

PROPIEDADES DE SUELO Y PRODUCCIÓN DE TRIGO SEGÚN ESTRATEGIAS DE DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO

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

López de Sabando, Marcelo José

Ingeniero Agrónomo - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad
Nacional de La Plata- 2005

Lugar de trabajo: Agencia Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria San Antonio
de Areco



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



COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

Martín Díaz-Zorita

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de La Pampa (Argentina).
Magíster en Ciencias Agrarias – Universidad Nacional del Sur (Argentina).
Ph.D. en Ciencias del Suelo – University of Kentucky (USA).

Consejero de Estudios

María Elena Otegui

Profesora Titular UBA

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires (Argentina).
Magíster en Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina).
Doctor – Universidad Paris XI UFRS Orsay (Francia).
Ph.D. USDA-ARS, Morris, Minnesota. (USA).

JURADO DE TESIS

Director de tesis

Martín Díaz-Zorita

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de La Pampa (Argentina).
Magíster en Ciencias Agrarias – Universidad Nacional del Sur (Argentina).
Ph.D. en Ciencias del Suelo – University of Kentucky (USA).

JURADO

Mercedes Zubillaga

Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires (Argentina)
Magister en Ciencias de Suelos - Universidad de Buenos Aires (Argentina)

JURADO

Ricardo José M Melchiori

Ingeniero Agrónomo - Universidad Nacional de Entre Rios (Argentina)
Magister en Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina)

Fecha de defensa de la tesis: 21 de DICIEMBRE de 2011

AGRADECIMIENTO

A Martín Díaz-Zorita, por creer en mí, por sus aportes, por sus exigencias, y por sobre todo "empujar con mucha fuerza" para que la tesis avance.

A María Elena Otegui y Pablo Mércuri, por su tiempo, por su ayuda, y por su conocimiento aportado a la tesis y a mi formación.

A Fernando Mousegne, por su apoyo incondicional, y por dar la libertad de trabajar cometiendo errores y aciertos.

Al INTA, por la beca que hizo posible esta maestría.

A los establecimientos de donde se realizan los experimentos. En especial al establecimiento La Fe por la disponibilidad total de todos los recursos, y por el apoyo constante. Además a quienes en la actividad de campo apoyaron incondicionalmente: al equipo de AgroPrecisión, a Cropsol y a Guillermo.

A el todo el "equipo" que conforma la agencia de San Antonio de Areco, por hacer tan amena la actividad diaria.

A mis padres, por todo lo brindado. Por sus enseñanzas, por la libertad en la que he crecido, por apostar al crecimiento, por su confianza, y por siempre encontrar y ayudarme a ver el "vaso lleno".

A Eugenia, por su amor, por su paciencia, por su apoyo, por el tiempo robado, por el respeto a mis actividades, porque siempre directa o indirectamente estaba presente, y por empujar tanto como Martín.

A Sofi, por pintar todos las tablas y figuras, y por haberme prestado tanto tiempo.

A todos aquello que directa e indirectamente apoyaron este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

	Página
INDICE DE TABLAS	X
INDICE FIGURAS	XVIII
DECLARACION	XXIV
ABREVIATURAS	XXV
RESUMEN	XXVII
ABSTRACT	XXIX
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL	01
1.1-Delimitación de zonas de manejo	01
1.1.1-Unidad de toma de decisiones	01
1.1.2-Ambiente, zonas de manejo y manejo de zonas	02
1.1.3- Metodologías para la delimitación de zonas de manejo	08
1.2-Hipótesis general	07
1.3- Objetivo general	08
CAPITULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	09
2.1- Metodología general	09

