

**PREDICCIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS
PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO EN SUELOS GANADEROS**

Pablo Leandro Cicore

Trabajo de tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al título de
DOCTOR en CIENCIAS AGRARIAS

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Balcarce, Argentina

Noviembre 2020

**PREDICCIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS
PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO EN SUELOS GANADEROS**

Pablo Leandro Cicore



.....

Ing. Agr. Jose Luis Costa, *MSc., Ph.D*

Director de Tesis

.....

Ing Agr. Rafael Marques Da Silva, *Ph.D*

Co-Director de Tesis

PREDICCIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD DE PASTURAS PARA LA DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO EN SUELOS GANADEROS

Pablo Leandro Cicore

Aprobada por:

.....

Evaluador: Ing Agr. Raul Lavado, *DEA*

.....

Evaluador: Ing Agr. Marcelo Wilson, *MSc., Dr.*

.....

Evaluador: Ing Agr. Daniel Buschiazso, *MSc., Dr.*



Prof. Liliانا TRIARTE, Mag
Secretaría de Posgrado
Facultad de Ciencias Agrarias
UNMdP

p/a



Prof. Liliانا TRIARTE, Mag
Secretaría de Posgrado
Facultad de Ciencias Agrarias
UNMdP

p/a



Prof. Liliانا TRIARTE, Mag
Secretaría de Posgrado
Facultad de Ciencias Agrarias
UNMdP

p/a

DEDICATORIA

A Mariano, Diego y Mónica

AGRADECIMIENTOS

A Mónica Agnusdei por haber confiado en mí para realizar el doctorado. Mónica fue la persona que “pensó” como introducir la agricultura de precisión en las pasturas cultivadas. Gran parte de los logros de esta tesis se deben a su motivación, rigor científico y extraordinaria capacidad de trabajo.

A José Luis Costa por haberme recibido en su grupo de trabajo, por haber aceptado ser mi director y por su apoyo incondicional durante el desarrollo de la tesis.

A mi familia por la tolerancia durante este proceso.

A Nahuel Peralta y Mauricio Castro Franco por su enorme ayuda con GIS y el “mundo de la agricultura de precisión”.

A Rafael Marques da Silva por su colaboración durante el trabajo de tesis y por haberme recibido en Portugal (abriendo las puertas de su casa sin condicionamientos).

Al resto de las personas que conocí en la Universidad de Évora (Joao, Adelia, etc) por su acompañamiento en mi estadía en Portugal.

Al jurado evaluador por las valiosas sugerencias que enriquecieron el manuscrito.

A los auxiliares, profesionales y tesistas (actuales y pasados) del grupo de Producción y Utilización de Pasturas (José, Lalo, Martin, German, Pedro, Alejandra, Silvia, Florencia, Juan, Jorge, Tito, Jony, Nacho, Alejandra, Romina, Silvia, Liliana, Rosario, Francisco, Karen, Gabriel, Ezequiel, Hernán, Maxi) por la colaboración en el desarrollo de la tesis y por los gratos momentos vividos durante estos últimos años.

A los integrantes y ex-integrantes del grupo de trabajo de José Luis Costa (Virginia, Maxi, Agustín, Luis, Leonardo, Eduardo, Hernán y Natalia) por su asistencia en las tareas de campo y laboratorio y por la buena onda transmitida en todo momento.

A Gastón Larrea y Celina Borrajo por su ayuda en el ensayo realizado en Las Armas.

A aquellos integrantes de la Unidad integrada Balcarce (INTA-FCA) que en algún momento de este proceso colaboraron en las tareas requeridas para el desarrollo de esta tesis. Asimismo, extendiendo este agradecimiento a la Escuela de Posgrado de la UNMdP por brindarme el ámbito y el apoyo académico que permitieron cumplir los requisitos necesarios para obtener el grado de Doctor en Ciencias Agrarias.

Al INTA por financiar económicamente las actividades desarrolladas en esta tesis a través del Programa de Formación y Capacitación.

INDICE

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
INDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
INDICE DE FIGURAS.....	x
ABREVIATURAS.....	xvi
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xxi
PUBLIACIONES DERIVADAS DE LA TESIS.....	xxiii
PUBLIACIONES ASOCIADAS A LA TESIS.....	xxv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	2
1.1.1. Introducción.....	2
1.1.2. Variabilidad edáfica y topográfica y su relación con la variabilidad productiva.....	5
1.1.3. Cuantificación de la variabilidad productiva.....	6
1.1.4. Propiedades de sitio y delimitación de zonas de manejo.....	6
1.1.5. Organización de la tesis.....	9
1.2. HIPÓTESIS.....	11
1.3. OBJETIVOS.....	12
CAPÍTULO 2: VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE VERDE NORMALIZADO.....	13
2.1. INTRODUCCIÓN.....	14
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
2.2.1. Características de los sitios experimentales y descripción de los tratamientos.....	16
2.2.2. Caracterización climática y meteorológica.....	19
2.2.3. Balances hídricos.....	20
2.2.4. Acumulación de forraje.....	20
2.2.5. Análisis de la variabilidad.....	22
2.2.6. Índice verde normalizado.....	23
2.2.7. Análisis estadístico.....	24

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
2.3.1. Caracterización climática y meteorológica y balances hídricos.....	25
2.3.2. Análisis descriptivo de la biomasa acumulada.....	34
2.3.3. Variabilidad espacial y temporal de la biomasa acumulada.....	36
2.3.4. Delimitación de zonas productivas.....	43
2.3.5. Relación entre índice el de vegetación normalizada y la biomasa acumulada	50
2.4. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	56
CAPÍTULO 3: RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DE SITIO Y PROPIEDADES DE SUELO Y DELIMITACION DE ZONAS DE MANEJO.....	57
3.1. INTRODUCCIÓN.....	58
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	60
3.2.1. Muestro y análisis de suelo.....	60
3.2.2. Medición de la conductividad eléctrica aparente.....	61
3.2.3. Medición de la elevación del terreno.....	62
3.2.4. Variabilidad espacial de las propiedades de sitio.....	62
3.2.5. Estimación de los atributos topográficos.....	64
3.2.6. Predicción de las propiedades de suelo.....	65
3.2.7. Delimitación de zonas de manejo.....	66
3.2.8. Evaluación de la delimitación.....	66
3.3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	68
3.3.1. Análisis descriptivo de las propiedades de suelo y su relación con la biomasa acumulada.....	68
3.3.2. Variabilidad espacial de las propiedades de sitio.....	72
3.3.3. Relación entre las propiedades de sitio y las propiedades de suelo que afectan la variabilidad de la biomasa acumulada.....	77
3.3.4. Delimitación de zonas de manejo.....	80
3.4. CONCLUSIONES DEL CAPITULO.....	86
CAPÍTULO 4: CONSIDERACIONES FINALES.....	87
4.1. CONCLUSIONES RESPECTO DEL PLANTEO ORIGINAL.....	88
4.2. POSIBLES INVESTIGACIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO.....	90
REFERENCIAS Y ANEXO.....	92
5.1. REFERENCIAS.....	93
5.2. ANEXO.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Superficie, unidades cartográficas, capacidad de uso, índice de productividad, serie de suelos y clasificación de suelos de los sitios experimentales.	17
Tabla 2. Denominación de los rebrotes, fechas de instalación y corte de los ensayos en los sitios experimentales Balcarce y Ayacucho.	19
Tabla 3. Promedio (Prom), duración del rebrote, valor mínimo (Min) valor máximo (Max), desvío estándar y coeficiente de variación (CV) de la biomasa aérea acumulada (BA) en los sitios experimentales Ayacucho y Balcarce durante cuatro rebrotes y para dos tratamientos de fertilización nitrogenada (N0 y N250).....	35
Tabla 4. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de festuca alta creciendo en el sitio experimental Ayacucho en los rebrotes PRIM15 y PRIM16, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).	47
Tabla 5. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de festuca alta creciendo en el sitio experimental Ayacucho en los rebrotes OTO16 y OTO17, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).	47
Tabla 6. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de agropiro creciendo en el sitio experimental Balcarce en los rebrotes PRIM14 y PRIM15, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).	49
Tabla 7. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de agropiro creciendo en el sitio experimental Balcarce en los rebrotes OTO15 y OTO16, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).	50
Tabla 8. Escala de valoración del índice Kappa (k)	67
Tabla 9. Modelos predictivos de la biomasa acumulada (BA) obtenidos con el procedimiento STEPWISE usando las propiedades edáficas como predictoras en el sitio experimental Ayacucho, en las estaciones de crecimiento primavera y otoño y para dos tratamientos de fertilización nitrogenada (N0 y N250).....	70

- Tabla 10.** Modelos predictivos de la biomasa acumulada (BA) obtenidos con el procedimiento STEPWISE usando las propiedades edáficas como predictoras en el sitio experimental Balcarce, en las estaciones de crecimiento primavera y otoño y para dos tratamientos de fertilización nitrogenada (N0 y N250)..... 72
- Tabla 11.** Porcentaje de varianza explicada e importancia de las propiedades de sitio como predictores de las propiedades de suelo en el sitio experimental Ayacucho. Valores elevados de porcentaje de incremento de cuadrado medio del error (CME) indican los predictores más importantes. 77
- Tabla 12.** Porcentaje de varianza explicada e importancia de las propiedades de sitio como predictores de las propiedades de suelo en el sitio experimental Balcarce. Valores elevados de porcentaje de incremento de cuadrado medio del error (CME) indican los predictores más importantes. 78
- Tabla 13.** Grado de acuerdo entre los mapas de ZP y ZM para el tratamiento N250 en el sitio experimental Ayacucho medido mediante la Precisión global (%) y el Índice Kappa (k)..... 82
- Tabla 14.** Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de festuca alta creciendo en el sitio experimental Ayacucho en los rebrotes PRIM15, PRIM16, OTO16 y OTO17, para el tratamiento de fertilización N250 y dos zonas de manejo (ZM): zona alta (ZA) y zona baja (ZB). 84

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la expansión y dispersión del suelo sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento (So y Aylmore, 1993).	4
Figura 2. Representación esquemática de la relación entre las variables medidas o estimadas en esta tesis. BA: Biomasa acumulada; CEa: Conductividad eléctrica aparente; IVN Índice verde normalizado; N: Nitrógeno; ZP: Zona productiva; ZM: Zona de manejo.....	10
Figura 3. Producción teórica de biomasa con y sin la aplicación de N para dos ZP teóricas con diferente potencial productivo: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB).....	14
Figura 4. Sitios experimentales: Balcarce, ubicado en el partido de General Balcarce (círculo rojo) y Ayacucho, ubicado en el partido de Ayacucho (círculo amarillo)	18
Figura 5. (●) Áreas de muestreo (AM) geo-referenciadas en (a) el sitio experimental Balcarce y (b) el sitio experimental Ayacucho. Cada AM fue dividida en dos unidades experimentales.	19
Figura 6. Área de muestreo (AM) dividida en unidades experimentales donde se aplicaron los tratamientos de fertilización: N0 (sin aplicación de N) y N250 (250 kg ha ⁻¹ de N, considerado sin limitantes).....	21
Figura 7. Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Balcarce durante dos rebrotes primaverales: (a) PRIM14 y (b) PRIM15. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. S = Septiembre, O = Octubre, N = Noviembre, D = Diciembre; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.....	26
Figura 8. Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Balcarce durante dos rebrotes otoñales: (a) OTO15 y (b) OTO16. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. M = Marzo, A = Abril, My = Mayo; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.	27

- Figura 9.** Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Balcarce durante los rebrotes (a) PRIM14 y (b) PRIM15. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.28
- Figura 10.** Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Balcarce durante los rebrotes (a) OTO15 y (b) OTO16. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.29
- Figura 11.** Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Ayacucho durante dos rebrotes primaverales: (a) PRIM15 y (b) PRIM16. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce y Centro de Capacitación Integral del INTA Cuenca del Salado. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. S = Septiembre, O = Octubre, N = Noviembre, D = Diciembre; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes..... 30
- Figura 12.** Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Ayacucho durante los rebrotes (a) PRIM15 y (b) PRIM 2016. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.31

- Figura 13.** Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Ayacucho durante dos rebrotes otoñales: (a) OTO16 y (b) OTO17. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce y Centro de Capacitación Integral del INTA Cuenca del Salado. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. M = Marzo, A = Abril, My = Mayo; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes..... 32
- Figura 14.** Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Ayacucho durante los rebrotes (a) OTO16 y (b) OTO17. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales. 33
- Figura 15.** Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada, en el sitio experimental Ayacucho y en el tratamiento N250 para los rebrotes (a) PRIM15, (b) OTO16, (c) PRIM16 y (d) OTO17. 37
- Figura 16.** Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Ayacucho, en el tratamiento N0 para los rebrotes (a) PRIM15, (b) OTO16, (c) PRIM16 y (d) OTO17. 39
- Figura 17.** Coeficiente de variación temporal (CVT) de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Ayacucho, en (a) el tratamiento N250 y (b) el tratamiento N0. • CVT \leq 0,3 (estable) • CVT $>$ 0,3 (inestable). 40
- Figura 18.** Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Balcarce, en el tratamiento N250, para los rebrotes (a) PRIM14, (b) OTO15, (c) PRIM15 y (d) OTO16. 41
- Figura 19.** Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Balcarce, en el tratamiento N0, para los rebrotes (a) OTO15, (b) PRIM15 y (c) OTO16. 42
- Figura 20.** Coeficiente de variación temporal (CVT) de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Balcarce, en (a) el tratamiento N250 y (b) el tratamiento N0. • CVT \leq 0,3 (estable) • CVT $>$ 0,3 (inestable). 43

- Figura 21.** Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA), zona de producción media (ZPM) y zona de producción baja (ZPB). 44
- Figura 22.** Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en primavera. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB). 45
- Figura 23.** Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N0 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB). 46
- Figura 24.** Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Balcarce en el tratamiento N0 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB). 48
- Figura 25.** Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Balcarce en el tratamiento N250 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB). 48
- Figura 26.** Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Ayacucho para dos estaciones de crecimiento (PRIM15 y PRIM16) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0. 52
- Figura 27.** Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Balcarce, para dos estaciones de crecimiento (PRIM14 y PRIM15) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0 (PRIM14; tratamiento N0: sin datos). 53
- Figura 28.** Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Ayacucho, para dos estaciones de crecimiento (OTO16 y OTO17) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0. 54

Figura 29. Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Balcarce, para dos estaciones de crecimiento (OTO15 y OTO16) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0.	55
Figura 30. Sensor Veris 3100 usado para las determinaciones de conductividad eléctrica aparente (CEa).	61
Figura 31. Discos del sensor Veris 3100 usado para medir la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa).	62
Figura 32. Semivariograma experimental (●) y teórico (—) de la CEa medida hasta los 30 cm de profundidad en (a) el sitio experimental Ayacucho y (b) en el sitio experimental Balcarce.	73
Figura 33. Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) medida hasta los 30 cm de profundidad en el sitio experimental Ayacucho.	73
Figura 34. Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) medida hasta los 30 cm de profundidad en el sitio experimental Balcarce.	74
Figura 35. Mapas de contorno de los atributos del terreno (a) elevación (Elev), (b) pendiente (Pend), (c) índice topográfico de humedad (ITH) y (d) curvatura del terreno (CT) del sitio experimental Ayacucho.	75
Figura 36. Mapas de contorno de los atributos del terreno (a) elevación (Elev), (b) pendiente (Pend), (c) índice topográfico de humedad (ITH) y (d) curvatura del terreno (CT) del sitio experimental Balcarce.	76
Figura 37. Valores observados de (a) pH, (b) relación de absorción de sodio (RAS) y (c) humedad gravimétrica a 1500 kPa de tensión mátrica versus valores estimados por el algoritmo <i>Random Forest</i> (RF) a partir de las propiedades de sitio de mayor importancia para el sitio experimental Ayacucho. La línea punteada indica el ajuste 1:1. Las ecuaciones de regresión lineal, los R^2 y las significancias para las distintas propiedades de suelo fueron: $\text{pH} = 0,61x + 3,07$, $R^2 = 0,24$, $P = 0,09$; $\text{RAS} = 0,50x + 7,10$; $R^2 = 0,43$, $P = 0,05$; $\text{Agua} = 0,41x + 0,21$ $R^2 = 0,37$, $P = 0,08$	79

Figura 38. Valores observados de (a) relación de absorción de sodio (RAS), (b) arena, (c) conductividad eléctrica del extracto (CEe), (d) pH y (e) humedad gravimétrica a 0,33 kPa de tensión mátrica versus valores estimados por el algoritmo *Random Forest* (RF) a partir de las propiedades de sitio de mayor importancia para el sitio experimental Balcarce. La línea punteada indica el ajuste 1:1. Las ecuaciones de regresión lineal, los R^2 y las significancias para las distintas propiedades de suelo fueron: RAS = $0,25x + 26,7$, $R^2 = 0,20$, $P = 0,14$; $A_r = 0,02x + 45,7$, $R^2 = 0,005$, $P = 0,80$; CEe = $0,15x + 4,50$, $R^2 = 0,14$, $P = 0,21$; Agua = $0,03x + 38,8$, $R^2 = 0,06$, $P = 0,41$ y pH = $0,29x + 6,13$, $R^2 = 0,41$, $P = 0,02$ 80

Figura 39. Patrón espacial de distribución de (a) las zonas de manejo (ZM) y (b) las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en primavera. Las zonas fueron delimitadas mediante clasificación clúster multivariada: (■) zona alta (ZA) y (■) zona baja (ZB). 81

Figura 40. Patrón espacial de distribución de (a) las zonas de manejo (ZM) y (b) las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en otoño. Las zonas fueron delimitadas mediante clasificación clúster multivariada: (■) zona alta (ZA) y (■) zona baja (ZB). 82

ABREVIATURAS

ABREVIATURA	DENOMINACIÓN
AM	Área de muestreo
ANVA	Análisis de la varianza
AP	Agricultura de precisión
A_r	Arena
A_s	Arcilla
BA	Biomasa acumulada
°Cd	Grados centígrados día
CEa	Conductividad eléctrica aparente
CECAIN	Centro de Capacitación Integral
CEe	Conductividad eléctrica del extracto de saturación
CV (%)	Coefficiente de variación
CT	Curvatura del terreno
CVT	Coefficiente de variación temporal
Desv	Desvío estándar
DGPS	Sistema de posicionamiento global diferencial (del inglés: <i>Differential global positioning system</i>)
EEA	Estación Experimental Agropecuaria
Elev	Elevación
ETP	Evapotranspiración potencial
FCA-UNMdP	Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional de Mar del Plata
FPI	Índice de rendimiento difuso (del inglés: <i>Fuzziness performance index</i>)
GPS	Geo-posicionamiento satelital
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IR	Banda infrarroja cercana
ITH	Índice topográfico de humedad
IVN	Índice verde normalizado

k	Índice Kappa
L_i	Limo
MA	Manejo por ambientes
Max	Máximo
Mg	Magnesio
Min	Mínimo
MO	Materia orgánica
MS	Materia seca
MZA	Analizador de zonas de manejo (del inglés: <i>Management zone analyst</i>)
N	Nitrógeno
N0	Tratamiento sin la aplicación de nitrógeno
N250	Tratamiento sin limitaciones nutricionales
Na	Sodio
NCE	Clasificación entrópica normalizada (del inglés: <i>Normalized classification entropy</i>)
OTO15	Otoño 2015
OTO16	Otoño 2016
OTO17	Otoño 2017
P	Fósforo
Pen	Pendiente
PRIM14	Primavera 2014
PRIM15	Primavera 2015
PRIM16	Primavera 2016
Prom	Promedio
R	Banda roja
RAS	Relación de absorción de Sodio
RF	Bosques aleatorios (del inglés: <i>Random forest</i>)
RRMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio relativo (del inglés: <i>Relative root mean square error</i>)
SIG	Sistemas de información geográfica
T	Temperatura media diaria del aire
Tb	Temperatura base de crecimiento

UIB	Unidad integrada Balcarce
ZA	Zona alta
ZB	Zona baja
ZM	Zona de manejo
ZP	Zona productiva
ZPA	Zona productiva alta
ZPB	Zona productiva baja

RESUMEN

Los suelos de aptitud ganadera de la Pampa Deprimida son heterogéneos, incluso a nivel de lote. Esto provoca variabilidad espacial en la producción de forraje. La aplicación de tecnologías de agricultura de precisión permitiría mejorar el uso de estos recursos. Los objetivos de este estudio fueron (i) relacionar, durante cuatro rebrotes de pasturas perennes templadas y niveles contrastes de nitrógeno (N), variables del sitio [conductividad eléctrica aparente (CEa), atributos del terreno derivados de modelos de elevación digitales y el índice verde normalizado (IVN)] y producción de forraje y (ii) evaluar la posibilidad de utilizar dichas variables de sitio para delimitar zonas de manejo (ZM).

En dos sitios experimentales (Balcarce y Ayacucho) se midieron y geo-referenciaron la CEa y la elevación. A partir de esta última se calcularon los atributos topográficos. Además, se geo-referenciaron ochenta y cuatro y cuarenta y tres áreas de muestreo (AM), en Balcarce y Ayacucho respectivamente. En las mismas, se tomaron muestras de suelo para la determinación de diferentes propiedades edáficas. Las AM se dividieron en dos parcelas, una de las cuales fue fertilizada con 250 kg ha⁻¹ de N (N250), al inicio de cuatro rebrotes, y la otra no fue fertilizada (N0). Al final de cada rebrote, se estimó la biomasa acumulada (BA) para delimitar zonas productivas (ZP). Además, en los cuatro períodos analizados se obtuvieron imágenes satelitales y a partir de las mismas se calculó el índice verde normalizado (IVN).

En el sitio Balcarce, el grado de ajuste de las asociaciones entre la BA y las propiedades del suelo fue bajo (el R² varió entre 0,08 y 0,34). En el mismo sentido, los datos mostraron que no se detectó asociación entre BA y IVN (el R² varió entre 0,05 y 0,07 y entre 0,15 y 0,26 para otoño y primavera, respectivamente). Además, a partir de las propiedades del sitio, no se pudieron estimar las propiedades del suelo. Por lo tanto, en los dos tratamientos de fertilización, la delimitación de ZM no fue posible en este sitio experimental.

En el sitio experimental Ayacucho los resultados hallados permitieron caracterizar adecuadamente, mediante información espectral, la BA creciendo en primavera con y sin limitantes de N. En cambio, en otoño, el IVN no se relacionó con la BA en ninguno de los tratamientos de fertilización evaluados. La información compilada permitió relacionar, a través de un análisis de bosques aleatorios, las propiedades del suelo con algunas de las propiedades del sitio evaluadas (CEa y elevación) esto permitió

junto con la caracterización a través del IVN, la información necesaria para identificar ZM en primavera. Por otro lado, en otoño, la delimitación se realizó utilizando únicamente las propiedades del sitio.

En este sitio, las ZP se relacionaron con las ZM delimitadas mediante la CEa y la elevación. El grado de acuerdo entre estas dos delimitaciones, para las estaciones de crecimiento primavera y otoño, fue de 60 y 67% respectivamente. Estos valores son aceptables, considerando el hecho de que existen otros factores limitantes de la productividad no relacionados con las propiedades del suelo que afectan la CEa y la elevación. Además, para evaluar si la CEa y la elevación se pueden usar para determinar ZM, las diferencias en BA se compararon mediante un análisis de varianza. En este sentido, en el tratamiento N250, se hallaron diferencias significativas entre ZM en la BA ($P < 0,01$) tanto en primavera como en otoño.

En el sitio Ayacucho, en el tratamiento N250 independientemente de la estación de crecimiento, el procedimiento evaluado permitió delimitar ZM mediante la selección de las variables de sitios apropiadas. Por el contrario, en Balcarce, no fue posible delimitar ZM.

Palabras claves: forraje, índice verde normalizado, propiedades de suelo, propiedades de sitio, variabilidad espacial, zonas de manejo

ABSTRACT

The spatial variability of livestock aptitude soils at paddock scale is usually very high. This causes high variability in forage production. A way to improve this type of management could be based on precision agriculture technologies. The aim of this study was to assess the relationship between site variables [apparent electrical conductivity (ECa), terrain attributes extracted from digital elevation models and normalized difference vegetation index (NDVI)], and forage yield during different regrowth periods and contrasting nitrogen (N) availability and then use this information to determine potential management zones (MZ).

The ECa and digital elevation models were measured and geo-referenced in two paddocks (experimental sites)(Balcarce y Ayacucho). Additionally, a grid cell was chosen and eighty-four and forty-three sampling areas were geo-referenced in Balcarce and Ayacucho respectively. In sampling areas soil samples were collected and analyzed for soil features. Sampling areas were divided into two experimental units of which one was fertilized with 250 kg ha⁻¹ of N (N250) at the beginning of four regrowth periods and the other one was not fertilized with N (N0). At the end of each regrowth periods, we estimated the accumulated biomass (AB) to delimit productivity zones (PZ). Also, in the four regrowth periods satellite images were obtained and NDVI was calculated.

In the Balcarce experimental site, AB and soil properties were poorly associated (The R² ranged between 0.08 and 0.34). In the same sense, the data showed that not significant and weakly correlation coefficients were found between and between AB and NDVI (The R² ranged between 0.05 and 0.07 and between 0.15 and 0.26 for autumn and spring, respectively). Besides, from the site properties the soil properties could not be estimated. Therefore, in the two fertilization treatments, the delimitation of MZs was not possible in this experimental site.

In the Ayacucho experimental site, in spring the NDVI was related to the BA with and without N-limiting. In contrast, in autumn, the NDVI was not related to the BA in any of the fertilization treatments evaluated. The compiled information allowed to relate, through an Random Forest analysis, soil properties with site properties (ECa and elevation, which provided, together with the characterization through the IVN, the information necessary to identify ZM in spring. On the other hand, in the autumn the ZM delimitation was carried out using only the site properties.

In this study, we found in N250, an association between PZ and MZ during the spring and autumn regrowths. In this sense, the combination of ECa and elevation variables gave 60-70% agreement (accuracy statistic) between zones productive and MZ. We consider this level of agreement promising, especially considering that there were many other yield-limiting factors unrelated to ECa and elevation. Additionally, to assess whether ECa and elevation can be used to determine MZ, the differences in AB were compared through analysis of variance test. In N250 the AB had significant differences among MZ ($P < 0.01$) in spring and autumn.

In Ayacucho, our procedure demonstrated the ability to delimit MZ by the selection of appropriate sites variables in N250 treatment. Contrarily, in Balcarce the delimitation of MZ was not possible.

Key words: forage; management zones, normalized difference vegetation index, soil properties, site variables, spatial variability

PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

REVISTAS CON REFERATO

- 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. *Environ. Monit. Assess.* 188: 513.
- 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 perennial pastures according to nitrogen availability and growing season. *Crop Pasture Sci.* 70: 908-916.
- Cicore, P.L.; Castro Franco, M.; Peralta, N.R.; Marques Da Silva, R.; Costa, J.L. 2020. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity and digital elevation models in temperate pastures. *Ci Suelo* (enviado).

CONGRESOS

- Cicore, P.L.; Borrajo, C.; Larrea, G.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M.; Costa, J.L. 2016. Relación espacial entre la conductividad eléctrica aparente del suelo y la producción de biomasa potencial de una pastura de *Festuca arundinacea*. 39° Congreso Argentino de Producción Animal, Actas. Tandil, Buenos Aires, oct 20-22.
- Cicore, P.L.; Larrea, G.; Castro Franco, M.; Marques Da Silva, J.R.; Costa, J.L. 2017. Delimitación de zonas de manejo en *Festuca (Festuca arundinacea)* utilizando el análisis espacio-temporal del crecimiento. 40° Congreso Argentino de Producción Animal, Actas. Córdoba, Córdoba, nov 6-9.
- Cicore, P.L.; Larrea, G.; Castro Franco, M.; Peralta, N.; Marques Da Silva, J.R.; Costa, J.L. 2018. Relación espacial entre la productividad potencial de pasturas cultivadas y propiedades edáficas. 41° Congreso Argentino de Producción Animal, Actas. Mar del Plata, Buenos Aires, oct 16-19.
- Cicore, P.L.; Costa, J.L.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M. 2019. Relación espacial entre la conductividad eléctrica aparente, propiedades edáficas y producción forrajera en suelos ganaderos. 6° Congreso de la Red Argentina de Salinidad, Actas. CABA, jul 22-25.

REVISTAS DE DIVULGACIÓN

- Cicore, P.L.; Sánchez H.R.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M.; Costa, J.L. 2016. Utilización de la conductividad eléctrica aparente y la elevación para delimitar ambientes edáficos en suelos ganaderos. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica.* 23: 19-25.
- Cicore, P.L.; Marino, M.A. 2017. Herramientas para aumentar la productividad ganadera. *Revista Fertilizar.* 38: 10-15.
- Cicore, P.L.; Berone, G.D.; Marino, M.A. 2017. Ganadería Eficiente. Delimitando zonas de manejo. *Visión Rural.* 116: 12-17.
- Cicore, P.L.; Berone, G.D.; Marino, M.A. Costa J.L. 2017. Recomendaciones para aumentar la productividad. *Revista Red de Innovadores.* 160: 54-59.

Cicore, P.L.; Marino, M.A. 2018. Herramientas para aumentar la productividad ganadera. Horizonte A. Magazine de las Ciencias Agrarias y los Agronegocios. 100: 40-43.

PUBLICACIONES ASOCIADAS A LA TESIS

REVISTAS CON REFERATO

- Cicore, P.L.; Sánchez, H.R.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M.; Aparicio, V.; Costa, J.L. 2015. Determinación de ambientes edáficos en suelos de la pampa Deprimida mediante la conductividad eléctrica aparente y la elevación. *Ci. Suelo*. 33: 229-237.
- Peralta, N.R.; Cicore, P.L.; Marino, M.A.; Marques Da Silva, J.R.; Costa, J.L. 2015. Use of geophysical survey as a predictor of the edaphic properties variability in soils used for livestock production. *Span. J. Agric. Res.* 13(4), e1103.
- Díaz, H.J.; Castro Franco, M.; Quiróz Londoño, M.; Cicore, P.L.; Costa, J.L. 2017. Predicción del contenido de arcilla superficial utilizando conductividad eléctrica aparente y esquemas de muestreo basados en modelos. *Ci. Suelo*. 35: 135-146.
- 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. *Agrisciencia*.34: 91-98.

CONGRESOS

- Cicore, P.L.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M.; Costa, J.L.; Agnusdei, M.G. 2013. Use of soil apparent electrical conductivity as predictor of soil properties variability in permanent pastures of the flooding pampas (Buenos Aires, Argentina). *International Annual Meetings. ASA, CSSA & SSSA, Actas Tampa, Florida, USA, nov 3-6.*
- Domenech, M.L.; Castro Franco, M.; Cicore, P.L.; Costa, J.L.; Aparicio, V. 2013. Spatial variability analysis of the effective depth to petrocalcic horizon using electrical resistivity in the southern Pampas of Argentina. *International Annual Meetings. ASA, CSSA & SSSA, Actas Tampa, Florida, USA, nov 3-6.*
- Cicore, P.L.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M.; Sánchez H.R.; Costa, J.L. 2014. Conductividad eléctrica aparente y altimetría para delimitar ambientes edáficos en suelos ganaderos. 24° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas. Bahía Blanca, Buenos Aires, may 19-23.
- Cicore, P.L.; Sánchez, H.R.; Peralta, N.R.; Aparicio, V.; Agnusdei, M.G.; Costa, J.L. 2014. Relación entre la conductividad eléctrica aparente y propiedades edáficas en suelos ganaderos. 24° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas. Bahía Blanca, Buenos Aires, may 19-23.
- Cicore, P.L.; Berone, G.D.; Álvarez Prado, A.F.; Agnusdei, M.G. 2014. Respuesta de pasturas de agropiro a la fertilización nitrogenada en diferentes posiciones topográficas de un lote de la Pampa Deprimida. 37° Congreso Argentino de Producción Animal, 2nd Joint Meeting ASAS-AAPA y XXXIX Congreso de la Sociedad Chilena de Producción Animal, Actas. CABA, Argentina, oct 20-22.
- Cicore, P.L.; Tancredi, M.; Berone, G.D.; Peralta, N.R.; Marino, M.A.; Costa, J.L. 2016. Respuesta al suministro de nitrógeno en Agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*) en función de zonas de manejo delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente del suelo. 39° Congreso Argentino de Producción Animal, Actas. Tandil, Buenos Aires, oct 20-22.

Castro Franco, M.; Costa, J.L.; Aparicio, V.; Domenech, M.L.; Cicore, P.L. 2017. Soil Management Units delimitation based on soil survey and multivariate techniques. European Geosciences Union. General Assembly, Actas. Viena, Austria, abr 23-28.

SIMPOSIOS, TALLERES Y JORNADAS SIN REFERATO

Cicore, P.L.; Tancredi, M.; Berone, G.D.; Peralta, N.R.; Marino, M.A.; Costa, J.L. 2017. Fertilización nitrogenada en agropiro alargado en función de zonas de manejo delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente. Resúmenes de conferencias y posters. Simposio Fertilidad 2017 “Más allá de la próxima cosecha”. International Plant Nutrition Institute (IPNI) Latin America-Southern Cone – Fertilizar Asociación Civil. Actas, pp 157-162.

Cicore, P.L.; Berone, G.D.; Marino, M.A. Costa J.L. 2017. Reconocimiento de ambientes edáficos y delimitación de zonas de manejo: herramientas para aumentar la productividad ganadera. 25° Congreso AAPRESID. Kairos. “El tiempo de los nativos sustentables”, Actas. Rosario, Santa Fe, ago 1-4.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1.1. Introducción

La población mundial aumentará a 9700 millones para el año 2050 (United Nations, 2015). Además, se pronostica un incremento anual del 2,5 % del producto bruto per cápita, lo que provocará que la dieta de las personas sean más ricas en productos de origen animal (Andrade, 2016). Una dieta con alta proporción de productos animales requiere el triple de equivalente grano que una dieta vegetariana (Bakker, 1985, citado por Andrade, 2016). En este contexto, el sector agropecuario enfrenta el desafío de aumentar la producción para satisfacer la creciente demanda de alimentos (Conforti, 2011). Sin embargo, esto incrementará la presión sobre los recursos naturales, en especial agua y suelo, lo que podría afectar la sustentabilidad de los sistemas de producción.

En la Pampa húmeda (situada entre los 28 y 40°S y 57 y 68°O), los sistemas de cría y recría bovina se desarrollan principalmente en la provincia de Buenos Aires, en una vasta planicie de 90.000 km² llamada Pampa Deprimida (Rodríguez y Jacobo, 2012), donde los suelos se caracterizan por una serie de restricciones edáficas y topográficas (Taboada, 2006). Estas actividades pecuarias son realizadas en base a pastizales naturales y pasturas cultivadas, con una baja adopción de tecnología que determina bajos niveles de productividad (Cid *et al.*, 2011).

Entre las especies adaptadas a las condiciones de esta región se destacan algunas gramíneas forrajeras templadas (e.g. festuca alta y agropiro alargado Mazzanti *et al.*, 1992; Agnusdei *et al.*, 2001). Estos recursos forrajeros muestran una marcada estacionalidad, los períodos de mayor crecimiento de forraje son primavera y otoño en menor medida (Mazzanti *et al.*, 1992). El incremento de la productividad y la eficiencia en pasturas conformadas por estas especies puede lograrse mediante algunas prácticas de manejo como la adecuada fertilización (Agnusdei *et al.*, 2010) o la implantación de la especie mejor adaptada a cada condición edáfica. Para ello, es necesario conocer las limitaciones de los suelos presentes en esta región.

En lo referido a las condiciones edáficas de la Pampa Deprimida, la característica de suelo que más afecta la disponibilidad de agua, la cual está altamente relacionada con la productividad (Fraisse *et al.*, 2001), es la presencia de sodio (So y Aylmore, 1993; Vázquez, 2001). Cuando el suelo está húmedo, por el alto contenido de este elemento, las arcillas se dispersan y se genera una estructura masiva que impide un

buen drenaje del agua y favorece la preponderancia de poros muy finos, esto provoca que una alta proporción de la humedad edáfica este retenida a elevadas tensiones. En consecuencia, estos suelos pueden tener moderados contenidos hídricos pero gran parte del agua no puede ser utilizada por las plantas (Vázquez, 2001). En este sentido, en suelos Natracuales de la Pampa Deprimida, Costa y García (1997) determinaron que la productividad de un pastizal natural se relaciona estrecha y negativamente el pH ($R^2 = 0,58$).

Por otra parte, debido la baja infiltración y el deficiente drenaje, cuando la demanda del ambiente es elevada, se produce una rápida evaporación y secado de los horizontes superficiales (So y Aylmore, 1993), donde se encuentran aproximadamente el 80-85% de las raíces (Doll y Deregibus, 1986), generándose así un elevado déficit hídrico. En la Figura 1 se resumen los efectos que provoca el sodio sobre propiedades edáficas y que determinan la baja producción de biomasa.

El valor crítico de sodio intercambiable, para clasificar un suelo como sódico, es 15 meq/100 g de suelo (Lavado y Taboada, 2009). Sin embargo, este umbral puede variar entre suelos, o entre lugares, debido a que las propiedades exhibidas por este tipo de suelos son el resultado de múltiples interacciones entre contenido de sodio, textura, conductividad eléctrica del extracto (CEe), pH, relación de absorción de sodio (RAS) y MO (Sumner, 1993; Crescimanno *et al.*, 1995). Por otra parte, otro factor que se asocia al sodio es la posición topográfica en el paisaje. Aquellos suelos ubicados en posiciones elevadas presentan mayor distancia entre la superficie del suelo y la napa freática. Por lo tanto, los procesos de ascenso capilar no son relevantes y las sales pueden ser lixiviadas hacia los horizontes profundos (Rubio y Taboada, 2013).

