0.71	0.49	0.13	0.22	0.66
8	0.39	0.11	0.18	0.59	0.43	0.15	0.18	0.64	0.43	0.13	0.21	0.60
9	0.46	0.12	0.18	0.66	0.53	0.16	0.19	0.75	0.52	0.13	0.21	0.70
10	0.43	0.12	0.18	0.60	0.48	0.16	0.19	0.75	0.48	0.13	0.21	0.70
11	0.43	0.11	0.18	0.64	0.51	0.15	0.19	0.72	0.51	0.12	0.21	0.67
12	0.35	0.15	0.10	0.57	0.38	0.19	0.09	0.70	0.39	0.17	0.10	0.67
13	0.50	0.13	0.23	0.61	0.60	0.19	0.24	0.76	0.57	0.16	0.20	0.70
14	0.39	0.16	0.08	0.56	0.49	0.21	0.06	0.69	0.48	0.19	0.07	0.66
15	0.45	0.20	0.05	0.61	0.53	0.25	0.04	0.72	0.51	0.23	0.05	0.68
16	0.40	0.19	0.06	0.59	0.51	0.24	0.04	0.72	0.50	0.22	0.05	0.68
17	0.46	0.15	0.15	0.57	0.54	0.19	0.16	0.69	0.53	0.17	0.18	0.65
18	0.37	0.15	0.09	0.53	0.41	0.17	0.09	0.62	0.42	0.16	0.10	0.59

Tabla III.4. Medidas resumen de las variables edáficas analizadas en sitios de alta y baja producción. Variables: % arcilla, % limo, % arena, % arcilla + limo (A+L), densidad aparente (DA), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), pH, conductividad eléctrica (CE), complejo de intercambio catiónico (CIC), Na, K, P disponible en ppm, % nitrógeno total (N total) y % materia orgánica total (MOT).

		Alta producción				*Baja producción*			
Variable	**Profundidad (cm)**	**Media**	**D.E.**	**Min**	**Max**	**Media**	**D.E.**	**Min**	**Max**
% arcilla	0 - 30	10,96	5,85	6,55	20,74	9,54	4,50	3,54	17,47
% limo		19,13	10,40	7,28	36,35	15,67	7,11	8,45	30,75
% arena		69,91	15,95	43,98	85,92	74,79	8,64	60,34	83,13
% A+L		30,09	15,95	14,08	56,02	25,21	8,64	16,87	39,66
pH (1:2,5)		8,01	0,18	7,78	8,22	8,10	0,26	7,75	8,42
CE (dS/m)		1,30	1,02	0,50	3,51	2,08	2,61	0,42	8,90
CIC (meq/100g)		13,36	4,08	8,75	20,29	11,45	3,85	6,96	18,51
Na i (meq/100g)		0,56	0,42	0,23	1,52	1,00	1,29	0,29	4,55
K i (meq/100g)		0,64	0,22	0,35	0,93	0,45	0,11	0,23	0,56
P disp. (ppm)		9,25	3,27	3,57	13,97	8,35	4,90	2,24	17,80
N t (%)		0,06	0,02	0,03	0,10	0,05	0,04	0,02	0,15
MO t (%)		0,93	0,37	0,54	1,71	0,61	0,40	0,22	1,65
Da (g/cm^3)		1,40	0,08	1,25	1,48	1,46	0,11	1,29	1,62
CC (%)		14,18	4,26	9,44	23,36	12,83	4,23	8,57	19,02
PMP (%)		6,28	1,26	4,38	8,21	5,89	1,18	4,74	8,82
% arcilla	30 - 60	12,70	5,24	7,51	22,66	13,24	7,78	7,14	25,55
% limo		28,58	10,36	15,05	44,14	20,80	16,99	10,38	52,21
% arena		58,72	12,76	44,30	77,44	65,96	24,23	23,50	82,48
% A+L		41,28	12,76	22,56	55,70	34,04	24,23	17,52	76,50
pH (1:2,5)		8,07	0,21	7,84	8,46	8,21	0,20	7,88	8,57
CE (dS/m)		3,87	3,21	0,83	10,63	5,63	5,46	1,42	18,11
CIC (meq/100g)		16,39	5,12	8,57	22,69	13,78	12,34	5,36	39,39
Na i (meq/100g)		2,06	2,46	0,33	7,71	2,07	2,08	0,54	6,34
K i (meq/100g)		0,87	0,68	0,18	2,18	0,54	0,27	0,06	0,85
P disp. (ppm)		7,20	2,38	3,63	11,10	8,03	4,32	2,59	14,30
N t (%)		0,06	0,01	0,04	0,07	0,04	0,02	0,01	0,07
MO t (%)		0,92	0,35	0,42	1,44	0,51	0,26	0,24	0,94
Da (g/cm^3)		1,44	0,08	1,28	1,56	1,40	0,16	1,14	1,66
CC (%)		19,29	6,68	13,13	31,85	13,95	9,54	6,15	32,95
PMP (%)		10,99	4,51	6,01	18,81	7,76	5,13	3,35	17,89
% arcilla	60 - 90	11,70	3,48	8,21	16,14	12,16	6,54	6,15	24,13
% limo		25,02	12,78	15,36	53,59	19,48	13,24	6,29	45,85
% arena		63,30	13,17	38,04	75,02	68,36	19,35	30,03	87,56
% A+L		36,72	13,15	24,98	61,96	31,64	19,35	12,44	69,98
pH (1:2,5)		8,01	0,26	7,69	8,42	8,27	0,21	7,90	8,58
CE (dS/m)		4,64	2,89	1,00	9,89	7,60	6,22	1,54	17,70
CIC (meq/100g)		14,04	7,00	7,68	29,04	11,99	9,14	3,75	28,82
Na i (meq/100g)		2,04	2,59	0,30	8,16	2,48	2,20	0,32	5,84
K i (meq/100g)		0,58	0,37	0,18	1,21	0,57	0,36	0,04	1,27
P disp. (ppm)		5,49	2,74	2,24	11,30	6,69	4,04	1,55	13,20
N t (%)		0,04	0,02	0,02	0,06	0,03	0,02	0,01	0,06
MO t (%)		0,61	0,31	0,29	1,21	0,37	0,17	0,17	0,68
Da (g/cm^3)		1,42	0,11	1,27	1,61	1,40	0,15	1,14	1,64
CC (%)		17,55	6,82	10,91	32,39	13,36	6,99	7,01	25,94
PMP (%)		9,07	3,45	6,52	17,30	7,14	3,68	2,77	13,17
% arcilla	90 - 120	9,33	3,44	6,03	17,54	12,02	6,86	5,19	26,10
% limo		22,15	20,03	8,01	67,99	19,20	15,40	5,60	47,56
% arena		68,52	19,79	24,04	83,89	68,79	19,54	37,54	89,21
% A+L		31,48	19,79	16,11	75,96	31,21	19,54	10,79	62,46
pH (1:2,5)		8,14	0,26	7,62	8,41	8,13	0,13	7,91	8,28
CE (dS/m)		4,81	3,00	1,06	9,68	7,60	5,70	2,44	17,83
CIC (meq/100g)		10,04	4,61	5,54	17,32	10,43	6,61	1,61	22,95
Na i (meq/100g)		2,50	2,99	0,29	9,32	2,81	3,79	0,27	11,46
K i (meq/100g)		0,34	0,26	0,00	0,73	0,42	0,43	0,00	1,27
P disp. (ppm)		5,56	3,52	2,24	11,30	6,77	3,21	1,55	11,50
N t (%)		0,02	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,06
MO t (%)		0,34	0,14	0,16	0,55	0,33	0,15	0,15	0,60
Da (g/cm^3)		1,41	0,14	1,18	1,65	1,45	0,12	1,33	1,68
CC (%)		18,44	12,12	5,39	36,50	12,38	8,92	2,61	30,19
PMP (%)		7,74	4,21	2,76	14,94	5,88	3,11	1,30	11,28