2.1.1-Ubicación de los sitios experimentales	09
2.1.1.1- Caracterización edáfica general de los sitios experimentales	09
2.1.1.1.1- San Antonio de Areco	09
2.1.1.1.2- Pehuajó	11
2.1.1.1.3- Pasteur	12
2.1.1.1.4- Adolfo Gonzales Chaves	12
2.1.1.2- Condiciones climáticas y agroclimáticas	12
2.1.2- Delimitación de zonas de manejo y comparación de métodos	17
2.2- Análisis comparativo de estrategias de delimitación de zonas de manejo	26
2.2.1- Superficie asignada a cada zona de manejo según metodología de delimitación	26
2.2.2- Superposición de áreas con igual productividad según metodologías de delimitación	30
CAPITULO III: PROPIEDADES DE LOS SUELOS SEGÚN ZONAS DE MANEJO DELIMITADAS MEDIANTE DIFERENTES METODOLOGÍAS	36
3.1- Introducción	36
3.1.1- Hipótesis	38
3.1.2- Objetivos	39
3.2- Materiales y métodos	39
3.2.1- Ubicación de los sitios experimentales y delimitación de zonas de manejo	39
	Página
3.2.2- Caracterización de las propiedades superficiales de suelos y contenido de agua durante el ciclo del cultivo	39
3.2.3- Análisis estadístico	43
3.3- Resultados y discusión	44
3.3.1- Propiedades superficiales de los suelos	44
3.3.2- Agua total	56
CAPITULO IV: MANEJO DEL CULTIVO Y PRODUCTIVIDAD SEGÚN ZONAS DE MANEJO DELIMITADAS MEDIANTE DIFERENTES METODOLOGÍAS	69
4.1- Introducción	69
4.1.1- Hipótesis	75
4.1.2- Objetivos	75
4.2- Materiales y métodos	76
4.2.1- Ubicación de los sitios experimentales y delimitación de zonas de manejo	76
4.2.2- Caracterización de propiedades superficiales de suelo y contenido de agua durante el ciclo del cultivo	76
4.2.3- Caracterización de la productividad de trigo	77
4.2.4- Análisis estadístico	79
4.3- Resultados y discusión	80
CAPÍTULO V: VALIDACIÓN DE LA FOTOINTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES ENTRE AÑOS Y REGIONES	

PRODUCTORAS DE TRIGO. INTEGRACIÓN DE INDICADORES INDEPENDIENTES DE SUELOS	99
5.1- Introducción	99
5.1.1- Hipótesis	102
5.1.2- Objetivos	102
5.2- Materiales y métodos	103
5.2.1- Ubicación de los sitios experimentales	103
5.2.2- Caracterización de las propiedades superficiales de suelo y contenido de agua durante el ciclo del cultivo	103
5.2.3- Caracterización de la productividad de trigo	104
5.2.4- Análisis estadístico	105
5.3- Resultados y discusión	106
5.3.1- Producción de trigo dentro de zonas de manejo delimitadas con imágenes satelitales en diferentes años y regiones productoras según nivel de nitrógeno fertilizado	106
5.3.1.1- Producción de trigo dentro de zonas de manejo en diferentes años y nivel de nitrógeno fertilizado en Argiudoles de la pampa ondulada	106
5.3.1.2- Producción de trigo dentro de zonas de manejo según región y nivel de nitrógeno fertilizado	109
5.3.2- Propiedades de suelo y producción de trigo según diferentes condiciones de año y disponibilidad de nitrógeno en Argiudoles de la región pampa ondulada	112
	Página
CAPÍTULO VI: INTEGRACIÓN FINAL	115
6.1- Metodologías de delimitación de zonas de manejo y propiedades de suelos	117
6.2- Metodologías de delimitación de zonas de manejo y productividad de trigo	118
6.3- Validación del uso de fotointerpretación de imágenes satelitales entre años y regiones productoras según nivel de fertilización con nitrógeno. Integración de rendimientos de trigo e indicadores independientes de suelos	119
6.4- Aplicaciones futuras	120
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA	122
APÉNDICE	134