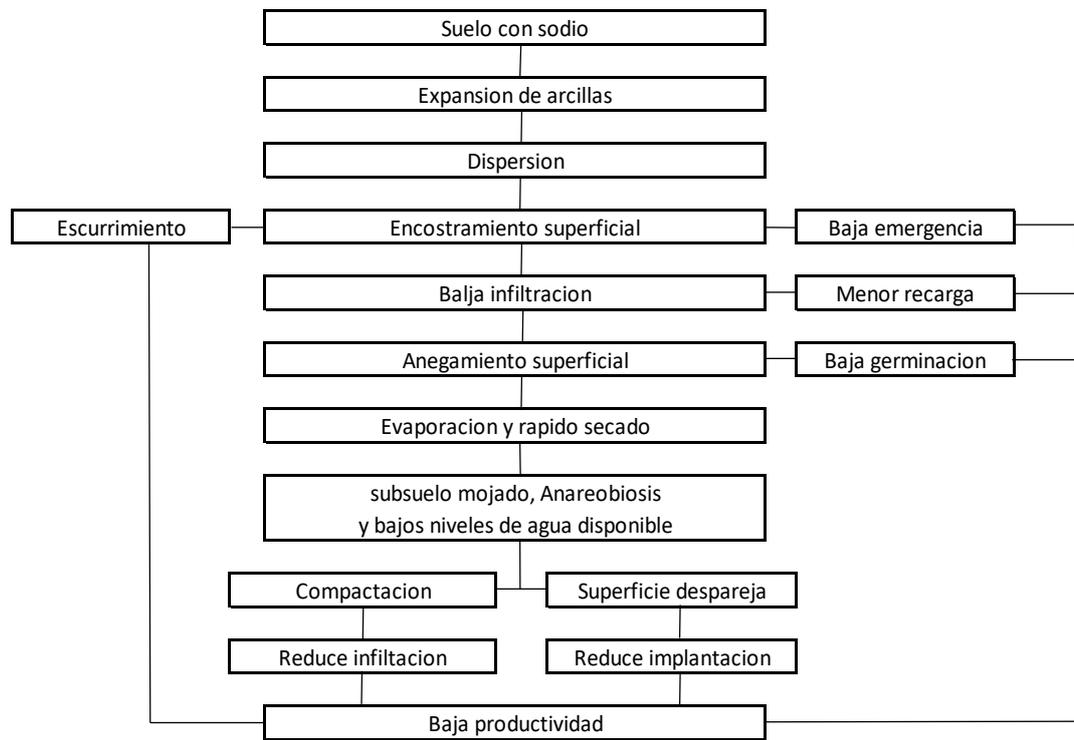


Figura 1. Efecto de la expansión y dispersión del suelo sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento (So y Aylmore, 1993).

En los suelos de la Pampa Deprimida, las propiedades edáficas, mencionadas anteriormente, presentan una elevada heterogeneidad espacial (Cicore *et al.*, 2015) y así, el manejo uniforme, no sería una estrategia de manejo eficiente (Moral *et al.*, 2010). Por lo tanto, otra manera de incrementar la productividad y la eficiencia, manteniendo o reduciendo el impacto ambiental, sería utilizar un conjunto de tecnologías y herramientas [e.g. monitores de rendimiento, sistemas de Información geográficos (SIG) y sistemas de geo-posicionamiento satelital (GPS)], que conforman la “Agricultura de Precisión” (AP) y que permiten determinar y manejar la variabilidad espacial (Pierce y Nowak, 1999). Sin embargo, a pesar de los beneficios que proporciona la adopción de la AP su implementación en los sistemas ganaderos es casi nula (Schellberg *et al.*, 2008; Trotter *et al.*, 2014; Cicore *et al.*, 2015).

En este contexto, el punto de partida para realizar AP en los sistemas pastoriles, sería aplicar el concepto de manejo por ambientes (MA). En el mismo, se identifican áreas, denominadas zonas de manejo (ZM), que poseen diferentes potenciales de producción (Doerge, 1989) debido a la variación espacial de las propiedades edáficas y topográficas que influyen en la disponibilidad de agua y, en consecuencia, en la producción de biomasa.

1.1.2. Variabilidad edáfica y topográfica y su relación con la variabilidad productiva

La variabilidad de las propiedades físicas y químicas del suelo puede resultar en rendimientos variables dentro de cada lote (Bullock y Bullock, 2000). En este sentido, Vázquez *et al.* (2001) indican que las propiedades edáficas del horizonte A serían las que permiten predecir la productividad de pastizales naturales desarrollados sobre diversos suelos sódicos. Sin embargo, estos autores establecieron que la disponibilidad de nitrógeno (N) y agua alteran la importancia relativa de las propiedades de suelo del horizonte superficial que afectan la productividad. Estos autores señalan que, en condiciones de déficit hídrico y sin el agregado de N, el pH y el porcentaje de arena explican la producción de materia seca. En cambio, al agregar N las propiedades edáficas explicativas de la variabilidad son el porcentaje de agua a capacidad de campo y el contenido de arcilla. A pesar de los antecedentes mencionados, en estos suelos, la magnitud en que las variaciones edáficas, afectan la variabilidad en la producción de los recursos forrajeros, a nivel de lote, son desconocidos en la actualidad.

Por otra parte, la topografía del terreno contribuye a la redistribución de las partículas de suelo, MO y nutrientes entre distintas posiciones del paisaje, generando variabilidad en las propiedades físico-químicas del suelo. Además, afecta la variabilidad de la humedad edáfica y en consecuencia la productividad de los cultivos (Kaspar *et al.*, 2003). La elevación determina el flujo y acumulación del agua en diferentes posiciones del lote (Pachepsky *et al.*, 2001). Asimismo, la curvatura del terreno provoca la concentración o dispersión del flujo de agua y la pendiente incrementa la velocidad de dicho flujo reduciendo la tasa de infiltración en las partes elevadas del terreno (Timlin *et al.*, 1998). En este sentido, en pasturas consociadas, Marques da Silva *et al.* (2008) demostraron que el índice topográfico de humedad, el cual se calcula a partir de modelos de elevación digital, se relaciona exponencialmente con la productividad.

En los suelos ganaderos de la Pampa Deprimida el paisaje se caracteriza por el relieve plano (Batista *et al.*, 2005). Por lo tanto, el efecto de la topografía sobre la variabilidad de la humedad del suelo podría ser poco relevante. Sin embargo, en sectores deprimidos de la Pampa Ondulada, donde las características topográficas del paisaje son similares a las halladas en la Pampa Deprimida, Martin *et al.* (2007) determinaron una relación negativa entre elevación del terreno y productividad de pastizales. Estos autores señalan que, este comportamiento, podría estar asociado a

que pequeñas diferencias en la posición topográfica generan cambios importantes en la dinámica del agua.

1.1.3. Cuantificación de la variabilidad productiva

Además de la cuantificación de la variabilidad de propiedades edáficas y topográficas, otra de las herramientas más utilizadas para realizar MA son los mapas de rendimiento (Birrell *et al.*, 1996). Sin embargo, en ganadería, debido a que la cosecha la realiza el animal y/o al menor nivel de tecnificación de estos sistemas, generar mapas de variabilidad de la biomasa acumulada (BA) es difícil.

A nivel experimental, el corte directo del pasto es el método de referencia para la cuantificación de la BA (Frame, 1993). Cuando el número de muestras es el adecuado, este método, es un indicador preciso del rendimiento de forraje. Sin embargo, es un método destructivo y requiere una elevada inversión en tiempo y trabajo (Flynn *et al.*, 2008; Moeckel *et al.*, 2017). Por lo tanto, son escasas las mediciones directas de variabilidad espacial en estos sistemas (Trotter *et al.*, 2014).

Diversos métodos indirectos han sido propuestos para la estimación de la BA, por ejemplo, pasturómetros o sondas de capacitancia electrónica (Harmony *et al.*, 1997; Sanderson *et al.*, 2001; Serrano *et al.*, 2016). Estos métodos presentan ventajas, en tiempo y trabajo, en relación al corte directo. Sin embargo, también presentan dificultades como variabilidad entre operarios o requerir de calibraciones por especie, estaciones del año, estrategia de manejo o localización geográfica (Flynn *et al.*, 2008).

La información espectral, provista por sensores remotos o proximales, ha sido un método difundido para el monitoreo de pasturas en diversos ecosistemas y regiones debido a que brindan una amplia cobertura espacial y temporal a bajo costo (Paruelo *et al.*, 2000). La misma se combina de diversas maneras obteniendo índices vegetacionales. El índice verde normalizado (IVN) (Rouse *et al.*, 1974) ha sido el más utilizado ya que se ha comprobado una alta asociación entre la actividad foliar de las plantas y la refracción espectral de la vegetación en el rojo e infrarrojo cercano. En este sentido, numerosos trabajos han encontrado que el IVN está asociado estrechamente con variables biológicas como biomasa verde o índice de área foliar (Zhang y Guo, 2008; He *et al.*, 2009, Trotter *et al.*, 2010; Desseux *et al.*, 2015). Por lo tanto, podría ser una alternativa viable para cuantificar la variabilidad de la BA.

1.1.4. Propiedades de sitio y delimitación de zonas de manejo

Como se mencionó anteriormente, para realizar MA es necesario determinar la variabilidad del rendimiento y de las características edáficas y topográficas. Esto debe realizarse de manera sencilla, rápida y con un bajo costo (King *et al.*, 2005). Para ello

se usan fuentes de información denominadas propiedades de sitio. La medición geoespacial de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa), ha sido una de las propiedades de sitio más utilizadas (Moral *et al.*, 2010; Peralta *et al.*, 2013a). La misma se define como la capacidad que tiene el suelo para conducir la corriente eléctrica, (Doerge, 1999) y ha sido utilizada como estimador de las propiedades del suelo (Heil y Schmidhalter, 2017). Por ejemplo, la disponibilidad de agua (Hossain *et al.*, 2010) la salinidad (Rhoades, 1976), la textura (Heil y Schmidhalter, 2012) el pH (Sanchez *et al.*, 2018) y la MO (Corwin y Lesch, 2005). Además, para su uso en MA, la CEa tiene la ventaja de que su medida resulta ser estable en el tiempo, los valores relativos de la cambian con el contenido de agua del suelo, pero los patrones de variación permanecen relativamente estables (Farahani y Flynn, 2007; Stadler *et al.*, 2015). Sin embargo, para delimitar ambientes, podría haber algunas limitaciones al utilizar la CEa ya que el N, el cual afecta sustancialmente la producción de forraje en la Pampa Deprimida (Agnusdei *et al.*, 2010), no se relacionaría con la CEa debido a que otros aniones influirían en las determinaciones de este parámetro en mayor medida que el N inorgánico (Johnson *et al.*, 2001). En este sentido, el grado de ajuste de las relaciones entre CEa y nitratos medidos en suelos agrícolas (Peralta *et al.* 2013a) y entre CEa y N-amonio producido en incubación anaeróbica, medido suelos ganaderos (Peralta *et al.*, 2015) es bajo.

En la literatura internacional la información disponible sobre la relación de la CEa con características edáficas es muy abundante para suelos de aptitud agrícola (Corwin y Lesch, 2005, Moral *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2016). Sin embargo, el uso de este parámetro en suelos de aptitud ganadera es escaso, Serrano *et al.* (2010) hallaron correlaciones positivas y significativas entre el pH y la CEa. Hossain *et al.* (2010) demostraron la relación entre este parámetro y el contenido de humedad en un suelo que tenía implantada una pastura naturalizada y Guretzky *et al.* (2004) utilizaron la CEa para determinar el patrón espacial de distribución de leguminosas dentro de una pastura mixta debido a que, esta especie, se ubica en las áreas de mayor disponibilidad hídrica y menor pH.

En concordancia con la literatura internacional, para la región pampeana, la mayoría de los trabajos que involucran la CEa se han realizado sobre lotes de aptitud agrícola. Peralta *et al.* (2011) y (2013a) observaron, en el sudeste Bonaerense, que la CEa tiene una elevada correlación con la profundidad a la que se encuentra la tosca, la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) y la humedad edáfica. Para los suelos de aptitud ganadera de la región pampeana existen algunos trabajos que

utilizan la CEa para caracterizar ambientes con el objetivo de aplicar dosis variables de enmiendas calcáreas (Gambaudo *et al.*, 2010). Sin embargo, no existe información sobre la utilización de la CEa para predecir propiedades edáficas en los suelos ganaderos de la región.

Como ya se mencionó para sodio, la variabilidad de otras propiedades del suelo está asociada a la topografía (Pachepsky *et al.*, 2001). Por lo tanto, diversos índices topográficos han sido utilizados como propiedades de sitio para determinar la variabilidad de características edáficas. Los atributos topográficos pueden dividirse en dos categorías: atributos primarios (e.g. elevación, pendiente, orientación y curvatura) y atributos secundarios, los cuales son calculados a partir de la combinación de atributos primarios (e.g. índice topográfico de humedad, índice de transporte de sedimentos, etc). Pei *et al.* (2010) demostraron que el índice topográfico de humedad correlaciona con variabilidad espacial de la MO, Serrano *et al.* (2013) hallaron una asociación, elevada y significativa, entre la elevación y el contenido de humedad del suelo ($R^2 = 0,66$) y Marques da Silva *et al.* (2008), en suelos de aptitud ganadera de Portugal, establecieron una relación entre el índice de humedad del suelo, calculado a partir de la pendiente y el área de captación de humedad, y la productividad de las pasturas. En base a estos antecedentes, tanto los atributos primarios como los secundarios, podrían tener importancia para describir la variabilidad de los suelos ganaderos de la región porque, si bien el paisaje se caracteriza por el relieve plano, se pueden distinguir diversos ambientes edáficos en función de la posición topográfica (Batista *et al.*, 2005).

Para usar conjuntamente la CEa y los atributos topográficos para predecir propiedades de suelo se necesita un procedimiento que permita hallar las propiedades de sitio (variables predictoras) más relevantes y cuantificar su importancia dentro de un modelo de predicción. En este sentido, Vitharana *et al.* (2008), en suelos agrícolas de Bélgica, utilizaron la CEa y la topografía para determinar la variabilidad de la textura, el pH y el carbono orgánico. En suelos de aptitud ganadera, principalmente, la CEa y la topografía han sido utilizadas por separado para caracterizar propiedades de suelo (Corwin *et al.*, 2003a; Guretzky *et al.*, 2004; Márquez da Silva *et al.*, 2009; Serrano *et al.*, 2010), aunque hay algunas experiencias que utilizan varias propiedades de sitio conjuntamente (Cicore *et al.*, 2015). No obstante, no hay reportes donde se utilicen atributos topográficos de relieve y CEa para la predicción de las propiedades edáficas de los suelos sódicos de la región.

Si bien las propiedades de sitio mencionadas no tienen relación directa con el crecimiento vegetal, hay autores que han intentado predecir, con diferente éxito, el rendimiento de los cultivos mediante la CEa (Johnson *et al.*, 2001; Kitchen *et al.*, 2005; Singh *et al.*, 2016) o los atributos topográficos (Márquez da Silva y Silva, 2008; Chi *et al.*, 2009). En pasturas, Bernardi *et al.* (2016), trabajando en alfalfa hallaron diferencias en producción entre ambientes delimitados mediante la CEa. En cambio, en ambientes mediterráneos de Portugal, Serrano *et al.* (2010) determinaron bajas asociaciones entre BA de una pastura consociada y la CEa ($R^2 = 0,19$). La diversidad de resultados obtenidos, tanto en cultivos agrícolas como en pasturas, permite inferir que la inclusión de información espectral como propiedad de sitio, la cual si podría estar relacionada con la cantidad de biomasa producida, podría mejorar la predicción de la variabilidad de la productividad y así, la delimitación de ZM.

En agricultura para delimitar ZM se han utilizado diversas fuentes de información, entre ellos mapas de rendimiento (Jaynes *et al.*, 2003), imágenes satelitales (Kemerer, 2011) o mapas de CEa (Moral *et al.*, 2010; Peralta y Costa, 2013). En algunos casos, se han usado conjuntamente varias fuentes de información (Fraisie *et al.*, 2001; Kitchen *et al.*, 2005; Córdoba *et al.*, 2013). Como se mencionó anteriormente para la predicción de propiedades edáficas, son escasas las experiencias de delimitación de ambientes en recursos forrajeros. Serrano *et al.* (2019) delimitaron, mediante índices espectrales y CEa, tres zonas productivas (zonas de alto, medio y bajo potencial) hallándose, entre estas, diferencias en la producción de biomasa. Asimismo, Belanger *et al.* (2017) utilizaron la CEa para delimitar ZM en pasturas y comparar la respuesta a diferentes fuentes de N. Sin embargo, localmente, no hay evidencias científicas de delimitación de ambientes en sistemas pastoriles.

1.1.5. Organización de la tesis

El tema se abordó en cuatro capítulos: en el primero se realizó una introducción general y se definieron los objetivos e hipótesis (este capítulo). En el segundo se determinó la variabilidad de la producción de forraje de las pasturas en diferentes épocas del año y disponibilidad de N. A partir de esta variabilidad se delimitaron zonas productivas (ZP). Por otra parte, se intentó caracterizar la variabilidad de la productividad mediante el IVN obtenido a partir de sensores remotos. En el tercer capítulo se relacionaron propiedades de sitio, (CEa y atributos topográficos) con las propiedades edáficas. Posteriormente, se delimitaron posibles ZM a partir de las propiedades de sitio (que explicaron la variabilidad de las propiedades de suelo) y el IVN (calculado en el capítulo 2). Para finalizar se analizó si estas ZM tienen un patrón

espacial similar a las ZP con el objetivo de comprobar si la combinación de propiedades de sitio e información espectral puede ser una herramienta confiable para la delimitación de ZM en suelos de aptitud ganadera de la Pampa Húmeda, lo cual no ha sido reportado en la literatura y por lo tanto, merecía su estudio. En el cuarto capítulo se realizaron las consideraciones finales de esta tesis.

Con el objetivo de mostrar, en un solo esquema las diversas actividades realizadas en esta tesis, se incluye, en este apartado, la Figura 2.

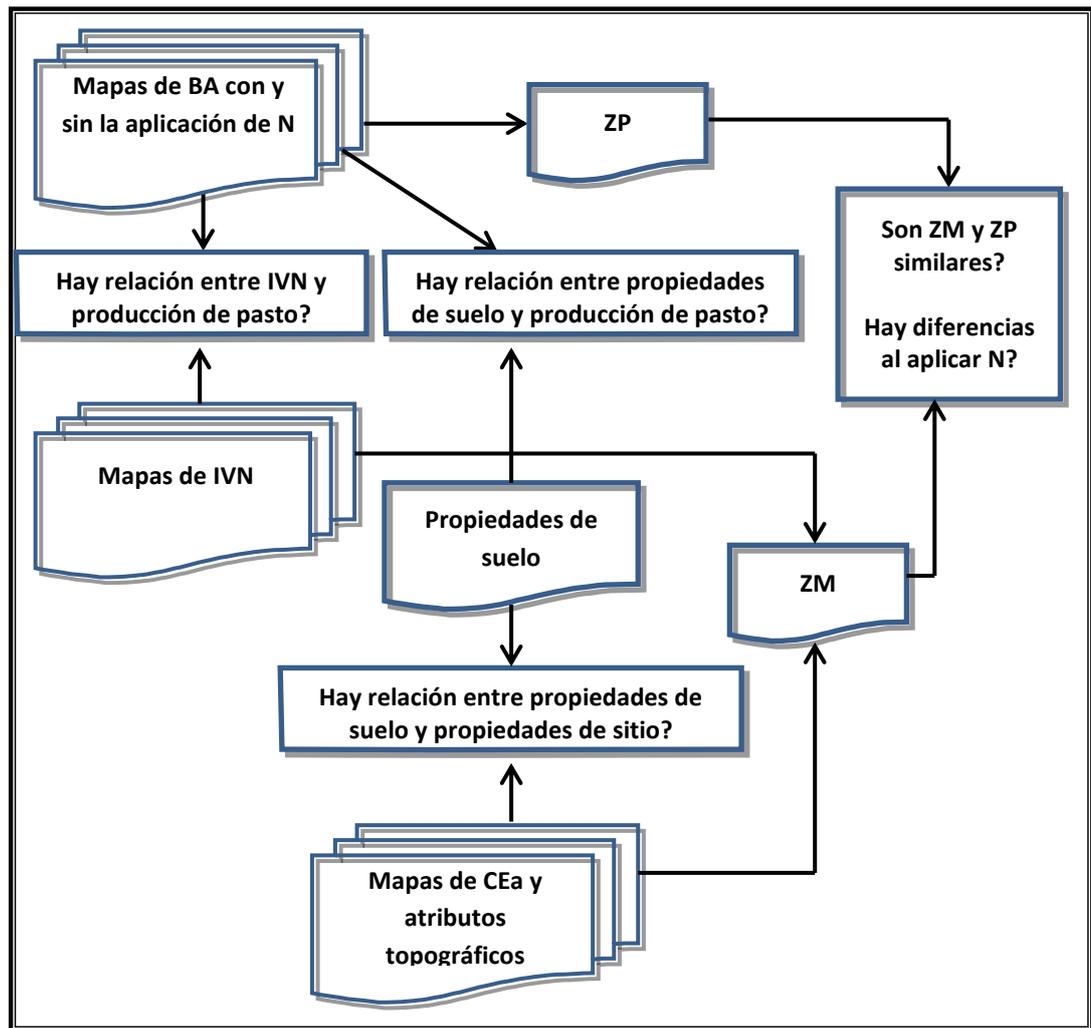


Figura 2. Representación esquemática de la relación entre las variables medidas o estimadas en esta tesis. BA: Biomasa acumulada; CEa: Conductividad eléctrica aparente; IVN Índice verde normalizado; N: Nitrógeno; ZP: Zona productiva; ZM: Zona de manejo.

1.2. HIPÓTESIS

Para pasturas cultivadas, compuestas por gramíneas forrajeras templadas, creciendo en a) primavera y b) otoño se plantea que:

Capítulo 2

1. En condiciones nutricionales no limitantes se presentan sub-ambientes (zonas productivas; ZP) que difieren en su potencial productivo.
2. Con baja oferta de N no es posible delimitar ZP.
3. La variabilidad de la productividad, con y sin limitantes de N, puede ser caracterizada adecuadamente mediante el IVN obtenido de sensores remotos.

Capítulo 3

4. En condiciones de elevada oferta de N el patrón de variación espacial de la productividad está asociado a la variabilidad espacial de propiedades edáficas, las cuales pueden ser predichas mediante la CEa y los atributos topográficos.
5. Ante deficiencias de N el patrón de variación espacial de la productividad no está asociado a la variabilidad espacial de propiedades edáficas.
6. En condiciones nutricionales no limitantes la ambientación realizada en función del análisis combinado de la CEa, los atributos topográficos y el IVN se corresponden con las ZP. Por lo tanto, es posible delimitar ZM a partir de estas fuentes de información.

1.3. OBJETIVOS

Capítulo 2

Determinar la variabilidad de la producción de forraje, mediante el método de corte directo, para delimitar ZP en diferentes épocas del año y condiciones nutricionales.

Caracterizar la variabilidad de la productividad de las pasturas, de manera indirecta, mediante el IVN obtenido a partir de sensores remotos.

Capítulo 3

Determinar la capacidad de la CEa y de los atributos topográficos como predictores de las propiedades edáficas que más influyen en la variabilidad de la productividad.

Delimitar ZM a partir de propiedades de sitio e IVN y comparar el patrón de variación espacial de estas ZM y las ZP delimitadas mediante corte directo.

CAPÍTULO 2

**VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD Y SU RELACIÓN CON
EL ÍNDICE VERDE NORMALIZADO**

2.1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad espacial de la disponibilidad de agua, provoca cambios espaciales en la productividad. Estas variaciones, de la oferta de agua, se deben principalmente a que la misma está asociada a cambios en la textura, el sodio, la MO y la topografía (Peralta *et al.*, 2013a). Asimismo, las propiedades físico-químicas del suelo y los atributos topográficos también influyen sobre la oferta de N (Basso *et al.*, 2011).

En este contexto, la co-limitación de agua y N genera dificultades a la hora de analizar la variabilidad de la productividad dado que la nutrición nitrogenada influye sobre una serie de aspectos relacionados con la eficiencia de uso del agua. Así, la disponibilidad homogénea, pero deficitaria de N, podría provocar que ambientes con diferente potencial, debido a la variabilidad intralote en la oferta de agua, manifiesten una respuesta similar (Figura 3). Por lo tanto, para cuantificar el efecto del agua, y los factores que afectan su variabilidad, las condiciones nutricionales para el crecimiento no deben ser limitantes.

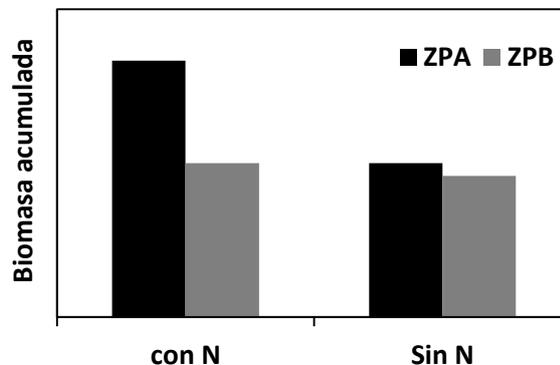


Figura 3. Producción teórica de biomasa con y sin la aplicación de N para dos ZP teóricas con diferente potencial productivo: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB).

Por otra parte, son necesarios varios mapas de producción para determinar adecuadamente el patrón espacial de la variabilidad producto de los factores mencionados anteriormente (MO, textura, topografía, etc) (Lark y Stafford, 1997) debido a que hay otros factores, denominados “temporales”, que pueden afectar la productividad en áreas determinadas de un lote pero pueden no encontrarse en el próximo año o, en el caso de una pastura, en un próximo rebrote. Por lo tanto, estos factores actúan tanto en el espacio como en el tiempo ocasionando, variabilidad espacial y temporal respectivamente (Mulla y Schepers, 1997). Los insectos, los

patógenos del suelo, las “fallas” en la siembra y, en el caso de una pastura, las deyecciones de los bovinos son ejemplos de estos factores temporales.

La determinación de la variabilidad mediante un análisis multivariado de estos mapas de rendimiento permitiría la identificación de ZM (Jaynes *et al.*, 2003), las cuales son subregiones dentro de los lotes que poseen potenciales de producción diferentes (Doerge, 1999). Estas áreas se llaman más específicamente ZP (Kitchen *et al.*, 2005). En la bibliografía son escasos los estudios sobre la delimitación de ZP utilizando mediciones directas de la producción de biomasa en sistemas pastoriles. Serrano *et al.* (2010) trabajando en Portugal definieron diferentes ambientes productivos luego de realizar el corte directo de 1 m² de forraje en una grilla de 28 x 28 m. La escasa información sobre ZP en estos sistemas se debe a la dificultad para elaborar mapas de rendimiento de las pasturas debido al menor nivel de tecnificación respecto a los sistemas agrícolas.

Si la variabilidad de la productividad de una pastura es baja, posiblemente el método de corte directo sea el más adecuado para la cuantificación de la misma ya que no sería necesario delimitar ZP. Sin embargo, cuando la variabilidad es elevada se requiere herramientas que proporcionen gran cantidad de datos que permitan reflejar la variabilidad espacial a un costo relativamente bajo ya que, como se mencionó en el primer capítulo, la delimitación de ZP mediante corte directo es dificultosa.

Una de estas herramientas podrían ser los índices espectrales obtenidos por sensores remotos. El IVN ha sido el más utilizado (Rouse *et al.*, 1974). Numerosos trabajos han encontrado, en diversos ecosistemas del mundo, una elevada correlación entre este índice y variables como biomasa verde o índice de área foliar (Zhang y Guo, 2008; He *et al.*, 2009, Trotter *et al.*, 2010; Desseux *et al.*, 2015).

Si se conoce la productividad forrajera se puede realizar una adecuada planificación y utilización de los recursos, ya que es posible identificar los períodos de déficits y excesos de forraje. Además, si también se cuantifica la variabilidad espacial de la producción de forraje con y sin limitaciones nutricionales se podrían delimitar ZP que permitirían mejorar la mencionada planificación. Por ello, los objetivos del presente capítulo son:

Determinar, mediante corte directo, la variabilidad de la producción de forraje, con y sin limitaciones nutricionales y en diferentes épocas del año, para delimitar ZP.

Caracterizar la variabilidad de la productividad de las pasturas, de manera indirecta, mediante el IVN obtenido a partir de sensores remotos.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Características de los sitios experimentales y descripción de los tratamientos

El experimento se realizó en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires donde el régimen es údico-térmico (Suero *et al.*, 1990) y según la clasificación de Köppen el clima es oceánico templado. La temperatura media anual de la región es 13,5°C y la precipitación promedio ~900 mm (Fuente: Laboratorio de Agrometeorología de la UIB).

Se utilizaron dos lotes (sitios experimentales) de aptitud ganadera que nunca fueron destinados a la agricultura y que tenían establecidas pasturas compuestas por gramíneas forrajeras templadas. El sitio experimental Balcarce ubicado en la EEA INTA Balcarce (37° 49' S; 58° 15' O)(Figura 4) tenía implantada una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth & D.R. Dewey Phil) y el sitio experimental Ayacucho ubicado en el Centro de Capacitación Integral (CECAIN), Colonia Ortiz Basualdo (37° 5' 8''S y 57° 52' 58''O)(Figura 4) una pastura de festuca alta [*Lolium arundinaceum* (Schreb.) Darbysh., anteriormente *Festuca arundinacea* (Schreb.)].

En la Tabla 1 se describen el tamaño, las unidades cartográficas, la aptitud agropecuaria (mediante la capacidad de uso y el índice de productividad), las series de suelos y la clasificación de suelos de dichos sitios experimentales.

Tabla 1. Superficie, unidades cartográficas, capacidad de uso, índice de productividad, serie de suelos y clasificación de suelos de los sitios experimentales.

Sitio experimental	Sup (ha)	Unidades cartográficas*	Capacidad de uso e índice de productividad*	Serie de Suelo*	Clasificación de suelo**
Balcarce	7,1	Che 6	VIws 15,0_B	Chelforó (50%)	Natracualf vértico
				Las Armas (30%)	Natrudol vértico
				Tandileofu (20%)	Natracualf mólico
Ayacucho	5,7	Che 2	VIws 19,4_B	Chelforó (70%)	Natracualf vértico
				Monsalvo (20%)	Argiudol vértico
				Juncalito (10%)	Natracualf glósico
		MPu8***	IIIws 58,2_B	Maipú (50%)	Argiudol vértico
				Monsalvo (30%)	Argiudol vértico
				Chelforó (20%)	Natracualf vértico

*INTA. 2014. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires (1:50000).

**USDA-Soil Taxonomy V.2010.

***Nueva nomenclatura no publicada en los mapas de suelos de la Provincia de Buenos Aires (anterior: Mp8).

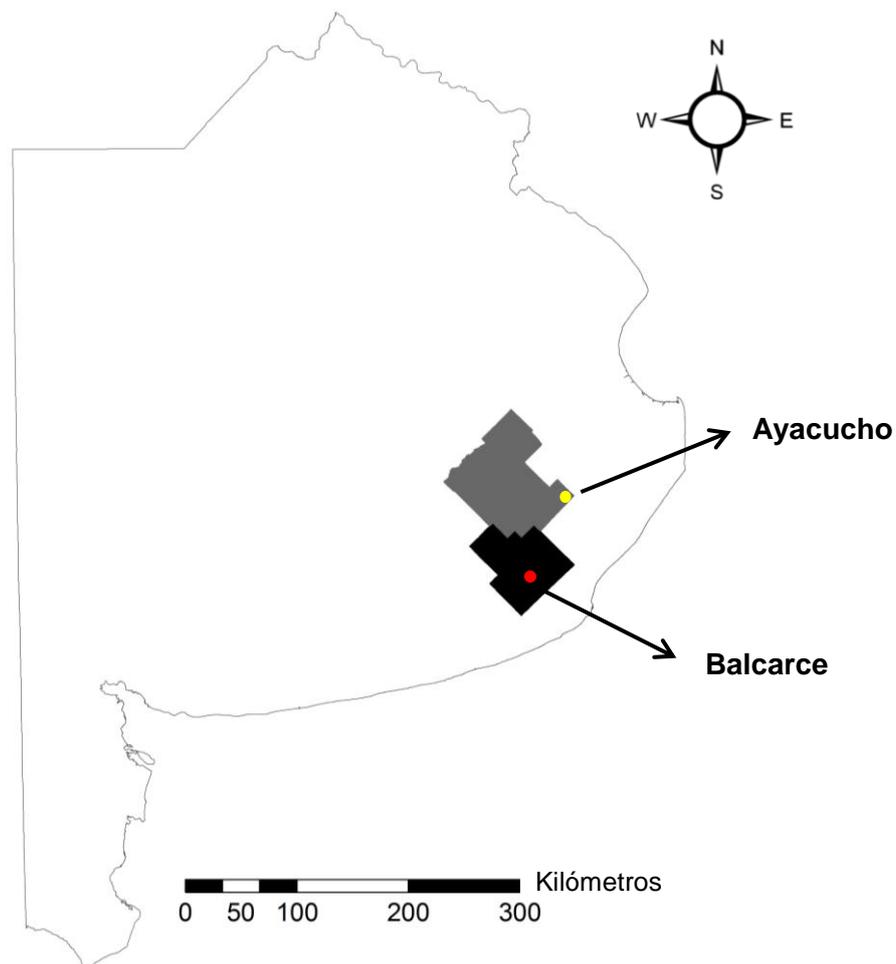


Figura 4. Sitios experimentales: Balcarce, ubicado en el partido de General Balcarce (círculo rojo) y Ayacucho, ubicado en el partido de Ayacucho (círculo amarillo).

Se georreferenciaron 84 puntos o área de muestreo (AM) en el sitio experimental Balcarce (grilla de 27x27) y 42 en el sitio Ayacucho (grilla 30x30) (Figura 5). En cada AM se marcaron dos unidades experimentales de 1 x 2 m. Al inicio de cuatro rebrotes [En Balcarce: primavera 2014 (PRIM14), otoño 2015 (OTO15), primavera 2015 (PRIM15) y otoño 2016 (OTO16) y en Ayacucho: PRIM15, OTO16, primavera 2016 (PRIM16) y otoño 2017 (OTO17)] (Tabla 2) en las unidades experimentales se realizó un corte de emparejamiento a 3 cm de altura y la aplicación de dos tratamientos: N0 (sin aplicación de N) y N250 (250 kg ha⁻¹ de N, considerado sin limitantes) (Figura 6). Además, las unidades experimentales recibieron 30 kg ha⁻¹ de fósforo (P) para evitar déficits de este nutriente. Las fuentes de N y P utilizadas fueron urea (46-0-0) y superfosfato triple (0-46-0) respectivamente.

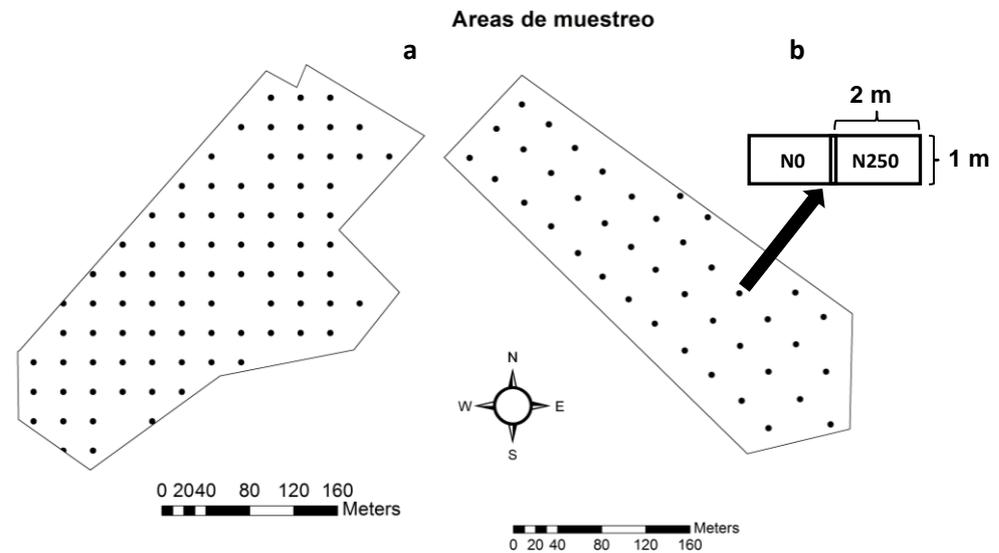


Figura 5. (●) Áreas de muestreo (AM) geo-referenciadas en (a) el sitio experimental Balcarce y (b) el sitio experimental Ayacucho. Cada AM fue dividida en dos unidades experimentales.

Tabla 2. Denominación de los rebrotes, fechas de instalación y corte de los ensayos en los sitios experimentales Balcarce y Ayacucho.

Rebote	Fecha instalación	Fecha corte
Sitio Balcarce		
PRIM14	11/11/2014	15/12/2014
OTO15	10/04/2015	27/05/2015
PRIM15	16/09/2015	04/11/2015
OTO16	31/03/2016	18/05/2016
Sitio Ayacucho		
PRIM15	08/10/2015	03/11/2015
OTO16	13/04/2016	20/05/2016
PRIM16	23/09/2016	27/10/2016
OTO17	17/04/2017	24/05/2017

2.2.2. Caracterización climática y meteorológica

La caracterización climática se realizó a partir de datos de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) de la serie histórica 1990-2017 suministrados por el laboratorio de Agrometeorología de la EEA-INTA Balcarce y el CECAIN de la EEA-INTA Cuenca del Salado. La información meteorológica para el análisis de las condiciones ambientales durante los rebrotes evaluados se obtuvo de las mismas fuentes.

2.2.3. Balances hídricos

Para cada rebrote se realizó el cálculo de un balance hídrico utilizando un modelo aportado por la Cátedra de Agrometeorología de la FCA-UNMdP. Los datos utilizados fueron la ETP diaria, la precipitación diaria y el coeficiente de cultivo promedio de una pastura. El mismo fue estimado en 0,95 (Della Maggiora, comunicación personal). Para los balances se consideró, en función de la clasificación de suelos de los sitios experimentales, una profundidad efectiva promedio de 0,40 y 0,50 m para Balcarce y Ayacucho respectivamente. La capacidad de retención de agua disponible del suelo, en cada sitio experimental, fue estimada a partir de la textura según Travasso y Suero (1994).