Tabla III.5. Coeficientes de Correlación Pearson entre la producción (kg MS/ha) e índices verdes derivados de sensores.

Coeficientes de correlación de Pearson				
Variable 1	Variable 2	n	Pearson	p-valor
Producción (Kg MS/ha)	NDVI	176	0,73	<0,0001
Producción (Kg MS/ha)	EVI	176	0,76	<0,0001
Producción (Kg MS/ha)	SAVI	176	0,75	<0,0001

Bibliografía

-**Abu-Awwad, A. M. y Shatanawi, M. R.** 1997. Water harvesting and infiltration in arid areas affected by Surface crust: examples from Jordan». Journal of Arid Environments, 37, 443-452.

- **Aguirre-Salado, C. A., Valdez-Lazalde, J.R., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M., Aguirre-Salado, A. I.** 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRG: Regresión y K-NN. Agrociencia 45 (1): 105-119.

- **Anastasiou, E.; Balafoutis, A.; Darra, N.; Psiroukis, V.; Biniari, A.; Xanthopoulos, G.; Fountas, S.** 2018. Satellite and Proximal Sensing to Estimate the Yield and Quality of Table Grapes. Agriculture 8, 94.

- **Arolfo, V. y A. Odorizzi.** 2017. Avances en alfalfa. Año 27. Nº 27. E.E.A. Manfredi– INTA. Córdoba, Argentina. 67 p.

- **Arolfo, V. y A. Odorizzi.** 2016. Avances en alfalfa. Año 26. Nº 26. E.E.A. Manfredi– INTA. Córdoba, Argentina. 83 pp.

- **Arolfo, V. y A. Odorizzi.** 2015. Avances en alfalfa. Año 25. Nº 25. E.E.A. Manfredi– INTA. Córdoba, Argentina. 64 pp.

- **Aumassanne, C. M.; Sartor, P. D.; Beget, M. E.; Fontanella, D. R.; Di Bella, C. M. y Lambert, M. J.** 2018. Potencialidades de las nuevas tecnologías en el agro pampeano. 1a ed. – Anguil, Buenos Aires: Ediciones INTA, pag 47-54.

- **Awad, M.M.** 2019. Toward Precision in Crop Yield Estimation Using Remote Sensing and Optimization Techniques. Agriculture 9, 54.

- **Bai, W.M., Li, L.H.** 2003. Effect of irrigation methods and quota on root wateruptake and biomass of alfalfa in the Wulanbuhe sandy region of China. Agric.Water Manage. 62, 139–148.

- **Barbanti, L.; Adroher, J.; Damian, J.M.; Di Virgilio, N.; Falsone, G.; Zucchelli, M.; Martelli, R.** 2017. Assessing wheat spatial variation based on proximal and remote spectral vegetation indices and soil properties. Italian Journal of Agronomy 21: 1-31.

- **Baret, F.; de Solan, B.; Lopez-Lozano, R.; Ma Kai; Weiss. M.** 2010. GAI estimates of row crops from downward looking digital photos taken perpendicular to rows at 57.5◦ zenith angle: Theoretical considerations based on 3D architecture models and application to wheat crops. Agricultural and Forest Meteorology. 150: 1393–1401

- **Baroni, G; B Ortuani; A Facchi & C Gandolfi.** 2013. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field. J Hydrol. 489: 148–159

- **Barrigi, C., N. Romero y G. Schenkel.** 1975. Deficiencias nutricionales de suelos pampeanospara el cultivo de la alfalfa determinadas mediante experimentos en macetas. EERA INTAAnguil. Proyecto FAO-INTA. 71 / 548. Documento de Trabajo Nro. 2, 17 p.

- **Basigalup, D.; R. Rossanigo y M. Ballario.** 2007. Panorama actual de la alfalfa en la Argentina. Capítulo 1. En: Basigalup D. (Ed). El cultivo de la alfalfa en la Argentina. E.E.A. Manfredi – INTA. Córdoba, Argentina. pp 15-25.

- **Basigalup, D., Giletta, M., Odorizzi, A., Arolfo, V., Sánchez, F. and Urrets Zavalía, G**. 2018. An overview of alfalfa (Medicago sativa L.) situation in Argentina. Second World Alfalfa Congress, Córdoba (Argentina).

- **Bélanger G, A.N. Cambouris, G. Parent, D. Mongrain & N. Ziadi.** 2017. Biomass yield from an old grassfield as affected by sources of nitrogen fertilization and management zones in northern areas. Canadian Journal of Plant Science 97, 53–64.

- **Bernardi ACC, Bettiol GM, Ferreira RP, Santos KEL, Rabello LM, Inamasu RY.** 2016 Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. Precision Agriculture 17, 737–752.

- **Bertín, O.** 2006. Aplicar tecnologías disponibles para incrementar la producción de pasto de calidad. Seminario técnico: Los nuevos ambientes ganaderos: Como prepararse para el desafío de aumentar la producción de pasto de calidad. Buenos Aires. pp 42-48.

- **Bestvater C.R. y Casamiquela C. H.** 1983. Distribución textural de los suelos del Alto Valle del Río Negro. EEA ALTO VALLE del INTA

- **Blackmer, T.M., J.S. Schepers, G.E. Varvel y G.E. Meyer.** 1996. Analysis of aerial photography for nitrogen stress within corn fields. Agron. J. 88:729-733.

- **Blake and Hartge.** 1986. Bulk density. In: A Klute (ed.) Methods of soil analysis, Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison. Agronomy 9:363-375.

- **Bramley, RGV.** 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. Crop Past Sci 60: 197-217.

- **Breda, N.** 2003. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany, 54, 2403–2417.

- **Bremner J.M.** 1996. Nitrogen Total. En: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. Ed. Sparks DL. SSSA. Madison WI. pp 1149-1176.

- **Brocca, L; F Melone; T Moramarco & R Morbidelli.** 2009. Soil moisture temporal stability over experimental areas of Central Italy. Geoderma 148 (3–4): 364–374.