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1: Ubicación de los sitios experimentales, tipo de suelos y manejo de cultivo.
- Tabla 2: Cultivo de los mapas de rendimientos utilizados para la delimitación de zonas de manejo.
- Tabla 3: Clasificación de zonas de productividad aparente según series de suelos. ZM = Zonas de manejo. INTA, 1965.
- Tabla 4: Cultivos utilizados para la delimitación de zonas de manejo según índices verdes de imágenes satelitales. + = Utilizado para la delimitación de zona de manejo con todos los cultivos. * = Utilizado para la delimitación de zona de manejo con gramíneas.
- Tabla 5: Tipo de cobertura de suelos en las imágenes satelitales utilizadas para la delimitación de zonas de manejo mediante fotointerpretación. SC = Sin presencia de cultivo en crecimiento.
- Tabla 6: Resumen de fuente de información, atributo y tipo de análisis realizado para cada metodología de delimitación de zonas de manejo. NDVIgra = Índice verde diferencial normalizado de gramíneas. NDVIto = Índice verde diferencial normalizado de los cultivos de las rotación.
- Tabla 7: Superficie de los lotes 1, 2 y 3 según cada zona de manejo de productividad aparente y según cada zona de rendimientos de trigo logrados.
- Tabla 8: Rendimientos de grano logrados en cada lote.
- Tabla 9: Similitud entre las metodologías de delimitación utilizadas. NDVIgra = índice verde diferencial normalizado de gramíneas. NDVIto = índice verde diferencial normalizado de los cultivos de las rotación. Letras diferentes muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre comparaciones de similitud entre métodos.
- Tabla 10: Similitud entre las metodologías de delimitación utilizadas y la delimitación con rendimientos observados de trigo. Letras diferentes muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) de similitud entre los métodos y los rendimientos observados de trigo

Tabla 11: Resumen de densidad aparente según capas de 0,2 m hasta la profundidad de suelos de 1,2 m.

Tabla 12: Propiedades de suelos en 3 lotes de la Pampa ondulada. Rango de valores máximos y mínimos. CE = conductividad eléctrica. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). COT = Carbono orgánico total. N_{Su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0,4 m de suelos. N₂₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de los 0,0 a los 0,2 m de suelos. N₄₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de los 0,2 a los 0,4 m de suelos. N_{total} = Nitrógeno total en los primeros 0,2 m de suelos. Pe = Fósforo extractable.

Tabla 13: Coeficientes de correlación Spearman de las propiedades de suelos. COT = Carbono orgánico total. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). Pe = Fósforo extractable. N_t = Nitrógeno total. N₂₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de profundidad de suelos. N₄₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de profundidad de suelos. N_{Su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 m de suelos. CE = Conductividad eléctrica. * = Significativo al nivel de $p \leq 0,10$. ** = Significativo al nivel de $p \leq 0,05$.

Tabla 14: Propiedades de suelo en Argiudoles de la pampa ondulada según productividad aparente de 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Promedio de 3 sitios experimentales. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 15: Propiedades de suelo en Argiudoles de la pampa ondulada según productividad aparente de 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Promedio de 3 sitios experimentales. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. N_{total} = Nitrógeno total. N₂₀ = nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. N₄₀ = nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos. N_{Su} =

Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 de suelos. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 16: Propiedades de suelo en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. CE = Conductividad eléctrica. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 17: Contenido de agua (mm) en la capa de 0 a 0,2 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 18: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 19: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,4 a 0,6 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de

zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 20: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,6 a 0,8 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 21: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,8 a 1,0 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 22: Contenido de agua (mm) en la capa de 1,0 a 1,2 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran

diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 23: Contenido de agua (mm) en la capa de 1,2 a 1,4 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 24: Contenido de agua (mm) en la capa de 0 a 1,2 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 25: Productividad de trigo en 3 lotes de la Pampa ondulada según zonas de productividad estimada. ZM = Zonas de manejo. NG = Número de granos. PMG = Peso de mil granos.