2.2.4. Acumulación de forraje

En cada rebrote la BA se cuantificó mediante corte directo. El mismo fue realizado con una motosegadora mecánica experimental, a 3 cm de altura del suelo, muestreándose 1m² en cada unidad experimental. Para evitar la cosecha de material senescente los cortes fueron realizados antes de alcanzar la producción techo [transcurridos un máximo de 400-450 grados centígrado día (°Cd) desde el momento de emparejamiento (Di Marco *et al.*, 2013)]. Los °Cd fueron calculados a partir del concepto de tiempo térmico, definido como la sumatoria de la temperatura media diaria del aire (Tm) menos la temperatura base de crecimiento (Tb) de las especies bajo estudio, en este caso 5 °C (Peacock, 1976; Hutchinson *et al.*, 2000; Borrajo y Alonso, 2014):

$$\text{Tiempo termico} = \Sigma (Tm - Tb) \quad [\text{Ec 1}]$$

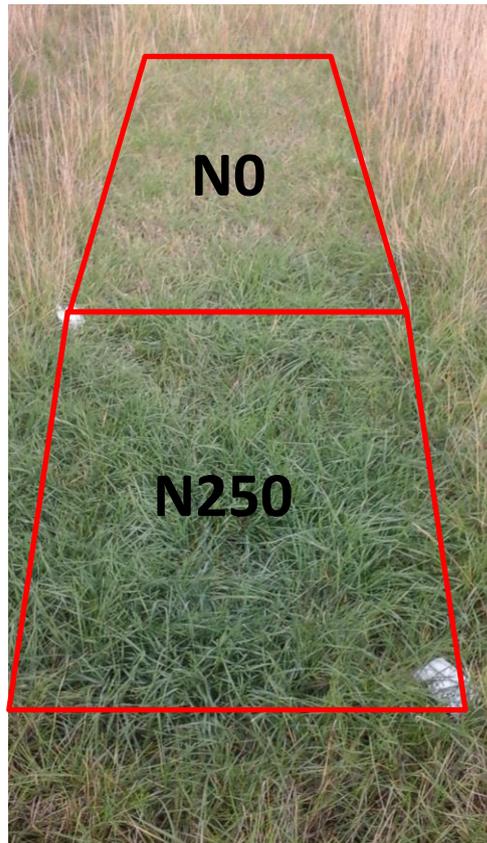


Figura 6. Área de muestreo (AM) dividida en unidades experimentales donde se aplicaron los tratamientos de fertilización: N0 (sin aplicación de N) y N250 (250 kg ha⁻¹ de N, considerado sin limitantes).

El forraje verde se cortó, se pesó en el campo y se extrajo una submuestra la cual fue pesada, secada en estufa a 65 °C con circulación de aire hasta peso constante y se volvió a pesar para determinar el porcentaje de materia seca (%MS) según la siguiente formula:

$$\%MS = 1 - [(\text{peso humedo} - \text{peso seco}) / \text{peso humedo}] * 100 \text{ [Ec 2]}$$

Los datos de BA se calcularon a partir del forraje verde y el %MS y fueron estandarizados utilizando la siguiente formula:

$$S_{UEi} = \left(\frac{Y_{UEi}}{X} \right) * 100 \text{ [Ec 3]}$$

Dónde:

S_{UEi} = Biomasa acumulada estandarizada en la unidad experimental;

Y_{UEi} = Biomasa acumulada en la unidad experimental;

X = Biomasa acumulada promedio para un sitio experimental y rebrote dado

La estandarización permite comparar la productividad de cada lote en las diferentes momentos del año y campañas (Kravchenko y Bullock, 2000).

La variación interrebrote de la BA de cada unidad experimental, dentro de cada sitio experimental, se cuantificó mediante el cálculo del coeficiente de variación temporal (CVT) a partir de la media y varianza interanual de las BAs estandarizadas según la siguiente formula (Blackmore, 2000):

$$CVT_{UE} = \frac{\sqrt{S_{UEi}}}{X_{UEi}} \text{ [Ec 4]}$$

Dónde:

CVT = Coeficiente de variación temporal en la unidad experimental;

X_{UEi} = Biomasa acumulada estandarizada promedio de la unidad experimental;

S_{UEi} = Varianza de la biomasa acumulada estandarizada de la unidad experimental;

2.2.5. Análisis de la variabilidad

Para confeccionar los mapas de BA (resolución 10 x 10 m) de cada lote, tratamiento de fertilización y rebrote, se utilizó la geoestadística. Esta disciplina utiliza funciones para modelar la variación espacial y posteriormente, estas funciones son utilizadas para interpolar en el espacio el valor de la variable en sitios no muestreados (Gallardo, 2006). El primer paso fue realizar el semivariograma experimental, que es la función básica que describe y cuantifica la dependencia espacial de una variable, es decir, su autocorrelación espacial. El mismo está definido por la siguiente ecuación:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad \text{[Ec 5]}$$

Dónde:

$\gamma(h)$ = Valor del semivariograma en función de la separación entre dos puntos

$Z(x_i)$ = Valor de la variable de interés en el punto x_i

$Z(x_i + h)$ = Valor de la variable de interés en el punto $x_i + h$

A continuación, se procedió al ajuste de un modelo teórico para describir esa variabilidad. La selección del modelo se realizó haciendo coincidir la curva del semivariograma experimental con la curva de la función matemática buscando obtener el menor cuadrado medio del error. Finalmente se realizó la predicción de la variable de interés en puntos dentro del área de estudio donde no se han tomado muestras mediante el método de interpolación kriging ordinario. Para la realización de cada uno de los pasos anteriormente mencionados se utilizó el software ArcGIS 10.2 [Environmental System Research Institute (ESRI), Redlands, CA, 2014].

A partir de los mapas de BA se delimitaron las ZP de cada estación de crecimiento y tratamiento de fertilización. Para ello, se usó el software Management Zone Analyst (MZA, Mizzou-ARS, 2000). Este programa realizó la división de ambientes mediante un análisis cluster multivariado (Fridgen *et al.*, 2004). El MZA estimó dos parámetros: el Índice de rendimiento difuso (FPI) y la clasificación entrópica normalizada (NCE) (Fridgen *et al.*, 2004). El número óptimo de ambientes se determinó cuando, ambos parámetros fueron mínimos, lo que representa menor grado de solapamiento y mayor cantidad de organización. La configuración del MZA fue la siguiente: el exponente difuso se fijó en el valor convencional de 1,30 (Tagarakis *et al.*, 2013), el número máximo de iteraciones fue 300, el criterio de convergencia fue 0.0001 y el número máximo de zonas a dividir los lotes fue 3 (Córdoba *et al.*, 2013). Por último, el archivo de salida del MZA se importó a ArcGIS 10.2 (ESRI, Redlands, CA, 2014) para realizar los mapas dividiéndolos en la cantidad de ZP determinadas mediante el análisis de clúster multivariado. Los valores y amplitud de las ZP fueron obtenidos mediante la clasificación de los datos en cuantiles (Peralta *et al.*, 2013a).

2.2.6. Índice verde normalizado

Para relacionar la BA con el IVN durante los rebrotes mencionados en la Tabla 2 fueron utilizadas imágenes obtenidas por los satélites Landsat 8 y Sentinel 2. Estos satélites proporcionan imágenes de moderada resolución (30 y 10 m respectivamente) de ocho bandas multispectrales. Las imágenes fueron descargadas del sitio web <http://glovis.usgs.gov/>, corregidas atmosféricamente y cortadas por los perímetros de

los sitios experimentales utilizando el software ArcGIS 10.2 (ESRI, Redlands, CA, 2014). Finalmente, el IVN fue calculado según Rouse *et al.* (1974):

$$IVN = \frac{(IR - R)}{(IR + R)} \text{ [Ec 6]}$$

Dónde:

IVN = Índice verde normalizado

IR = Banda infrarroja cercana

R = Banda roja

Para describir la variabilidad espacial de del IVN se siguieron los mismos pasos mencionados anteriormente para determinar la variabilidad espacial de la BA.

2.2.7. Análisis estadístico

Para una primera valoración de la variabilidad de la BA se usó el método propuesto por Cox y Gerard (2007). A partir de la media interanual de las BAs estandariza y el CVT se clasificó a las AM en inestables ($CVT \geq 0.3$) o estables ($CVT < 0.3$). Para analizar la variabilidad espacio-temporal de la BAs se dividieron las mismas en función de la media interanual. Se utilizaron tres categorías de BA estandarizada: alta ($\geq 1,2$), media (entre 0,8 y 1,2) y baja ($\leq 0,8$).

Para evaluar si las ZP delimitadas expresan diferente comportamiento según la estación de crecimiento, se compararon los promedios de la BA estandarizada en las diferentes ZP utilizando un ANVA de modelo mixto (PROC MIXED, SAS Institute, 2007), donde las ZP, los rebrotes y la interacción ZP*rebrote fueron efectos fijos y las unidades experimentales observaciones repetidas.

Las relaciones entre IVN y BA fueron evaluadas mediante modelos lineales estimados mediante el procedimiento REG (PROC REG, SAS Institute, 2007). Para ajustar estas regresiones se calculó el promedio de IVN alrededor de cada AM (15 m) usando la herramienta Buffer 3D Analyst Tools de ArcGIS 10.2. (ESRI, Redlands, CA, 2014).

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Caracterización climática y meteorológica y balances hídricos

En los dos sitios experimentales la temperatura media del aire durante los rebrotes evaluados fue superior a la temperatura base de crecimiento e inferior a la temperatura óptima de crecimiento (Anexo; Figura I).

En el sitio experimental Balcarce, la ETP fue superior a los valores promedios históricos (periodo 1990-17) en los rebrotes PRIM14 y OTO15 (Figuras 7a y 8a). En cambio, en PRIM15 y OTO16, la ETP registrada durante los periodos experimentales fue similar a la media histórica (Figuras 7b y 8b). En el rebrote PRIM14 la oferta de agua por precipitaciones, previa a la instalación del ensayo (149 mm) y durante el mismo (84 mm), fue similar a la media histórica (Figura 7a). En el mismo sentido, en PRIM15 las precipitaciones durante el experimento fueron similares al promedio del periodo 1990-17 (108 vs 128 mm respectivamente (Figura 7b). Por el contrario, las lluvias registradas en el mes de agosto (previo al inicio del experimento) fueron elevadas (175 mm, datos no mostrados) respecto a lo que habitualmente ocurre en este mes en la localidad de Balcarce.

En PRIM14 los datos de la ETP fueron marcadamente superiores a las precipitaciones (Figura 7a), lo cual es normal en primavera avanzada (noviembre-diciembre) en el Sudeste Bonaerense. Este comportamiento sumado a la escasa capacidad de almacenaje de este suelo determinaron que la humedad edáfica se mantuviera, casi todo el periodo experimental, por debajo del 50% del agua disponible (Figura 9a) lo que provocó, en este rebrote, un déficit de 61 mm de agua. El rebrote PRIM15 fue realizado a mediados de la primavera. Esto determinó que el agua disponible se mantuviera a veces por encima del 50% del agua útil y en otras ocasiones por debajo de la misma (Figura 9b), determinándose así, un déficit marcadamente inferior al registrado en PRIM14.

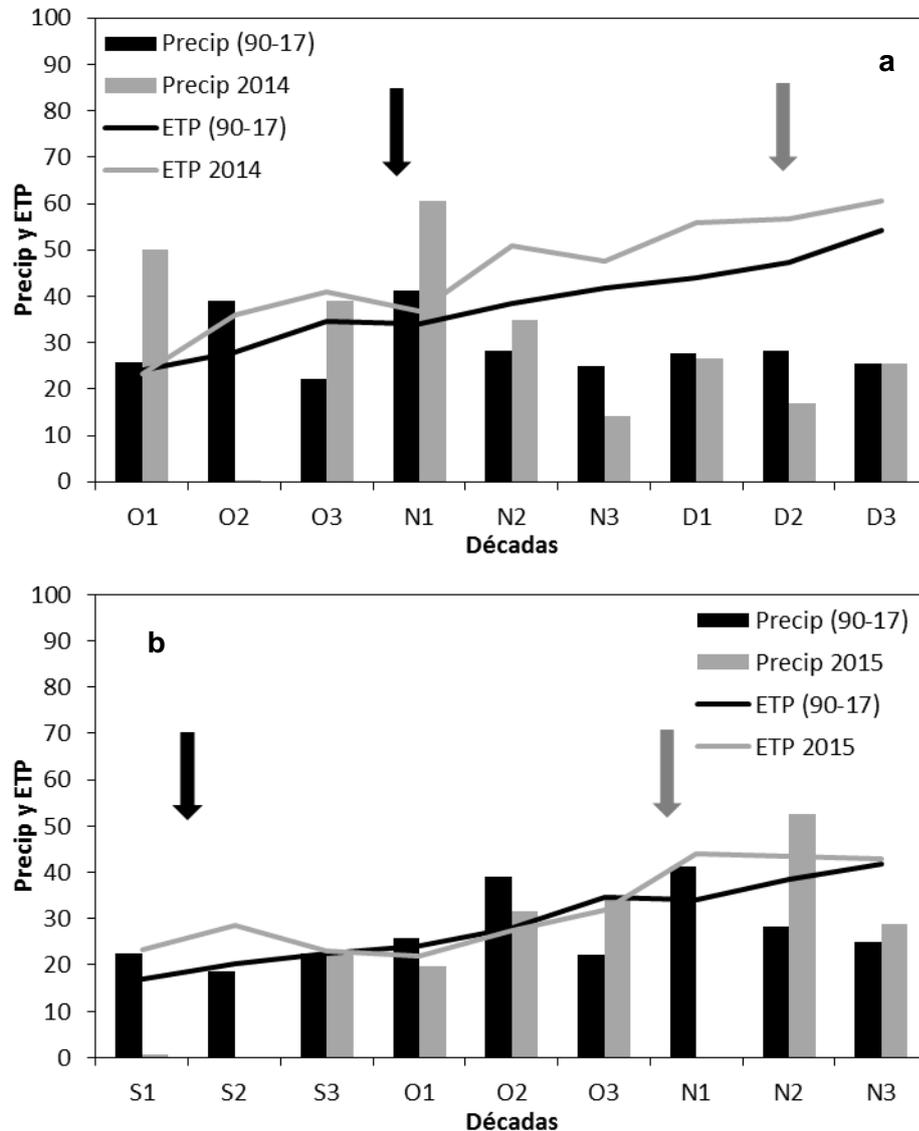


Figura 7. Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Balcarce durante dos rebrotes primaverales: (a) PRIM14 y (b) PRIM15. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. S = Septiembre, O = Octubre, N = Noviembre, D = Diciembre; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.

En los rebrotes otoñales, las precipitaciones registradas previas a los periodos experimentales fueron inferiores a los datos promedio del periodo 1990-17 (18 vs 122 mm respectivamente en OTO15 y 52 vs 93 mm respectivamente en OTO16) mientras que durante los periodos experimentales, fueron similares (101 mm vs 97 mm respectivamente en OTO15 y 108 vs 128 mm respectivamente en OTO16) (Figura 8a, 8b). En estos rebrotes, dada la baja ETP en esta época del año, se determinó que la humedad del suelo se mantuvo por encima del 50 % del agua disponible

registrándose un déficit de solo 9 y 10 mm en OTO15 y OTO16 respectivamente (Figura 10a y 10b).

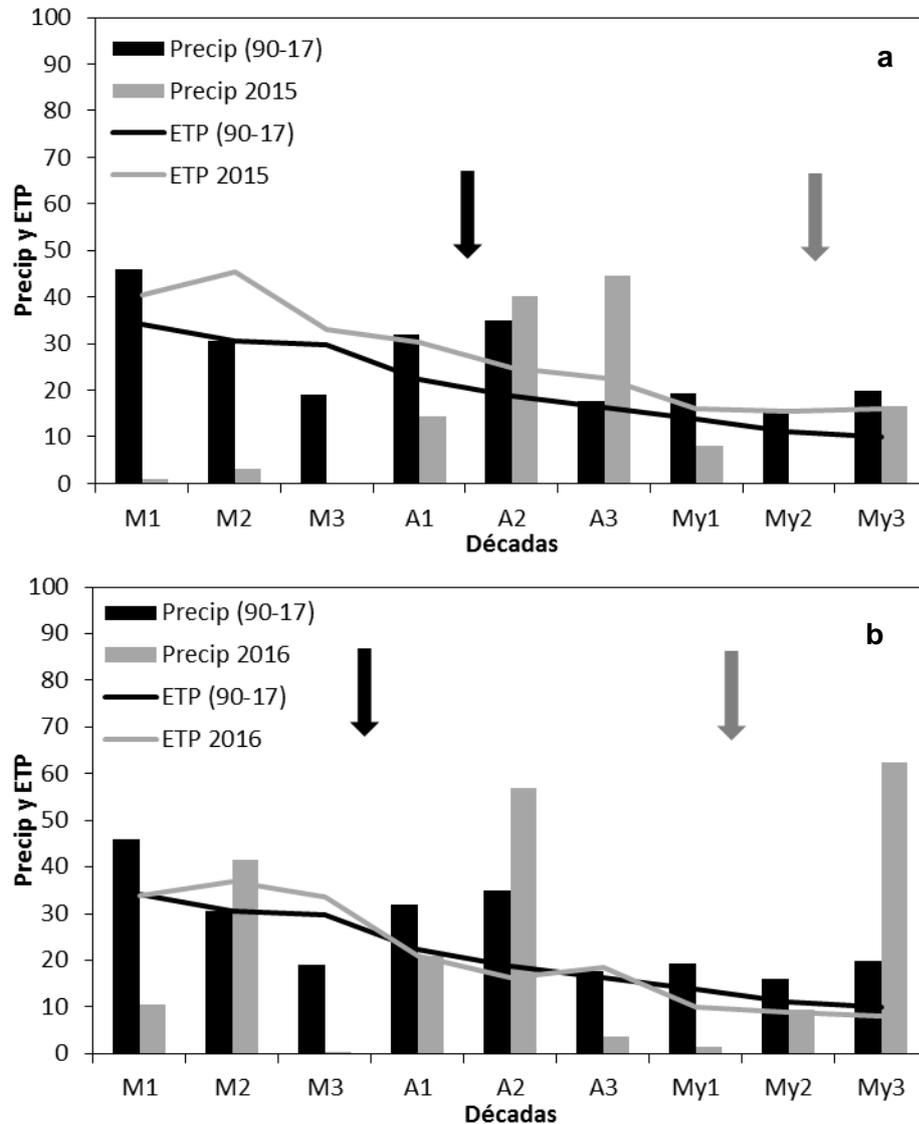


Figura 8. Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Balcarce durante dos rebrotes otoñales: (a) OTO15 y (b) OTO16. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. M = Marzo, A = Abril, My = Mayo; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.

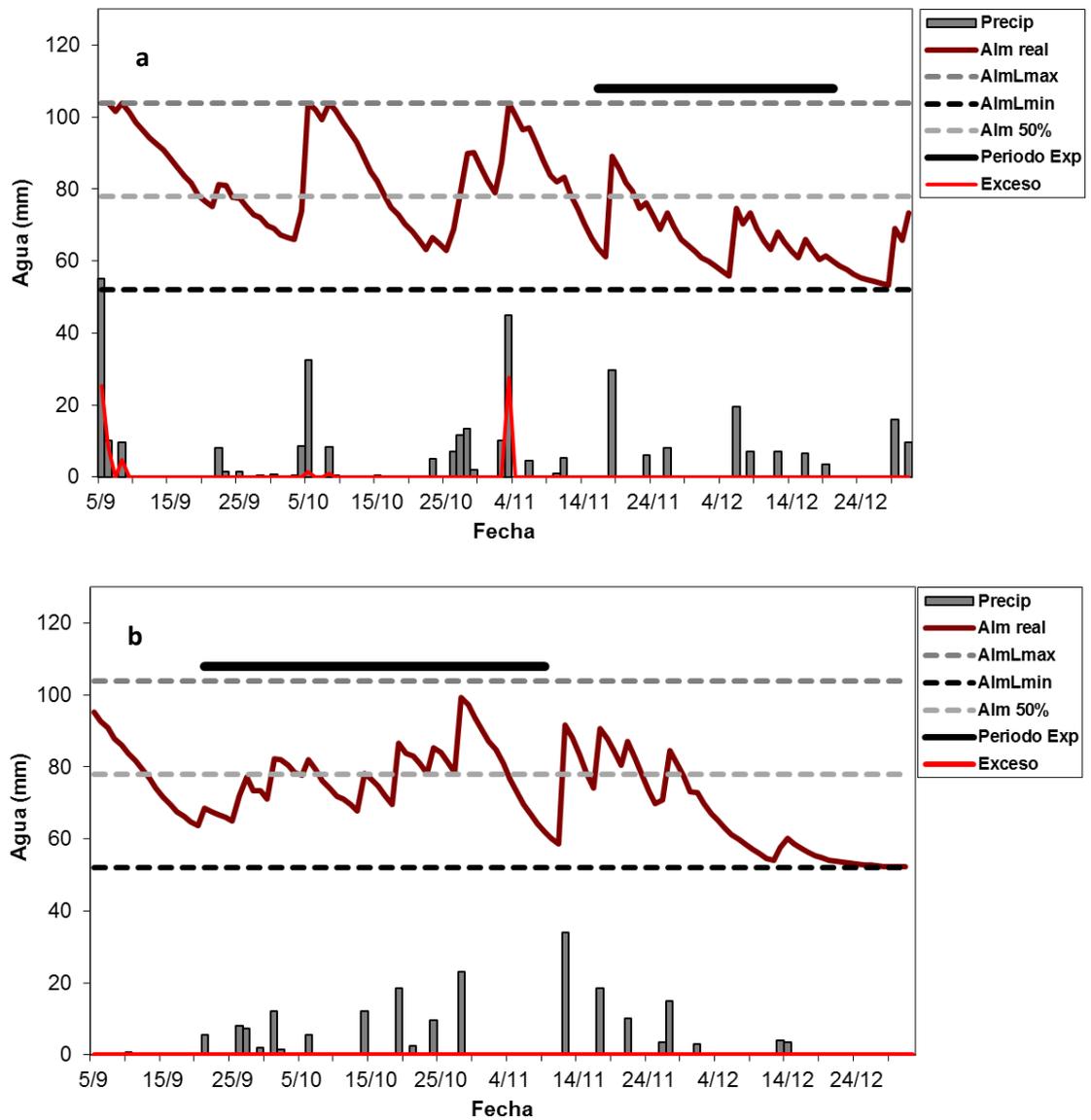


Figura 9. Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Balcarce durante los rebrotes (a) PRIM14 y (b) PRIM15. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.

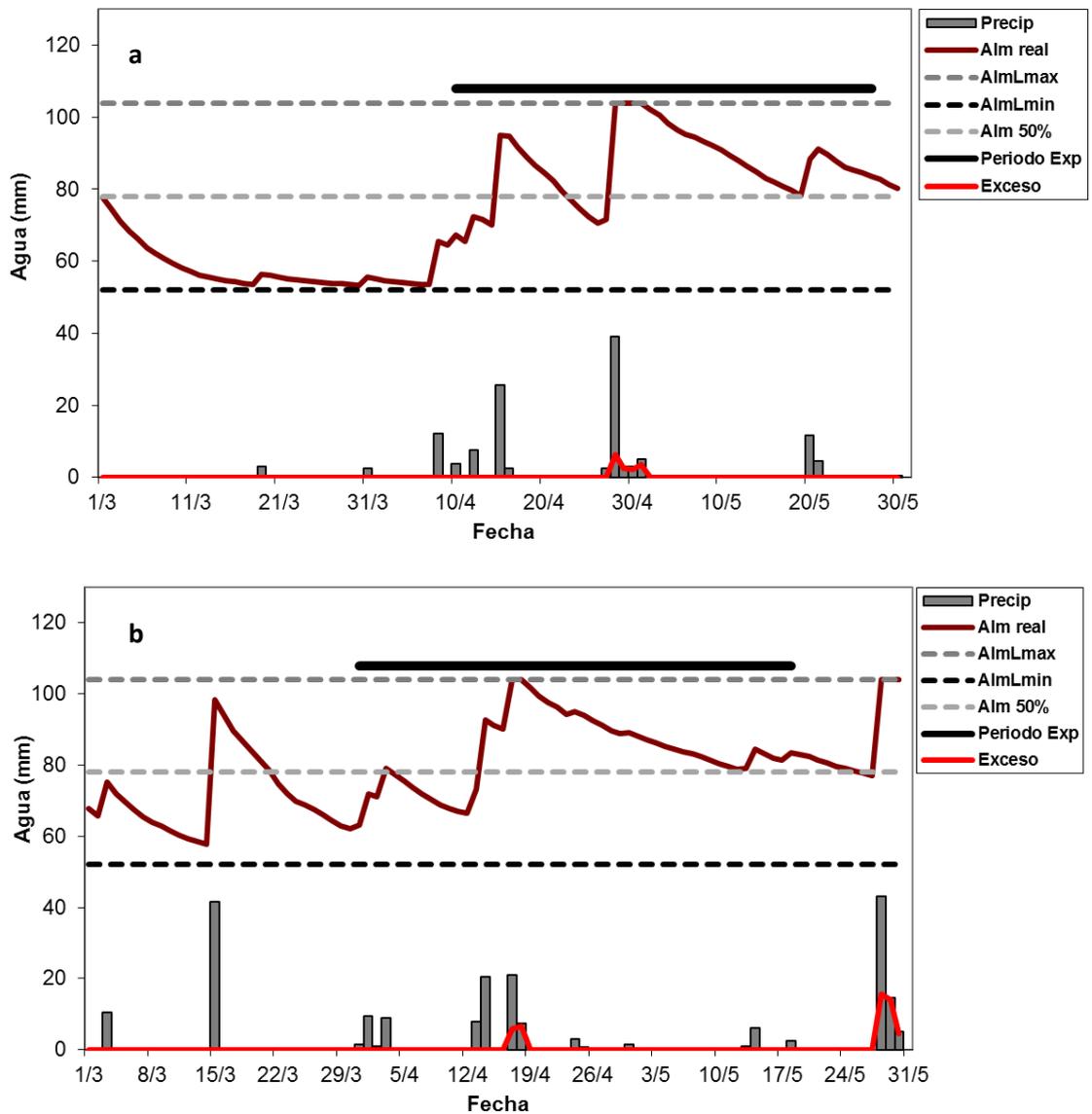


Figura 10. Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Balcarce durante los rebrotes (a) OTO15 y (b) OTO16. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.

La oferta hídrica registrada en Ayacucho, antes y durante los experimentos PRIM15 y PRIM16, fue inferior a la media histórica (1990-2017) (Figura 11a y 11b). En cambio, cuando se comparan dichas precipitaciones con los datos de la ETP de cada rebrote no se registraron diferencias (Figura 11a y 11b). Sin embargo, el balance hídrico de estos rebrotes arrojó algunas deficiencias hídricas en PRIM15 y PRIM16 ya que el almacenamiento real se mantuvo la mayor parte del tiempo (en ambos rebrotes) por debajo del 50% del agua disponible (Figura 12).

En este sitio experimental, las precipitaciones registradas en otoño fueron variables respecto a los datos promedio del periodo 1990-17(Figura 13). Previa a la instalación de los ensayos las mismas fueron inferiores a la media histórica en OTO16 (74 vs 95 mm) y marcadamente superiores en OTO17 (135 vs 87 mm). En cambio, para los periodos experimentales, fueron similares en OTO16 (128 mm vs 120 mm) e inferiores en OTO17 (50 vs 88 mm) (Figura 13a y 13b). Este comportamiento provocó un adecuado suministro de agua para el crecimiento de las pasturas durante gran parte del rebrote OTO16 (Figura 14a) y durante todo el rebrote OTO17 (Figura 14b).

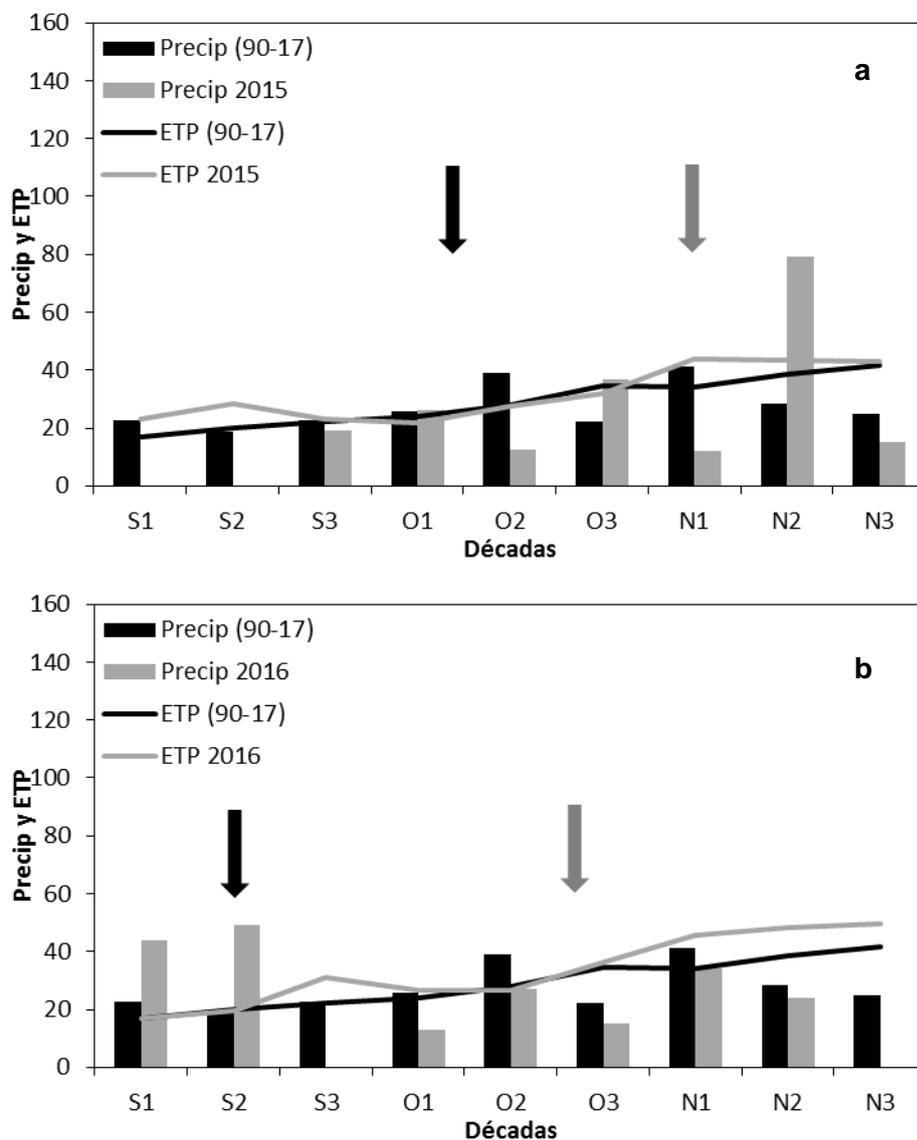


Figura 11. Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Ayacucho durante dos rebrotos primaverales: (a) PRIM15 y (b) PRIM16. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce y Centro de Capacitación Integral del INTA Cuenca del Salado. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. S = Septiembre, O = Octubre, N = Noviembre, D = Diciembre; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.

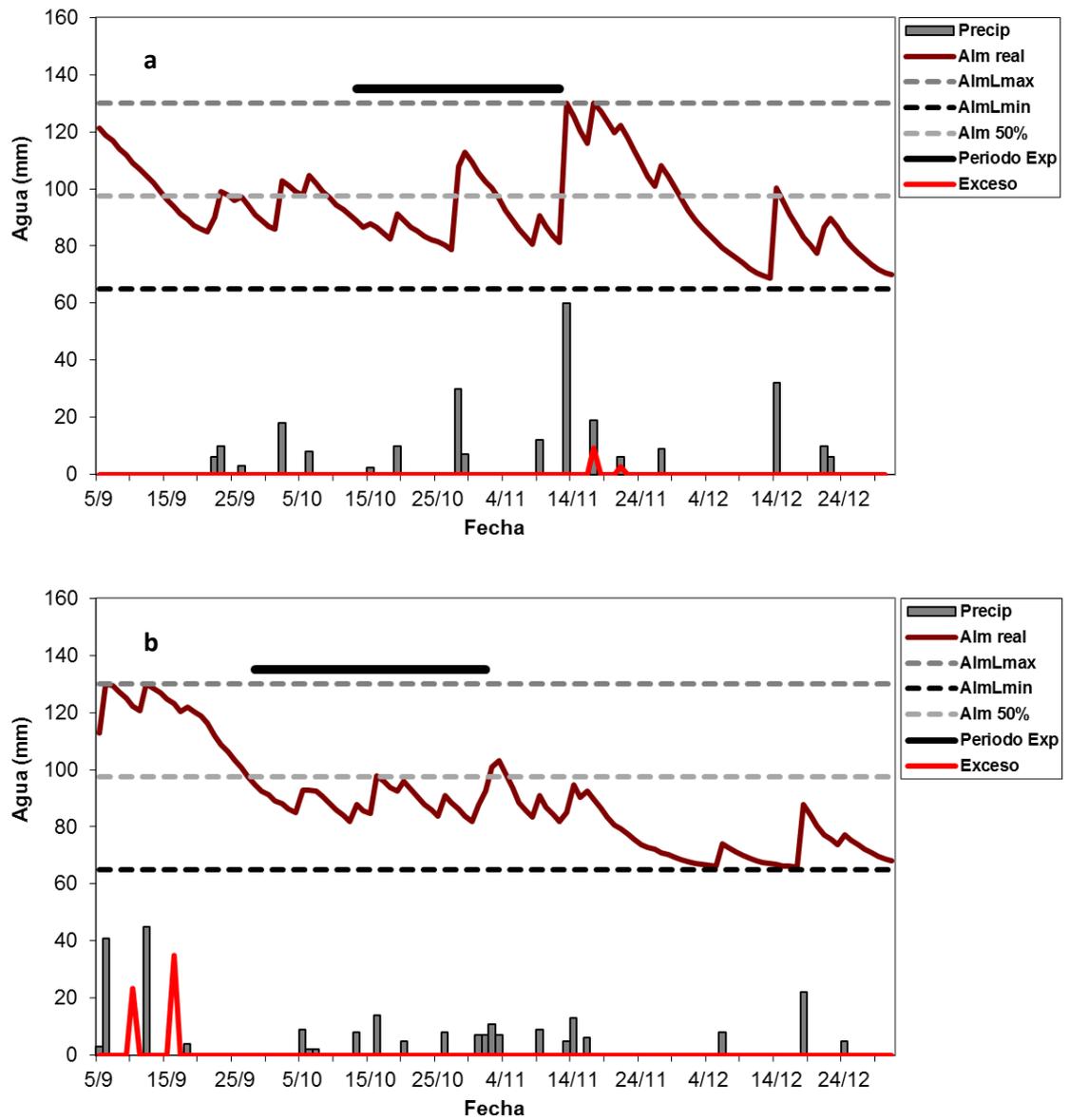


Figura 12. Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Ayacucho durante los rebrotes (a) PRIM15 y (b) PRIM 2016. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (—) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.

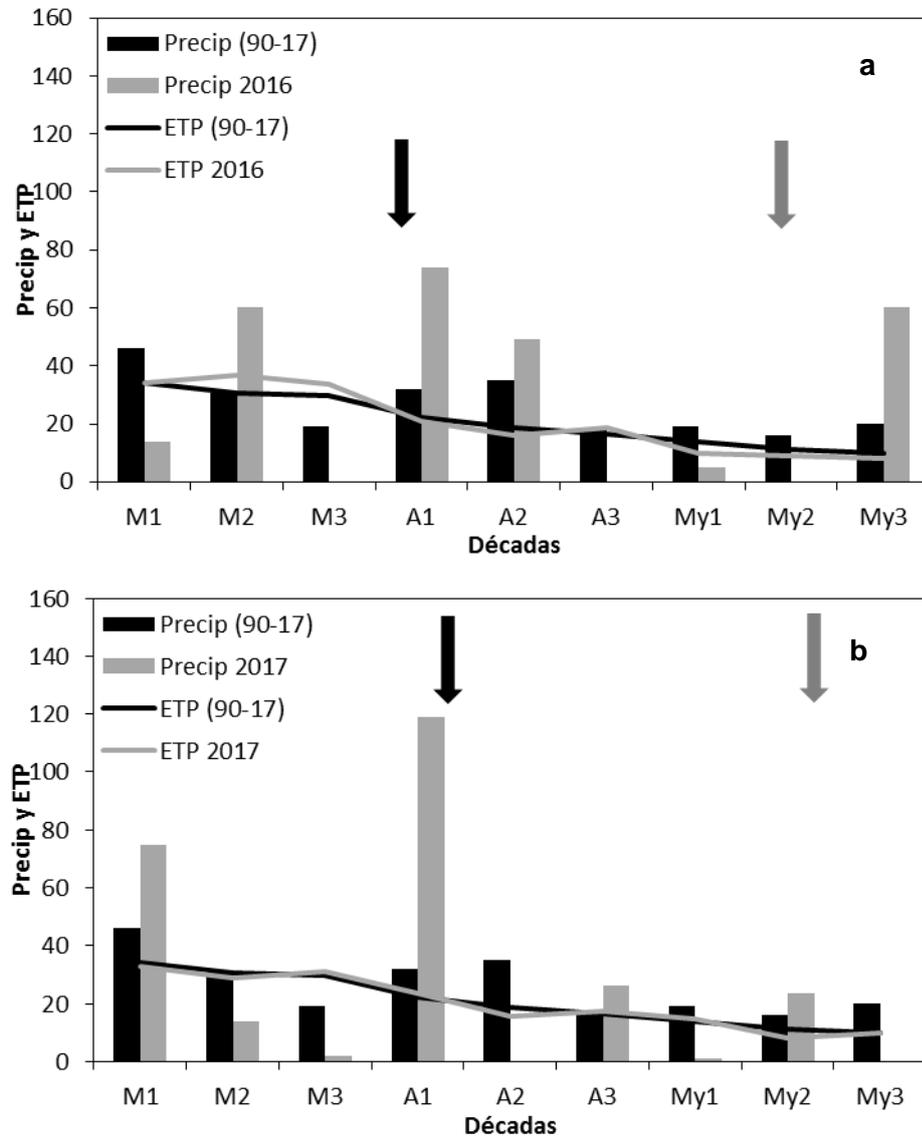


Figura 13. Precipitaciones (Precip), evapotranspiración potencial (ETP) y medias históricas (periodo 1990-17) en Ayacucho durante dos rebrotes otoñales: (a) OTO16 y (b) OTO17. Fuente: Estación Meteorológica INTA Balcarce y Centro de Capacitación Integral del INTA Cuenca del Salado. Las fechas negras y las flechas grises indican el momento de inicio y fin de los experimentos respectivamente. M = Marzo, A = Abril, My = Mayo; 1 = día 1 al 10 de cada mes, 2 = día 11 al 20 de cada mes, 3 = 21 al 30 ó 31 de cada mes.