- **Buol, S., F. Hole and R. Mc Cracken.** 1973. Soil genesis and classification. 306 p. The Iowa University Press, Ames, Iowa, USA. 360 p.

- **Camacho, F., Latorre C., Pérez, M., Di Bella, C., Beget, M.E., Fontanella, D.R., Aumassanne C., Sartor P., Lambert, M.J., Baret, F., Lacaze, R**. 2014. Characterization of vegetation parameters over the Río Colorado basin in La Pampa (Argentine) with ground data and multi-scale satellite imagery. The 4th International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'IV, Torrent (Valencia) Spain.

- **Cano, E., Casagrande, G., Conti, H., Salazar Lea Plaza, J., Peña Zubiate, C., Maldonado Pinedo, D., Martínez, H., Hevia, R., Scoppa, C., Fernández, B., Montes, M., Musto, J., Pittaluga, A.** 1980. Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa. ISAG, Buenos Aires. 493 p.

- **Cantón, Y; A Sole´-Benet & F Domingo.** 2004. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. J Hydrol. 285: 199–214.

- **Cassel, D., O. Wendroth y D.R. Nielsen.** 2000. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. Agron. J. 92, 706–714.

- **Cattle, S. R.** 1999. Efficacy of perforating the soil to capture and store rain during fallow in dry regions. European Journal of Soil Science, 50, 481-487.

- **Cavero, J., Faci J., Pueyo E.T., Martínez-Cob, A.** 2017. Alfalfa forage production under solid-set sprinkler irrigation in a semiarid climate. Agricultural Water Management. 191. 184-192. 10.1016/j.agwat.2017.06.018.

- **Chamran F., P.E. Gessler, y O.A. Chadwick.** 2002. Spatially explicit treatment of soilwater dynamics along a semiarid catena. Soil Sci. Soc. Am. J. 66:1571-1583.

- **Chasco Yrigoyen, C.** 2003. Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales. Madrid: Instituto L. R./Universidad Autónoma de Madrid.

- **Chen, D., J. Huang, T.J. Jackson.** 2005. Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands. Remote Sens. Environ. 98:225-236.

- **Chuvieco, E.** 1996. "Fundamentos de la teledetección". 3º Ed. RIALP, S.A. Madrid.

- **Cicore, P.L.; Berone, G.D.; Álvarez Prado, A.F.; Agnusdei, M.G.** 2017. Producción de forraje de agropiro en función de la disponibilidad de nitrógeno y la posición topográfica. Agriscientia. 34: 91-98.

- **Cicore, P.L.; Castro Franco, M.; Peralta, N.R.; Marques da Silva, R.; Costa, J.L.** 2019. Relationship between soil apparent electrical conductivity and forage yield in temperate pastures according to nitrogen availability and growing season. Crop and Pasture Science. 70: 908-916.

- **Cicore, P.L.; Serrano, J.; Shahidian, S.; Sousa, A.; Costa, J.L.; Marques da Silva, J.R.** 2016. Estimation of spatial variability of forage potential production of Tall wheatgrass using LANDSAT 8 images for delineation of management zones. Environmental Monitoring and Assessment. 188: 513.

- **Cihlar, J.** 2000. Land cover mapping of large areas from satellites: Status and research priorities. International Journal of Remote Sensing 21:1093-1114.

- **Clay, D.E., K-I. Kim, J. Chang, S.A. Clay, and K. Dalsted.** 2006. Characterizing water and nitrogen stress in corn using remote sensing. Agron. J. 98:579-587.

- **Collino, D.; J. Dardanelli y M. De Luca.** 2007. Uso del agua y la radiación para la producción de forraje. En El cultivo de la alfalfa en la Argentina. Basigalup D. (Ed.) El cultivo de la alfalfa en la Argentina. E.E.A. Manfredi – INTA. Córdoba, Argentina. pp. 45-65.

- **Collins, W.** 1978. Remote sensing of crop type and maturity. Photogramm. Eng. Remote Sens. 44, 43–55.

- **Consejo Federal de Inversiones.** 2010. Estudio de Suelos del Área Sur.

- **Consejo Federal de Inversiones.** 1982. Estudio de revisión y actualización del sistema de aprovechamiento múltiple de Rio Colorado en Colonia 25 de Mayo, La Pampa. Informe final. Volumen II. Tomo I.

- **Cornacchione, M.V.** 2015. Alfalfa en Santiago del Estero. Jornada Todo Alfalfa. Todo Agro, INTA EEA Manfredi Córdoba, Argentina. p. 64-65.

- **Cornacchione, M.V. y D.L. Suarez.** 2015. Emergence, forage production, and ion relations of alfalfa in response to saline waters. Crop Sci. 55: 444-457.

- **Cornacchione, M.V. y D.L. Suarez.** 2017. Evaluation of Alfalfa (Medicago sativa L.) Populations` Response to Salinity Stress. Crop Sci. doi:10.2135/cropsci2016.05.0371.

- **Corwin, L. y Lesch, S.M.** 2010. Delineating site-specific management units with proximal sensors. En: OLIVER, M. (Ed.) geostatistical applications in precision agriculture. Springer. Nueva or. pp. 3965.

- **Dardanelli, J, Bachmeier, O, Sereno, R, y R. Gil.** 1997. Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil. Field Crops Research 54, 29 - 38.

- **Darwich, N.** 1992. Fertilización de Praderas. In: Primer Congreso Mundial sobre Producción, Utilización y Conservación de Forrajes Empleados en la Alimentación de la Ganadería Vacu-na – Forrajes '92. Buenos Aires, 4-6 Noviembre, pp. 77-86.

- **Dawbin, K.W., J.C. Evans, M.J. Duggin, and E.K. Leggett.** 1980. Classification of wheat areas and prediction of yields in North-western New South Wales by repetitive Landsat data. Aust. J. Agric. Res. 31:449-453.

- **Desconnets, J. C.; Taupin, J. D.; Lebel, T. y Leduc, C.** 1997. Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool system». *Journal of Hydrology*, 188-189, 155-178.

- **Di Bella, C.M., Negri I.J., Posse G., Jaimes F.R., Jobbágy E.G., Garbulsky M.F., y V.A. Deregibus.** 2009. Forage Production of the Argentine Pampa Region Based on Land Use and Long-Term Normalized Difference Vegetation Index Data. Rangeland Ecol Manage 62:163–170.

- **Díaz, F., Grattan, S., Reyes, J., de la Roza-Delgado, B., Benes, S, y C. Jiménez.** 2018. Using saline soil and marginal quality water to produce alfalfa in arid climates. Agri. Water Manage. 199: 11-21. doi: 10.1016/j.agwat.2017.12.003.

- **Dick, R.P.** 2004. Soil Biological, chemical, and physical dynamics during transition to nonthermal residue management grass seed systems. Online Internet. Oregon, GSCSSA. Progress reports FY00. Disponible en: http://gscssa.wsu.edu/progress/00/100.htm.

- **Di Pietro L., L. Marbán, y V. Richter**. 1986. Variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. Ciencia del suelo 4:99-106.