Tabla 26: Producción de número de granos de trigo en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. NG = Número de granos. Nd = Nitrógeno disponible en la capa de los primeros 0,4 m de suelos

más nitrógeno agregado como fertilizante. NGmínimo = Número de granos sin nitrógeno. NGmáximo = Número de granos con fertilización con nitrógeno. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 27: Rendimientos de trigo en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. Nd = Nitrógeno disponible en la capa de los primeros 0,4 m de suelos más nitrógeno agregado como fertilizante. Mínimo = Sin nitrógeno. Máximo = Con fertilización con nitrógeno. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 28: Eficiencia de uso del agua (EUA) según rendimientos máximos (Rmax) y mínimos (Rmin) en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Tabla 29: Productividad y uso de nitrógeno en trigo según zonas de manejo y año de evaluación (2007 y 2008) en sitios de la región pampa ondulada. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. Nd = Nitrógeno disponible. Rmin = Rendimiento mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. NGmin = Número de granos mínimo. Nmax = Número de granos máximo. PMG = Peso de mil granos. p = nivel de error según año, según zona de manejo y según interacción año por zona de manejo.

Tabla 30: Productividad y uso de nitrógeno en trigo según zonas de manejo y región (R1 = Pampa ondulada, R2 = Pasteur, Pehuajó y G, Chaves) en el año 2008. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. Nd = Nitrógeno disponible. Rmin = Rendimiento mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. NGmin = Número de granos mínimo. Nmax = Número de granos máximo. PMG = Peso de mil

granos. p = nivel de error según región, según zona de manejo, y según interacción de región y zona de manejo.

Tabla 31: Coeficientes de correlación y coeficientes de determinación (R^2) para regresión Stepwise relacionando rendimientos de trigo en lotes de la región pampa ondulada y zonas de manejo y propiedades superficiales de suelo según año (2007 y 2008) y fertilización con 0 (N 0) y 160 (N 160) kg de N ha⁻¹ (n=15). Pe = Fósforo extractable. COT = Carbono orgánico. Ntotal = Nitrógeno total. CE = Conductividad eléctrica. N_{su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 m de suelos. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995). ZM B = Zona de manejo de baja productividad delimitadas con fotointerpretación de imágenes satelitales. * = Variable retenida en modelo de regresión Stepwise. NS = No significativo a nivel de $P \leq 0,15$.

Tabla 32: Resumen de propiedades edáficas de cada zona de productividad en 7 lotes de producción de trigo en Argiudoles de la Pampa Ondulada. Datos máximos y mínimos.

Tabla 33: Resumen de rendimiento promedio e incremento de rendimientos promedio de las zonas de productividad alta y baja en las diferentes dosis de N de fertilizante aplicado.

Tabla 34: Coeficientes estimados y errores estándar (entre paréntesis) de la respuesta de rendimiento al contenido de limo, N total, carbono orgánico total (COT), zona de productividad baja, fósforo extractable (Pe) y nitrógeno disponible de suelo más fertilizante (Nd), en el cultivo de trigo de las campaña 2007 y 2008, Pampa Ondulada. ***, **, *, y + representan significancia de 0,0001, 0,001, 0,05 y 0,15 nivel de probabilidad, respectivamente.

Tabla 35: Coeficientes estimados y errores estándar (entre paréntesis) de la respuesta de incremento de rendimiento al contenido de nitrógeno disponible de suelo más fertilizante (Nd), zona de productividad baja, limo y N total, en el cultivo de trigo de las campaña 2007 y 2008. **, *, y + representan significancia de 0,001, 0,01 y 0,05 nivel de probabilidad, respectivamente.

Tabla 36: Ubicación de los sitios experimentales y características de suelo y manejo.

Tabla 37: Resumen de propiedades edáficas en 10 lotes de producción de trigo en la región Pampa Ondulada. Pe= Fósforo extractable, CO = carbono orgánico. Datos promedio más menos desvío estándar.