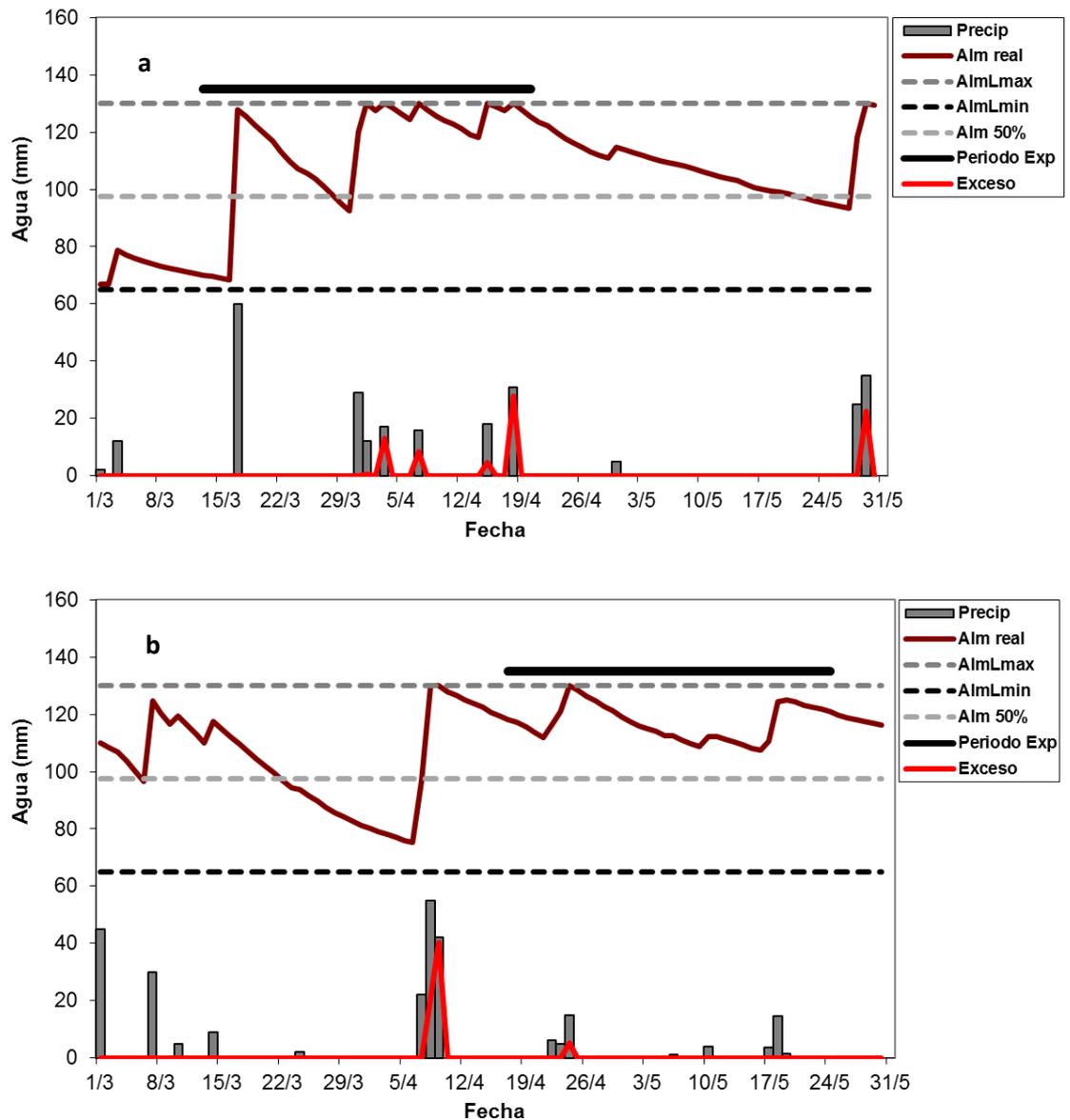


Figura 14. Balance de agua en una pastura cultivada creciendo en el sitio experimental Ayacucho durante los rebrotes (a) OTO16 y (b) OTO17. (—) Almacenaje real (Alm real) o variación de agua en el suelo, (▼) excesos hídricos, (■) precipitaciones (Precip), capacidad de almacenaje de agua del suelo (---) máxima (AlmLmax), (---) mínima (AlmLmin) y (---) del 50% (Alm 50%). Las barras negras horizontales indican la duración de los periodos experimentales.

2.3.2. Análisis descriptivo de la biomasa acumulada

En el sitio Ayacucho, en el tratamiento N0, la BA fue en promedio 822, 947, 1001 y 920 kg ha⁻¹ en los rebrotes PRIM15, PRIM16, OTO16 y OTO17, respectivamente (Tabla 3). En cambio, en el tratamiento N250 la BA fue superior (1709, 2058, 1758 y 1686 kg ha⁻¹ en los rebrotes PRIM15, PRIM16, OTO16 y OTO17, respectivamente)(Tabla 3). La menor acumulación de forraje observada en el tratamiento N0, respecto al tratamiento fertilizado, se debe a que la disponibilidad de formas asimilables de N edáfico habría sido limitante para el crecimiento de la especies forrajeras utilizadas en estos experimentos, lo cual es consistente con la dinámica natural de mineralización de este nutriente en suelos de la región pampeana (Echeverría y Bergonzi, 1995).

El criterio sugerido por Wilding *et al.* (1994) fue utilizado para caracterizar la magnitud de la variabilidad de la BA, con CV de 0 a 15, 15 a 30 y 35 a 100% la variabilidad es baja media y alta respectivamente. En este sitio experimental el CV varió entre 45 y 32 % en el tratamiento N0 y entre 20 y 38% en el tratamiento sin limitantes de N (Tabla 3). Por lo tanto, la variabilidad de la BA en Ayacucho fue alta en la mayoría de los rebrotes y tratamientos evaluados, lo que es un indicador de que el manejo uniforme puede ser ineficiente (Moral *et al.*, 2010).

Según Kravchenko y Bullock, (2000), uno de los factores que afectan el CV de los rendimientos dentro del lote son las precipitaciones. Estos autores señalan que a medida que los precipitaciones se incrementan la variabilidad intralote disminuye (Marques da Silva *et al.*, 2008). En Ayacucho, en los rebrotes otoñales, el CV fue mayor en el tratamiento N0 respecto al tratamiento N250 (Tabla 3). Esto podría deberse a que, en el tratamiento N0, habría habido variabilidad intralote de la disponibilidad de N, producto de no haber aplicado este nutriente, la cual puede haber influido en la variabilidad de la producción de pasto ya que no se produjeron déficits hídricos (Figura 14a y 14b). En cambio, en N250, la oferta de N y el balance hídrico no influyeron en la variabilidad espacial ya que la dosis aplicada de este nutriente fue elevada y como se mencionó anteriormente la oferta de agua fue adecuada. En los rebrotes primaverales, donde hubo moderados déficits hídricos (Figura 12a y 12b), la disponibilidad deficitaria de N podría provocar que ambientes con diferente potencial, manifiesten una respuesta menos contrastante. En consecuencia la diferencia de CV entre los tratamientos de fertilización se redujo (Tabla 3).

Tabla 3. Promedio (Prom), duración del rebrote, valor mínimo (Min) valor máximo (Max), desvío estándar y coeficiente de variación (CV) de la biomasa aérea acumulada (BA) en los sitios experimentales Ayacucho y Balcarce durante cuatro rebrotes y para dos tratamientos de fertilización nitrogenada (N0 y N250).

Sitio	Rebrote	N	Duración rebrote**	Prom	Min	Max	Desvío estándar	CV
			°Cd	-----kg ha ⁻¹ -----			%	
Ayacucho	PRIM15	N0	295	822	365	2000	326	39
		N250		1709	900	2780	653	34
	OTO16	N0	303	1001	360	2750	456	40
		N250		1758	950	2900	433	24
	PRIM16	N0	330	947	300	1890	408	43
		N250		2058	800	4100	794	38
	OTO17	N0	322	920	315	1570	290	32
		N250		1686	900	2780	349	20
Balcarce	PRIM14	N0*	516	---	---	---	---	---
		N250		3629	790	5080	1604	44
	OTO15	N0	552	1458	690	2430	441	30
		N250		2399	980	3960	628	26
	PRIM15	N0	385	1798	690	2870	492	27
		N250		3758	1760	5000	787	21
	OTO16	N0	447	1165	550	1750	303	26
		N250		2023	1110	3000	433	21

*Sin datos

**Temperatura base de crecimiento: 5°C (Peacock, 1976; Hutchinson *et al.*, 2000; Borrajo y Alonso, 2014).

En el sitio Balcarce la acumulación de forraje promedio de los rebrotes primaverales, en el tratamiento N250, fue 3693 kg ha⁻¹. En cambio, el promedio otoñal, en este tratamiento de fertilización, fue inferior (2221 kg ha⁻¹) (Tabla 3). Esta diferencia se debe a que los requerimientos varían en función de las condiciones ambientales imperantes. En otoño, el efecto de la fertilización nitrogenada es, generalmente, de menor magnitud, debido a que, comparada con la primavera, la temperatura del aire y la radiación fotosintéticamente incidente son menores. Por ejemplo, en nuestra región, la aplicación de N al inicio de la primavera permite obtener respuestas que varían entre 10 y 30 kg MS por kg de N aplicado (Agnusdei *et al.*, 2010). En cambio, en otoño, el efecto de la fertilización es de menor magnitud, registrándose respuestas de 7 a 12 kg MS por kg de N aplicado (Barbieri *et al.*, 2006; Fernández Grecco, 2013)

En cambio, en el tratamiento N0 la variabilidad de la BA entre estaciones de crecimiento, fue menor respecto al tratamiento sin limitantes de N (1458, 1798 y 1165 kg ha⁻¹ en los rebrotes OTO15, PRIM16 y OTO16 respectivamente)(Tabla 3). En este sitio experimental la variabilidad fue media (Wilding *et al.*, 1994), ya que los CV fueron

inferiores a los determinados en Ayacucho, excepto en el tratamiento N250 de PRIM14 (Tabla 3). Sin embargo, las diferencias entre sitios no son sustancialmente importantes. Los valores promedios de CV en Balcarce y Ayacucho fueron 28 y 33% respectivamente.

2.3.3. Variabilidad espacial y temporal de la biomasa acumulada

Los datos de BA fueron estandarizados para disminuir el efecto de las condiciones climáticas de cada estación de crecimiento (Kravchenko y Bullock, 2000) y así, poder comparar las BA. El análisis de la variabilidad espacial es un requisito importante para decidir cambiar de un manejo uniforme a un manejo por ambientes (Blackmore, 2000; Whelan y McBratney, 2000). En el mismo sentido, el análisis de la variabilidad temporal también es importante porque si los patrones espaciales varían significativamente con el tiempo, el manejo sitio específico puede no ser factible (Xu *et al.*, 2006).

En Ayacucho, en el tratamiento N250, la variabilidad de la BA estandarizada es visualmente similar entre los cuatro rebrotes evaluados (Figura 15). Este patrón de variación no es tan claro, visualmente, en el tratamiento N0 (Figura 16) La identificación de patrones espaciales consistentes entre años indicaría el efecto de factores temporalmente estables y espacialmente estructurados que permitirían el manejo diferenciado (Lark y Stafford, 1997).

La variación estacional promedio en el tratamiento sin limitantes de N fue 22 %. La distribución espacial de la variación estacional de la BA muestra que la mayor parte del área de estudio tiene un CVT menor a 0,3 (Figura 17a) por lo que podría considerarse como estable (Blackmore, 2000). En cambio, en el tratamiento sin N, la variación estacional promedio fue algo superior (30%) respecto a la establecida en el tratamiento N250. Por esto, un área mayor, respecto al tratamiento N250, mostró un CVT mayor a 0,3 (Figura 17b).

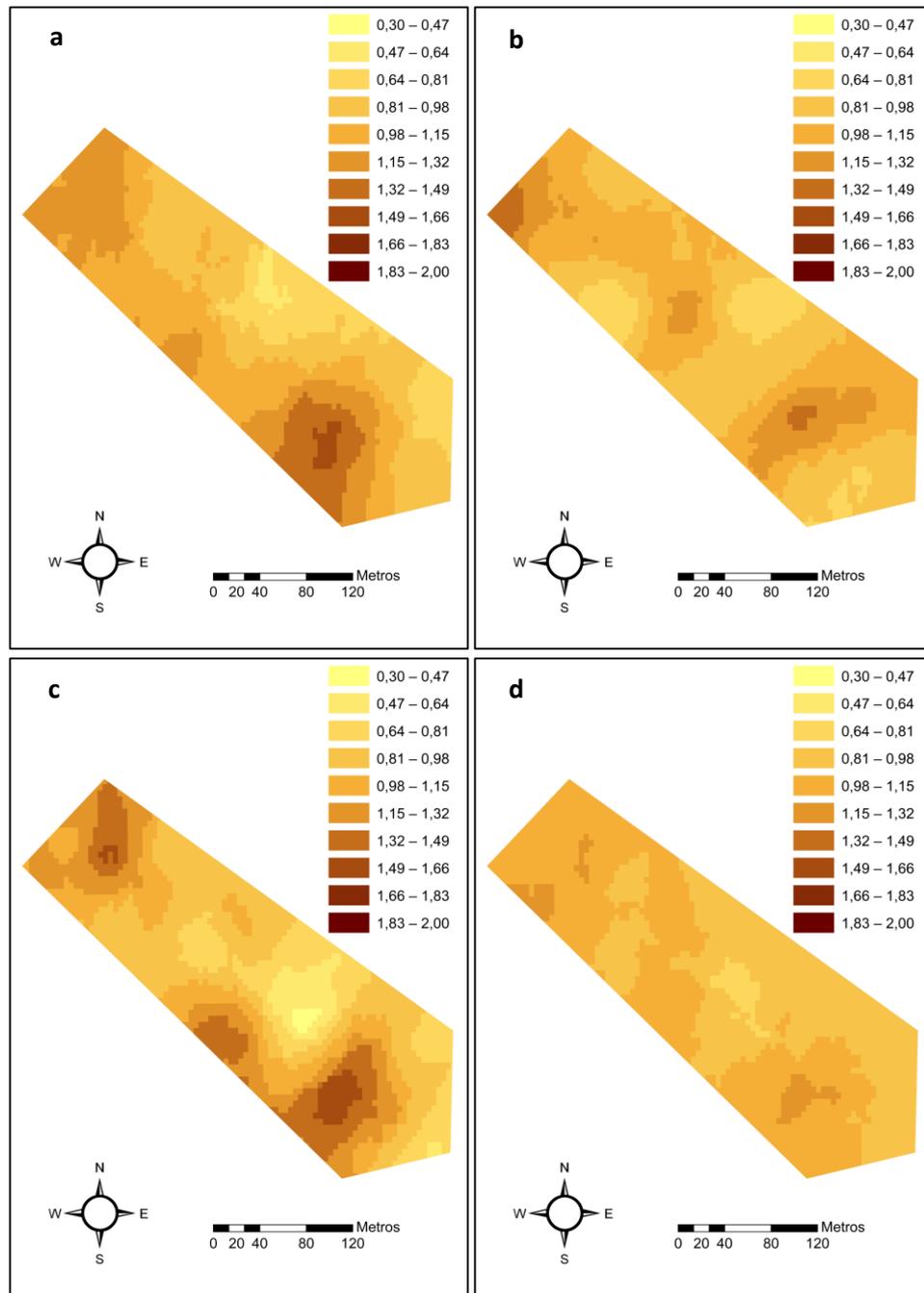


Figura 15. Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada, en el sitio experimental Ayacucho y en el tratamiento N250 para los rebrotes (a) PRIM15, (b) OTO16, (c) PRIM16 y (d) OTO17.

Como fue mencionado anteriormente, la mayoría de las unidades experimentales, en el tratamiento N250, fueron clasificadas como estables (Figura 17a). En la BA de estas unidades experimentales estables, las asociaciones entre los rebrotes evaluados fueron directas, lineales y significativas ($R^2 = 0.36$ a 0.50)(datos no mostrados). Por ello, la variabilidad de la BA es visualmente similar entre rebrotes (Figura 15). En cambio, en el tratamiento N0 se determinó una mayor cantidad de unidades

experimentales con elevada variación estacional (inestables) (Figura 17b). Por ello, las asociaciones entre estaciones de crecimiento, aunque significativas, mostraron un grado de ajuste menor ($R^2 = 0,20$ a $0,34$) (datos no mostrados). Esto podría deberse a que, el tratamiento sin limitantes de N y P, permite que los “ambientes” dentro del sitio experimental expresen su potencial productivo en seco, independientemente de la estación de crecimiento evaluada. En cambio, en el tratamiento N0, debido a la diferente disponibilidad de N, la productividad en un ambiente dado se modificó, entre estaciones, en mayor medida respecto a lo ocurrido en el tratamiento N250.

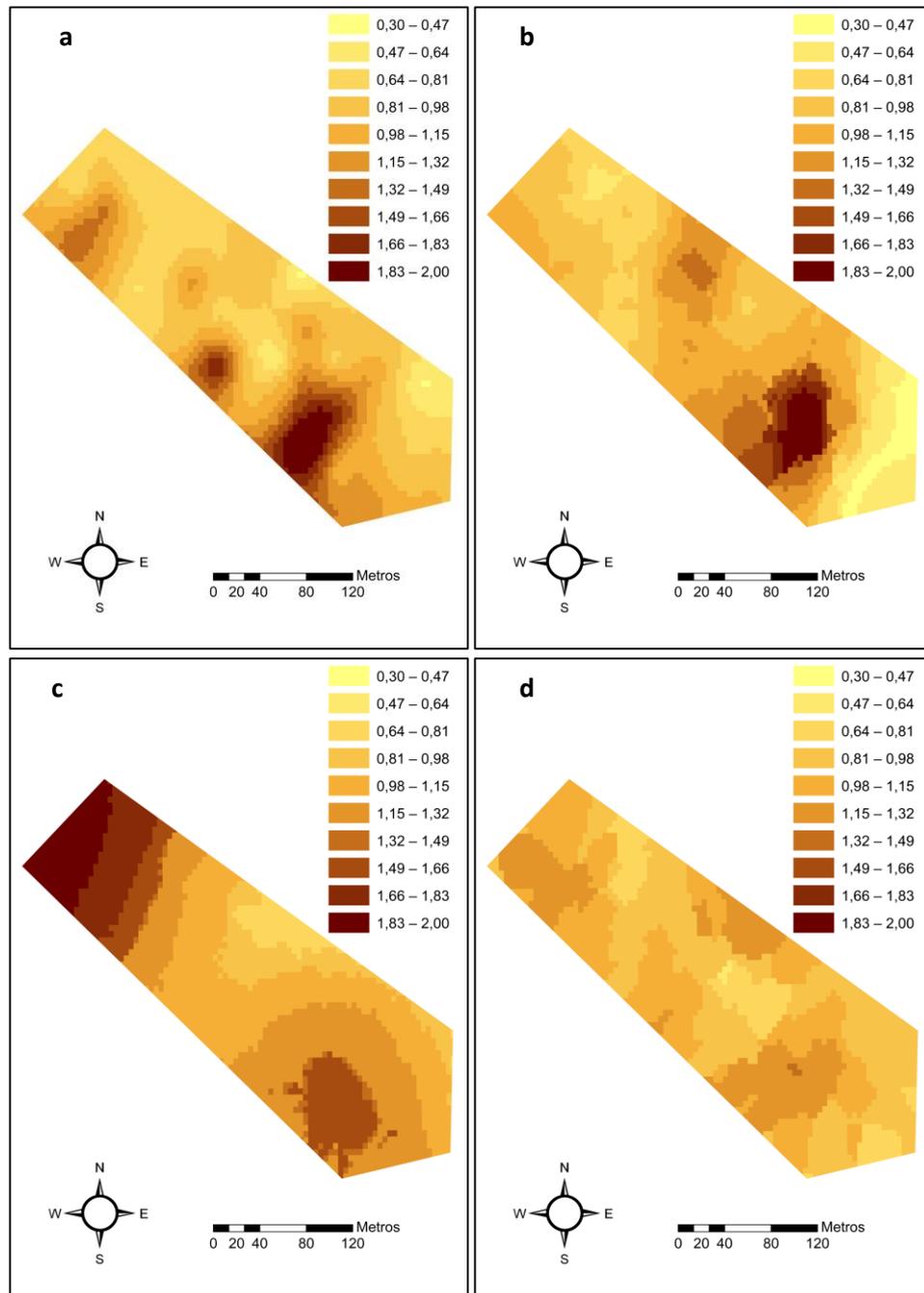


Figura 16. Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Ayacucho, en el tratamiento N0 para los rebotes (a) PRIM15, (b) OTO16, (c) PRIM16 y (d) OTO17.

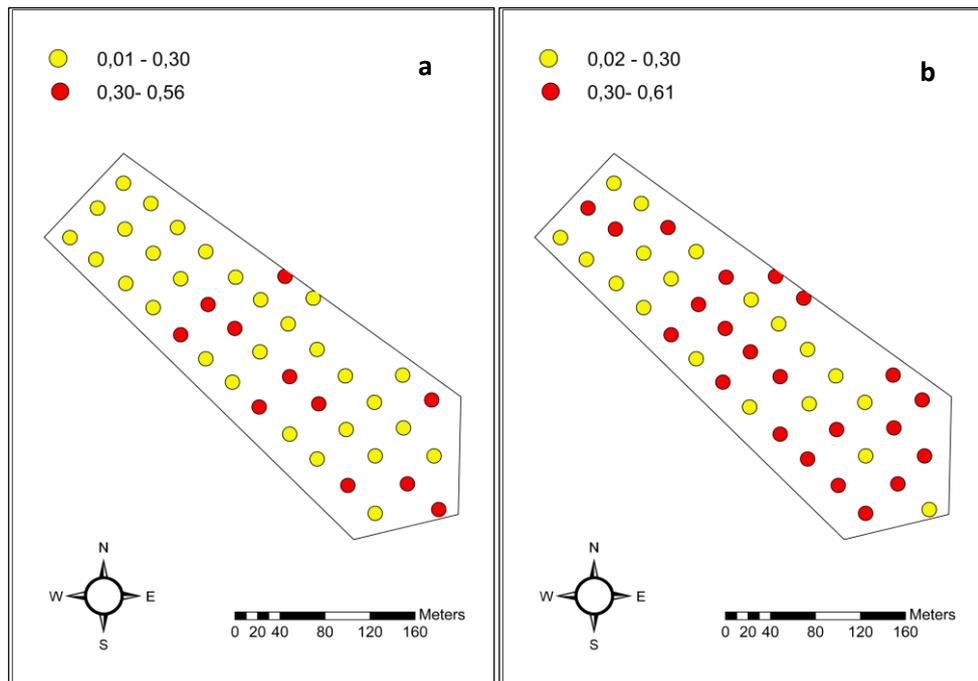


Figura 17. Coeficiente de variación temporal (CVT) de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Ayacucho, en (a) el tratamiento N250 y (b) el tratamiento N0. ● CVT \leq 0,3 (estable) ● CVT $>$ 0,3 (inestable).

En el sitio experimental Balcarce, se puede observar una baja variabilidad espacial de la BA estandarizada para cada rebrote (Figuras 18 y 19), comparada con la observada en el sitio Ayacucho (Figuras 15 y 16). Esto podría deberse a que el sitio Balcarce está compuesto por una sola unidad cartográfica mientras que el sitio Ayacucho está conformado por dos unidades cartográficas (Tabla 1). Por otra parte, en los dos tratamientos de fertilización, la variabilidad de la BA estandarizada no fue visualmente similar entre los rebrotes evaluados (Figuras 18 y 19). En el mismo sentido, independientemente del tratamiento de fertilización, no se detectaron asociaciones significativas entre los rebrotes evaluados (datos no mostrados). La baja correlación entre rebrotes, que determina inconsistencia de los patrones espaciales de productividad, podría limitar la predicción de BA en este sitio experimental.

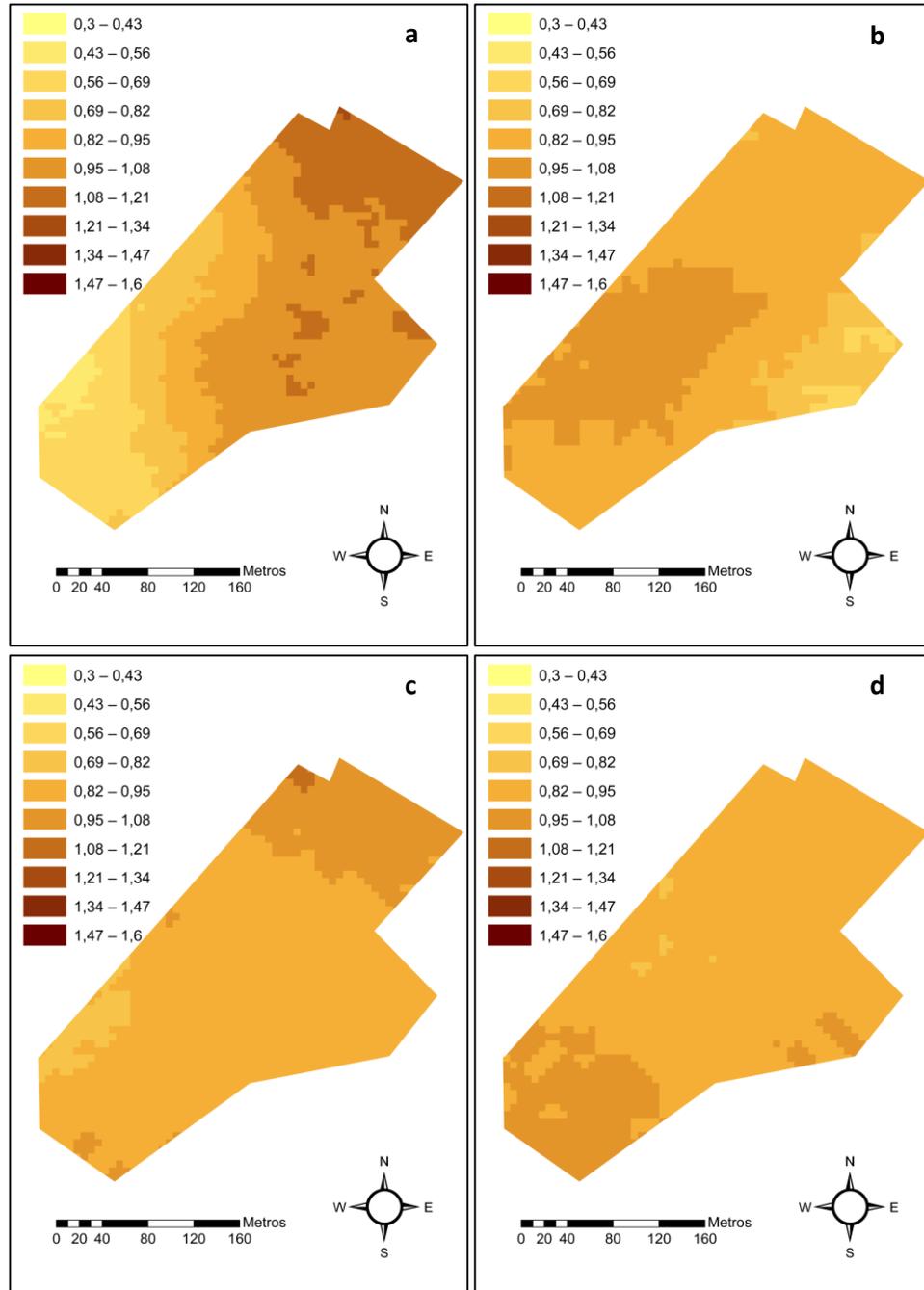


Figura 18. Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Balcarce, en el tratamiento N250, para los rebrotes (a) PRIM14, (b) OTO15, (c) PRIM15 y (d) OTO16.

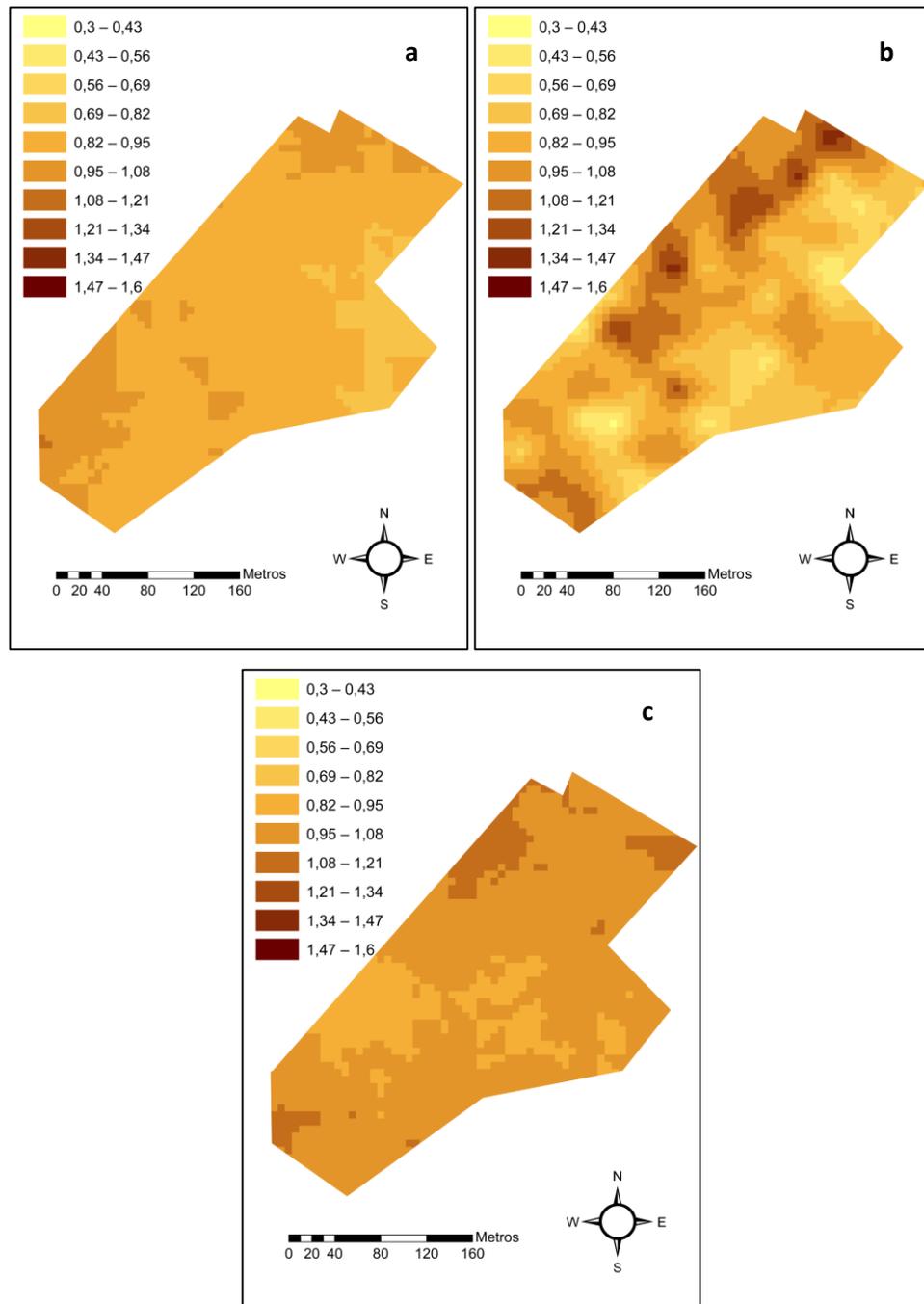


Figura 19. Distribución espacial de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Balcarce, en el tratamiento N0, para los rebotes (a) OTO15, (b) PRIM15 y (c) OTO16.

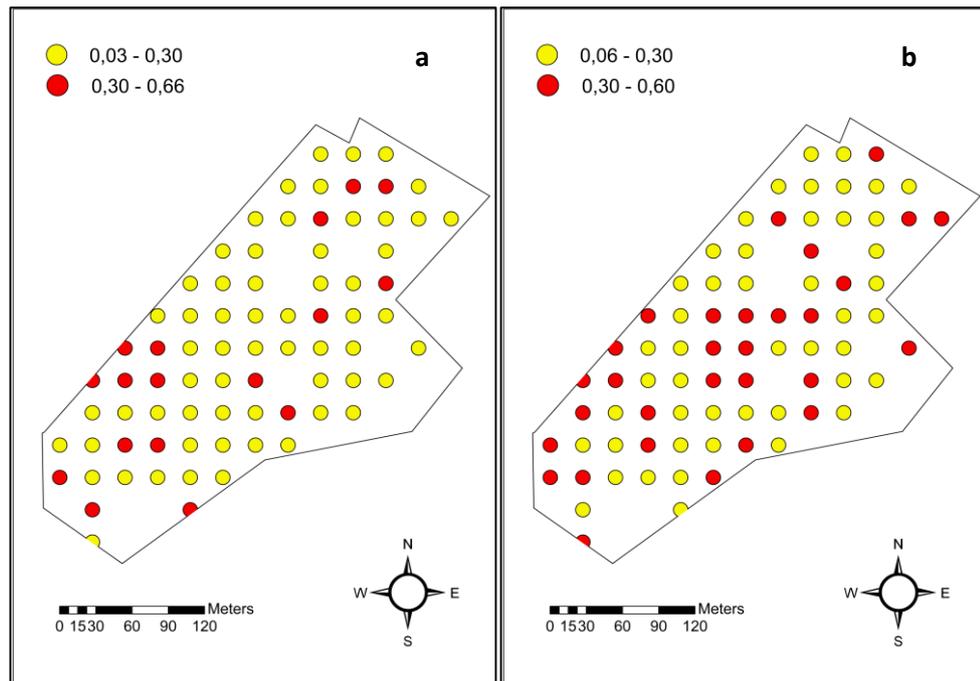


Figura 20. Coeficiente de variación temporal (CVT) de la biomasa acumulada (BA) estandarizada en el sitio experimental Balcarce, en (a) el tratamiento N250 y (b) el tratamiento N0. ● CVT \leq 0,3 (estable) ● CVT $>$ 0,3 (inestable).

2.3.4. Delimitación de zonas productivas

En cultivos agrícolas hay numerosas referencias sobre la delimitación de ambientes a partir de datos de rendimiento (Bocchi y Castrignanó, 2007; Leroux *et al.*, 2018). Sin embargo, en pasturas la información es escasa. Serrano *et al.* (2010), definieron ambientes productivos a partir de corte directo de forraje. Sin embargo, estos autores realizaron estos experimentos en condiciones climáticas y edáficas muy diferentes a las de este experimento.

En la Figura 21 se muestra la distribución de las ZP en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250. El software MZA, a partir de los índices, FPI y NCE, calculó el número óptimo de ZP que representa un menor grado de solapamiento y mayor cantidad de organización de los conglomerados (Anexo; Figura II). Se delimitaron, para este tratamiento de fertilización en primavera, tres ZP: zona de producción alta (ZPA), zona de producción media (ZPM) y zona de producción baja (ZPB) (Figura 21a). En cambio, en otoño se delimitaron solo dos zonas de producción (Figura 21b). Esta diferencia en la cantidad de ambientes podría deberse a la menor variabilidad espacial en la producción de biomasa de otoño (CV=22%) respecto a la producción primaveral (CV=36%)(Tabla 3).

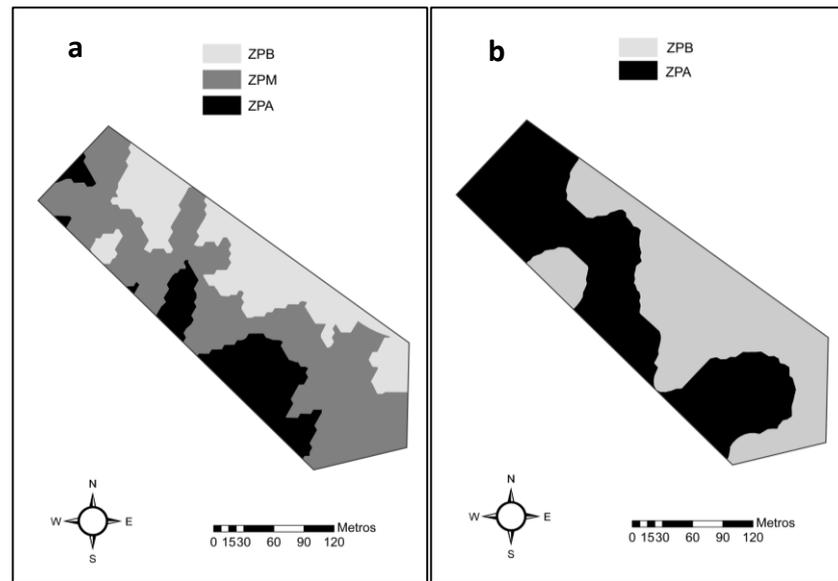


Figura 21. Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA), zona de producción media (ZPM) y zona de producción baja (ZPB).

Dado el tamaño del lote y con el objetivo de simplificar el hipotético manejo del mismo, la delimitación de ambientes realizada en los rebrotes primaverales, en el tratamiento N250, fue simplificada a solo dos zonas como en el caso de otoño, observándose que la distribución de las ZP es visualmente similar entre estaciones de crecimiento (Figura 21b y Figura 22).

El número óptimo de zonas se determina cuando FPI y NCE alcanzan el valor mínimo (Córdoba *et al.*, 2013). En el tratamiento N0, tanto para los rebrotes otoñales como los primaverales, no hubo coincidencia entre índices (Anexo; Figura II). Por lo tanto, se procedió a seleccionar la menor cantidad de ambientes introducidos en el análisis multivariado (Córdoba *et al.*, 2013). En la Figuras 23a y 23b se muestran las ZP delimitadas cuando no se aplicó N para primavera y otoño respectivamente. En los mismos pueden observarse que las ZP no fueron consistentes entre estaciones de crecimiento y que hay un predominio de alguna de las zonas respecto a la otra (Figura 23a y 23b) que no se verificaba en el tratamiento N250 (Figura 21).

Con el objetivo de determinar diferencias significativas entre las ZP delimitadas mediante el método clúster, se realizó un ANVA a la BA en función de cada una de estas zonas. En el tratamiento N250, el análisis estadístico de la primavera, no presentó interacción entre los factores de tratamiento ZP y rebrote ($P=0,19$) ni efecto del rebrote (Tabla 4). En cambio, como era de esperarse, se registró efecto de la zona

($P=0,0001$) (Tabla 4). Por lo tanto, sería factible la delimitación de ambientes ya que el comportamiento se mantiene a través de los rebrotes.



Figura 22. Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en primavera. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB).

En N250, en otoño, la BA estandarizada no presentó interacción entre los factores de tratamiento (Tabla 5). Por otra parte, se hallaron diferencias significativas entre ZP (1,08 y 0,96 de BA estandarizada, en ZPA y ZPB respectivamente)(Tabla 5). Sin embargo, estas fueron de menor magnitud a las halladas en el tratamiento N250 en primavera ($P=0,08$ y $0,0001$, respectivamente). Esto podría deberse a que la oferta de agua por precipitaciones fue superior a la demanda del ambiente en los dos rebrotes otoñales (ETP) (Figura 13) generándose así mayor disponibilidad de agua (Figura 14), el cual es el principal factor limitante del crecimiento de las plantas en regiones templadas (Fraisie *et al.*, 2001).