- **Di Rienzo, J.A; Casanoves, F; Balzarini, M.G.; Gonzalez, L; Tablada, M. & Robledo, C.W.** InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL http://www.infostat.com.ar

- **Doerge, T. A.** 1999. Management zone concepts. SSMG-2. In: Information Agriculture Conference. Stewart Center, Purdue, IN.

- **Donovan, T. J. & B. D. Meek.** 1983. Alfalfa responses to irrigation treatment and environment. Agronomy Journal 75: 461-464.

- **Doorenbos, J. y A.H. Kassam.** 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Food and Agricultural Organization. Roma, Italia.

- **Doraiswamy, P.C., S. Moulin, P.W. Cook, and A. Stern.** 2003. Crop yield assessment from remote sensing. Photogrametric Engineering & Remote Sensing 69:665-674.

- **Duarte, G.** 2007. Fertilización de alfalfa. www.produccion-animal.com.ar

- **Dusseux, P., Hubert–Moy, L., Corpetti, T., y Vertès, F.** 2015. Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 38, 72–77.

- **Echeverría Obanos, A.** 2017. Utilidad de las imágenes Sentinel-2 para la estimación de la densidad de alfalfa en Bardenas Reales. Máster en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección.

- **Ediciones INTA.** 2014. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales-red de evaluación de cultivares de alfalfa. ISSN 1515-4602 Año 14 Nº14.

- **Elwadie, M.E., F.J. Pierce, and J. Qi.** 2005. Remote sensing of canopy dynamics and biophysical variables estimation of corn in Michigan. Agron. J. 97:99-105.

- **FAO, 2006.** Agricultural Outlook 2006-2015. OECD-FAO . 57 pp.

- **Farias, E.N.** 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Cap. 3. México –Trillas. Pp.50

- **Fensholt, R., and I. Sandholt.** 2003. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. Remote Sens. Environ. 87:111-121.

- **Fernandez, R; A Quiroga; E Noellemeyer; D Funaro; J Montoya, B Hitzmann y N Peinemann.** 2008. A study of the effect of the interaction between site-specific conditions, residue cover and weed control on water storage during fallow. Agr. Water Manag. 95: 1028–1040. doi: 10.1016/j.agwat.2008.03.010

- **Ferencz C, Bognar P, Lichtenberger J, Hamar D, Tarscai G.** 2004. Crop yield estimation by satellite remote sensing. International Journal of Remote Sensing. 25: 4113–4149.

- **Flynn, E., Dougherty, C., y Wendroth, O.** 2008. Assessment of pasture biomass with the normalized difference vegetation index from active ground-based sensors. Agronomy Journal, 100, 114–121.

- **Fraterrigo, JM y JA Rusak.** 2008. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. Ecol Lett 11: 756–770.

- **Friedl, M. A., Michaelsen, J., Davis, F.W. Walker, H., y Schimel, D. S.** 1994. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. International Journal of Remote Sensing, 15, 1401–1420.

- **Gao Y.; J.F. Mas & A. Navarrete.** 2009. The improvement of an object-oriented classification using multi-temporal MODIS EVI satellite data, International Journal of Digital Earth, 2:3, 219-236, DOI: 10.1080/17538940902818311

- García-Ferrer, A. 2013. Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y selvicultura. Ambienta: Teledetección agroforestal, el futuro ya está aquí. ISSN: 1577-9491

- **Garroutte, E., Hansen, A., Lawrence, R. 2016.** Using NDVI and EVI to map spatiotemporal variation in the biomass and quality of forage for migratory elk in the Greater Yellowstone Ecosystem. Rem. Sen. 8(5), 404.

- Geerts, S., Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize cropwater productivity in dry areas. Agric. Water Manage. 96, 1275–1284.

- **Giao, P. H.; Phien-Wej, N. y Honjo, Y.** 1999. FEM quasi-3D modeling of responses to artificial recharge in the Bangkok multiaquifer system». Environmental Modelling and Software, 14, 141-151.

- **Gitelson, A.A.** 2004. Wide Dynamic Range Vegetation Index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. J. Plant Physiol. 161:165-173.

- Godwin, R. y C. Miller. 2003. A review of the technologies for mapping within-field variability. Biosyst. Eng. (2003), 1-15.

- **Goldberg, D.** 1990. Components of resource competition in plant communities. En: J.B. Grace and D. Tilman, eds. Perspectives on Plant Competition. San Diego. Academic Press. p. 27-49.

- **González Rebollar y Chueca Sancho.** 2010. C4 y CAM. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras Homenjae del doctor Julio López Gorgé. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. ISBN 978-84-00-09213-9.

- **Gore, K. P.; Pendke, M. S.; Gurunadha, V. V. S.; Gupta, C. P.** 1998. Groundwater modeling to quantify the effect of water harvesting structures in Wagarwadi watershed, Parbhani district, Maharashtra, India. Hydrological Processes, 12, 1043-1052.

- **Gower, S. T., Kucharik, C. J., Norman, J. M.** 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. Remote Sens. Environ. 70: 29–51.

- Gratzfeld, J. (Ed.), 2003. Extractive Industries in Arid and Semi-Arid Zones: Environmental Planning and Management. IUCN - The World Conservation Union, 122 pp. Gland, Switzerland and Cambridge (Reino Unido).

- Gregoret M.C., J. Dardanelli, R.C. Bongiovanni, y M. Diaz-Zorita. 2005. Análisis de la respuesta sitio específica al nitrógeno en maíz. Parte I: Caracterización de ambientes. VIII Congreso nacional de maíz Rosario 2005. 137-140.

- **Gregoret M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni, y M. Diaz-Zorita**. 2006. Modelo de respuesta sitio-especifica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. Ciencia de Suelo (Argentina) 24(2):147-159.

- **Gregory, PJ; LP Simmonds y CJ Pilbeam.** 2000. Soil type, climatic regime, and the response of water use efficiency to Crop Management. Agron. J. 92: 814–820.

- **Hanna MM, Steyn-Ross DA, Steyn-Ross M.** 1999. Estimating biomass for New Zealand pasture using optical remote sensing techniques. Geocarto International. 14: p. 89-94.

- **Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, and C. L. Walthall.** 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agron. J. 100: S117-S131.

- **He, Y., Guo, X., y Wilmshurst, J. F.** 2009. Reflectance measures of grassland biophysical structure. International Journal of Remote Sensing, 30, 2509–2521.

- **Hebrard, O; M Voltz; P Andrieux & R Moussa.** 2006. Spatiotemporal distribution of soil surface moisture in a heterogeneously farmed Mediterranean catchment. J Hydrol. 329: 110– 121.

- **Helmke, P.A. y D.L. Sparks.** 1996. Chapter 19 Lithium, sodium, potassium, rubidium and cesium. In: Sparks DL (Ed.), Methods of soil analysis Part 3-chemical methods, USA: SSSA - ASA Madison WI pp. 551-573.