Tabla 38: Propiedades de cultivo en diferentes zonas de productividad de trigo (alta, media y baja) en dos niveles de nitrógeno fertilizado: sin fertilización y con 160 kg de N ha⁻¹. PMG= Peso de mil granos. IC= Índice de cosecha. Letras diferentes indican diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de productividad.

Tabla 39: Coeficientes estimados y errores estándar (entre paréntesis) de contenido de proteína en grano de trigo en función del contenido de nitrógeno disponible (Nd), carbono orgánico (CO), fósforo extractable (Pe), arena, rendimiento estimado (EstR), zona de productividad baja (ZM B) y SPAD. R² ajustado 0,68. Campaña 2007 y 2008. ***, ** y * representan significancia de 0,0001, 0,10 y 0,15 nivel de probabilidad, respectivamente.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplos de selección de organismos individuales y en comunidad para la definición de ambiente. A = Organismo individual diferenciados en negro, gris oscuro y gris claro según sea planta dominante, normal o dominada. B = Organismo zonas del cultivo; se determinaron tres sistemas dentro del lote representados en negro, gris y blanco. C = Organismo cultivo; todo el cultivo se considera un sistema.

Figura 2: Ubicación de la provincia de Buenos Aires en Argentina (A), y áreas homogéneas de producción de trigo en la provincia de Buenos Aires según Diaz-Zorita y Fernández Canigia (1996) y ubicación de los sitios donde se realizaron experimentos (B). 1 = San Antonio de Areco. 2 = Pasteur. 3 = Pehuajó. 4 = Adolfo Gonzales Chaves.

Figura 3: Resumen de temperaturas y precipitaciones promedio mensuales entre mayo y diciembre en San Antonio de Areco. Registros de temperaturas y precipitaciones de agencia de INTA San Antonio de Areco (com. pers.) desde 1977 hasta 2009.

Figura 4: Resumen de temperaturas y precipitaciones promedio mensuales entre mayo y diciembre en Pasteur. Registros de agencia de INTA Lincol (com. pers.), temperaturas y precipitaciones desde 1969 hasta 2009.

Figura 5: Resumen de temperaturas y precipitaciones promedio mensuales entre mayo y diciembre en Pehuajó. Registros de temperaturas y precipitaciones de agencia de INTA Pehuajó (com. pers.). Temperaturas desde 1969 hasta 2009 y precipitaciones desde 1990 hasta 2009.

Figura 6: Resumen de temperaturas y precipitaciones promedio mensuales entre mayo y diciembre en Adolfo Gonzales Chaves. Registros de temperaturas y precipitaciones de oficina de información técnica de INTA Adolfo Gonzales Chaves (com. pers.) desde 1972 hasta 2009.

Figura 7. Suma estandarizada adaptada de Derby et al. (2007). Mapas de conductividad eléctrica profunda, elevación y promedio de 5 años de rendimientos, sumados para crear zonas mediante la suma estandarizada.

Figura 8: Modelo adaptado de Simbahan et al. (2004) para detectar 6 tipos de datos erróneos o inciertos de mapas de rendimientos.

Figura 9: Delimitaciones realizadas en el lote 1. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos. I= Mapa de rendimientos de trigo 2007. Zonas de productividad alta, media y baja expresadas en negro, gris y blanco, respectivamente.

Figura 10: Delimitaciones realizadas en el lote 2. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos. I= Mapa de rendimientos de trigo 2007. Zonas de productividad alta, media y baja expresadas en negro, gris y blanco, respectivamente.

Figura 11: Delimitaciones realizadas en el lote 3. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos. I= Mapa de rendimientos de trigo 2007. Zonas de productividad alta, media y baja expresadas en negro, gris y blanco, respectivamente.