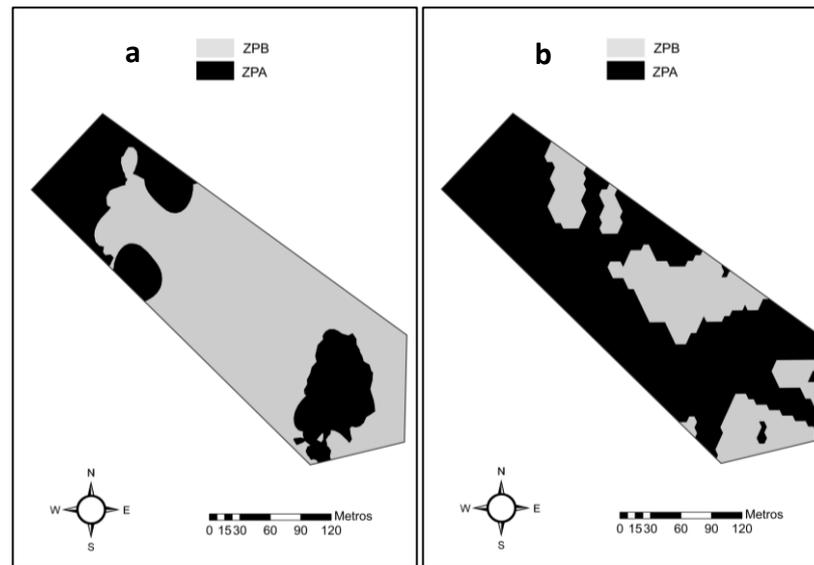


Figura 23. Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N0 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB).

Anteriormente se había mencionado que, en el tratamiento N0, la distribución de las ZP no había sido similar entre estaciones de crecimiento (Figura 23). En el mismo sentido, las ZP tampoco mostraron un comportamiento consistente entre rebrotes dentro de una misma estación de crecimiento ya que al evaluar las ZP mediante un ANVA se determinó una interacción significativa entre ZP y rebrote en las dos estaciones de crecimiento (Tabla 4 y 5). Por ejemplo, en PRIM16 hubo diferencias significativas entre zonas ($P < 0,05$) (Tabla 4) mientras que en PRIM15 no se detectaron diferencias entre la ZPA y la ZPB (Tabla 4). Asimismo, en OTO16, la ZPA mostró una BA significativamente mayor que en la ZPB ($P < 0,05$). En cambio, en OTO17 no se detectaron diferencias entre zonas productivas (Tabla 5).

Estas inconsistencias en los patrones de productividad, entre estaciones de crecimiento y dentro de cada estación entre rebrotes, podrían condicionar la aplicación de esquemas de MA en pasturas limitadas por la oferta de N. Sin embargo, si se incluyera mayor cantidad de mapas de productividad a los utilizados en este experimento se podrían clarificar los patrones de variabilidad espacio-temporal. En este sentido, Doberman *et al.* (2003), trabajando en maíz, indican que, sin la aplicación de insumos, el número mínimo de mapas necesarios para identificar patrones estables es mayor al utilizado en este experimento.

Tabla 4. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de festuca alta creciendo en el sitio experimental Ayacucho en los rebotes PRIM15 y PRIM16, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).

		BA estandarizada	
		N250	N0
PRIM15	ZPA	1,32	0,99a
	ZPB	0,85	1,01a
PRIM16	ZPA	1,18	1,43a
	ZPB	0,92	0,77b
Medias	PRIM15	1,08	0,99
	PRIM16	1,05	1,09
	ZPA	1,24	1,21
	ZPB	0,89	0,87
Fuente de variación		ANVA	
rebrote		ns	ns
ZP		***	***
ZP x rebrote		ns	**

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre ZP cuando hubo interacción entre los factores de tratamiento.
 *** $P < 0,01$; ** $P < 0,05$, * $P < 0,10$.

ns: no significativo.

Tabla 5. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de festuca alta creciendo en el sitio experimental Ayacucho en los rebotes OTO16 y OTO17, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).

		BA estandarizada	
		N250	N0
OTO16	ZPA	1,08	1,21a
	ZPB	0,92	0,89b
OTO17	ZPA	1,06	0,98a
	ZPB	0,98	1,01a
Medias	OTO16	1,01	1,05
	OTO17	1,03	1,00
	ZPA	1,08	1,10
	ZPB	0,96	0,94
Fuente de variación		ANVA	
rebrote		ns	ns
ZP		*	ns
ZP x rebrote		ns	**

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre ZP cuando hubo interacción entre los factores de tratamiento.
 *** $P < 0,01$; ** $P < 0,05$, * $P < 0,10$.

ns: no significativo.

En el sitio experimental Balcarce, al realizar los análisis clúster, la estructura de los conjuntos de datos no pudo ser identificada claramente mediante el mínimo de FPI y NCE ya que el menor nivel de desorden de la clasificación (indicada por el NCE) se produjo dividiendo en dos o tres ZP, mientras que el índice FPI disminuyó con la

cantidad de clúster incluidos en el análisis (Anexo; Figura III). Por lo tanto, se procedió a seleccionar solo dos ZP. En las Figuras 24 y 25 se muestra la distribución de las ZP, para las diferentes estaciones de crecimiento y disponibilidad de N.

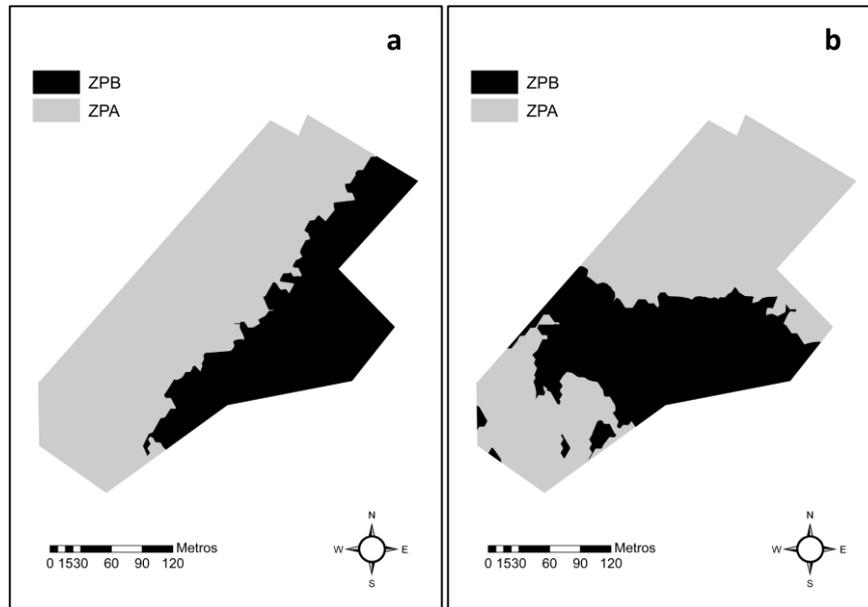


Figura 24. Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Balcarce en el tratamiento N0 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB).

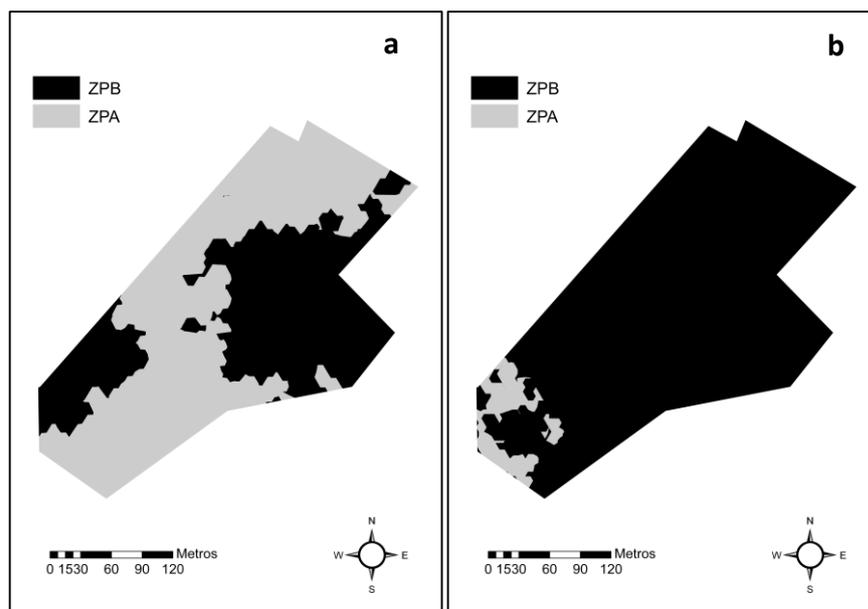


Figura 25. Patrón espacial de distribución de las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Balcarce en el tratamiento N250 en (a) primavera y en (b) otoño. Las ZP fueron delimitadas mediante clasificación cluster multivariada: zona de producción alta (ZPA) y zona de producción baja (ZPB).

Para N0, en la estación de crecimiento primavera, no se realizó el ANVA de la BA ya que solo se evaluó la producción de forraje durante un solo rebrote (Tabla 3). En N250, en otoño y primavera, y en N0, en otoño, la BA estandarizada presentó interacción entre los factores de tratamiento ZP y rebrote (Tabla 6 y 7). Además, como se mencionó anteriormente, los patrones de distribución de la BA no fueron similares visualmente (Figura 24 y 25) y, en el mismo sentido, se hallaron bajas correlaciones entre rebrotes en la BA.

La causa de este comportamiento espacial aleatorio entre rebrotes, para un mismo tratamiento de fertilización o estación de crecimiento podría deberse a condiciones climáticas extremadamente adversas en la localidad de Balcarce (elevado déficit hídrico en el verano del 2015 y excesos hídricos durante el invierno del mismo año)(datos no mostrados) que podrían haber provocado, de un rebrote a otro, cambios en la estructura espacial de la pastura. En este sentido, Mulla y Schepers (1997) indican que la estructura espacial de la productividad está afectada por las propiedades hidráulicas del suelo las cuales interaccionan con la variación de las precipitaciones de la campaña. Por lo tanto, sin una variabilidad de rendimiento espacialmente estructurada y estable en el tiempo no sería adecuado implementar un esquema de MA (Xu *et al.*, 2006; Florin *et al.*, 2009).

Tabla 6. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de agropiro creciendo en el sitio experimental Balcarce en los rebrotes PRIM14 y PRIM15, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).

		BA estandarizada
		N250
PRIM14	ZPA	1,05a
	ZPB	1,00a
PRIM15	ZPA	1,17a
	ZPB	0,83b
Medias	PRIM14	1,03
	PRIM15	1,00
	ZPA	1,11
	ZPB	0,91
Fuente de variación		
rebrote		ns
ZP		***
ZP x rebrote		***

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre ZP cuando hubo interacción entre los factores de tratamiento.

*** $P < 0,01$; ** $P < 0,05$, * $P < 0,10$.

ns: no significativo.

Tabla 7. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de agropiro creciendo en el sitio experimental Balcarce en los rebrotes OTO15 y OTO16, para dos tratamientos de fertilización: N250 y N0 y dos zonas productivas (ZP): zona productiva alta (ZPA) y zona productiva baja (ZPB).

		BA estandarizada	
		N250	N0
OTO15	ZPA	1,28a	1,06a
	ZPB	0,89b	0,93a
OTO16	ZPA	1,13a	1,19a
	ZPB	0,94a	0,76b
Medias	OTO15	1,08	1,00
	OTO16	1,03	0,98
	ZPA	1,20	1,13
	ZPB	0,92	0,84
Fuente de variación			
rebrote		ns	ns
ZP		***	***
ZP x rebrote		***	***

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre ZP cuando hubo interacción entre los factores de tratamiento.

*** $P < 0,01$; ** $P < 0,05$, * $P < 0,10$

ns: no significativo.

Por otra parte, no habría que descartar que la grilla de muestreo, para este sitio experimental (Figura 5), no haya tenido la suficiente cantidad de muestras para representar la variabilidad de la producción de pasto. En conclusión, en el sitio Balcarce, no fue posible de realizar la predicción de la variabilidad espacial de BA mediante corte directo y por ende, la delimitación de ZP.

2.3.5. Relación entre índice el de vegetación normalizada y la biomasa acumulada

Se evaluó la relación entre el IVN estimado mediante sensores remotos y la producción de pasto en condiciones limitantes de N. Asimismo, se estimó la capacidad de este índice para predecir la variabilidad de la producción potencial de pasto.

En el sitio experimental Ayacucho, durante los rebrotes primaverales, en los dos tratamientos de fertilización, se estableció una relación lineal, directa y significativa entre BA estandarizada e IVN (Figura 26). Sin embargo, las regresiones presentaron coeficientes de determinación menores a los determinados por otros autores que trabajaron con pasturas y medidores de IVN portátiles (Trotter *et al.*, 2010; Schaefer y Lamb, 2016; Insua *et al.*, 2019; McEntee *et al.*, 2019). Esto podría deberse a que los sensores portátiles utilizados por estos autores, poseen una alta resolución espacial comparada con el IVN calculado mediante imágenes satelitales.

Por otra parte, en las Figura 26 se observa que, tanto en N250 como en N0, para similar valor de BA estandarizada, el IVN fue superior en PRIM15 respecto a PRIM16. Este comportamiento, que como se indicará más adelante se replica en otoño, se debería a que la fecha de obtención de las imágenes satelitales, durante cada rebrote, difiere entre estaciones. Sin embargo, las pendientes de las regresiones primaverales no difirieron significativamente entre ellas, en los dos tratamientos de fertilización ($P>0,14$ y $P>0,17$; datos no mostrados). Por lo tanto, la IVN permitiría describir, en esta estación de crecimiento, la variabilidad de la BA estandarizada tanto en condiciones limitantes de N como en condiciones nutricionales potenciales.

En el mismo sentido, en el sitio experimental Balcarce durante los rebrotes primaverales, las relaciones entre estas variables fueron significativas (Figura 27). No obstante, el grado de ajuste de las regresiones fueron más bajos a los hallados en el sitio Ayacucho. Edirisinghe *et al.* (2012) plantean que, para mejorar la predicción de biomasa a partir de imágenes satelitales, es necesario realizar cuatro muestreos directos de biomasa por cada pixel de 10 x 10 m evaluado.

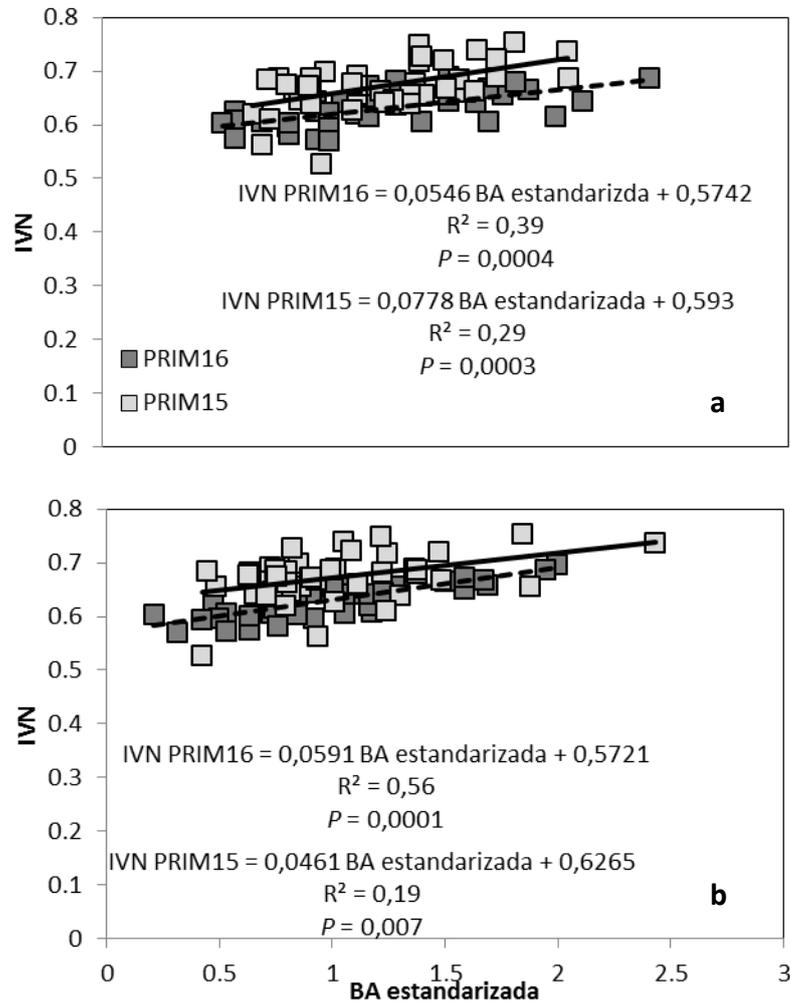


Figura 26. Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Ayacucho para dos estaciones de crecimiento (PRIM15 y PRIM16) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0.

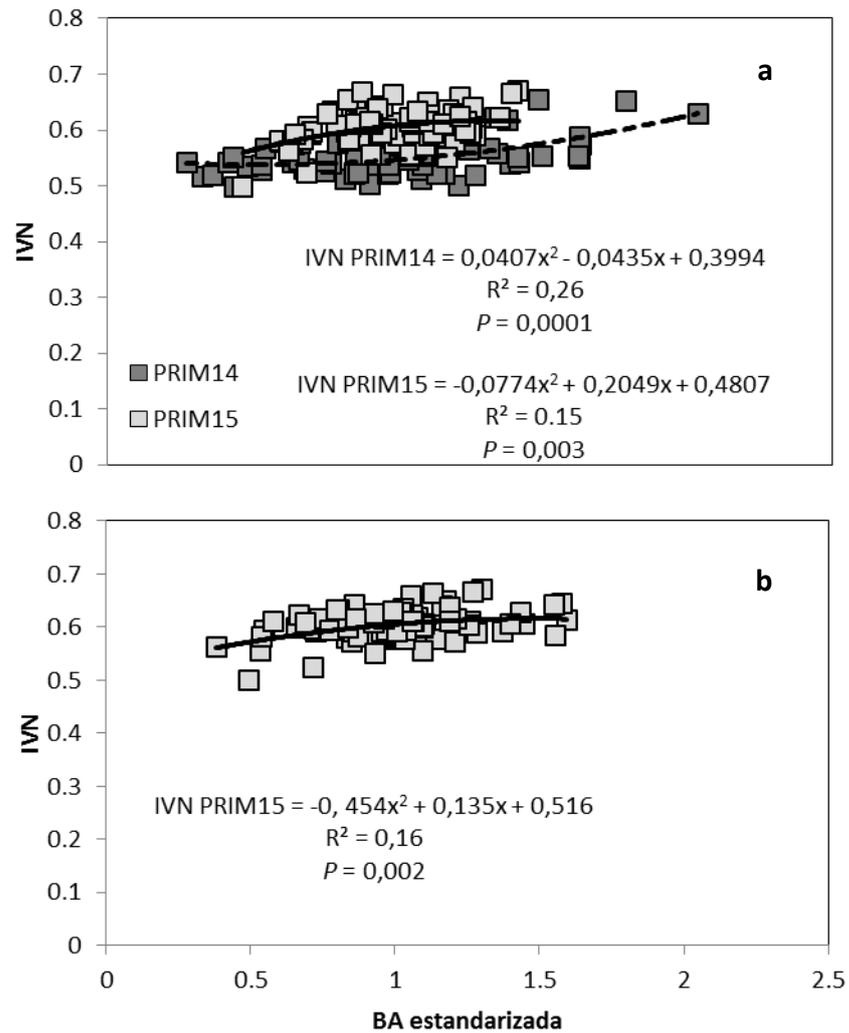


Figura 27. Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Balcarce, para dos estaciones de crecimiento (PRIM14 y PRIM15) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0 (PRIM14; tratamiento N0: sin datos).

En cambio, en otoño, en los dos sitios experimentales, las relaciones entre BA y IVN no fueron significativas (Figura 28 y 29) y los coeficientes de determinación hallados fueron sensiblemente menores respecto a los determinados en los rebrotes primaverales. La habilidad del IVN para predecir la producción de forraje está fuertemente influenciada por la cobertura del cultivo (Serrano *et al.*, 2000). En otoño (pastura vegetativa) las hojas tienden a estar más postradas que en primavera (pastura reproductiva), principalmente en las capas superiores del canopeo (Parsons, 1988). Por lo tanto, el bajo grado de ajuste entre BA y IVN en esta época del año podría deberse a la disposición geométrica de las hojas, la cual altera la cobertura en menor medida que la producción de biomasa. En el mismo sentido, Flynn *et al.* (2008) también trabajando con *Festuca alta* determinaron variaciones en el grado de ajuste

entre el IVN (determinado con un sensor proximal) y la biomasa acumulada al evaluar dicha relación en diferentes estaciones de crecimiento.

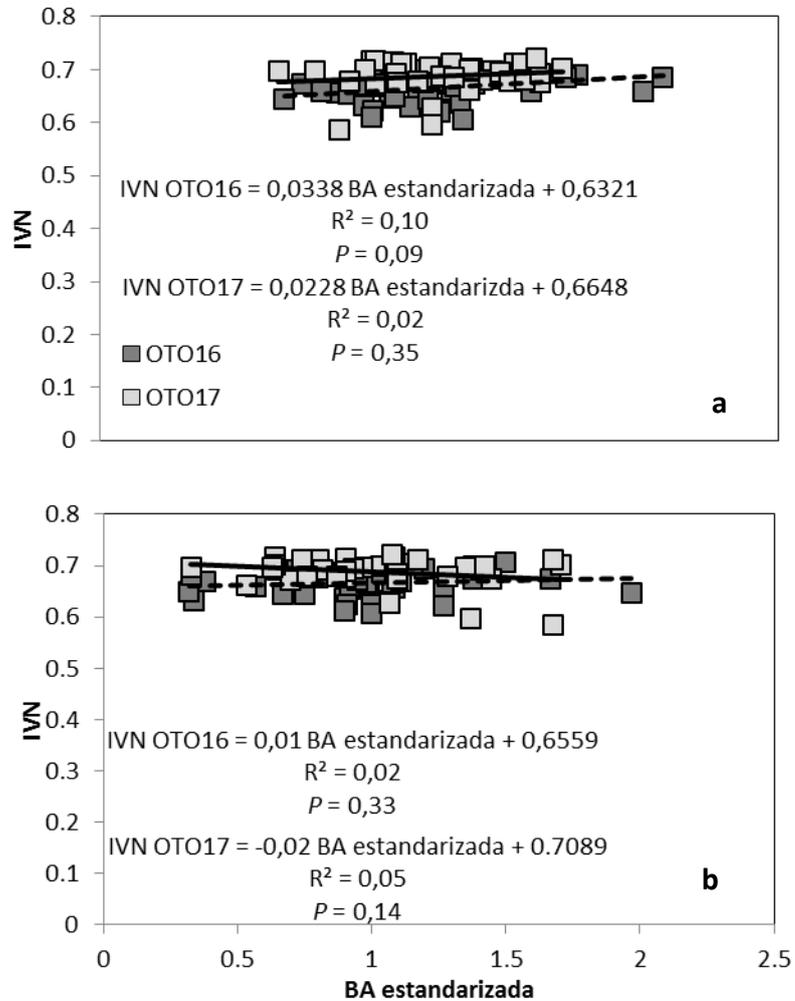


Figura 28. Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Ayacucho, para dos estaciones de crecimiento (OTO16 y OTO17) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0.

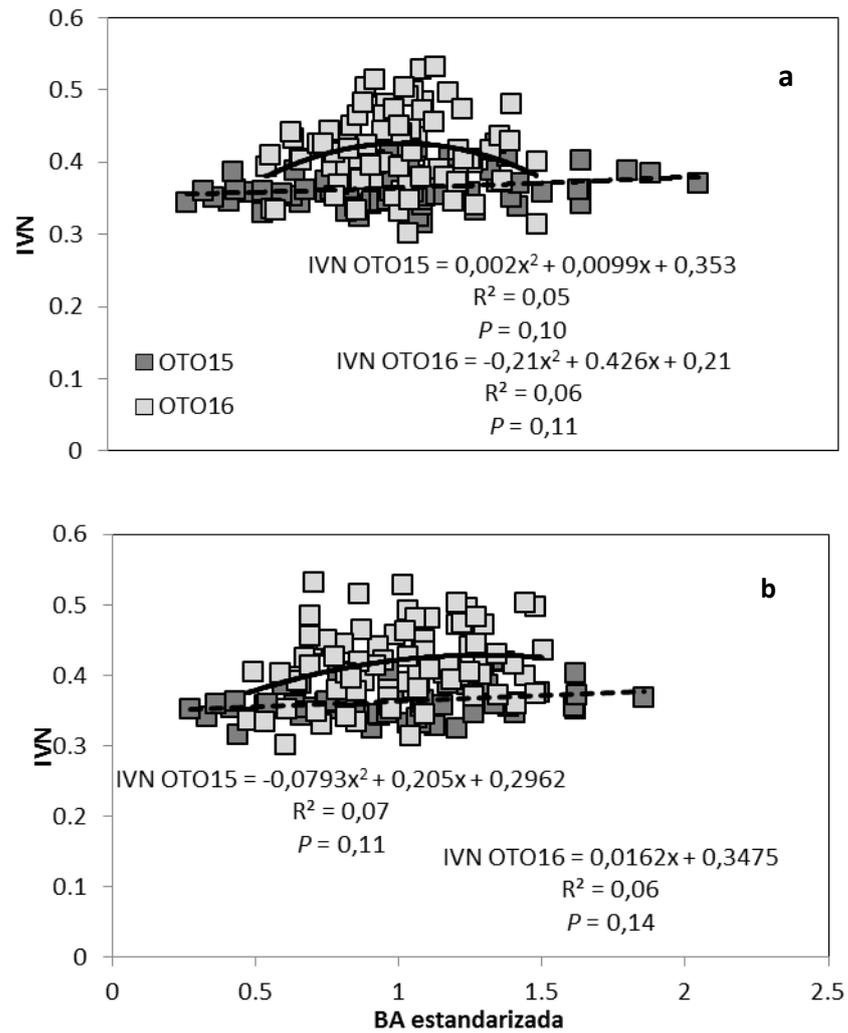


Figura 29. Relación entre la biomasa acumulada (BA) estandarizada y el índice de verdor normalizado (IVN) en el sitio experimental Balcarce, para dos estaciones de crecimiento (OTO15 y OTO16) en el (a) tratamiento N250 y en el (b) tratamiento N0.

2.4. CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En el sitio Ayacucho, en las condiciones del presente trabajo, se recopilaron evidencias para:

No rechazar las hipótesis 1a) y 1b), las cuales postulaban que, en primavera y otoño respectivamente, en condiciones nutricionales no limitantes se presentan sub-ambientes (zonas productivas; ZP) que difieren en su potencial productivo.

En el tratamiento N0, si bien el análisis cluster multivariado permitió la delimitación de ZP, la diferencia en BA, entre estas, varió entre los rebrotes evaluados. Así, surge que la delimitación de ZP basada en cortes directos de biomasa tendría menos precisión en pasturas limitadas por N que en aquellas donde la disponibilidad de este nutriente no es limitante. Por lo tanto, las evidencias recopiladas son suficientes para **no rechazar las hipótesis 2a) y 2b)**, la cuales postulaban que con baja oferta de N, en primavera y otoño respectivamente, no es posible delimitar ZP.

En el sitio experimental Balcarce, se determinó, que la diferencia en BA entre ZP, varió entre los rebrotes evaluados en los dos tratamientos de fertilización. Por lo tanto, se recopilaron evidencias **para rechazar las hipótesis 1a) y 1b) y no rechazar las hipótesis 2a) y 2b)**,

Por otra parte, para los dos sitios experimentales, se recopilaron evidencias suficientes para **no rechazar la hipótesis 3a) y rechazar la hipótesis 3b)**, las cuales postulaban que la variabilidad de la productividad, con y sin limitantes de N, puede ser caracterizada adecuadamente mediante el IVN obtenido de sensores remotos en primavera y otoño respectivamente.

CAPÍTULO 3

**RELACIÓN ENTRE PROPIEDADES DE SITIO Y PROPIEDADES
DE SUELO Y DELIMITACION DE ZONAS DE MANEJO**

3.1. INTRODUCCIÓN

Para realizar MA es necesario caracterizar, de manera sencilla, rápida y con un bajo costo, la variabilidad de las propiedades edáficas que influyen en la producción (King *et al.*, 2005). Esto puede realizarse mediante fuentes de información auxiliar denominadas propiedades de sitio.

La medición geoespacial de la CEa, ha sido una de las propiedades de sitio más utilizadas (Peralta y Costa, 2013). Este parámetro es influenciado por propiedades de suelo como la disponibilidad de agua (Hossain *et al.*, 2010) la salinidad (Rhoades *et al.*, 1976), la capacidad de intercambio catiónico (Kitchen *et al.*, 2005), el pH (Serrano *et al.*, 2010) y la MO (Corwin y Lesch, 2005). Sin embargo, hay algunas propiedades del suelo que pueden afectar la producción de forraje (e.g. disponibilidad de N), lo cual se vio en el capítulo anterior, pero que no están relacionadas con la CEa (Kuang *et al.*, 2012; Peralta *et al.*, 2013a).

La información disponible sobre la relación de la CEa con características edáficas es muy abundante para suelos de aptitud agrícola donde se establecen cultivos con destino a cosecha (Kitchen *et al.*, 2005; Corwin y Lesch, 2005; Moral *et al.*, 2010; Peralta *et al.*, 2013a). Sin embargo, el uso de este parámetro en suelos de aptitud ganadera es escaso. Serrano *et al.* (2010) y (2013) hallaron correlaciones positivas y significativas entre la producción de biomasa de una pastura consociada y la CEa. Guretzky *et al.* (2008) utilizaron la CEa para determinar el patrón espacial de distribución de leguminosas dentro de una pastura mixta debido a que, esta especie, se ubica en las áreas de mayor disponibilidad hídrica y menor pH. Bernardi *et al.* (2016) relacionaron la CEa con propiedades edáficas. Cabe mencionar que todas estas experiencias fueron realizadas en condiciones edáficas muy diferentes a las de los suelos utilizados en este experimento.

La relación existente entre las propiedades de suelo y la CEa permitiría delimitar zonas edáficas las cuales podrían ser utilizadas para delimitar ZM. Sin embargo, hay autores que indican que la delimitación puede mejorarse si además de la CEa, se agrega al análisis otras propiedades de sitio (e.g. atributos topográficos) (Fraisse *et al.*, 2001).

En este sentido, con el avance de la AP se han podido realizar modelos de elevación digitales, definidos como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la elevación del terreno. La variabilidad de la elevación

provoca cambios en el flujo y acumulación del agua entre diferentes posiciones del lote como también la redistribución de partículas minerales del suelo y MO (Pachepsky *et al.*, 2001). En este sentido, la capa arable es erosionada en las posiciones elevadas y las partículas son depositadas en las posiciones bajas del terreno, generando un gradiente de productividad (Pierson y Mulla, 1990). Por otro lado, la pendiente incrementa la velocidad del flujo de agua superficial, reduciendo la tasa de infiltración en las partes elevadas del terreno y la curvatura del terreno determina la concentración o dispersión del flujo de agua (Timlin *et al.*, 1998). En la Pampa Deprimida se pueden distinguir diversos ambientes edáficos determinados por la posición topográfica (Batista *et al.*, 2005). Por esto, los atributos topográficos podrían ser relevantes para la delimitación de ZM en estos suelos.

En suelos agrícolas, localmente, solo Peralta *et al.* (2013b) y Córdoba *et al.* (2013) utilizaron para delimitar ZM varias fuentes de información. Los primeros autores utilizaron la pendiente, la elevación, la curvatura del terreno, el flujo de acumulación de agua, el rendimiento y la profundidad del suelo. En cambio, Córdoba *et al.* (2013) usaron la CEa, la elevación y el rendimiento de los cultivos. En el caso de los suelos ganaderos, la disponibilidad de información, o la posibilidad de generarla, para delimitar ZM, se ha incrementado sustancialmente en los últimos años. Sin embargo, el uso de las propiedades de sitio para caracterizar la variabilidad de propiedades edáficas de los suelos de nuestra región es nulo.

En el mismo sentido, es escasa la información con base científica sobre la delimitación de ZM en sistemas pastoriles. Serrano *et al.* (2019), delimitaron, mediante índices espectrales y CEa, tres zonas productivas (zonas de alto, medio y bajo potencial) hallándose, entre estas, diferencias en la producción de biomasa. No obstante, no se encuentran en la bibliografía antecedentes sobre esta temática que se hallan realizados en suelos sódicos. Por ende, los objetivos de este capítulo son:

Determinar la capacidad de la CEa y de los atributos topográficos como predictores de las propiedades edáficas que más influyen en la variabilidad de la productividad.

Delimitar ZM a partir de propiedades de sitio e IVN y comparar el patrón de variación espacial de estas ZM y las ZP delimitadas en el capítulo 2 mediante el corte directo de biomasa.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Muestro y análisis de suelo

Cada AM geo-referenciada (Figura 5), de los dos sitios experimentales descritos en el Capítulo 2 (Figura 4; Tabla 1), se localizó con un GPS (Juno ST; Trimble Navigation Ltd, USA) para realizar un muestreo de suelo hasta los 30 cm de profundidad. Las muestras, compuestas por tres submuestras, fueron separadas en dos estratos (0-15 y 15-30 cm de profundidad). En el laboratorio fueron secadas en estufa con circulación de aire forzada a una temperatura de 30° C. Posteriormente, se molieron y se tamizaron hasta pasar por una malla 2 mm para realizar las determinaciones de CEe. Para este parámetro se elaboró pasta saturada de suelo para su posterior filtración. En el extracto se midió la CEe con un equipo Thermo Orion modelo 150 Aplus, el Na⁺ soluble por lectura directa con fotómetro de llama Corning Photometer 410 y el Ca⁺² y el Mg⁺² solubles mediante un espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu AA-6200.

Con los datos de Na⁺, Ca⁺² y Mg⁺² solubles se calculó la RAS de cada muestra, a partir de la siguiente ecuación:

$$RAS = \frac{Na^2}{\sqrt{\left(\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}\right)}} \quad [Ec 7]$$

Además, en cada muestra se midió el pH (relación suelo: agua 1:2,5), la textura por el método de la pipeta de Robinson separando la muestra en tres fracciones granulométricas: arcilla (As), limo (Li) y arena (Ar) (Gee y Bauder 1986) y en ollas de presión el contenido de humedad gravimétrica (%) a 33 y 1500 kPa de tensión mátrica. El contenido de humedad gravimétrica a cada tensión considerada se determinó a partir de tres submuestras de 20 g de suelo seco saturadas. Finalmente, una fracción de cada muestra fue nuevamente tamizada hasta pasar por una malla de 0,5 mm para la determinación de MO (Walkley y Black, 1934).

Las propiedades de suelo se relacionaron con las BAs promedio de cada estación de crecimiento y tratamiento de fertilización, determinadas en el Capítulo 2 mediante análisis de regresión simple estimados mediante el procedimiento REG (PROC REG, SAS Institute, 2007). Además, para determinar las propiedades edáficas más significativas para la variabilidad de productividad se realizaron regresiones múltiples usando el procedimiento STEPWISE (SAS, SAS Institute Inc., 2007). Una vez definido

los modelos, para cada tratamiento de fertilización y estación de crecimiento, los mismos se simplificaron a no más de dos propiedades edáficas independientes para minimizar el cuadrado medio del error (CME) y así facilitar su interpretación.

3.2.2. Medición de la Conductividad eléctrica aparente

En los dos sitios experimentales la CEa fue medida mediante el empleo del sensor Veris 3100 (Veris Technologies, 2014) (Figura 30).



Figura 30. Sensor Veris 3100 usado para las determinaciones de conductividad eléctrica aparente (CEa).

El mismo posee tres pares de discos como electrodos. Los discos están montados sobre un bastidor con ruedas y penetran en el suelo aproximadamente 5-6 cm. El par de discos 2 y 5 (Figura 31) tiene la función de emitir una corriente eléctrica en el suelo, mientras que los discos 1, 3, 4 y 6 detectan el grado de disminución en la corriente eléctrica emitida a causa de su transmisión a través del suelo (resistencia). El par central (discos 3 y 4) lee la resistencia ofrecida por el suelo de 0-30 cm de profundidad, mientras que el par externo (discos 1 y 6) lee la resistencia de 0-90 cm de profundidad (Figura 31). En estos experimentos la resistencia utilizada fue aquella medida por los discos 3 y 4 porque en los suelos utilizados en este experimento el 80-85 % de las raíces de las pasturas se encuentran de 0 a 30 cm de profundidad (Doll y Deregibus, 1986).

El Veris 3100 fue calibrado según las instrucciones del manual, luego fue remolcado en los sitios experimentales por una camioneta, aproximadamente a 15 km h⁻¹ y en transectas paralelas separadas 20-25 metros ya que según Farahani y Flynn (2007) no existen diferencias en la eficiencia de predicción del mapa en transectas separadas entre 2,5 y 30 metros.

En un “*data logger*”, a razón de un dato por segundo, se almacenaron los datos de resistencia que fueron transformados a CEa (decisiemens por metro; $dS\ m^{-1}$) mediante la siguiente formula:

$$1/\text{resistencia} = \text{conductividad [Ec 8]}$$

El “*data logger*” estaba acoplado a un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) (Trimble® R3, Trimble Navigation Ltd., USA), donde se registraba la posición exacta (latitud y longitud) al momento de la medición de cada dato de CEa (Veris Technologies, 2014; Johnson *et al.*, 2001).

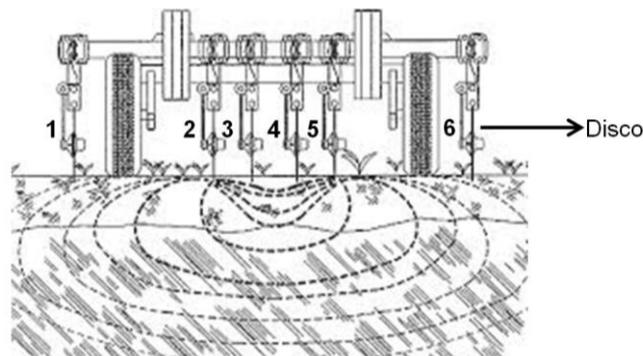


Figura 31. Discos del sensor Veris 3100 usado para medir la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa).