- **Hereher, M. E.** 2013. The status of Egypt's agricultural lands using MODIS Aqua data. The Egyptian J. Rem. Sen. and Space Sci. 16(1), 83-89.

- **Hijano, E. y D. Basigalup.** 1995. El cultivo de la alfalfa en la República Argentina. Capítulo 1. En: Hijano E. & Navarro A. (eds.) La alfalfa en la Argentina. Subprograma alfalfa – INTA C. R. Cuyo. Agro de Cuyo manual Nº 11. pp 12-18.

- **Hu, W; M Shao, F Han & K Reichardt.** 2011. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub and grass-land. Geoderma. 162: 260-272.

- **Huete**, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (savi). Remote Sens. Environ., 25, 295–309.

- **Huete, A.R.; G. Hua; J. Qi; A. Chehbouni & W.J.D. van Leeuwen**. 1992. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. Remote Sensing of Environment, Volume 41, Issues 2–3. Pages 143-154, ISSN 0034-4257. https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90074-T.

- **Ismail, S.M. y Almarshadi, M.H.** 2013. Maximizing productivity and water use efficiency of alfalfa under precise subsurface drip irrigation in arid regions. Irrig. Drain. 62, 57–66.

- **Jackson, T.J., D. Chen, M. Cosh, F. Li, M. Anderson, C. Walthall, P. Doriaswamy, and E.R. Hunt.** 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived

normalized difference water index for corn and soybeans. Remote Sens. Environ. 92:475-482.

- **Jiang, Z., A.R. Huete, J. Chen, Y. Chen, J. Li, G. Yan, and X. Zhang.** 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. Remote Sens. Environ. 101:366-378.

- Jobbágy, E.G., Sala O.E., y Paruelo J.M. 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonian steppe: a remote sensing approach. Ecology 83:307–319.

- **Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B., Muys, P., Coppin, M., Weiss, y F. Baret.** 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. Agric. For. Meteorol. 121:19-35.

- **Kaspar, T.C., Colvin T.S., Jaynes D.B., Karlen D.L., James D.E., Meek D.W., Pulido D., Butler H.** 2003. Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. Precision Agriculture 4(1): 87-101.

- **Katerji, N y M Mastrorilli.** 2009. The effect of soil texture on the water use efficiency of irrigated crops: Results of a multi-year experiment carried out in the Mediterranean region. Eur. J. Agron. 30: 95–100. doi: 10.1016/j.eja.2008.07.009

- **Kayad, A.G. Al-Gaadi K.A., Tola E., Madugundu R., Zeyada A.M. y Kalaitzidis C.** 2016. Assessing the Spatial Variability of Alfalfa Yield Using Satellite Imagery and Ground-Based Data. PLoS ONE 11(6): e0157166. doi: 10.1371/journal.pone.0157166

- **Kayad A., Al-Gaadi K., Tola E., Madugundu R, Sozzi M. y Marinello F.** 2018. Assessing the Spatio-Temporal Alfalfa Yield Variability Using Landsat-8 and Yield Monitor Data at Field Scale. AgEng conference, Wageningen, the Netherlands.

- **Kiesselbach, T. A., Russely J. A. & J. A. Anderson.** 1929. The significance of subsoil moisture in alfalfa production. J. of Am. Soc. of Agronomy 21(3): 241-268.

- **Kipnist, T., Vaisman, I., Granoth, I.** 1989. Drought stress and alfalfa production in amediterranean environment. Irrig. Sci. 10, 113–125.

- Kovda, V.A. 1973. Quality of irrigation water. Soluble components in irrigation water. pp. 177-205. In: Irrigation, drainage and salinity. Food and Agricultural Organization/UNESCO. Hutchinson Publishers. London, UK.

- **Kravchenko, A.N. y D.G. Bullock.** 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agron. J. 92:75–83.

- Kravchenko, A. y D. Bullock. 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography: I. Spatial data analysis. Crop Sci. 42, 804–815.

- **Kravchenko, A.N.; Thelen, K.D.; Bullock, D.G. and N. R. Millar.** 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. Agronomy Journal, Madison, v.97, p.514–523.

- **Kujawski, A., & Stępień, G.** 2017. A method of determining inland vessel position using a single stationary, non-metric camera. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, 52*(124), 103–111. https://doi.org/10.17402/251

- **Kumhálová, J; F Kumhála; M Kroulík y Š Matejková.** 2011. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. Precis. Agric. 12: 813–830. doi:10.1007/s11119-011-9221-x

- **Lang, M., Kuusk, A., Mõttus, M., Rautiainen, M., Nilson, T.** 2010. Canopy gap fraction estimation from digital hemispherical images using sky radiance models and a linear conversion method. Agricultural and Forest Meteorology, 150(1), 20-29. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.001

- **Li, W., Weiss, M., Waldner, F., Defourny, P., Demarez, V., Morin, D., Hagolle, O., Baret, F.** 2015. A generic algorithm to estimate LAI, FAPAR and FCOVER variables from SPOT4_HRVIR and landsat sensors: Evaluation of the consistency and comparison with ground measurements. Remote Sensing, 7(11), 15494- 15516. https://doi.org/10.3390/rs71115494

- **Li Y. y Su D.** 2017. Alfalfa Water Use and Yield under Different Sprinkler Irrigation Regimes in North Arid Regions of China. Sustainability (Switzerland). 9. 10.3390/su9081380.

- **Li, Z.; Zhang, W.; Sun, Z.** 2015. Yield and water use efficiency of non- and single-irrigated alfalfa with ridge and furrow planting in northern China. Agron. J. 2015, 107, 1039–1047.

- **Lijun, Z., Zengxiang, Z., Tingting, D., Xiao, W.** 2008. Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis. Trans. of the Chinese Soc. of Agri. Engi. 3.

- **Lindenmayer, R.B., Hansen, N.C., Brummer, J., Pritchett, J.G.** 2011. Deficit irrigation of alfalfa for water-savings in the Great Plains and Intermountain West: areview and analysis of the literature. Agron. J. 103, 45–50.

- **Lloyd, J. W.** 1986. A review of aridity and groundwater. Hydrological Processes, 1, 63-78.

- **López, A., Dardanelli, J. L., Collino, D., Sereno, R., & R. W. Racca.** 1997. Efecto del grado de reposo invernal sobre la producción, consumo y eficiencia en el uso del agua en alfalfa cultivada bajo riego. RIA 28 (2): 41-48.

- **López-Lozano, R., Baret, F., García de Cortázar-Atauri, I., Bertrand, N., Casterad, M.A.** 2009. Optimal geometric configuration and algorithms for LAI indirect estimates under row canopies: The case of vineyards. Agricultural and Forest Meteorology, 149(8), 1307-1316. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.001

- **Lus, J.** 2015. Alfalfa en ambientes salinos o salinos sódicos. ¿Es lo mismo? Boletin todoagrao. www.produccion-animal.com.ar

- **Maas, E.V.** 1987. Salt tolerance of plants. In: B. R. Christie, editor Handbook of Plant Science in Agriculture. CRC Press, Boca, Raton, FL, USA. p. 55-75.