Figura 12: Muestreo estratificado por zonas de manejo. Estratificación del lote 3 para muestreo mediante delimitación de zonas de manejo de alta, media y baja productividad según áreas negras, gris oscuro y gris claro, respectivamente. Líneas en zigzag verdes, amarillas y rojas representan el trayecto realizado para muestreos de suelos en zonas de productividad aparente. Los sitios donde se toman las muestras resultaron de obtener 30 submuestras en la totalidad del

trayecto realizado en cada zona de manejo. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos.

Figura 13= Representación en el plano de las 2 primeras componentes principales (84 % de explicación) de (A) variables de propiedades de suelo, y de (B) lotes de producción de la Pampa ondulada. Lotes 1, 2 y 3 representados como cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente. Zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. Pe= fósforo extractable. Nt= nitrógeno total. COT= carbono orgánico. CE= conductividad eléctrica. N₂₀= nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. N₄₀= nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de profundidad de suelos. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). N_{Su}= Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 de suelos.

Figura 14: Distribución vertical del contenido de agua (mm) en Argiudoles de la Pampa ondulada al momento de la siembra de trigo, en primer nudo visible (Z31), en emergencia de una cuarta parte de las espigas (Z53) y en el momento de la cosecha. Promedio de 3 sitios experimentales y zonas de manejo. Las barras de error indican valores máximos y mínimos para cada momento de evaluación.

Figura 15: Representación en el plano de las 2 primeras componentes principales (61 % de explicación) de (A) variables de contenido de agua en el suelo y eficiencia de uso de agua, y de (B) lotes de producción (lote 1, lote 2 y lote 3 representado como cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente) y zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. S20, S40, S60, y S120= Contenido de agua al momento de la siembra de 0 a 0,2 m, 0 a 0,4 m, 0 a 0,6 m, y 0 a 1,2 m de profundidad de suelo, respectivamente. Z₃₁20, Z₃₁40, Z₃₁60, y Z₃₁120= Contenido de agua al detectar el primer nudo del cultivo de trigo de 0 a 0,2 m, 0 a 0,4 m, 0 a 0,6 m, y 0 a 1,2 m de profundidad de suelo, respectivamente. Z₅₃20, Z₅₃40, Z₅₃60, y Z₅₃120= Contenido de agua en emergencia de la cuarta parte de la espiga de 0 a 0,2 m, 0 a 0,4 m, 0 a 0,6 m, y 0 a 1,2 m de profundidad de suelo, respectivamente. C20, C40, C60, y C120= Contenido de agua al momento de la cosecha de trigo de 0 a 0,2 m, 0 a 0,4 m, 0

a 0,6 m, y 0 a 1,2 m de profundidad de suelo, respectivamente. $EUA_{R_{min}}$ y $EUA_{R_{max}}$ = Eficiencia de uso del agua para rendimientos mínimos y máximos, respectivamente.

Figura 16: Rendimientos de trigo sin fertilización con nitrógeno según (A) el número de granos y según (B) el peso de mil granos. Zonas de alta, de media y de baja productividad estimada en 3 lotes de la Pampa ondulada. ZM = Zonas de manejo.

Figura 17: Rendimientos de trigo fertilizados con 160 kg de nitrógeno ha^{-1} según (A) el número de granos y según (B) el peso de mil granos. Zonas de alta, de media y de baja productividad estimada en 3 lotes de la Pampa ondulada. ZM = Zonas de manejo.

Figura 18: Representación en el plano de las 2 primeras componentes principales (87 % de explicación) de (A) variables de producción de trigo y uso del N, y (B) 3 lotes de producción de la Pampa ondulada según zonas de manejo. Lotes 1, 2 y 3 representados en cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente. Zonas de manejo de alta, de media y de baja productividad en negro, gris y blanco, respectivamente. EUN = eficiencia de uso del N, R_{max} = rendimientos máximos, R_{min} = rendimientos mínimos, N_{max} = nitrógeno disponible para alcanzar R_{max} .