3.2.3. Medición de la elevación del terreno

Los datos de elevación, para la realización de los modelos de elevación digitales, fueron medidos utilizando un DGPS (Trimble® R3, Trimble Navigation Ltd., USA) constituido por dos receptores: el móvil, el cual se utilizó para hacer el relevamiento en los sitios experimentales y el fijo que permitió corregir los errores del móvil. El equipo fue configurado según las instrucciones del manual para tomar posición satelital cada segundo (latitud, longitud y altitud). Posteriormente, fue colocado en una camioneta para recorrer los sitios experimentales en transectas paralelas distanciadas entre 15 y 20 m. La velocidad de avance fue aproximadamente $10\ km\ h^{-1}$.

3.2.4. Variabilidad espacial de las propiedades de sitio

Para confeccionar los mapas de CEa y de los modelos de elevación digitales se usó una metodología similar a la usada para realizar los mapas de ZP descripta en el Capítulo 2. El primer paso fue la confección de los semivariogramas experimentales.

Los mismos son una función básica que describe la dependencia espacial de una variable, es decir, su autocorrelación espacial y están definidos por el siguiente modelo:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad [\text{Ec 9}]$$

Dónde:

$\gamma(h)$ = valor del semivariograma en función de la separación entre dos puntos

$Z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto x_i

$Z(x_i + h)$ = valor de la variable de interés en el punto $x_i + h$

Este modelo representa la dependencia espacial de los valores de una variable registrados en dos puntos separados a una cierta distancia h . A medida que aumenta la distancia entre dos puntos, las diferencias entre valores registrados se van incrementando, por lo que la correlación espacial disminuye.

Posteriormente, se procedió al ajuste de un modelo teórico que describa la variabilidad de cada propiedad de sitio. La selección de los modelos se realizó haciendo coincidir las curvas de los semivariogramas experimentales con las curvas de las funciones matemáticas buscando obtener el menor CME. Los modelos teóricos usados fueron el esférico y el exponencial.

Finalmente, se realizó la predicción en puntos dentro del área de estudio donde no se habían medido las propiedades de sitio mediante el método de interpolación "kriging" ordinario. El mismo es un procedimiento geoestadístico que permite obtener valores en zonas desconocidas a través de datos reales espacialmente dispersos. Establece pesos a las muestras que se encuentran alrededor del punto a estimar, a través de la estructura de covarianza detectada en el semivariograma, con el fin de asegurar que el promedio de error de estimación sea cero, con una varianza mínima, lo cual brinda una predicción no sesgada (Schloeder *et al.*, 2001). Los pesos se obtienen mediante la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma[d(S_i, S_j)] + m = \gamma[d(S_o, S_i)] \quad i = 1, \dots, n; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\gamma[d(S_o, S_i)] = \text{var}[Z(S_i) - Z(S_o)] \quad [\text{Ec 10}]$$

Dónde:

N = Número de observaciones.

M = Multiplicador de Lagrange.

λ = Pesos dado a cada observación.

S_i, S_j = Puntos muestreados (variable medida).

S_o = Punto en estimación.

$d(S_i, S_o)$ = Distancia entre S_i y S_o a partir del semivariograma.

Una vez encontrado los pesos de los valores cercanos al punto a estimar, que minimicen la varianza del punto desconocido, se calcula el valor del nuevo punto.

$$Z^*(S_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(S_i) \quad i = 1, \dots, n \quad [\text{Ec 11}]$$

Dónde:

$Z^*(S_o)$ = Valor estimado.

N = Número de observaciones vecinas usadas para la estimación.

λ_i = Peso asignado al valor observado $Z(S_i)$.

3.2.5. Estimación de los atributos topográficos

A partir de los modelos de elevación digitales generados en el punto anterior, utilizando el software SIG de Análisis Geo-científico Automatizado SAGA-GIS v2.1 (Olaya y Conrad, 2009; SAGA Development Team, 2012), se calcularon los siguientes atributos topográficos: elevación (Elev; valor estructural implícito en los modelos de elevación digitales), pendiente (Pend; tasa de cambio de la elevación con relación a una superficie), curvatura del terreno (CT; medida transversal a la máxima pendiente, la CT delimita áreas de divergencia y convergencia de flujo, valores positivos y negativos respectivamente, permitiendo determinar si un lugar específico es plano, cóncavo o convexo) y el índice topográfico de humedad (ITH; valor que ha sido

utilizado para predecir la capacidad de agua disponible del suelo). Los mapas de los atributos topográficos fueron realizados mediante el mismo método que el utilizado para los mapas de CEa y de los modelos de elevación digitales.

3.2.6. Predicción de propiedades de suelo

Las propiedades edáficas definidas mediante el procedimiento STEPWISE como las más significativas para la productividad fueron las variables a predecir mediante el algoritmo Random Forest (RF). Este algoritmo es un conjunto de árboles de regresión. Los resultados de todos los árboles de regresión son ensamblados para identificar las variables con mayor capacidad predictiva y hacer una clasificación de importancia de las mismas (Genuer *et al.*, 2010). El procedimiento, que fue realizado con el software estadístico R v3.1.1 (R Development Core Team, 2013) fue el siguiente:

Los modelos RF fueron ejecutados con los 5 predictores mencionados anteriormente (CEa, Elev, Pend, CT e ITH) y las propiedades de suelo que mejor explicaron la variabilidad de la productividad como variables de respuesta. Las muestras de suelo, obtenidas en cada AM, fueron divididas aleatoriamente en dos grupos: grupo de calibración del modelo RF (datos de calibración) y muestras de validación del modelo RF (datos de validación).

RF utiliza numerosos árboles de regresión llamados dentro del algoritmo como “*ntrees*”. Un muestreo, que utiliza aproximadamente el 70% de los datos disponibles, es realizado cada vez que se ejecuta cada uno de los árboles de regresión. El 30% de datos remanentes referidos como “*out-of-bag*” son utilizados para determinar el error de predicción de cada árbol de regresión (Cutler *et al.*, 2007). Cada vez que se ejecuta un árbol de regresión un subconjunto de predictores es seleccionado. A este subconjunto se le llama “*mtry*”.

Los “*ntrees*” y el “*mtry*” óptimos para la ejecución de RF deben ser seleccionados por el usuario. En este estudio, el óptimo “*mtry*” fue definido por iteración de valores “*mtry*” a partir de uno y hasta la cantidad total de predictores. Para cada “*mtry*”, los valores de “*ntrees*” se fueron incrementando de 200 a 2000 en intervalos de 200. Los valores óptimos de “*mtry*” y “*ntrees*” fueron seleccionados utilizando el valor de los errores “*out-of-bag*” más bajos (Rad *et al.*, 2014). Adicionalmente, RF también estimó la importancia de los predictores (Genuer *et al.*, 2010). La importancia de los predictores fue calculada a partir de las 20 ejecuciones del algoritmo.

Por último, los modelos RF, fueron validados utilizando los datos de validación. La precisión de predicción del modelo RF fue evaluada utilizando la raíz cuadrada del error cuadrático medio relativo (RRMSE). El mismo evalúa la relación entre la raíz del cuadrado medio del error con la media observada para cada variable:

$$\text{RRSME (\%)} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \quad [\text{Ec 12}]$$

Dónde:

P_i = Valores estimados

O_i = Valores observados

N = Número de AM

M = Media

El modelo generado es considerado excelente cuando el RRMSE es menor a 10%, bueno si el valor se ubica entre 10 y 20%, aceptable entre 20 y 30% y pobre si es mayor a 30% (Jameison *et al.*, 1991).

3.2.7. Delimitación de zonas de manejo

En cada mapa de las propiedades de sitio predictoras elegidas por el algoritmo RF como las más robustas y en los mapas de información espectral se generaron grillas de 10x10m, lo cual permitió trabajar a la misma escala. Se delimitaron ZM (Hipótesis 6) para cada estación de crecimiento y tratamiento de fertilización (a menos que las hipótesis previas no lo permitieran). Para delimitar ZM se usó la combinación de propiedades de sitio e información espectral respectiva de cada tratamiento. El procedimiento (análisis cluster multivariado con el software MZA y posterior realización de los mapas con el software ArcGIS) fue el mismo que el descrito para delimitar las ZP (Sección 2.2.5; Capítulo 2). Sin embargo, solo se delimitaron dos ZM para poder realizar la comparación con las ZP establecidas en el capítulo 2.

3.2.8. Evaluación de la delimitación

En los mapas de ZP mostrados en el capítulo 2 también se generaron grillas de 10x10m para realizar la comparación entre las ZM y las ZP. La misma se realizó mediante:

i) el índice de precisión general (%) que se calculó dividiendo el número de celdas coincidentes correctamente por el número total de celdas en el conjunto de datos, produciendo la fracción del total de celdas que se clasifican idénticamente (Kitchen *et al.*, 2005).

ii) el índice de concordancia de Kappa (k) (Jensen *et al.*, 1996) definido por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{p^0 - p^e}{1 - p^e} \text{ [Ec 13]}$$

Dónde:

p^0 = Proporción de observaciones dentro de las celdas diagonales de la tabla de contingencia.

p^e = Proporciones esperadas en dicha diagonal bajo la hipótesis nula de no asociación entre las clasificaciones.

El k mide el grado de concordancia entre dos variables categóricas en una escala de 0 a 1. A mayor cantidad de observaciones en la diagonal de la tabla de contingencia entre dos clasificaciones, mayor es el grado de concordancia y por lo tanto, el índice tiende a 1 (máximo acuerdo). Por el contrario, valores k cercanos a 0 indican independencia entre ambas clasificaciones (total desacuerdo). Landis y Koch (1977) proponen la siguiente escala de valoración (Tabla 8).

Tabla 8. Escala de valoración del índice Kappa (k)

Valor k	Valoración
0,00 – 0,20	Leve
0,21 – 0,40	Aceptable
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Considerable
0,81 – 1,00	Casi Perfecta

Por último, se compararon los promedios de la BA estandarizada de cada rebrote en las diferentes ZM utilizando un ANVA de modelo mixto (PROC MIXED, SAS Institute, 2007), donde las ZM, los rebrotes y la interacción ZM*rebrote fueron efectos fijos y las unidades experimentales observaciones repetidas.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.3.1. Análisis descriptivo de las propiedades de suelo y su relación con la biomasa acumulada

En las Tabla I y II del Anexo se presentan las estadísticas de resumen de las propiedades edáficas de los sitios experimentales Ayacucho y Balcarce respectivamente. De acuerdo a la clasificación propuesta en Wilding *et al.* (1994), en Ayacucho, la variabilidad de la mayoría de las propiedades edáficas fue media (i.e. $15\% < CV < 35\%$) o alta (i.e. $CV > 35\%$), excepto en la MO y el pH, donde el CV promedio hasta los 30 cm de profundidad fue 15 y 9,8% respectivamente. En Balcarce la variabilidad, respecto al sitio Ayacucho fue mayor (Anexo; Tabla I y II respectivamente), salvo el pH, el resto de las propiedades edáficas mostraron una variabilidad medio o alta. Por lo tanto, los altos CV hallados indicarían una elevada variabilidad espacial, sugiriendo la conveniencia del MA (Moral *et al.*, 2010).

El análisis de correlación simple es frecuentemente utilizado en la AP ya que permite una primera aproximación para determinar el factor predominante del suelo que influye sobre la producción (Corwin *et al.*, 2003b). En las tablas III, IV, V y VI del Anexo se presentan las ecuaciones, los coeficientes de determinación y la significancia de las funciones ajustadas entre la BA y las propiedades del suelo determinadas en los sitios Ayacucho y Balcarce.

En el sitio experimental Ayacucho el grado de ajuste entre la BA y las propiedades de suelo es mayor en el tratamiento N250 respecto al tratamiento N0 (Anexo; Tabla III y IV respectivamente). Estas diferencias podrían deberse a la menor variabilidad de la BA en el tratamiento N0 (Tabla 3). Por otra parte, en ambos tratamientos de fertilización, el pH, la C_{Ee} y el RAS fueron las propiedades de suelo que se relacionaron más significativamente con la BA. En cambio, el % de arcilla, el % de limo y el Na soluble no se relacionaron la producción de pasto (Anexo; Tabla III y IV).

En Balcarce el grado de ajuste de las regresiones entre la BA y las propiedades de suelo fue bajo, independientemente de la estación y el tratamiento de fertilización evaluado (Anexo; Tabla III y IV). Estos resultados se sustentan con lo discutido en el capítulo anterior: i) cambios en la estructura de la pastura a lo largo del periodo experimental, ii) cantidad de mapas, la cual no habría sido suficiente para representar la variabilidad espacial de la producción de pasto y/o iii) una grilla de muestreo con escasa cantidad de muestras para representar adecuadamente la variabilidad de las propiedades edáficas evaluadas.

Para el sitio Ayacucho el análisis de regresión múltiple mostró, en primavera en el tratamiento N250, que el pH y la humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa fueron las variables que se relacionaron significativamente con la producción de BA promedio ($P=0,0151$ y $0,0395$ respectivamente) (Tabla 9). El modelo predictivo presentó un R^2 de 0,55 y los coeficientes de regresión fueron: intercepto: 1,42; pH:-0,22 y humedad gravimétrica a 1500 kPa: 2.81 (Tabla 9).

El efecto del pH sobre la producción de BA se debe a la elevada variabilidad de esta propiedad de suelo. La festuca alta crece adecuadamente cuando el pH se encuentra entre 5,5 y 7,5 (Hannawey *et al.*, 2009). Sin embargo, cuando es mayor, las principales fuentes de alcalinidad presentes en los suelos de la Pampa Deprimida (e.g. Na^2CO^3), que se corresponden con elevados contenidos de sodio, provocan la pérdida de estructura del suelo, la cual afecta la disponibilidad de agua y por ende el crecimiento. En este sentido, en este sitio, el pH, en los primeros 15 cm de suelo, varió entre 6,5 y 9,0 (Anexo; Tabla I). Esta relación entre productividad y pH es inconsistente en lotes de aptitud agrícola de la Pampa húmeda (Peralta *et al.*, 2013a) debido a la escasa variabilidad de esta propiedad edáfica en este tipo de suelos. En cambio, en suelos de aptitud ganadera, resultados obtenidos por Serrano *et al.* (2010), indican una asociación entre el pH y la biomasa de pasturas consociadas. En el mismo sentido, la relación lineal e inversa entre estas variables, en pastizales naturales creciendo en suelos de aptitud ganadera de la Pampa Deprimida, ha sido reportada por Costa y García (1997). Sin embargo, los resultados obtenidos en este trabajo, referidos a esta temática, son los primeros antecedentes obtenidos en pasturas templadas creciendo en suelos sódicos.

Tabla 9. Modelos predictivos de la biomasa acumulada (BA) obtenidos con el procedimiento STEPWISE usando las propiedades edáficas como predictoras en el sitio experimental Ayacucho, en las estaciones de crecimiento primavera y otoño y para dos tratamientos de fertilización nitrogenada (N0 y N250).

Estación	N	Modelo			
			Coefficiente	P	R ²
Primavera	N250	Intercepto	3,28	<0,0001	0,53
		pH	-0,22	0,0151	
		Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa	2,81	0,0395	
	N0	Intercepto	3,73	0,0001	0,41
		pH	0,35	0,0006	
Otoño	N250	Intercepto	1,29	<0,0001	0,36
		RAS	-0,02	0,0015	

En lo que respecta a la inclusión de la humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa (contenido hídrico a capacidad de campo) en el modelo predictivo de la BA podría interpretarse que la variabilidad de este parámetro origina cambios en la capacidad de retención hídrica del suelo. Por lo tanto podría generarse variabilidad en la producción de pasto (Vásquez *et al.*, 2001).

Por otra parte en primavera, en el tratamiento N0, también el pH fue la propiedad edáfica que explicó significativamente la variabilidad de la BA promedio (Tabla 9). No obstante, hay que recordar, que para este tratamiento en el ANVA de la BA se determinó interacción entre los factores de tratamiento rebrote y ZP (Tabla 4; Capítulo 2). Por lo tanto, a pesar que el pH explica la variabilidad de la BA no fue posible la delimitación de ZP para esta estación de crecimiento y tratamiento de fertilización.

En otoño, en el tratamiento N250, la variable que se asoció significativamente con la BA fue el RAS (Tabla 9). Cuando el RAS es elevado provoca en el crecimiento dos efectos negativos. El primero, atribuible a la salinidad (CEe y RAS se asociaron significativamente, R²= 0,75, datos no mostrados). Esta propiedad edáfica, que en este experimento mostró variabilidad (Anexo; Tabla I), cuando es elevada provoca un incremento del potencial osmótico de la solución del suelo en la zona radical (Vásquez *et al.*, 2001). En consecuencia, las plantas deben destinar parte de sus recursos al ajuste del potencial osmótico de sus raíces, disminuyendo la cantidad de asimilados destinados al crecimiento. El segundo efecto negativo del RAS es el asociado al sodio presente en estos suelos y mencionado anteriormente. Por último, en esta estación de

crecimiento, en el tratamiento N0, no se pudo determinar que propiedades edáficas explican la variabilidad de la producción de BA.

En Balcarce, en el mismo sentido que en los resultados obtenidos en las regresiones simples, los coeficientes de determinación hallados en las regresiones múltiples fueron inferiores a los determinados en el sitio experimental Ayacucho (Tabla 10 y 9 respectivamente). En primavera N250 y primavera N0, las propiedades edáficas que se relacionaron con la BA fueron la CE_e y la A_r en el primer caso y la humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa en el segundo (P=0,09)(Tabla 10). En otoño, al agregar N, la humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa y el RAS definieron la producción de BA (R²=0,19). En esta última estación de crecimiento, sin el agregado de este N, la propiedad edáfica que definió la productividad fue el pH (Tabla 10). Sin embargo, el grado de ajuste entre estas variables fue extremadamente bajo (R²=0,08) similarmente a lo reportado en el sitio experimental Ayacucho donde no se pudo determinar un modelo que explique la variabilidad de la producción de BA (Tabla 9).

La inclusión de la humedad gravimétrica, el pH y el RAS en los diferentes modelos fue discutida previamente. Asimismo, la participación de la A_r en el modelo predictivo de BA en primavera N250 (Tabla 10) estaría relacionada con las propiedades físicas de esta fracción. La ausencia de carga en su superficie y su menor superficie específica respecto a la A_s y el L_i determinan que la A_r no interactúa con el sodio provocando así un efecto amortiguador de la dispersión de los agregados provocado por este elemento (Oster *et al.*, 1980).

En los tratamiento N0, los modelos predictivos de la producción de pasto, tanto en primavera como en otoño, podrían haber mejorado si se hubiera incluido en N inorgánico como predictor debido a que este parámetro es el segundo factor limitante del crecimiento de las plantas luego del agua (Sinclair y Rufty, 2012). Sin embargo, como fue mencionado anteriormente, los nitratos no fueron incluidos en el análisis porque no se relacionarían con la CE_e.

Tabla 10. Modelos predictivos de la biomasa acumulada (BA) obtenidos con el procedimiento STEPWISE usando las propiedades edáficas como predictoras en el sitio experimental Balcarce, en las estaciones de crecimiento primavera y otoño y para dos tratamientos de fertilización nitrogenada (N0 y N250).

Estación	N	Modelo			
			Coefficiente	P	R ²
Primavera	N250	Intercepto	1,21	<0,001	0,36
		CEe	0,05	0,0001	
		A _r	0,02	0,06	
	N0	Intercepto	0,77	0,12	0,18
		Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa	0,01	0,09	
Otoño	N250	Intercepto	1,14	0,13	0,19
		Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa	-0,01	0,04	
		RAS	0,01	0,03	
	N0	Intercepto	1,51	0,11	0,08
		pH	-0,06	0,09	

3.3.2. Variabilidad espacial de las propiedades de sitio

En los dos sitios experimentales el semivariograma que mejor describió la variabilidad espacial de la CEa, medida hasta los 30 cm de profundidad, fue el esférico (Figura 32) ya que presentó el R² más alto y el CME más bajo (datos no mostrados). La CEa mostró diferentes rangos de dependencia espacial en los sitios experimentales evaluados. Este comportamiento podría deberse a las características intrínsecas de cada potrero en particular (Rao *et al.*, 1985). El rango de CEa fue mayor en el sitio Ayacucho (Figura 32a) respecto al sitio Balcarce (Figura 32b), posiblemente por cambios paulatinos en las propiedades edáficas del sitio Ayacucho. En cambio, en el sitio experimental Balcarce el menor rango estaría asociado a cambios más abruptos en las propiedades del suelo en cortas distancias (Saldaña *et al.*, 1998). Esto podría explicar, en parte, porque en este sitio experimental las asociaciones entre BA y propiedades de suelo halladas fueron más débiles que las determinadas en el sitio Ayacucho (Tabla 10 y 9 respectivamente).

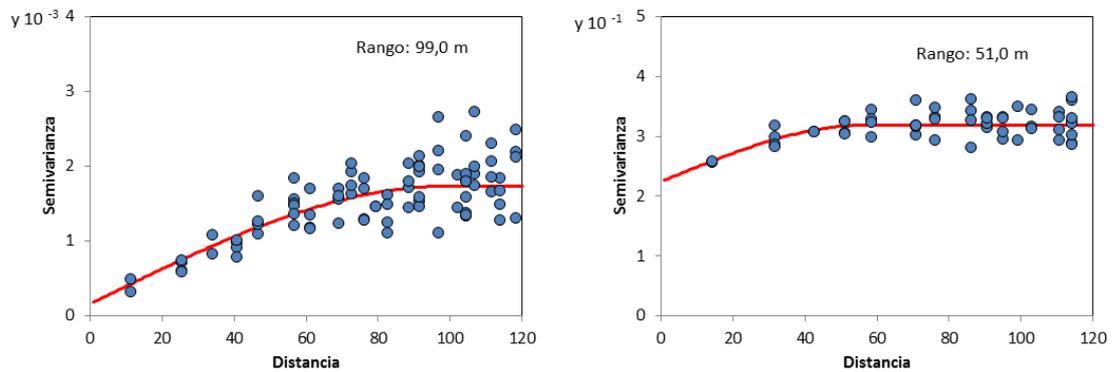


Figura 32. Semivariograma experimental (●) y teórico (—) de la CEa medida hasta los 30 cm de profundidad en (a) el sitio experimental Ayacucho y (b) en el sitio experimental Balcarce.

Utilizando los parámetros ajustados de los semivariogramas esféricos y mediante kriging ordinario se realizaron los mapas de distribución espacial de la CEa, para los sitios Ayacucho y Balcarce (Figuras 33 y 34, respectivamente). En los mismos se puede observar que la CEa presenta variabilidad espacial y que a su vez tiene una distribución heterogénea.

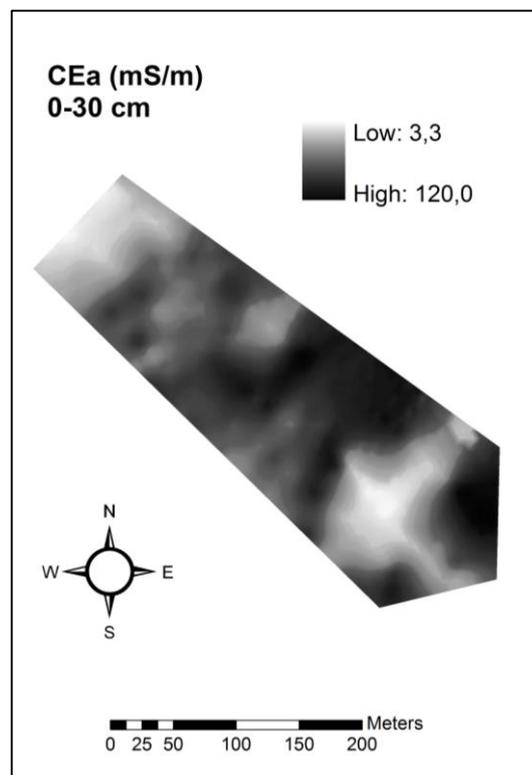


Figura 33. Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) medida hasta los 30 cm de profundidad en el sitio experimental Ayacucho.

Asimismo, en las Figuras 35 y 36 se presentan los mapas de distribución espacial de los atributos topográficos derivados de los modelos de elevación digitales: Elev, Pen, CT y el ITH para los sitios Ayacucho y Balcarce respectivamente. Estos atributos son de importancia porque numerosos estudios ha encontrado que los mismos pueden ser predictores de las propiedades del suelo ya que afectan la redistribución de partículas minerales y MO (Boettinger, 2010; Florinsky, 2012) influyendo de manera indirecta la disponibilidad de agua en el suelo. Además, los atributos topográficos también influyen, de manera directa, en la disponibilidad hídrica ya que afectan los flujos de agua dentro de un área determinada. En este sentido, Serrano *et al.* (2013), hallaron una asociación, elevada y significativa, entre la elevación del terreno y el contenido de humedad del suelo ($R^2=0,66$). Por estas dos razones, estudios realizados en diferentes cultivos, años y condiciones climáticas muestran que puede existir relaciones espaciales entre el rendimiento y diversos atributos topográficos (Kaspar *et al.*, 2003). Por ejemplo, en suelos ganaderos, las variaciones de microaltimetría pueden ser suficientes para crear condiciones de salinidad en los perfiles de suelo respectivos. Por lo tanto, se manifiestan diferencias, entre sectores altimétricos, en la productividad de pasturas de agropiro (Martin *et al.*, 2008) y de pastizales naturales (Martin *et al.*, 2007).

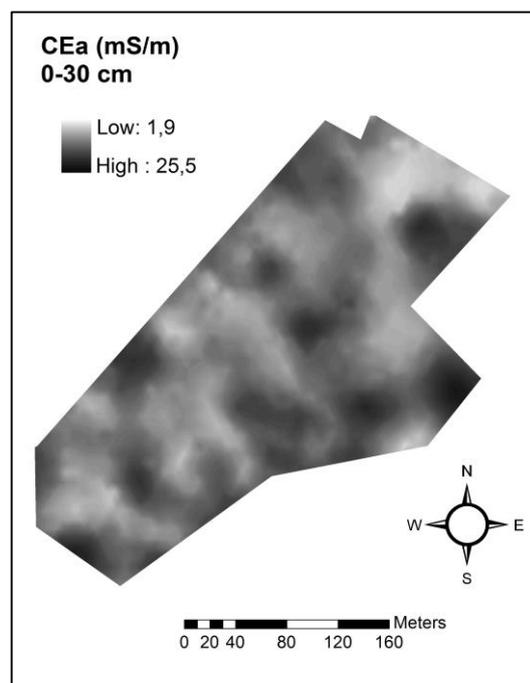


Figura 34. Mapa de conductividad eléctrica aparente (CEa) medida hasta los 30 cm de profundidad en el sitio experimental Balcarce.

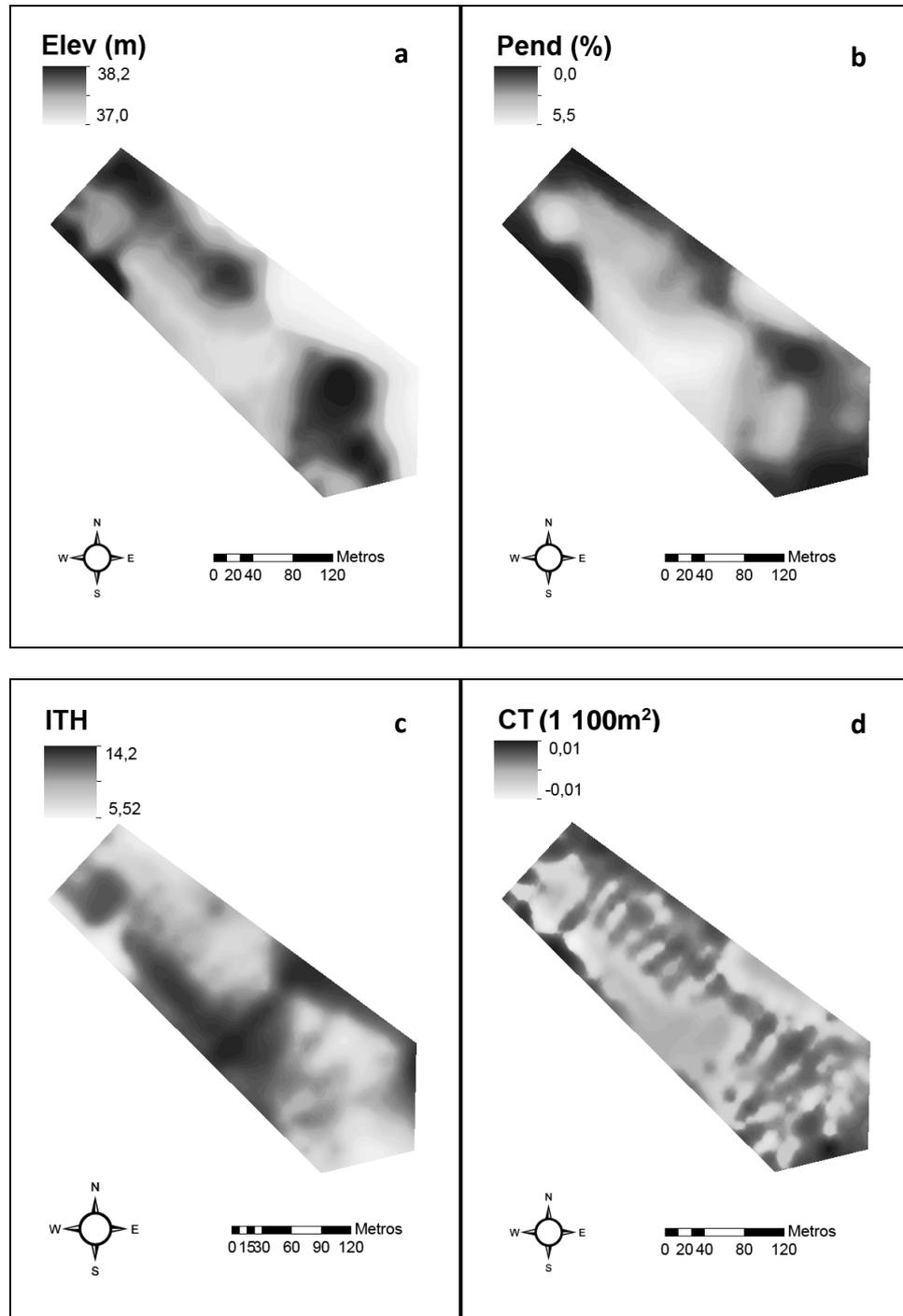


Figura 35. Mapas de contorno de los atributos del terreno (a) elevación (Elev), (b) pendiente (Pend), (c) índice topográfico de humedad (ITH) y (d) curvatura del terreno (CT) del sitio experimental Ayacucho.

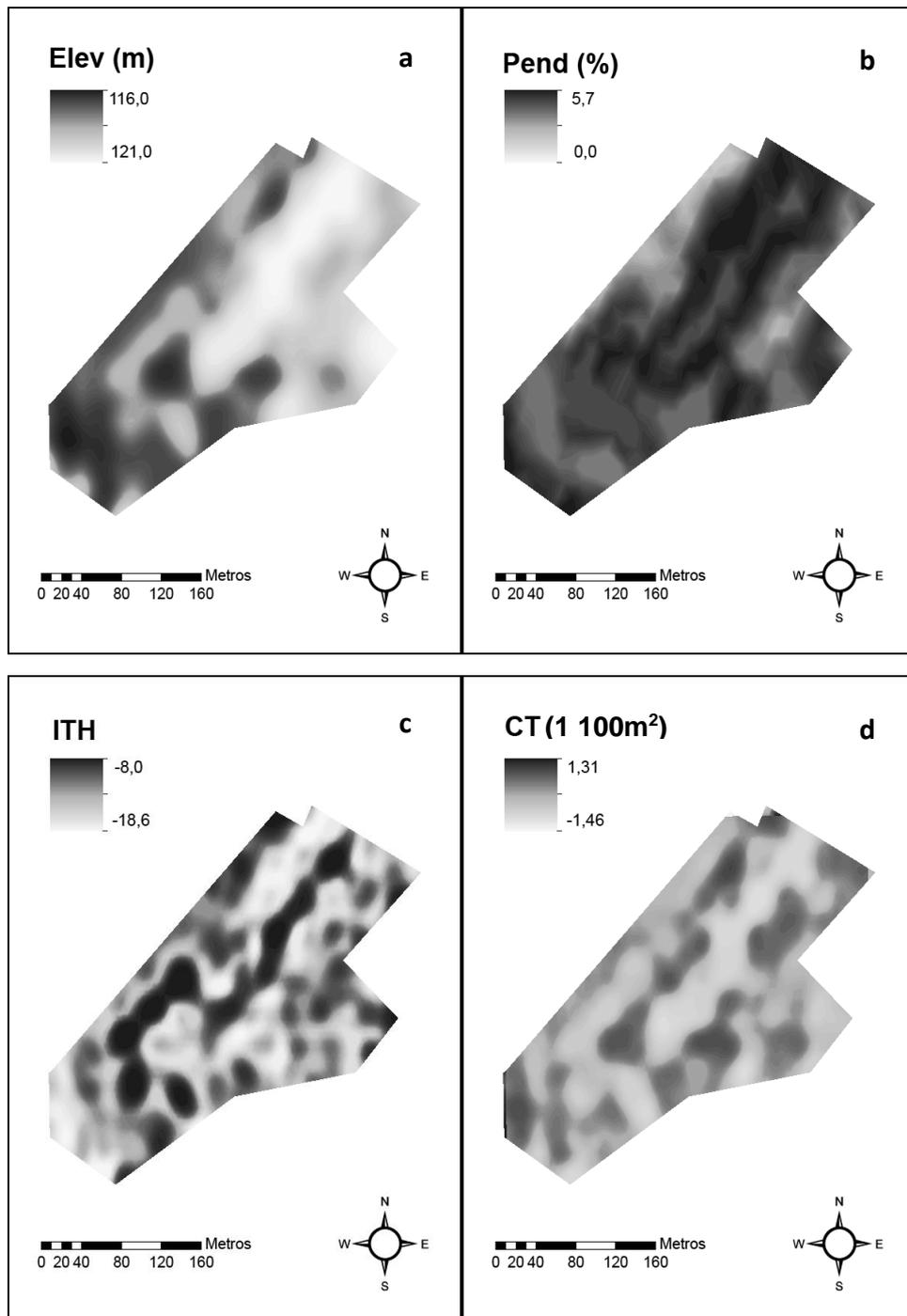


Figura 36. Mapas de contorno de los atributos del terreno (a) elevación (Elev), (b) pendiente (Pend), (c) índice topográfico de humedad (ITH) y (d) curvatura del terreno (CT) del sitio experimental Balcarce.

3.3.3. Relación entre las propiedades de sitio y las propiedades de suelo que afectan la variabilidad de la biomasa acumulada

Las propiedades de suelo más relevantes para explicar la variabilidad de la BA fueron presentadas en las Tablas 9 y 10. En las Tablas 11 y 12 se muestran los predictores más importantes, de estas propiedades edáficas, para los sitios experimentales Ayacucho y Balcarce respectivamente. En todos los casos la CEa y la Elev fueron las propiedades de sitio más importantes para la predicción. De manera similar a lo descrito en el presente trabajo, Vitharana *et al.* (2008), en suelos agrícolas de Bélgica, utilizaron la CEa y la Elev para determinar la variabilidad de la textura y el pH. En cambio, en suelos ganaderos, Moral y Serrano (2019) utilizaron solo la CEa como variable auxiliar para generar mapas de diferentes propiedades de suelo.

Por otra parte, en el sitio Ayacucho, para las diferentes propiedades edáficas, el % de varianza explicada fue superior al hallado en el sitio Balcarce. Esto se explicaría, como fue mencionado anteriormente, debido a la elevada heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo de este último sitio experimental la cual no habría sido detectada porque la grilla no tuvo la cantidad de muestras suficiente para cumplir este objetivo.

Numerosos estudios ha encontrado que los índices de topografía permiten predecir la variabilidad de las propiedades del suelo (Boettinger, 2010; Florinsky, 2012). Sin embargo, en este trabajo otros atributos topográficos, diferentes de la Elev, fueron predictores menos importantes o tuvieron nula participación en la predicción (Tablas 11 y 12). En este sentido, Pei *et al.* (2010) encontraron que el ITH no siempre es válido para predecir las propiedades del suelo, especialmente en áreas con poco relieve donde el movimiento de agua puede ser de tipo divergente. Asimismo, Wang *et al.* (2001) hallaron que los atributos topográficos secundarios no son predictores eficientes de las propiedades del suelo en áreas con pocas diferencias de pendiente, como son las localizadas en los suelos ganaderos de la Pampa Deprimida.

Tabla 11. Porcentaje de varianza explicada e importancia de las propiedades de sitio como predictores de las propiedades de suelo en el sitio experimental Ayacucho. Valores elevados de porcentaje de incremento de cuadrado medio del error (CME) indican los predictores más importantes.

Parámetro edáfico	% de varianza explicada	Propiedades de sitio	% incremento CME
pH	43,6	CEa	13,4
		Elev	10,9
		Pend	2,9
RAS	19,6	CEa	12,9
		Elev	8,2
		CT	1,2
Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	15,9	CEa	12,2
		Elev	9,3

Tabla 12. Porcentaje de varianza explicada e importancia de las propiedades de sitio como predictores de las propiedades de suelo en el sitio experimental Balcarce. Valores elevados de porcentaje de incremento de cuadrado medio del error (CME) indican los predictores más importantes.

Parámetro edáfico	% de varianza explicada	Propiedades de sitio	% incremento CME
CEe	7,3	Elev	12,3
		CEa	3,7
A _r	-32,7	Pend	2,2
pH	30,9	CEa	9,7
		Elev	9,6
RAS	19,9	Elev	11,2
		CEa	7,2
Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	-18,5	CEa	5,7

En el sitio experimental Ayacucho, para las diferentes propiedades de suelo, la relación entre los valores estimados por el algoritmo RF y los valores observados fue significativa ($P < 0,10$) (Figura 37). Además, el índice RRSME, que permite evaluar la calidad de la predicción, para el pH, la humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica y el RAS fue 6,0; 11,6 y 29,4% respectivamente (Figura 37). Según lo establecido por Jamieson *et al.* (1991) estos valores de RRSME indicarían que los modelos generados son excelentes para las dos primeras propiedades de suelo y aceptable en el caso del RAS. Por lo tanto, la CEa y la Elev permitirían describir la variabilidad de aquellas propiedades edáficas más relevantes para la producción de Festuca alta. En el mismo sentido, en la región pampeana, Castro Franco *et al.* (2015),

también usando propiedades de sitio y mediante modelos RF, predijeron efectivamente propiedades de suelo (MO y arcilla). Sin embargo, estos autores realizaron sus experimentos en suelos agrícolas, los cuales tienen diferentes características a los empleados en este estudio. En lo referido a suelos de aptitud ganadera, Li *et al.* (2017) utilizaron como propiedades de sitio diversos índices espectrales para estimar; mediante RF, el índice de área foliar de pastizales naturales de China. En lo referido al uso de CEA y atributos topográficos en suelos donde crecen pasturas o pastizales naturales solo han sido utilizados por separado para caracterizar algunas propiedades de suelo (Corwin *et al.*, 2003a; Guretzky *et al.*, 2004; Márquez da Silva *et al.*, 2009; Serrano *et al.*, 2010, Serrano *et al.*, 2016). Por lo tanto, el uso en conjunto de estas propiedades de sitio no ha sido reportado. En este marco, estos resultados, representan un aporte original al conocimiento.