- **Maas, E.V. y G.J. Hoffman.** 1977. Crop salt tolerance current assessment. J. Irrig. Drain. Div. American Society of Civil Engineering 103 (IR2): 115-134.

- **Mahlein, A. K.; Oerke, E. C.; Steiner, U. and Dehne, H. W.** 2012. Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. Eur. J. Plant Pathol. 133(1):197-209.

- **Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G.** 2007. Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. Sensors, 7(11), 2636-2651.

- **Maughan, J.D., S. K. Mathanker, T.E. Grift and A.C. Hansen.** 2012. Yield Monitoring and Mapping Systems for Hay and Forage Harvesting: A Review. ASABE Annual International Meeting, Hilton Anatole, Dallas, Texas, July 29 – August 1.

- **Mazuela Águila, P. C.** 2013. Agricultura en zonas áridas y semiáridas. Idesia (Arica), 31(2), 3-4. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292013000200001

- **McNamara, J.P.; D. Chandler; M. Seyfried & S. Achet.** 2005. Soil moisture states, lateral flow, and streamflow generation in a semi-arid, snowmelt-driven catchment. Hydrol Process. 19: 4023–4038.

- **Melgar, R., J. Lavandera y M. Camozzi.** 2000. Alfalfa: la fertilización balanceada es la clavepara la alta productividad. In: AAPRESID (org) Jornadas de Intercambio Técnico «Pasturas enSiembra Directa», pp. 52-59.

- **Méndez-Jocik A., Núñez-Pérez A. y González-Robaina F.** 2021. Remote Sensing Application to Water Resources Management. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, ISSN - 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, Vol. 30. No.1, pp. 17-25.

- **Meng, J. H.; Wu, B. F.; Du, X.; Zhang, F. F.; Zhang, M. and Dong, T. F.** 2011. A review and outlook of applying remote sensing to precision agriculture. Remote Sens. Land Res. 23(3):1-7.

- **Miao Y., D.J. Mulla, W.D. Batchelor, J.O Paz, P.C. Robert, y M. Wiebers**. 2006b. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. Agron. J. 98:545-553.

- **Miao, Y; DJ. Mulla & PC Robert.** 2006a. Spatial variability of soil properties, corn quality and yield in two Illinois, USA fields: Implications for precision corn management. Precision Agric. 7:5-20.

- **Michelini, J.J.** 2010. Instituciones, capital social y territorio. La Pampa y el dilema del desarrollo en la Cuenca del Colorado. Ed. Biblos. ISBN: 978-950-786-853-5, 524p.

- **Milán, C; E Bonadeo; M Manzotti & A Dell'Oso.** 2016. Técnica del índice de dispersión para el reconocimiento de suelos sódicos. Libro digital, PDF de Actas del XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Río Cuarto. Junio de 2016. 367 pp.

- **Miura, T., H. Yoshioka, K. Fujiwara, y H. Yamamoto.** 2008. Inter-Comparison of ASTER and MODIS Surface Reflectance and Vegetation Index Products for Synergistic Applications to Natural Resource Monitoring. Sensors 8:2480-2499.

- **Montazar, A., Sadeghi, M.** 2008. Effects of applied water and sprinkler irrigationuniformity on alfalfa growth and hay yield. Agric. Water Manage. 95,1279–1287.

- **Moral, F.; Terrón, M. y Marques Da Silva, R.** 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. Soil Till. Res. 06:33533.

- **Mulla, D. J.** 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. Bios. Eng. 114(4): 358-371.

- **Nash, D. J.** 1999. Arid Geomorphology». Progress in Physical Geography, 23(3), 429-439.

- **Nestola, E., Sánchez-Zapero, J., Latorre, C., Mazzenga, F., Matteucci, G., Calfapietra, C., Camacho, F.** 2017. Validation of PROBA-V GEOV1 and MODIS C5 & C6 fAPAR Products in a Deciduous Beech Forest Site in Italy. Remote Sensing, 9(2), 126. https://doi.org/10.3390/rs9020126.

- **Noellemeyer, E; R Fernández y A Quiroga.** 2013. Crop and Tillage Effects on Water Productivity of Dryland Agriculture in Argentina. Agriculture 3: 1–11. doi:10.3390/agriculture3010001

- **Northcote, KH y JKM Skene.** 1972. Australian soils with saline and sodic properties. CSIRO Soil Publication 27.

- **Olsen, SR; CV Cole; FS Watanabe & LA Dean.** 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Washington, D.C. Circular 939.

- **Pachepsky, Y; W Rawls y H Lin.** 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. Geoderma 131: 308–316. doi: 10.1016/j.geoderma.2005.03.012

- **Panigatti, J.L.** (2010) Argentina: 200 años, 200 suelos. Ediciones INTA, Buenos Aires.

- **Peralta, NR y JL Costa.** 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. Comput Electron Agr 99: 218-226.

- **Persson, A; P Pilesjö & L Eklundh.** 2005. Spatial influence of topographical factors on yield of potato (Solanumtuberosum L.) in Central Sweden. Precision Agric. 6: 341-357.

- **Ponce, M. A.** 2014. Producción de forraje. Estado de desarrollo de alfalfas con distintos grados de reposo. 64 pp.

- **Posse, G., y A. M. Cingolani.** 2000. Environmental controls of NDVI and sheep production in the Tierra del Fuego steppe of Argentina. Applied Vegetation Science 3:253–260.

- **Posse, G., M. Oesterheld, y C. M. Di Bella.** 2005. Landscape, soil and meteorological influences on canopy dynamics of northern flooding Pampa grasslands, Argentina. Applied Vegetation Science 8:49–56.

- **Prieto, D., G. Angella and M.C. Angueira.** 2008. Un efoque al problema de la salinidad en el área de riego del Rio Dulce, Santiago del Estero. In: E. Taleisnik, K. Grunberg and G. Santa María, ed. La Salinización de Suelos en la Argentina: su impacto en la produccion agropecuaria. EDUCC, Córdoba, Argentina. p. 93-104.

- **Putnam, D.H., Benes, S., Galdi, G., Hutmacher, B., and S, Grattan.** 2017. Alfalfa (Medicago sativa, L.) is tolerant to higher levels of salinity than previous guidelines indicated: implications of field and greenhouse studies. Geophysical Research Abstracts, Vol. 19. EGU2017-18266-1.

- **Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A., Kerr, Y., y Sorooshian, S.** 1994. A modified soil adjusted vegetation index. Remote Sensing of Environment, 48, 119–126.

- **Quintero, C., G. Boschetti, J. Mayer, M. Barrera y R. Benavídez.** 1999. Alfalfares bien nutridos. Fertilizar 14: 8-12

- **Quiroga Garza, H. M.** 2013. Tasa de acumulación de materia seca de alfalfa en respuesta a variables climatológicas. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 4: 503-516.

- **Reed, B. C., J. F. Brown, D. Vanderzee, T. R. Loveland, J. W. Merchant, y D. O. Ohlen**. 1994. Measuring phonological variability from satellite imagery. Journal of Vegetation Science 5:703–714.

- **Rengasamy, P.** 1997. Sodic soils. In: Rengasamy Lal, R.; Blum, W.H.; Valentine, C. and A. Stewart (1997) Methods for assessment of soil degradation, R. Lal et al. (eds) Advances in Soil Science (USA). 558 pp.

- **Reyniers, M.; Maertens, K.; Vrindts, E. and J. Baerdemaeker.** 2006. Yield Variability Related to Landscape Properties of a Loamy Soil In Central Belgium. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v.88, p.262-273.

- **Rhoades, J. D.** 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks DL (Ed.), Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods. USA: SSSA - ASA, Madison WI pp. 417-436.

- **Richards, L.A.** 1948. Porous plate apparatus for meas uring moisture retention and transmission by soil. Soil Science 66(2):105-110

- **Ritter, C; D Dicke; M Weis; H Oebel; HP Piepho; A Büchse & R Gerhards.** 2008. An on-farm approach to quantify yield variation and to derivate decision rules for site-specific weed management. Precision Agric. 9: 133-146.

- **Rodríguez, A., de la Casa, A., Accietto, R., Bressanini, L. y. Ovando, G.** 2000. Determinación del área foliar en papa (SolanumtuberosumL., var. Spunta) por medio de fotografías digitales conociendo la relación entre el número de pixeles y la altura de adquisición. Rev. Bras. Agrometeorol. 8: 215-221.

- **Rodriguez-Perez, J.R.; Plant, R.E.; Lambert, J.J. y Smart, D.R.** 2011. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. Precis. Agric. 2(6): 77579.

- **Romero, N. A., Bariggi C. y G. Schenkel.** 1977. Exploración de deficiencias nutritivas para la alfalfa en suelos pampeanos mediante ensayos de campo. INTA, EEA Anguil. Proyecto FAOINTA Argentina 75/006. Documento de Trabajo Nº 3, 76 p.

- **Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., y Harlan, J.C.** 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD.

- **Sammis, T. W.** 1981. Yield of alfalfa and cotton as influenced by irrigation. Agronomy Journal 73: 323-328.

- **Sartor, P. D.; Aumassanne, C. M.; Fontanella, D. R.; Masseroni, M. L.; Zamora, C. D.; Pérez, M. M.; Álvarez, C. O.; Beget, M. E. y Di Bella, C. M.** 2018. Variabilidad edáfica y su implicancia en la producción del cultivo de alfalfa bajo riego. Potencialidades de las nuevas tecnologías en el agro pampeano. 1a ed. - Anguil, Buenos Aires: Ediciones INTA, 2019. ISBN 978-987-521-949-6.

- **Scalon, B. R.; Tyler, S. W. y Wierenga, P. J.** 1997. Hydrologic issues in arid, unsaturated systems and implications for contaminant transport». Reviews of Geophysics, 35(4), 461-490.

- **Schmidt, H. & A. Karnieli.** 2001. Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid environment: The Makhtesh Ramon Crater (Israel) case study. int. j. remote sensing. 22. 3503-3520. 10.1080/01431160110063779.

- **Seelan, S. K.; Laguette, S.; Casady, G. M. and Seielstad, G. A.** 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. Rem. Sens. Environ. 88(1):157-169.

- **Segarra, J.; Buchaillot, M.L.; Araus, J.L.; Kefauver, S.C. Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications.** 2020. *Agronomy 10*, 641. https://doi.org/10.3390/agronomy10050641

- **Sellers, P.** 1987. Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence. Remote Sens. Environ. 21, 143–183.

- **Serrano, J. M., Peca, J. O., Marques da Silva, J. R., & Shahidian, S.** 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. Computers and Electronics in Agriculture, 73, 7–16.

- **Shainberg, I y J Letetey.** 1984. Response of soils to sodic and saline conditions, Hilgardia 52(2): 1-57.

- **Sheaffer, C.C., Tanner, C.B., Kirkham, M.B.** 1988. Alfalfa water relations and irrigation. In: Hanson, A.A., Barnes, D.K., Hill, R.R. (Eds.), Alfalfa and Alfalfa Improvement. Agronomy Monograph, 29. ASA, Madison, WI, USA, pp. 373–409.

- **Sishodia, R.P.; Ray, R.L.; Singh, S.K. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review.** 2020. *Remote Sens. 12*, 3136. https://doi.org/10.3390/rs12193136

- **Soil Survey Division Staff.** 1993. Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.

- **Soil Survey Staff in USDA**, 2006. Keys to Soil Taxonomy. 10th Ed. U.S. Government Printing Office, Washington, DC 338 pp

- **Soil Taxonomy.** 2014. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

- **Spada, M. del C.** 2015. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales. Red de evaluación de cultivares de alfalfa. Año 25. Nº 25. ISSN 1550-4602. E.E.A. Manfredi–INTA. Córdoba, Argentina, 90 pp.

- **Spada, M. del C.** 2018. Avances en alfalfa. Ensayos territoriales. Red de evaluación de cultivares de alfalfa. Año 28. Nº 28. ISSN 1550-4602. E.E.A. Manfredi–INTA. Córdoba, Argentina, 91 pp.

- **Strudley M.; T. Green & J. Ascough.** 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. Soil and Tillage Research. 99. 4-48. 10.1016/j.still.2008.01.007.

- **Sumner, M.E. & W.P. Miller.** 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. In: D L Sparks. Methods of soil analysis. Part 3-Chemical Methods. USA: SSSA - ASA Madison WI pp 1201-1230.

- **Taboada M.A. & Lavado R.S.** 2009. (Ed) Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez, el hidromorfismo y las inundaciones. FAUBA, Buenos Aires. 160 p.

- **Takagi, K & H S Lin.** 2012. Changing controls of soil moisture spatial organization in the Shale Hills Catchment. Geoderma 173-174: 289–302.

- Taylor, J., G. Wood, R. Earl y R. Godwin. 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability. Part II: Spatial analysis and determination of management zones. Biosyst. Eng. 84(4), 441–453.

- **Teal, R.K., B. Tubana, K. Girma, K.W. Freeman, D.B. Arnall, O. Walsh, and W.R. Raun,** 2006. In-season prediction of corn grain yield potential using Normalized Difference Vegetation Index. Agron. J. 98:1488-1494.

- **Terra J.A., J.N. Shaw, D.W. Reeves, E. van Santen, R.L. Raper, K.S. Balkcom, E.B. Schwab, y P.L. Mask**. 2006. Soil management practices and landscape attributes impacts on field-scale corn productivity. 17th International Soil Tillage Research Organization (ISTRO) Conference. Kiel, Germany. Pag. 1275-1281.

- **Thornley, J.H.M., y I.R. Johnson.** 2000. Plant and crop modeling: A mathematical approach to plant and crop physiology. 669 p. The Blackburn Press. P.O. Box 287. Caldwell, New Jersey 07006. USA

- **Timlin, D.J., Y. Pachepsky, V.A. Snyder, y R.B. Bryant**. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:764-773.