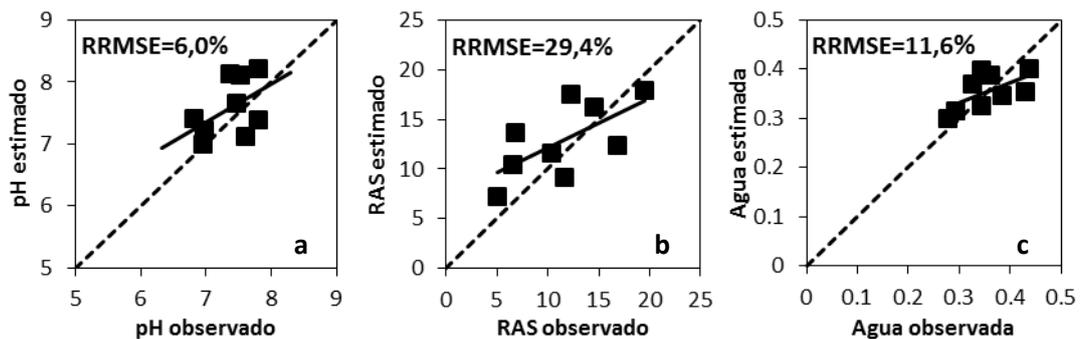


Figura 37. Valores observados de (a) pH, (b) relación de absorción de sodio (RAS) y (c) humedad gravimétrica a 1500 kPa de tensión mátrica versus valores estimados por el algoritmo *Random Forest* (RF) a partir de las propiedades de sitio de mayor importancia para el sitio experimental Ayacucho. La línea punteada indica el ajuste 1:1. Las ecuaciones de regresión lineal, los R^2 y las significancias para las distintas propiedades de suelo fueron: pH = $0,61x + 3,07$, $R^2 = 0,24$, $P = 0,09$; RAS = $0,50x + 7,10$; $R^2 = 0,43$, $P = 0,05$; Agua = $0,41x + 0,21$ $R^2 = 0,37$, $P = 0,08$.

Si bien en Balcarce se hallaron relaciones entre BA y propiedades de suelo (principalmente en N250 y primavera) (Tabla 10), el grado de ajuste entre valores estimados y observados de las propiedades edáficas fue bajo y no significativo ($P > 0,10$) excepto para el pH ($P = 0,02$) (Figura 38). Además, los RRMSE fueron más elevados que aquellos determinados en el sitio Ayacucho (Figura 38 y 37, respectivamente). Por lo tanto, la variabilidad de la mayoría de las propiedades de suelo definidas como las más importantes para la producción de pasto no pudo ser predicha eficientemente mediante las propiedades de sitio utilizadas en este sitio experimental.

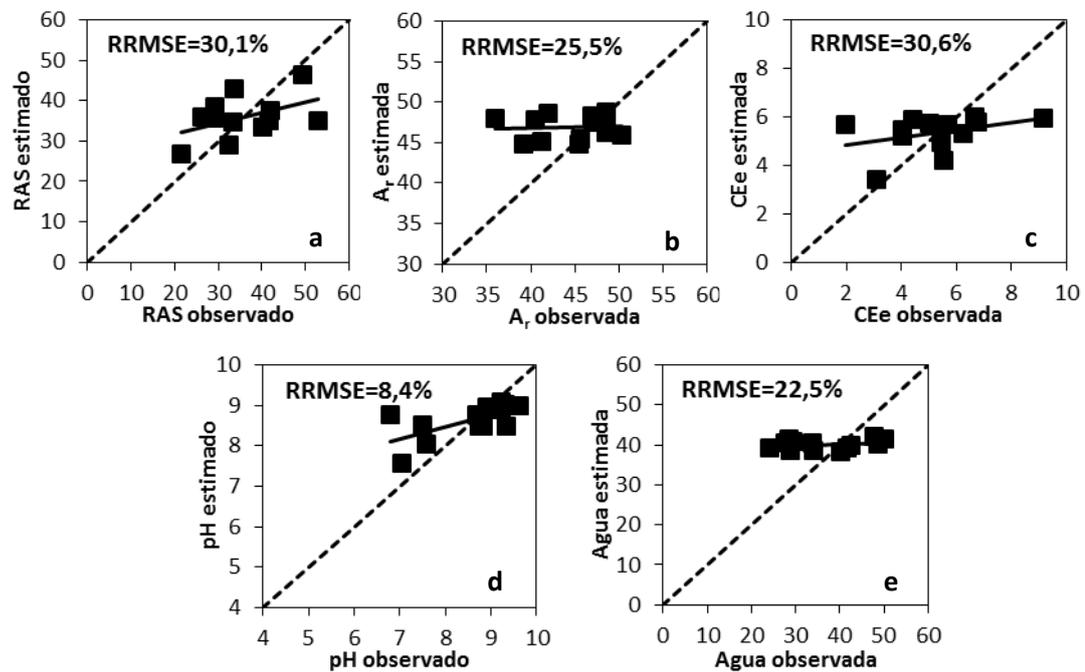


Figura 38. Valores observados de (a) relación de absorción de sodio (RAS), (b) arena, (c) conductividad eléctrica del extracto (CEe), (d) pH y (e) humedad gravimétrica a 0,33 kPa de tensión mátrica versus valores estimados por el algoritmo *Random Forest* (RF) a partir de las propiedades de sitio de mayor importancia para el sitio experimental Balcarce. La línea punteada indica el ajuste 1:1. Las ecuaciones de regresión lineal, los R^2 y las significancias para las distintas propiedades de suelo fueron: RAS = $0,25x + 26,7$, $R^2 = 0,20$, $P = 0,14$; $A_r = 0,02x + 45,7$, $R^2 = 0,005$, $P = 0,80$; CEe = $0,15x + 4,50$, $R^2 = 0,14$, $P = 0,21$; Agua = $0,03x + 38,8$, $R^2 = 0,06$, $P = 0,41$ y pH = $0,29x + 6,13$, $R^2 = 0,41$, $P = 0,02$.

3.3.4. Delimitación de zonas de manejo

Para el sitio experimental Balcarce, en el capítulo 2, se estableció una elevada inestabilidad temporal en la producción de pasto (Figura 18, 19 y 20). De manera coincidente, en este capítulo, se determinó que el grado de ajuste de las relaciones entre BA y propiedades de suelo fue bajo (Tabla IV y V; anexo y Tabla 9). Estos resultados determinaron que no hubiera un patrón espacial coincidente entre BA y propiedades de sitio. Asimismo, el IVN no logró caracterizar adecuadamente la BA (Capítulo 2; Figura 27 y 29). Por lo tanto, no se realizará la delimitación de zonas de manejo en este sitio experimental. En el sitio Ayacucho, a pesar de establecer un modelo predictivo de la BA en primavera, en el tratamiento N0, el patrón de variación de la BA no fue consistente entre rebrotes impidiendo la delimitación de ZP (Capítulo 2) lo que limita, como en el caso de Balcarce, la delimitación de ZM bajo las condiciones del presente trabajo.

Las propiedades de suelo más relevantes para explicar la variabilidad de la BA en Ayacucho fueron el pH, el RAS y la humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa (Tabla 9).

En la Tabla 10 se muestran los predictores más importantes (CEa y Elev) de estas propiedades edáficas. Por lo tanto, se delimitaron ZM a partir de estas propiedades de sitio y el IVN, en primavera en el tratamiento N250 (Figura 39) y solo las propiedades de sitio en otoño (Figura 40), ya que no se determinó relación significativa entre el IVN y la BA en esta estación de crecimiento (Figura 28).

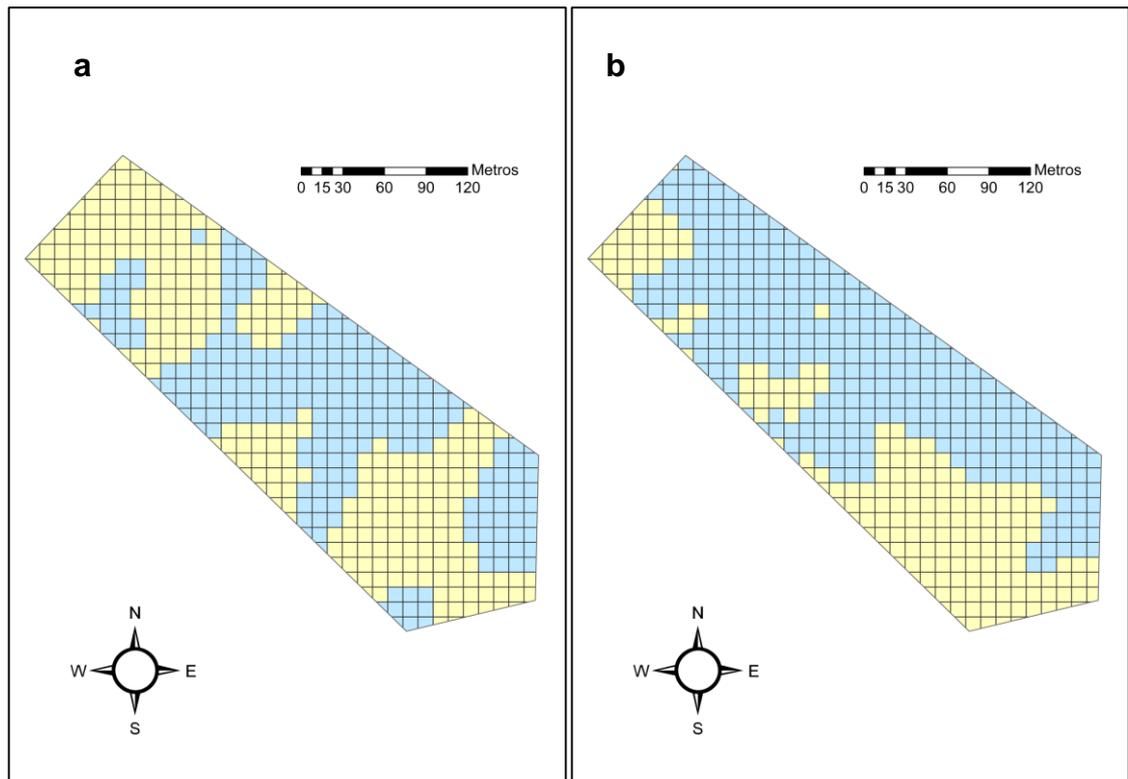


Figura 39. Patrón espacial de distribución de (a) las zonas de manejo (ZM) y (b) las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en primavera. Las zonas fueron delimitadas mediante clasificación clúster multivariada: (■) zona alta (ZA) y (■) zona baja (ZB).

Las ZM (Figuras 39a y 40a) son visualmente similares a las ZP delimitadas en el capítulo 2, las cuales en este capítulo se muestran en las Figuras 39b y 40b. La zona de manejo alta (ZA) estuvo asociada a áreas de mayor elevación y baja CEa. Esto, como fue explicado previamente, se debió a que bajos valores de CEa se asocian con menor pH y RAS y posiblemente mayor disponibilidad de agua en el perfil de suelo. Asimismo, aquellas áreas ubicadas en posiciones más elevadas presentarían mayor distancia entre la superficie del suelo y la napa freática. Por lo tanto, los procesos de ascenso capilar no serían relevantes y las sales pueden ser lixiviadas hacia los horizontes profundos (Rubio y Taboada, 2013).

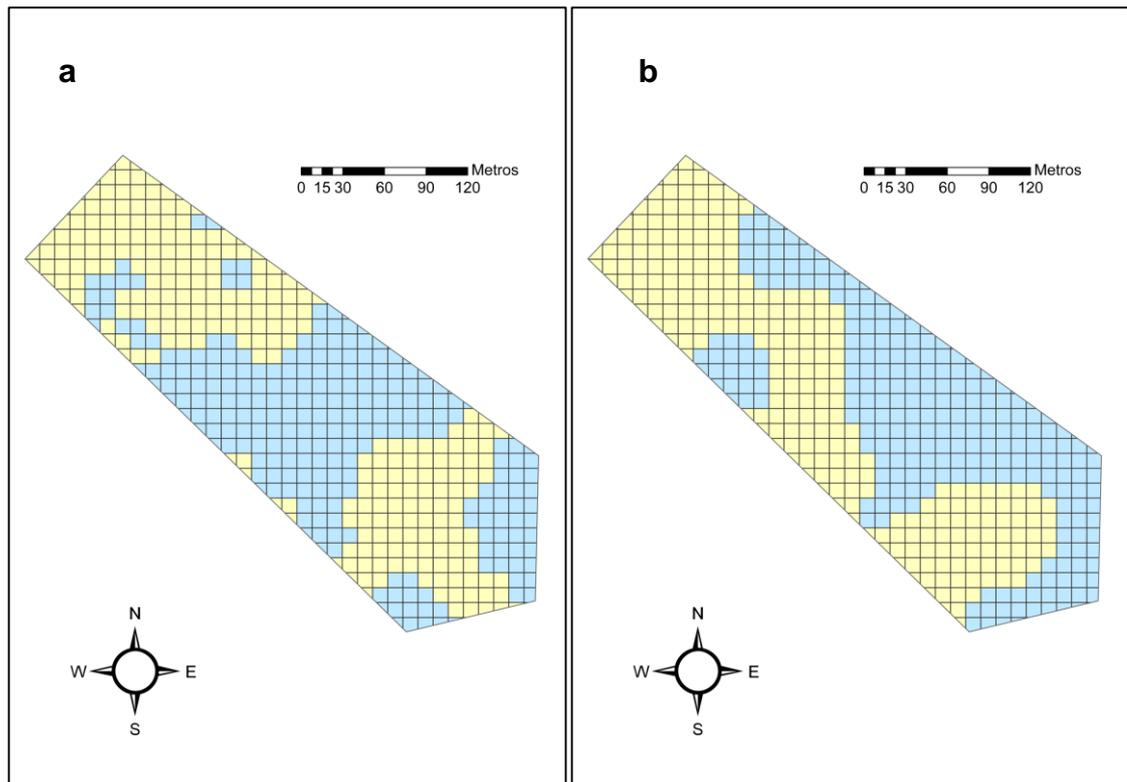


Figura 40. Patrón espacial de distribución de (a) las zonas de manejo (ZM) y (b) las zonas productivas (ZP) en el sitio experimental Ayacucho en el tratamiento N250 en otoño. Las zonas fueron delimitadas mediante clasificación clúster multivariada: (■) zona alta (ZA) y (■) zona baja (ZB).

La precisión global para las estaciones de crecimiento primavera y otoño fue de 60 y 67% respectivamente (Tabla 13). En este sentido, Kitchen *et al.* (2005), en cultivos agrícolas, hallaron valores similares de acuerdo entre ZP delimitadas mediante mapas de rendimiento y ZM delimitadas a partir de la CEa y la Elev. Estos autores indican que si la precisión global es alrededor del 60-70% el nivel de acuerdo es prometedor, considerando el hecho de que existen muchos otros factores limitantes del rendimiento no relacionados con las propiedades del suelo que afectan la CEa y la elevación. En el mismo sentido, los valores del índice k, fueron aceptables según la escala propuesta por Landis y Koch (1977) (Tabla 13) y similares a los reportados por Kitchen *et al.* (2005).

Tabla 13. Grado de acuerdo entre los mapas de ZP y ZM para el tratamiento N250 en el sitio experimental Ayacucho medido mediante la Precisión global (%) y el Índice Kappa (k).

Estación de crecimiento	Precisión global (%)	Índice Kappa*
-------------------------	----------------------	---------------

Primavera	60,0	0,23
Otoño	67,0	0,30

*Valoración del acuerdo mediante el índice Kappa. 0,00 – 0,20: Leve; 0,21 – 0,40 Aceptable; 0,41 – 0,60 Moderada; 0,61 – 0,80 Considerable; 0,81 – 1,00 Casi Perfecto.

Georgi *et al.* (2018) indican que el IVN podría ser un buen complemento de la CEa para delimitar ZM. Sin embargo, en este experimento, como se mencionó anteriormente, en otoño no se incluyó al IVN en la delimitación de ambientes debido a que las relaciones entre este parámetro y la BA estandarizada no fueron significativas (Figura 27). Por otra parte, en primavera, la inclusión del IVN podría haber afectado la delimitación debido a que la precisión global y el índice k fueron menores respecto a los observados en otoño (Tabla 13). Esto podría deberse a que la relación entre el IVN y la BA en PRIM15, aunque significativa, presentó un grado de ajuste relativamente bajo ($R^2=0,29$ en N250)(Figura 26a). Este bajo coeficiente de determinación podría deberse a que, en esta estación de crecimiento, las imágenes satelitales aún eran de 30 m de resolución, disminuyendo así la eficacia de la predicción de la BA.

Para determinar diferencias significativas entre las ZM se realizó un ANVA a la BA en función de cada una de estas zonas. En primavera, no se presentó interacción entre los factores de tratamiento ZM y rebrote ($P=0,32$) ni efecto del rebrote ($P=0,82$) (Tabla 14). En cambio, se registró efecto de la zona ($P<0,001$) (Tabla 14). En otoño, la BA estandarizada tampoco presentó interacción entre los factores de tratamiento ($P=0,86$) (Tabla 14). Por otra parte, se hallaron diferencias significativas entre ZM ($P<0,001$) (1,07 y 0,92 de BA estandarizada, en ZA y ZB respectivamente) (Tabla 14). En el mismo sentido, en pasturas creciendo en ambientes mediterráneos, Serrano *et al.* (2019), delimitaron, mediante índices espectrales y CEa, tres zonas (zonas de alto, medio y bajo potencial) hallándose, entre estas, diferencias en la producción de biomasa. Un análisis diferente fue realizado, en este mismo ambiente, por Moral *et al.* (2019). Estos autores generaron ZM a partir de propiedades de suelo y no incluyeron el IVN en la delimitación. Esta medida indirecta de la producción de biomasa la usaron solo para validar los resultados obtenidos en la delimitación.

En otoño la producción de BA estandarizada para las ZA y ZB no varió conforme la pastura creció en OTO16 y OTO17 (Tabla 14). Esto se debió a las condiciones nutricionales no limitantes y al adecuado suministro de agua para el crecimiento de las pasturas durante ambos rebrotes (Figura 14). En cambio, en primavera, se determinaron algunas deficiencias hídricas, las cuales fueron levemente superiores en

PRIM16 (Figura 12) lo que podría explicar las mayores diferencias entre ZM (0,23 y 0,38 de BA estandarizada para PRIM15 y PRIM16 respectivamente (Tabla 14). En este sentido, Fraisse *et al.* (2001) y Schepers *et al.* (2004) indican que, en cultivos agrícolas, los rendimientos de las ZM varían de una campaña a otra en función de la magnitud del estrés hídrico.

Tabla 14. Biomasa acumulada (BA) estandarizada de una pastura de festuca alta creciendo en el sitio experimental Ayacucho en los rebrotes PRIM15, PRIM16, OTO16 y OTO17, para el tratamiento de fertilización N250 y dos zonas de manejo (ZM): zona alta (ZA) y zona baja (ZB).

		BA estandarizada N250	
		OTO	PRIM
PRIM15	ZA	---	1,12
	ZB	---	0,89
PRIM16	ZA	---	1,18
	ZB	---	0,80
OTO16	ZA	1,06	---
	ZB	0,92	---
OTO17	ZA	1,07	---
	ZB	0,91	---
Medias	PRIM15	---	1,01
	PRIM16	---	0,99
	OTO16	0,99	---
	OTO17	0,99	---
	ZA	1,07	1,15
	ZB	0,92	0,85
Fuente de variación		ANVA	
rebrote		ns	ns
ZM		***	***
ZM x rebrote		ns	ns

*** $P < 0,01$; ** $P < 0,05$, * $P < 0,10$; ns: no significativo.

En Ayacucho se destaca que tanto el análisis de los datos de la BA estandarizada por estación de crecimiento (Tabla 14) como el análisis integrado (primavera y otoño, conjuntamente) (datos no mostrados) presentaron diferencias significativas entre ZM. Esto resulta relevante puesto que un alto grado de estabilidad temporal facilita la aplicación de tecnologías de manejo sitio específico (Xu *et al.*, 2006). Sin embargo, la variación espacial de la productividad no siempre es consistente debido a que está influenciada por variaciones estacionales, generando dificultades en la interpretación agronómica de los mapas de rendimiento (McEntee *et al.*, 2019). Por lo tanto, sería necesaria una mayor cantidad de mapas de BA para confirmar este resultado.

3.4. CONCLUSIONES DEL CAPITULO

En el sitio Ayacucho, en las condiciones del presente trabajo, se recopilaron evidencias para:

No rechazar la hipótesis 4a) y 4b), las cuales postulaban que, bajo condiciones de elevada oferta de N, en primavera y otoño respectivamente, el patrón de variación espacial de la productividad está asociado a la variabilidad espacial de propiedades edáficas, las cuales pueden ser predichas mediante la CEa y los atributos topográficos. Asimismo, la información analizada contribuye con evidencias para **rechazar la hipótesis 5a) y no rechazar la hipótesis 5b)**, las cuales postulaban que, en primavera y otoño respectivamente, ante deficiencias de N el patrón de variación espacial de la productividad no está asociado a la variabilidad espacial de propiedades edáficas. Como ya fue mencionado, a pesar de establecer un modelo predictivo de la BA en primavera, en el tratamiento N0, el patrón de variación de la BA no fue consistente entre rebrotes impidiendo la delimitación de ZP (Capítulo 2) lo que limita la delimitación de ZM bajo las condiciones del presente trabajo. Por lo tanto, en Ayacucho, solo se testeó la hipótesis 6 cuando las condiciones nutricionales no fueron limitantes (N250) concluyéndose que **se recopilaron evidencias para no rechazar dicha hipótesis**, pudiéndose delimitar ZM tanto en primavera como en otoño. Asimismo, dada la similitud de la delimitación entre estaciones de crecimiento, la misma podría mantenerse a lo largo del año.

Para el sitio experimental Balcarce, se recopilaron evidencias para **rechazar la hipótesis 4 y no rechazar la hipótesis 5 independientemente de la estación de crecimiento evaluada**. Como ya fuera mencionado, estos resultados condicionan la delimitación de ZM (como es el caso del tratamiento de fertilización N0 del sitio Ayacucho). Asimismo, el IVN no logró caracterizar adecuadamente la BA (Capítulo 2; Figura 27 y 29). Por lo tanto, la hipótesis 6 no fue testeada en este sitio experimental, y deberíamos asumir la posibilidad de implementar una de las premisas fundamentales de la AP **“Dada la evidente y amplia variación temporal dentro del lote, la estrategia optima de la aversión al riesgo es el manejo uniforme”**

CAPÍTULO 4

CONSIDERACIONES FINALES

4.1. CONCLUSIONES RESPECTO DEL PLANTEO ORIGINAL

La presente tesis se propuso avanzar en el desarrollo de conocimientos y técnicas que aporten a posicionar los principios del MA en los sistemas pastoriles. A partir de la interpretación de la información disponible se intentó establecer si la combinación de propiedades de sitio e información espectral puede ser una herramienta confiable para la creación de ZM en suelos de aptitud ganadera, utilizados tradicionalmente para la cría y recría bovina. Esto no ha sido reportado en la literatura y por lo tanto, era oportuno iniciar esta línea de investigación.

En el sitio experimental Ayacucho los resultados hallados permitieron caracterizar adecuadamente, mediante información espectral, la BA creciendo en primavera con y sin limitantes de N, En cambio, en otoño, el IVN no se relacionó con la BA en ninguno de los tratamientos de fertilización evaluados.

Se generaron aportes originales a la comprensión del efecto de las propiedades edáficas sobre la variabilidad de la productividad de gramíneas forrajeras templadas creciendo en suelos de aptitud ganadera de la región pampeana, especialmente cuando las condiciones nutricionales no son limitantes. La información compilada permitió relacionar, mediante un análisis RF, dichas propiedades de suelo con propiedades de sitio, las cuales son fáciles de medir y de bajo costo, lo que proporcionó la información necesaria para identificar ZM. La delimitación de ambientes en los sistemas pastoriles es el primer paso para aumentar la productividad y rentabilidad de los sistemas, ya que permitiría un uso más eficiente de los insumos y recursos ambientales, reduciendo a la vez los riesgos de impacto ambiental. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el análisis de la variabilidad de la BA se realizó a partir de solo dos rebrotes primaverales y dos otoñales y que la toma de decisiones de manejo a partir de la interpretación de pocos mapas de rendimiento ha sido calificada como riesgosa.

Por otra parte, en el sitio experimental Balcarce, el grado de ajuste de las asociaciones entre BA y propiedades de suelo fue bajo. En el mismo sentido, no se pudo determinar una relación consistente entre propiedades de sitio y características edáficas y entre BA e índices espectrales. Por lo tanto, se estableció, en los dos tratamientos de fertilización, la imposibilidad de delimitar ZM en este sitio experimental. Estos resultados podrían haber sido producto de múltiples causas. En primer lugar, la ya mencionada escasa cantidad de mapas de BA. Además, no habría que descartar que la grilla de muestreo, para este sitio experimental, no haya tenido la suficiente

cantidad de muestras para representar la variabilidad de la producción de pasto y/o de las propiedades edáficas evaluadas y/o qué condiciones climáticas extremadamente adversas hayan provocado, de un rebrote a otro, cambios en la estructura espacial de la pastura.

Finalmente, como fue mencionado en el capítulo tres, la inclusión de formas asimilables de N edáfico como variables predictoras podría haber mejorado la predicción de la variabilidad de la BA acumulada pero no fueron incluidas porque no influirían en la CEa (Johnson *et al.*, 2001; Peralta *et al.*, 2013a) ya que en los suelos estudiados los contenidos de nitratos bajo pasturas son bajos y poco variables (Prado *et al.*, 2001). Sin embargo, a elevadas concentraciones de nitratos en suelo, los mismos si tendrían relación con la CEa (Zhang y Wienhold, 2002; citado por Peralta *et al.*, 2013a). Por lo tanto, al no haber medido este parámetro edáfico queda la incógnita de si también podría haberse mejorado la delimitación de ambientes en el tratamiento NO.

4.2. POSIBLES INVESTIGACIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO

Numerosos aspectos de interés no han sido dilucidados en este trabajo y al mismo tiempo surgen nuevos interrogantes a resolver en investigaciones futuras: En primer lugar, a partir del análisis de la información colectada en los dos sitios experimentales se podría presuponer que la complejidad edáfica e hidrológica de los suelos de la Pampa Deprimida no permite que los resultados sean extrapolables de un sitio a otro. Por lo tanto, serían necesarias investigaciones en los diferentes tipos y/o complejos de suelos de aptitud ganadera de la región para despejar dudas acerca de esta cuestión.

La variabilidad de la producción de pasto se evaluó indirectamente mediante el IVN obtenido de imágenes satelitales de mediana resolución (10 y 30 m). Con respecto al uso de esta herramienta para la toma de decisiones, el incremento de la cantidad de imágenes para analizar podría mejorar la estimación de la biomasa producida. Además, es factible que en el futuro cercano la resolución de las imágenes, disponibles aumente, optimizando así la delimitación de ambientes. Por otra parte, y con el mismo objetivo, otras capas de información de elevada resolución, tales como aquellas generadas por sensores proximales, pueden reemplazar a las imágenes satelitales en el proceso de delimitación.

Los resultados obtenidos en el sitio Ayacucho sugieren la necesidad de contemplar variaciones intralote para la recomendación de estrategias de fertilización nitrogenada en primavera, debido a que el aporte de N de forma homogénea puede llevar tanto a que zonas de mejor aptitud no manifiesten sus ventajas productivas así como que, en otras zonas, se desaprovechen insumos por su menor aptitud. Por lo tanto, una propuesta sería realizar, en esta estación de crecimiento, ensayos de dosis variables de fertilizantes nitrogenados dentro de cada ZM, ya que en este estudio solo se analizó la relación entre ambientes y dos niveles de disponibilidad de N. En sistemas pastoriles, no han sido reportados trabajos que analicen esta interacción, la cual permitiría desarrollar curvas de respuesta para ajustar recomendaciones de fertilización nitrogenada por ZM. Además, como complemento de lo anteriormente mencionado, sería recomendable realizar un análisis del beneficio económico correspondiente a las dosis variables usadas.

Por otra parte, en este estudio se trabajó con N debido a que las características edafoclimáticas de la región promueven elevadas respuestas a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Dado los resultados obtenidos con este nutriente sería recomendable iniciar líneas de investigación que contemplen otros nutrientes donde la

disponibilidad edáfica de los mismos no alcance para abastecer los requerimientos de las plantas (e.g: P).

Por último, en este trabajo, fueron utilizadas pasturas de agropiro y festuca dada la importancia de estas especies en los sistemas ganaderos de la Pampa Deprimida. No obstante, esta tesis sienta las bases para futuros estudios en otras gramíneas o leguminosas, que también tienen relevancia en los sistemas pastoriles de la región pampeana.

Referencias y Anexo

5.1. REFERENCIAS

- Aggelopoulou, K.; Castrignanò, A.; Gemtos, T.; De Benedetto, D. 2013. Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. *Comput. Elect. Agric.* 90: 119-130.
- Agnusdei, M.G.; Colabelli, M.E.; Fernández Grecco, R.C. 2001. Crecimiento estacional de forraje de pasturas y pastizales naturales para el sudeste bonaerense.. CERBAS, INTA EEA Balcarce. *Boletín Técnico*; 152. 47p.
- Agnusdei, M.G.; Assuero, S.G.; Lattanzi, F.A.; Marino, M.A. 2010. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 88: 215-230.
- Albarenque, S.; Basso, B.; Caviglia, O.; Melchiori, R. 2016. Spatio-temporal nitrogen fertilizer response in maize: Field study and modeling approach. *Agron. J.* 108: 1-13.
- Alesso, C.A. 2014. Variabilidad espacial y temporal de rendimientos de maíz (*zea mays* L.) y soja [*glycine max* (L.) Merr.] y de las propiedades del suelo en las condiciones edafoclimáticas de la pampa llana santafesina. Tesis Doctor en Ciencias Agrarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. 118 p.
- Andrade, F.H. 2016. Los desafíos de la agricultura. *International Plant Nutrition Institute*, Acassuso, Argentina, 136 p.
- Barbieri, P.A.; Echeverría, H.E.; Sainz Rozas, H.R.; Picone, L.I. 2006. Nitrogen use efficiency from urea applied to a tall wheatgrass (*Elytrigia elongata*) prairie in a sodic soil. *Aust. J. Exp. Agric.* 46: 535–543.
- Basso, B.; Ritchie, J.T.; Cammarano, D.; Sartori, L. 2011. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *Eur. J. Agron.* 35: 215-222.
- Batista, W.B.; Taboada; M.A.; Lavado; R.S.; Perelman, S.B.; León, R.J.C. 2005. Asociación entre comunidades vegetales y suelos de pastizal de la Pampa Deprimida. En: Oesterheld, M. et al.; (eds.) *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando J.C León*. Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires, Argentina, pp. 113-129.
- Bélanger, G.; Cambouris, A.N.; Parent, G.; Mongrain, D.; Ziadi, N. 2017. Biomass yield from an old grass field as affected by sources of nitrogen fertilization and management zones in northern areas. *Can. J. Plant Sci.* 97: 53–64.
- Bernardi, A.C.C.; Bettiol, G.M.; Ferreira, R.P.; Santos, K.E.L.; Rabello, L.M.; Inamasu, R.Y. 2016. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. *Precis. Agric.* 17: 737-752.
- Birrell, S.J.; Sudduth, K.A.; Borgelt, S.C. 1996. Comparison of sensors and techniques for crop yield mapping. *Comput. Elect. Agric.* 14: 215-233.
- Blackmore, S. 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Comput. Elect. Agric.* 26: 37-51.

- Bocchi, S.; Castrignanó, A. 2007. Identification of different potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis. *Field Crops Res.* 102: 85-197.
- Boettinger, J.L. 2010. Digital soil mapping: Bridging Research, Production, and Environmental Application. Springer Science & Business Media, pp.17-27
- Borrajó, C.I.; Alonso, S.I. 2014. Tasa de elongación foliar en materiales de agropiro alargado: efecto de la fenología y el agregado de nitrógeno. En: 37° Congreso Argentino de Producción Animal, Actas, Buenos Aires, Argentina. Oct 20-22.
- Bullock, D.S.; Bullock, D.G. 2000. From agronomic research to farm management guidelines: A primer on the economics of information and precision technology. *Precis. Agric.* 2: 71-101.
- Castro-Franco, M.; Costa, J.L.; Peralta, N.; Aparicio, V. 2015. Prediction of soil properties at farm scale using a model-based soil sampling scheme and random forest. *Soil Sci.* 180: 74-85.
- Chi, B.L.; Bing, C.S.; Walley, F.; Yates, T. 2009. Topographic indices and yield variability in a rolling landscape of Western Canada. *Pedosphere.* 19: 362-370.
- Chuvioco, E. 2002. Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde El espacio. Ariel Ciencia: Barcelona, pp. 1-87.
- 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 perennial pastures according to nitrogen availability and growing season. *Crop Pasture Sci.* 70: 908-916.
- Cicore, P.L.; Sánchez, H.R.; Peralta, N.R.; Castro Franco, M.; Aparicio, V.C.; Costa, J.L. 2015. Determinación de ambientes edáficos en suelos de la pampa Deprimida mediante la conductividad eléctrica aparente y la elevación. *Ci. Suelo.* 33: 229-237.
- Cicore, P.L.; Tancredi, M.; Berone, G.D.; Peralta, N.R.; Marino, M.A.; Costa, J.L. 2017. Fertilización nitrogenada en agropiro alargado en función de zonas de manejo delimitadas mediante la conductividad eléctrica aparente. Resúmenes de conferencias y posters. Simposio Fertilidad 2017 "Más allá de la próxima cosecha". International Plant Nutrition Institute (IPNI) Latin America-Southern Cone – Fertilizar Asociación Civil. Actas, pp. 157-162.
- Cid, M.S.; Fernández Grecco, R.C.; Oesterheld, M.; Paruelo, J.M.; Cibils, A.F.; Brizuela, M.A. 2011. Grass-fed beef production systems of Argentina's flooding pampas: Understanding ecosystem heterogeneity to improve livestock production. *Outlook Agr.* 40: 181-189.
- Conforti, P. 2011. Looking ahead in world food and agriculture: Perspectives to 2050. FAO, Rome, pp 11-56.
- Córdoba, M.; Bruno, C.; Costa, J.L.; Balzarini, M. 2013. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Comp. Electron. Agric.* 97: 6-14.
- Corwin, D.L.; Kaffkab, S.R.; Hopmans, J.W.; Morid, Y.; Van Groenigen, J.W.; Van Kessel, C....; Osterf, J.D. 2003. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma.* 114: 231-259.
- Corwin, D.L.; Lesch, S.M. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Part II. Case study. *Comput. Elect. Agric.* 46: 135-152.

- Corwin, D.L.; Lesch, S.M.; Shouse, P.J.; Soppe, R.; Ayars, J.E. 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agron. J.* 95: 352-364.
- Costa, J.L.; García, F.O. 1997. Respuesta de un pastizal natural a la fertilización con fósforo y nitrógeno en un natracuol. *RIA.* 28: 31-39.
- Cox, M.S.; Gerard, P.D. 2007. Soil management zone determination by yield stability analysis and classification. *Agron. J.* 99: 1357-1365.
- Crescimanno, G.; Iovino, M.; Provenzano, G. 1995. Influence of salinity and sodicity on structural and hydraulic characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1701-1708.
- Cutler, D.R.; Edwards, T.C.; Beard, K.H.; Cutler, A.; Hess, K.T... Lawler, J.J. 2007. Random forests for classification in ecology. *Ecology.* 88: 2783-2792.
- De Prado, M.R.; Echeverría, H.E.; Lattanzi F.A. 2001. Evolución otoño-invernal del nitrógeno mineral en un Natracuol típico bajo festucas con diferente hábito de crecimiento. *Ci suelo.* 19: 39-46.
- Di Marco, O.N.; Harkes, H.; Agnusdei, M.G. 2013. Calidad de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*) en estado vegetativo en relación con la edad y longitud de las hojas. *RIA.* 39:105-106.
- Dobermann, A.P.; Adamchuk, J.L.; Simbahan, V.I.; Ferguson, G.C. 2003. Classification of crop yield variability in irrigated production fields. *Agron. J.* 95: 1105-1120.
- Doerge, T.A. 1999. Management zone concepts. Potash & Phosphate Institute, International Plant Nutrition Institute, Norcross, GA. Site-Specific Management Guidelines; 2. 4p.
- Doll, U.M.; Deregibus, V.A. 1986. Efecto de la exclusión del pastoreo sobre el sistema subterráneo de un pastizal templado húmedo. *Turrialba* 36: 337-344.
- Dusseux, P.; Hubert-Moy, L.; Corpetti, T.; Vertès, F. 2015. Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass. *Int. J. Appl. Earth Obs.* 38: 72-77.
- Echeverría, H.E.; Bergonzi, R. 1995. Estimación de la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. CERBAS. INTA, EEA Balcarce. Boletín Técnico N°135. 15p.
- Edirisinghe, A.; Clark, D.; Waugh, D. 2012. Spatio-temporal modelling of biomass of intensively grazed perennial dairy pastures using multispectral remote sensing. *Int. J. Appl. Earth. Obs.* 16: 5-16.
- Environmental System Research Institute. 2014. [en línea] ArcGis 10.2 – Arc Map vers.10.2. [en línea] ESRI <<http://www.esri.com/>>. [consulta: Mayo 2015].
- Farahani, H.J.; Flynn, R.L. 2007. Map quality and zone delineation as affected by width of parallel swaths of mobile agricultural sensors. *Precis. Agric.* 96: 151-159.
- Fernández Grecco, R.C. 2013. Dinámica del crecimiento de una pastura de agropiro alargado de acuerdo con la época de fertilización nitrogenada. *RIA.* 39: 162-168.
- Florin, M.J.; Mcbratney, A.B.; Whelan, B.M. 2009. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. *Eur. J. Agron.* 30: 212-219.
- Florinsky I.V. 2012. Digital terrain analysis in soil science and geology. Academic Press, pp.145-149.