- **Trotter, T. F., Frazier, P., Trotter, M. G. & Lamb, D. W.** 2008. Objective biomass assessment using an active plant sensor (Crop Circle), preliminary experiences on a variety of agricultural landscapes. Retrieved from: https://www.researchgate.net/profile/Paul_Frazier2

- **Trotter, M. G., Lamb, D. W., Donald, G. E., y Schneider, D. A.** 2010. Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. Crop and Pasture Science, 61, 389–398.

- **Tucker, C.J.** 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sens. Environ. 8 (2), 127–150.

- **Tucker, C.J., Maxwell, E**. 1976. Sensor design for monitoring vegetation canopies. Photogramm. Eng. Remote Sens. 42, 1399–1410.

- **UNEP**. 1997. World Atlas of Desertification. 2nd Edition. United Nations Environment Programme. Nairobi (Kenya).

- UNESCO. 2010. "Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe". Dentro del marco del proyecto "Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas de América Latina y el Caribe". CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°25.

- **Uribe, D., Mattar, C. y Camacho, F.** 2018. Estimation of Vegetation Biophysical Parameters in Grasslands and Crops in Chile through Hemispheric Digital Photography by a GoPro camera. Revista de Teledetección, 52, 1-15. https://doi.org/10.4995/raet.2018.9315

- **Urricariet, S; M Niborski y CM Kvolek.** 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. Ci. Suelo (Argentina) 29: 49–59.

- Ustin, S. L. and Gamon, J. A. 2010. Remote sensing of plant functional types. New Phytologist. 186:795-816.

- Valbuena, CA; ML Martínez & HR. Giraldo. 2008. Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango (Mangifera indica L.). Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal-SP. 30(4): 1146-1151.

- **Van den Bygaart, A; E Gregorich y D Angers.** 2012. Influence of agricultural management on soil organic carbon: a compendium and assessment of Canadian studies. Can J Soil Sci 83: 363–380.

- **Van Leeuwen, W. J. D., B. J. Orr, S. E. Marsh, y S. M. Herrmann.** 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. Remote Sensing of Environment 100:67-81.

- Venturini, V., S. Islam, and L. Rodriguez. 2008. Estimation of evaporative fraction and evapotranspiration from MODIS products using a complementary based model. Remote Sens. Environ. 112:132-141.

- Verger, A., Baret, F., Camacho, F. 2011. Optimal modalities for radiative transfer-neural network estimation of canopy biophysical characteristics: Evaluation over an agricultural area with CHRIS/PROBA observations. Remote Sensing of Environment, 115(2), 415-426. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.012

- Vibhute, A. D. and Gawali, B. W. 2013. Analysis and modeling of agricultural land use using remote sensing and geographic information system: a review. Int. J. Eng. Res. Appl. 3(3):081-091.

- **Viña, A., A.A. Gitelson, D.C. Rundquist, G. Keydan, B. Leavitt y J. Schepers.** 2004. Monitoring maize (*Zea mays L.*) phenology with remote sensing. Agron. J. 96:1139-1147.

- **Walkley, A. & Black, I.A.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science 27, 29-38.

- **Wang, X., Ge, L., & Li, X.** 2013. Pasture monitoring using SAR with COSMO-SkyMed, ENVISAT ASAR, and ALOS PALSAR in Otway, Australia. Remote Sensing, 5, 3611–3636.

- **Wardlow, B. D., Egbert, S. L.** 2010. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping: a case study for southwest Kansas. Int. J. Rem. Sen. 31(3), 805-830.

- **Wardlow, B.D., S.L. Egbert, and J.H. Kastens**. 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. Remote Sens. Environ. 108:290-310.

- **Watson, D. J.** 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. Ann. Bot. 11: 41–76.

- **Weiss, M.; Baret, F.; Smith, G.J.; Jonckheered, I. y Coppin, P.** 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination, part II: Estimation of LAI, errors and sampling. Agric. and For. Met., 121: 37-53.

- **Western, A W; R B Grayson & G Bloschl.** 2002. Scaling of soil moisture: A Hydrologic Perspective. Annu Rev Earth Planet Sci. 30:149–80.

- **Wilson, D J; A W Western & R B Grayson.** 2004. Identifying and quantifying sources of variability in temporal and spatial soil moisture observations. Water Resour Res. 40, W02507, doi:10.1029/2003WR002306.

- **Wong M.T.F., y S. Asseng**. 2006. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of up scaling a crop model. Plant and Soil 283:203-215. proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci.

- **Zerbato, C.; Rosalen, D.L.; Furlani, C.E.A.; Deghaid, J.; Voltarelli, M.A.V.** 2016. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. Australian Journal of Crop Science 10: 758-764.

- **Zhao, Y; S Peth; X Y Wang; H Lin & R Horn.** 2010. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe. Hydrol Process. 24: 2507–2519.

- **Zhang, X.Y., M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C.F. Hodges, F. Gao, B.C. Reed, y A. Huete**. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sens. Environ. 84:471-475.

- **Zhang, C., y Guo, X**. 2008. Monitoring northern mixed prairie health using broadband satellite imagery. International Journal of Remote Sensing, 29, 2257–2271.

- Zhang, Y., and M. Wegehenkel. 2006. Integration of MODIS data into a simple model for the spatial distributed simulation of soil water content and evapotranspiration. Remote Sens. Environ. 104:393-408.

- **Zhu, Q & H Lin.** 2011. Influences of soil, terrain, and crop growth on soil moisture variation from transect to farm scales. Geoderma 163: 45–54.

- **Zubillaga M.M., J. Sierra, y L. Barberis**. 1991. Nitratos en un suelo cultivado con trigo: variabilidad espacial e influencia del cultivo antecesor. Turrialba 41:217-222.

- **Zubillaga M.M., J. Barros, P. Cipriotti, y J. Pastori**. 2005. Variación espacial del N mineralizado a nivel lote en Vedia. VII Congreso nacional de maíz. 150-153.

- **Zubillaga M.M., M. Carmona, A. Latorre, M. Falcon, y M.J. Barros**. 2006a. Estructura espacial de variables edáficas a nivel de lote en Vedia. CD-R XX Congreso Argentina de la Ciencia de Suelo, Salta, Argentina.

- **Zubillaga M.M., P.A. Cipriotti, y M.J. Barros.** 2006b. Asociaciones espaciales entre el N mineralizado y otras variables edáficas a nivel de lote. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta (Argentina). p.247.

- **Zubillaga M.M., M.J. Lopez de Sabando, M.S. Zubillaga, y M.V. Vilches**. 2009. Nitrógeno potencialmente mineralizable en zonas diferenciales de manejo de un lote de producción de trigo de San Antonio de Areco. En Avances en Ingeniería Agrícola 2007-2009. ISBN 978-950673-752-8. ED. Montico et al. pág. 500-506