- Flynn, E.S.; Dougherty, C.T.; Wendroth, O. 2008. Assessment of pasture biomass with the normalized difference vegetation index from active ground-based sensors. *Agron. J.* 100: 114-121.
- Fraisse, C.W.; Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans ASAE* 44: 155-166.
- Frame, J. 1993. Herbage mass. In: Davies, A. et al. (eds.) *Sward Measurement Handbook*. 2^o ed. BGS Publishing, Reading, UK. pp 39-67.
- Fridgen, J.J.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Drummond, S.T.; Wiebold, W.J.; Fraisse, C.W. 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agron. J.* 96: 100-108.
- Gallardo, A. 2006. Geoestadística. Asociación Española de Ecología Terrestre. [en línea] <<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?id=431>>. [consulta: Marzo 2015].
- Gambaudo, S.; Fontanetto, H.; Sosa, N.; Becaría, G.; Albrecht, J.; Meroi, G. 2010. Aplicación de enmiendas de suelo por ambientes. Criterios a tener en cuenta para el cálculo de la dosis variable. 10^o Curso Internacional de Agricultura de Precisión. 14 al 16 de julio 2010. Ediciones INTA. EEA Manfredi, pp. 163-168.
- Gee, G.W.; Baudert, J.W. 1986. Particle size analyses. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. 2^o ed. ASA. SSSA. Agronomy Monograph; 9, pp.383-411.
- Genuer, R.; Poggi, J.M.; Tuleau-Malot, C. 2010. Variable selection using random forests. *Pattern Recognit. Lett.* 31: 2225-2236.
- Georgi, C.; Spengler, D.; Itzerott, S.; Kleinschmit, B. 2018. Automatic delineation algorithm for site-specific management zones based on satellite remote sensing data. *Precis. Agric.* 19: 684-707.
- Guretzky, J.A.; Moore, K.J.; Burras, C.L.; Brummer, E.C. 2008. Distribution of legumes along gradients of slope and soil electrical conductivity in pastures. *Agron. J.* 96: 547-555.
- Hannaway, D.B.; Daly, C.; Halbleib, M.D.; James, D.; West, C.P.; Volenec, J.J.; ... Johnson S. 2009. Development of Suitability Maps with Examples for the United States and China. In: H.A. Fribourg, D.B. Hannaway, C.P. West, editors, *Tall Fescue for the Twenty-first Century*,. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. Agronomy Monograph; 53, pp. 33-47.
- Harmony, K.R.; Moore, K.J.; George, J.R.; Brummer, E.C.; Russell, J.R. 1997. Determination of pasture biomass using four indirect methods. *Agron. J.* 89: 665-672.
- He, Y.; Guo, X.; Wilmshurst, J.F. 2009. Reflectance measures of grassland biophysical structure. *Int. J. Remote Sens.* 30: 2509-2521.
- Heil, K.; Schmidhalter, U. 2012. Characterization of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site. *Comput. Geosci.* 39: 98-110.
- Heil, K.; Schmidhalter, U. 2017. The Application of EM38: Determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. *Sensors.* 17: 2540-2584.

- Hossain, M.B.; Lamb, D.W.; Lockwood, P.V.; Frazier, P. 2010. EM38 for volumetric soil water content estimation in the root-zone of deep vertosol soils. *Comp. Electron. Agric.* 74: 100-109.
- Hutchinson, G.K.; Richards, K.; Risk, W.H. 2000. Aspects of accumulated heat patterns (growing degree-days) and pasture growth in Southland. *Proc N Z Grassl Assoc.* 62: 81-85.
- Insua, J.R.; Utsumi, S.A.; Basso, B. 2019. Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PLoS ONE* 14: e0212773.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 2015. Cartas de suelo de la República Argentina, Provincia de Buenos Aires. Carta Balcarce 3757-31-3 y Carta Las Armas 3757-20-1 [en línea] <<http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm>>. [consulta: Noviembre 2015].
- Jamieson, P.D.; Porter, J.R.; Wilson, D.R. 1991. A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* 27: 337-350.
- Jaynes, D.B.; Colvin, T.S. 1997. Spatio-temporal variability of corn and soybean yield. *Agron. J.* 89: 30-37.
- Jaynes, D.B.; Kasper, T.C.; Colvin, T.S.; James, D.E. 2003. Cluster analysis of spatio-temporal corn yield patterns in an Iowa field. *Agron. J.* 95: 574-586.
- Jensen, J.R., 1996. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, pp. 250-251.
- Johnson, C.K.; Doran J.W.; Duke, H.R.; Wienhold, B.J.; Eskridge, K.M.; Shanahan, J.F. 2001. Field-scales electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1829-1837.
- Kaspar, T.C.; Colvin, T.S.; Jaynes, D.B.; Karlen, D.L.; James, D.E.; Meek, D.W. 2003. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precis. Agric.* 4: 87-101.
- Kemerer, A. 2011. *Procedimientos para la delimitación de zonas de manejo mediante imágenes satelitales*. 1º ed. Ediciones INTA: Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 79 p.
- King, J.; Dampney, P.; Lark, R.; Wheeler, H.; Bradley, R.; Mayr, T. 2005. Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. *Precis. Agric.* 6: 167-181.
- Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A.; Myers, D.B.; Drummond, S.T.; Hong, S. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.* 46: 285-308.
- Kravchenko, A.N.; Bullock, D.G. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92: 75- 83.
- Kuang, B.; Mahmood, H.S.; Quraishi, M.Z.; Hoogmoed, W.B.; Mouazen, A.M.; Van Henten, E.J. 2012. Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: A review. *Adv. Agron.* 114: 155-223.

- Landis, J.R.; Koch, G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 33: 159-174.
- Lark, R.M. 1998. Forming spatially coherent regions by classification of multivariate data: an example from the analysis of maps of crop yield. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 12: 83-98.
- Lark, R.M.; Stafford, J.V. 1997. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Ann. Appl. Biol.* 130: 111-21.
- Lavado, R.S.; Taboada, M.A. 1988. Soil water, salts, and sodium dynamics in a Natraquoll of Argentina. *Catena*. 15: 577-594.
- Lavado, R.S.; Taboada, M.A. 2009. Alteraciones de la fertilidad de los suelos. El halomorfismo, la acidez y las inundaciones. Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires. 160 p.
- Leroux, C.; Jones, H.; Taylor, J.; Clenet, A.; Tisseyre, B. 2018. A zone-based approach for processing and interpreting variability in multitemporal yield data sets. *Comp. Electron. Agric.* 148: 299-308.
- Li, Y.; Shi, Z.; Li, F.; Li, H.Y. 2007. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Comput. Electron. Agric.* 56: 174-186.
- Li, Z.; Xin, X.; Tang, H.; Yang, F.; Chen, B.; Zhang, B. 2017. Estimating grassland LAI using the Random Forests approach and Landsat imagery in the meadow steppe of Hulunber, China. *J. Integr. Agric.* 16: 286-297.
- Liu, J.; Pattey, E.; Nolin, M.; Miller, J.; Ka, O. 2008. Mapping within-field soil drainage using remote sensing and DEM and apparent soil electrical conductivity. *Geoderma*. 143: 261-272.
- Lobell, D.B.; Cassman, K.G.; Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Env. Resour.* 34: 179-204.
- Mallarino, A.P. 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1473-1481.
- Marques Da Silva, J.R.; Peça, J.O.; Serrano, J.M.; Carvalho, M.J.; Palma, P.M. 2008. Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. *Precis. Agric.* 9: 209-229.
- Marques Da Silva, J.R.; Silva, L.L. 2008. Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosyst. Eng.* 101: 183-190.
- Martín, B.; Sosa, O.; Montico, S.; Zerpa, G. 2007. Relación entre las unidades de vegetación y la microtopografía en un pastizal ubicado en un sector mal drenado de Argentina. *Cienc. Investig. Agrar.* 34: 103-113.
- Martín, B.; Sosa, O.; Zerpa, G.; Acebal, M.; Magra, G. 2008. Características de una pastura en implantación en sectores con diferencias microaltimétricas en un área Deprimida. *Revista Científica Agropecuaria*. 12: 25-33.
- Mazzanti, A.; Castaño, J.; Sevilla, G.; Orbea, J. 1992. Características agronómicas de especies y cultivares de gramíneas y leguminosas forrajeras adaptadas al sudeste de la Provincia de Buenos Aires. Manual de descripción. CERBAS. INTA. EEA Balcarce. Buenos Aires, Argentina 28p.

- McEntee, P.J.; Bennett S.J.; Belford, R.K. 2019. Mapping the spatial and temporal stability of production in mixed farming systems: an index that integrates crop and pasture productivity to assist in the management of variability. *Precis. Agric.* 21:77-106.
- Moeckel, T.; Safari, H.; Reddersen, B.; Fricke, T.; Wachendorf, M. 2017. Fusion of ultrasonic and spectral sensor data for improving the estimation of biomass in grasslands with heterogeneous sward structure. *Remote Sens.* 9: 98-112.
- Moral, F.J.; Rebollo, F.J.; Serrano, J.M. 2019. Delineating site-specific management zones on pasture soil using a probabilistic and objective model and geostatistical techniques *Precis. Agric.* 18: 1-17.
- Moral, F.J.; Serrano, J.M. 2019. Using low-cost geophysical survey to map soil properties and delineate management zones on grazed permanent pastures. *Precis. Agric.* 20: 1000-1014.
- Moral, F.J.; Terrón, J.M.; Marques Da Silva, J.R. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Till. Res.* 106: 335-343.
- Mulla, D.J.; Schepers, J.S. 1997. Key processes and properties for site specific soil and crop management. In: Pierce, F.J.; Sadler, .J. (eds.). *The State of Site Specific Management for Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 1-18.
- United Nations. 2015. *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division., NY. Working Paper No. ESA/P/WP.241. 66 p.
- Oster, J.D.; Shainberg, I.; Wood, J.D. 1980. Flocculation value and gel structure of Na/Ca montmorillonite illite suspensions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:955-959.
- Pachepsky, Y.A.; Timlin, D.J.; Rawls, W.J. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Parsons, A.; Johnson, I.; Harvey, A. 1988. Use of a model to optimize the interaction between frequency and severity of intermittent defoliation and to provide a fundamental comparison of the continuous and intermittent defoliation of grass. *Grass Forage Sci.* 43: 49-59.
- Paruelo, J.M.; Oesterheld, M.; Di Bella, C.; Arzadum, M.; Lafontaine, J.; Cahuepé, M.; Rebella, C.M. 2000. Estimation of primary production of subhumid rangelands from remote sensing data. *Appl. Veg. Sci.* 3: 189-195.
- Peacock, J.M. 1976. Temperature and leaf growth in four grasses species. *J. Appl. Ecol.* 13: 225-232.
- Pei, T.; Qin, C.Z.; Zhu, A.X.; Yang, L.; Luo, M.; Li, B.; Zhou, C. 2010. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecol. Indic.* 10: 610-619.
- Peralta, N.R.; Costa, J.L. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comp. Electron. Agric.* 99: 218-226.

- Peralta, N.R.; Cicore, P.L.; Marino, M.A.; Marques Da Silva, J.R.; Costa, J.L. 2015. Use of geophysical survey as a predictor of the edaphic properties variability in soils used for livestock production. *Span. J. Agric. Res.* 13: e1103.
- Peralta, N.R.; Costa, J.L.; Balzarini, M.; Angelini, H. 2013a. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93: 205-218.
- Peralta, N.R.; Costa, J.L.; Balzarini, M.; Castro Franco, M. 2013b. Delineation of management zones with digital elevation models and soil depth. *Interciencia.* 38:1-7.
- Peralta, N.R.; Franco Castro, M.; Costa, J.L. 2011. Relación espacial entre variables de sitio y rendimiento para la delimitación de zonas de manejo mediante el uso de herramientas informáticas. En: Mendarozqueta, A.R.; et al. (eds.) 3º Congreso Argentino de Agroinformática. Córdoba, pp. 58-69.
- Pierce F.J.; Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv Agron.* 67: 1-85.
- Pierson, F.B.; Mulla, D.J. 1990. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1407-1412.
- R Development Core Team. 2013. R: A language and Environment for Statistical Computing. R [en línea]. Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. <https://www.R-project.org/>. [consulta: Marzo 2016].
- Rad, M.R.P.; Toomanian, N.; Khormali, F.; Brungard, C.W.; Komaki, C.B.; Bogaert, P. 2014. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma.* 232: 97-106.
- Rao, P.S.C.; Wagenet, R.J. 1985. Spatial variability of pesticides in field soil: methods for data analysis and consequences. *Weed Sci.* 33: 18-24.
- Rhoades, J.D.; Raats, P.A.; Prather, R.J. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:651-655.
- Rodríguez, A.; Jacobo, E. 2012. Manejo de pastizales naturales para una ganadería sustentable en la pampa Deprimida 1º ed. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires. 98 p.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W.; Harlan, J.C. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, pp. 14-44.
- Rubio, G.; Taboada, A. 2013. Árbol de decisión para diagnosticar la capacidad productiva de suelos de la región Pampeana. *Ci. Suelo.* 31: 235-244.
- Saldaña, A.; Stein, A.; Zinck, J.A. 1998. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares river (Spain). *Catena.* 33:139-53.
- Sanches, G.M.; Magalhães, P.S.G; Remacre, A.Z; Franco, H. 2018. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. *Soil Till. Res.* 175: 217-225.
- Sanderson, M.A.; Rotz, C.A.; Fultz, S.W.; Rayburn, E.B. 2001. Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agron. J.* 93: 1281-1286.

- SAS Institute INC. 2007. SAS/STAT-JMP Users Guide. Release 7. Cary, NC.USA. 506p.
- Schaefer, M; Lamb, D. 2016. A Combination of Plant NDVI and LiDAR measurements improve the estimation of pasture biomass in tall fescue (*Festuca arundinacea* var. *Fletcher*). Remote Sens. 8: 109-119.
- Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M.; Braune, M. 2008. Precision agriculture on grassland: applications, perspectives and constraints. Eur. J. Agron. 29: 59-71.
- Schepers, A.R.; Shanahan, J.F.; Liebig, M.A.; Schepers, J.S.; Johnson, S.H.; Luchiari A. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. Agron. J. 96: 195-203.
- Serrano, J.; Peca, J.; Marques Da Silva, J.; Shahidian, S. 2010. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. Comp. Electron. Agric. 73: 7-16.
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques Da Silva, J. 2016. Calibration of GrassMaster II to estimate green and dry matter yield in Mediterranean pastures: Effect of pasture moisture content. Crop Pasture Sci. 67: 780-791.
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques Da Silva, J.; Paixão, L.; Calado, J.; Carvalho, M. 2019. Integration of soil electrical conductivity and indices obtained through satellite imagery for differential management of pasture fertilization Agr. Engineering. 1(4): 567-585.
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques Da Silva, J.R. 2013. Small scale soil variation and its effect on pasture yield in southern Portugal. Geoderma. 195: 173-183.
- Serrano, L.; Filella, I.; Penuelas, J. 2000. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. Crop Sci. 40: 723-731.
- Sinclair, T.R.; Ruffy, T. 2012. Nitrogen and water resources commonly limit crop yields increases, not necessarily plant genetics. Glob. Food Sec. 1: 94-98
- Singh, G.; Williard, K.; Schoonover, J. 2016. Spatial relation of apparent soil electrical conductivity with crop yields and soil properties at different topographic positions in a small agricultural watershed. Agronomy. 6:57-79.
- So, H.B.; Aylmore, L.A.G. 1993. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. Aust J. Soil Res. 31: 761-777.
- Soil Survey Staff. 2010. Keys to soil taxonomy. [en línea]. USDA–NRCS. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050915.pdf [consulta: Marzo 2016].
- Stadler, A.; Rudolph, S.; Kupischa, M.; Langensiepen, M.; Van Der Krukb, J.; Ewert, F. 2015. Quantifying the effects of soil variability on crop growth using apparent soil electrical conductivity measurements. Europ J. Agron. 64: 8-20.
- Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R.; Wiebold, W.J.; Batchelor, W.D.; Bollero, G.A.; Bullock, D.G; ...; Thelen, K.D. 2005. Relating apparent electrical conductivity top soil properties across the North-Central USA. Comp. Electron. Agric. 46: 263-283.
- Suero, E.E.; Santa Cruz, J.N.; Busso, A.S.; Della Maggiora, A.I.; Irigoyen, A.I.; Costa, J.L. 1990. Characterization of natural resources in low watering systems of the Southeastern Pampas. RIA. 30: 71-90.

- Sumner, M. 1993. Sodic soils: new perspectives. *Aust. J. Soil Res.* 31: 683-750.
- Taboada, M.A. 2006. Soil structural behaviour in flooded and agricultural soils of the Argentine Pampas. Tesis doctoral. Institut National Polytechnique de Toulouse, Francia. 345 p.
- Taboada, M.A.; Lavado, R.S.; Svartz, H.A.; Segat, M.L. 1999. Structural stability changes in a grazed grassland Natraquoll of the Flooding Pampa of Argentina. *Wetlands.* 19: 50-55.
- Tagarakis, A.; Liakos, V.; Fountas, S.; Koundouras, S.; Gemtos, T.A. 2013. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. *Precis. Agric.* 14:18-39.
- Timlin, D. J.; Pachepsky, Y.; Snyder, V.A.; Bryant, R.B. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 764-733.
- Travasso, M.I.; Suero, E.E. 1994. Estimación de la capacidad de almacenaje de agua en suelos del sudeste bonaerense. CERBAS. INTA, EEA Balcarce Boletín Técnico N° 125. 9 p.
- Trimble. 2015. The Trimble® Juno® T41 Series [en línea] <<https://www.trimble.com/Outdoor-Rugged-Computers/junot41.aspx>> [consulta: Febrero 2015].
- Trotter, M.; Guppy, C.; Haling, R.; Trotter, T.; Edwards, C.; Lamb, D. 2014. Spatial variability in pH and key soil nutrients: is this an opportunity to increase fertiliser and lime-use efficiency in grazing systems? *Crop Pasture Sci.* 65: 817-827.
- Trotter, M.G.; Lamb, D.W.; Donald, G.E.; Schneider, D.A. 2010. Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. *Crop Pasture Sci.* 61: 389-398.
- Vázquez, P.M. 2001. Predicción de la productividad primaria de pastizales naturales de la pampa Deprimida utilizando propiedades del horizonte A. Tesis M.Sc. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Argentina. 60 p.
- Vázquez, P.M.; Costa, J.L.; Monterubbianesi, G.; Godz, P. 2001. Predicción de la productividad primaria de pastizales naturales de la pampa Deprimida utilizando propiedades del horizonte A. *Ci suelo.* 19: 136-143.
- Veris Technologies. 2014. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. [en línea] < <https://www.veristech.com/> > [consulta: Marzo 2014].
- Vitharana, U.; Van Meirvenne, M.; Simpson, D.; Cockx, L.; De Baerdemaeker, J. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma.* 143: 206-215.
- Walkley, A.; Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.
- Wang, G.; Gertner, G.; Parysow, P.; Anderson, A. 2001. Spatial prediction and uncertainty assessment of topographic factor for revised universal soil loss equation using digital elevation models. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 56:65-80.
- Whelan, B.M.; McBratney, A.B. 2000. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. *Precis. Agric.* 2: 265-279.

- Wilding, L.P.; Bouma, J.; Goss, D.W. 1994. Impact of spatial variability on interpretive modeling. In: Bryant, R.B.; Arnold, R.W. (eds). Quantitative modeling of soil forming processes ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA .SSSA Special Publication; 39, pp.61-75.
- Xu, H.W.; Wang, K.; Bailey, J.; Jordan, C.; Withers, A. 2006. Temporal stability of sward dry matter and nitrogen yield patterns in a temperate grassland. *Pedosphere*. 16: 735-744.
- Zhang, C.; Guo, X. 2008. Monitoring northern mixed prairie health using broadband satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 29: 2257-2271.
- Zhang, R.; Wienhold, B.J. 2002. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity and pH. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 63: 251-254.

5.2. ANEXO

Tabla I. Valor promedio (Prom), desvío estándar (Desv), coeficiente de variación en porcentaje (CV %), mínimo (Min), máximo (Max), de diferentes propiedades físico-químicas del suelo en el sitio experimental Ayacucho.

	Propiedad del suelo	Profundidad	Prom	Desv	CV (%)	Max	Min
Ayacucho	MO (%)	0-15	5,9	0,8	13,4	8,0	4,5
		15-30	3,1	0,5	16,6	4,1	2,2
	pH	0-15	7,2	0,7	10,0	9,0	6,2
		15-30	8,2	0,7	8,5	9,5	6,7
	CEe (dS m ⁻¹)	0-15	3,4	2,3	67,7	7,2	0,8
		15-30	4,9	2,7	55,4	8,9	0,8
	Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	0-15	33,2	3,8	11,6	40,3	27,4
		15-30	40,8	9,1	22,3	56,9	26,7
	Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	0-15	14,0	4,2	29,9	31,0	9,6
		15-30	19,1	5,7	29,9	27,5	8,9
	Arcilla (%)	0-15	21,4	2,7	12,5	26,9	17,6
		15-30	35,9	9,4	26,1	51,2	20,9
	Arena (%)	0-15	45,5	5,1	11,3	56,3	33,7
		15-30	39,1	5,8	14,7	49,9	29,8
	Limo (%)	0-15	33,0	4,9	15,0	41,4	25,7
		15-30	24,9	5,8	23,3	36,8	15,8
	RAS	0-15	8,9	4,8	53,7	20,5	2,2
		15-30	19,9	9,0	45,3	43,1	5,3
Na (mmol l ⁻¹)	0-15	18,5	13,8	74,7	46,5	2,8	
	15-30	37,2	21,6	58,0	63,0	5,1	

Tabla II. Valor promedio (Prom), desvío estándar (Desv), coeficiente de variación (CV%), mínimo (Min), máximo (Max), de diferentes propiedades físico-químicas del suelo en el sitio experimental Balcarce.

	Propiedad del suelo	Profundidad	Prom	Desv	CV (%)	Max	Min
Balcarce	MO (%)	0-15	4,5	1,4	30,6	9,0	2,2
		15-30	2,3	0,8	35,9	5,1	1,1
	pH	0-15	8,5	1,0	11,9	9,9	5,4
		15-30	9,7	0,6	6,2	10,3	6,5
	CEe (dS m ⁻¹)	0-15	5,7	2,5	44,0	11,8	0,7
		15-30	5,1	1,8	35,7	10,2	0,5
	Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	0-15	31,7	7,8	24,8	44,2	18,6
		15-30	44,9	13,4	29,9	69,4	21,4
	Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	0-15	15,5	3,3	21,4	21,4	9,1
		15-30	24,4	9,1	37,2	41,6	10,3
	Arcilla (%)	0-15	21,8	5,1	23,5	35,1	15,3
		15-30	38,3	13,5	35,1	60,0	22,2
	Arena (%)	0-15	49,5	5,3	10,7	57,7	31,6
		15-30	42,1	9,6	22,7	58,3	23,7
	Limo (%)	0-15	28,7	4,8	16,5	45,0	20,9
		15-30	19,6	4,9	24,5	34,6	11,9
	RAS	0-15	29,5	12,7	43,2	51,8	1,5
		15-30	40,7	15,9	39,0	82,9	1,4
Na (mmol l ⁻¹)	0-15	43,3	18,3	42,3	67,7	1,7	
	15-30	39,6	14,5	37,6	63,1	1,4	

Tabla III. Ecuaciones, coeficientes de determinación y significancia de las funciones ajustadas entre la biomasa acumulada (BA) y las propiedades de suelo en el tratamiento N250, en primavera y otoño, en el sitio experimental Ayacucho.

Propiedad del suelo	Rebrote	Ecuación	R ²	p-valor
MO (%)	Primavera	$0,0707x + 0,7664$	0,02	0,56
	Otoño	$0,0597x + 0,7462$	0,03	0,41
pH	Primavera	$-0,3257x + 3,5873$	0,42	0,0003
	Otoño	$-0,1679x + 2,3055$	0,31	0,0033
CEe	Primavera	$-0,0702x + 1,3797$	0,29	0,005
	Otoño	$-0,0443x + 1,2014$	0,31	0,003
Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	Primavera	$-3,3222x + 2,3154$	0,34	0,0018
	Otoño	$-1,6518x + 1,6272$	0,23	0,01
Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	Primavera	$-4,6338x + 1,8528$	0,38	0,0008
	Otoño	$-1,9042x + 1,331$	0,17	0,03
Arcilla (%)	Primavera	$-0,0243x + 1,7828$	0,18	0,03
	Otoño	$-0,0075x + 1,2313$	0,05	0,28
Arena (%)	Primavera	$0,0346x - 0,3864$	0,27	0,006
	Otoño	$0,0176x + 0,2662$	0,19	0,02
Limo (%)	Primavera	$0,0059x + 0,9137$	0,01	0,65
	Otoño	$-0,0053x + 1,1687$	0,02	0,50
RAS	Primavera	$-0,0305x + 1,52$	0,40	0,0005
	Otoño	$-0,0159x + 1,29$	0,35	0,0015
Na	Primavera	$-0,0159x + 1,2451$	0,32	0,0028
	Otoño	$-0,0064x + 1,1941$	0,31	0,0029

Tabla IV. Ecuaciones, coeficientes de determinación y significancia de las funciones ajustadas entre la biomasa acumulada (BA) y las propiedades de suelo en el tratamiento N0, en primavera y otoño, en el sitio experimental Ayacucho.

Propiedad del suelo	Rebrote	Ecuación	R ²	p-valor
MO (%)	Primavera	$0,1671x + 0,3085$	0,07	0,19
	Otoño	$0,2302x - 0,0143$	0,21	0,02
pH	Primavera	$-0,3466x + 3,7251$	0,4	0,0006
	Otoño	$-0,1175x + 1,9274$	0,08	0,17
CEe	Primavera	$-0,0692x + 1,3529$	0,23	0,01
	Otoño	$-0,0151x + 1,0886$	0,01	0,51
Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	Primavera	$-2,5102x + 1,9922$	0,16	0,04
	Otoño	$-1,2467x + 1,4868$	0,07	0,20
Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	Primavera	$-2,9607x + 1,5532$	0,13	0,07
	Otoño	$-1,5713x + 1,2854$	0,06	0,23
Arcilla (%)	Primavera	$-0,0131x + 1,4405$	0,04	0,30
	Otoño	$-0,0072x + 1,2311$	0,02	0,48
Arena (%)	Primavera	$0,0263x - 0,056$	0,13	0,07
	Otoño	$0,0111x + 0,5519$	0,04	0,34
Limo (%)	Primavera	$-0,0019x + 1,1189$	0,0008	0,89
	Otoño	$0,0005x + 1,0101$	0,0009	0,92
RAS	Primavera	$-0,0385x + 1,5965$	0,32	0,003
	Otoño	$-0,0126x + 1,2025$	0,07	0,19
Na	Primavera	$-0,0104x + 1,3546$	0,26	0,003
	Otoño	$-0,002x + 1,0806$	0,02	0,56

Tabla V. Ecuaciones, coeficientes de determinación y significancia de las funciones ajustadas entre la biomasa acumulada (BA) y las propiedades de suelo en el tratamiento N250, en primavera y otoño, en el sitio experimental Balcarce.

Propiedad del suelo	Rebrote	Ecuación	R ²	p-valor
MO (%)	Primavera	-0,0039x + 1,09	0,05	0,13
	Otoño	0,026x + 0,88	0,03	0,33
pH	Primavera	-0,07x + 1,58	0,14	0,02
	Otoño	-0,0122x + 1,08	0,007	0,61
CEe	Primavera	-0,04x + 1,20	0,20	0,004
	Otoño	-0,0038x + 1,00	0,02	0,75
Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	Primavera	-0,005x + 1,17	0,05	0,17
	Otoño	-0,005x + 1,17	0,08	0,09
Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	Primavera	-0,012x + 1,21	0,11	0,05
	Otoño	-0,007x + 1,12	0,06	0,12
Arcilla (%)	Primavera	0,0008x + 0,94	0,0009	0,86
	Otoño	-0,0039x + 1,09	0,04	0,22
Arena (%)	Primavera	8E-05x + 0,95	0,00002	0,98
	Otoño	0,0028x + 0,84	0,01	0,50
Limo (%)	Primavera	-0,0036x + 1,05	0,004	0,70
	Otoño	0,0099x + 0,74	0,06	0,13
RAS	Primavera	-0,003x + 1,09	0,06	0,13
	Otoño	0,0018x + 0,92	0,02	0,35
Na	Primavera	-0,0054x + 1,19	0,10	0,08
	Otoño	-0,0006x + 0,99	0,003	0,71

Tabla VI. Ecuaciones, coeficientes de determinación y significancia de las funciones ajustadas entre la biomasa acumulada (BA) y las propiedades de suelo en el tratamiento N0, en primavera y otoño, en el sitio experimental Balcarce.

Propiedad del suelo	Rebrote	Ecuación	R ²	p-valor
MO (%)	Primavera	$0,0438x + 0,82$	0,02	0,31
	Otoño	$0,0514x + 0,82$	0,05	0,14
pH	Primavera	$-0,0849x + 1,68$	0,10	0,05
	Otoño	$-0,0577x + 1,50$	0,08	0,09
CEe	Primavera	$-0,0259x + 1,10$	0,04	0,25
	Otoño	$-0,0248x + 1,15$	0,05	0,15
Humedad gravimétrica (%) a 0,33 kPa de tensión mátrica	Primavera	$-0,0129x + 1,46$	0,15	0,02
	Otoño	$-0,0046x + 1,19$	0,03	0,28
Humedad gravimétrica (%) a 1500 kPa de tensión mátrica	Primavera	$-0,0152x + 1,26$	0,08	0,07
	Otoño	$-0,0054x + 1,12$	0,02	0,42
Arcilla (%)	Primavera	$-0,0137x + 1,37$	0,15	0,02
	Otoño	$-0,0062x + 1,20$	0,05	0,17
Arena (%)	Primavera	$0,0176x + 0,15$	0,14	0,02
	Otoño	$0,0053x + 0,77$	0,02	0,38
Limo (%)	Primavera	$0,0165x + 0,57$	0,05	0,17
	Otoño	$0,0141x + 0,67$	0,06	0,13
RAS	Primavera	$-0,002x + 1,03$	0,0083	0,58
	Otoño	$-0,0014x + 1,06$	0,0072	0,60
Na	Primavera	$-0,0042x + 1,14$	0,05	0,14
	Otoño	$-0,0033x + 1,13$	0,05	0,15

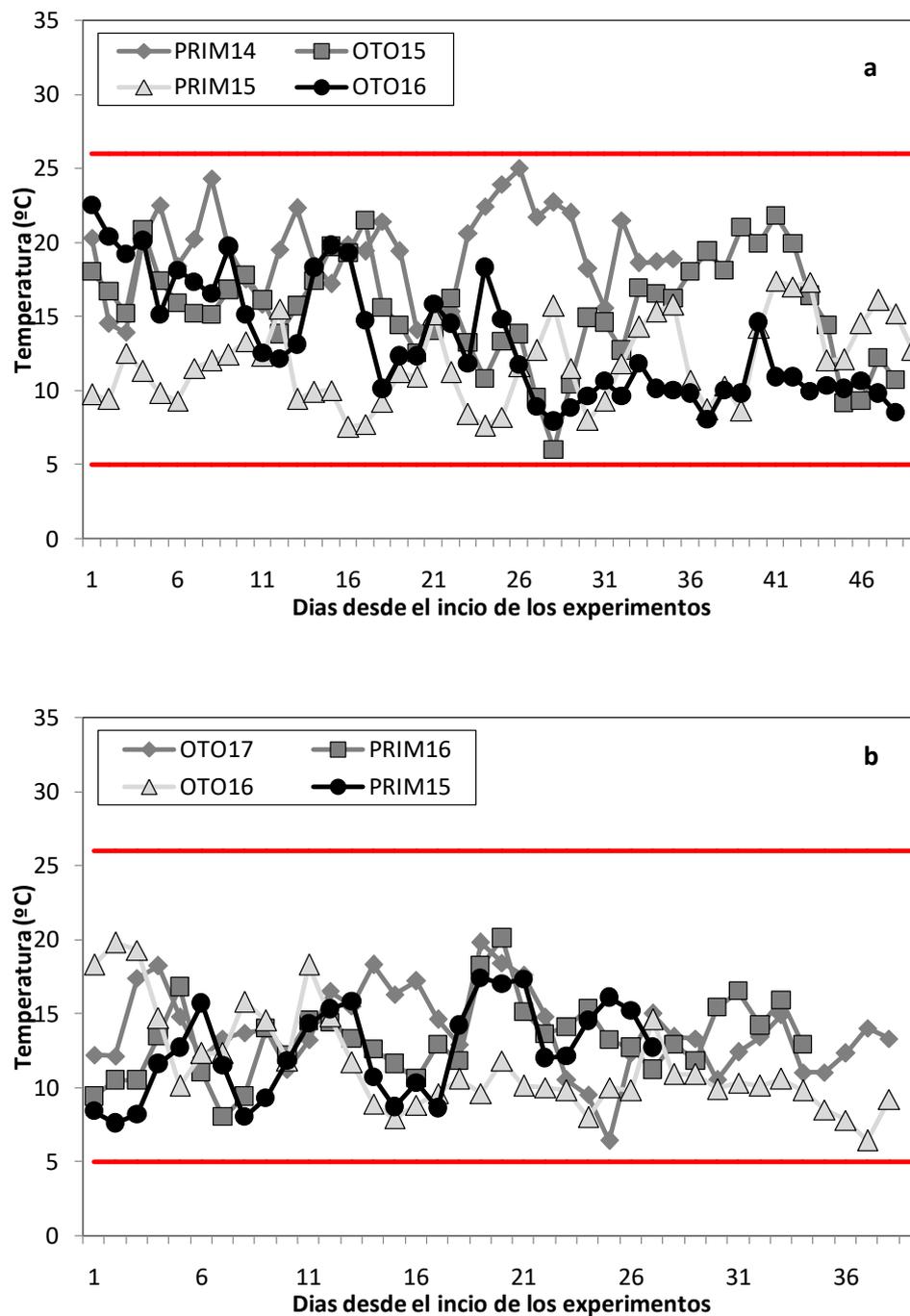


Figura I. Temperatura media del aire (°C) en los sitios experimentales (a) Balcarce y (b) Ayacucho durante los rebrotes evaluados. Las líneas rojas indican la temperatura base de crecimiento y la temperatura óptima de crecimiento.

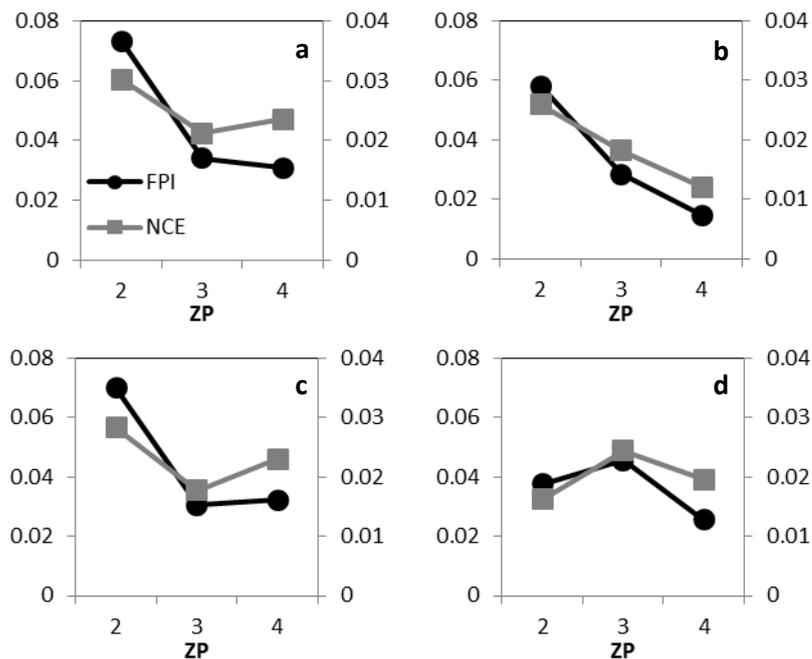


Figura II. Índice de rendimiento difuso (FPI) y Clasificación entrópica normalizada (NCE) para el sitio experimental Ayacucho en (a) Otoño N250, (b) Primavera N250, (c) Otoño N0 y (d) Primavera N0.

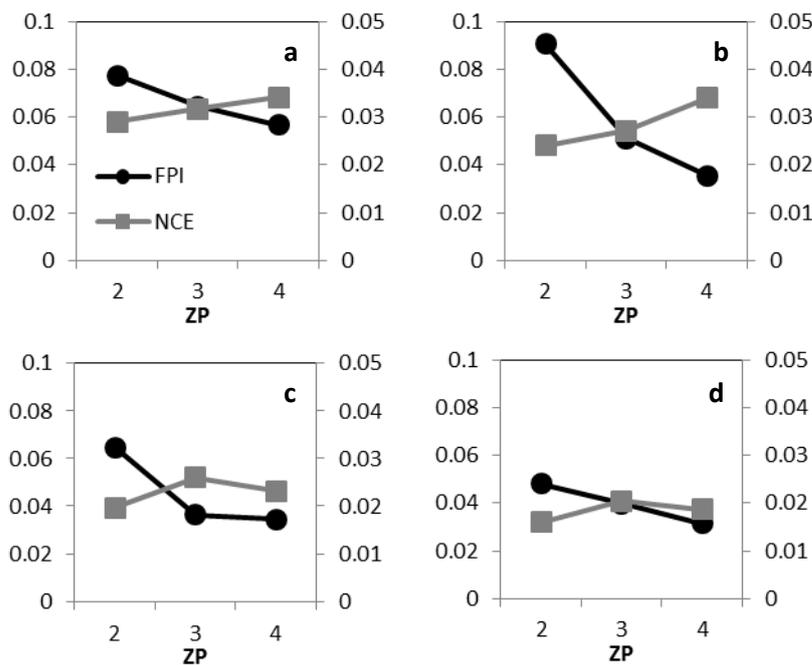


Figura III. Índice de rendimiento difuso (FPI) y Clasificación entrópica normalizada (NCE) para el sitio experimental Balcarce en (a) Otoño N250, (b) Primavera N250, (c) otoño N0 y (d) Primavera N0.