Figura 19: Error relativo acumulado de 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. ALT = Altimetría y pendiente. AM = Antecedentes de manejo. MS = Mapas de suelos. SE = Sumas estandarizadas. NDVI_{gra} = Índice verde diferencial normalizado de gramíneas NDVI_{to} = Índice verde diferencial normalizado de trigo, maíz y soja. MR = Mapas de rendimientos. FIS = Fotointerpretación de imágenes satelitales. R_{max} = Rendimientos máximos. R_{min} = Rendimientos mínimos. $N_{d R_{max}}$ = Nitrógeno disponible para alcanzar R_{max} . EUN = Eficiencia de uso de nitrógeno.

Figura 20: Representación en el plano de las 3 primeras componentes principales, en A y en B componentes principales 1 y 2 (73 % de la explicación), y en C y D componentes principales 1 y 3 (63 % de la explicación), de (A y C) variables de propiedades de suelo, y de (B y D) lotes de producción. Lotes 1, 2 y 3 representados como cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente. Zonas de

productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. Pe = Fósforo extractable. COT = Carbono orgánico. CE = Conductividad eléctrica. N₀₋₂₀ = nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. N₂₀₋₄₀ = nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995). EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. NG = Número de granos por metro cuadrado. Ntotal = Nitrógeno total en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. NGmax = Número de granos máximos. NGmin = Número de granos mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. Rmin = Rendimiento mínimo. S 20, Z31 20, Z53 20 y Mf 20 = Contenido de agua en los primeros 0,2 m de suelo al momento de la siembra, en primer nudo visible, en aparición de la espiga, y en madurez fisiológica de trigo, respectivamente. S 120, Z31 120, Z53 120 y Mf 120 = Contenido de agua en los primeros 1,2 m de suelo al momento de la siembra, en primer nudo visible, en aparición de la espiga, y en madurez fisiológica de trigo, respectivamente.

Figura 21 = Asociación entre propiedades de suelo: IMO (A), carbono orgánico total (B) y nitrógeno total (C), y rendimientos mínimos (triángulos) y máximos de trigo (cuadrados) según zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995).

Figura 22= Nitrógeno disponible para alcanzar los rendimientos máximos según IMO. Zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995).

Figura 23: Secuencia de estudio.

Figura 24: Relación entre valores estimados por el modelo y observados: A= Rendimiento y B= Incremento de rendimientos.

Figura25: Relación entre valores de proteína de trigo estimados y observados. Campaña 2007 y 2008.

Figura 26: Nivel de errores de 8 metodologías de delimitación según diferenciación entre zonas de manejo de propiedades de suelos y propiedades de trigo y uso de nitrógeno. Metodologías de delimitación: Mapas de rendimiento y altimetría y pendiente en A, antecedentes de manejo y fotointerpretación de imágenes satelitales en B, mapas de suelos e índice verde de gramíneas (NDVI_{gra}) en C, e índice de verde de todos los cultivos (NDVI_{to}) y suma estandarizada de mapas

de suelos y mapas de rendimientos en D. Pe= fósforo extractable. COT= carbono orgánico. CE= conductividad eléctrica. N₂₀= nitrógeno de nitratos de 0 a 0.2 m de profundidad de suelos. N₄₀= nitrógeno de nitratos de 0.2 a 0.4 m de profundidad de suelos. IMO = (materia orgánica) (limo+arcilla)⁻¹. Nsuelo= Nitrógeno disponible entre los primeros 0.4 m de suelos. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. NG = Número de granos por metro cuadrado. Nd = Nitrógeno disponible en los primeros 0.4 m de suelo más nitrógeno agregado como fertilizante. NGmax = Número de granos máximos. NGmin = Número de granos mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. Rmin = Rendimiento mínimo. Siembra, Z31, Z53 y Mf = Contenido de agua en los primeros 1.2 m de suelo al momento de la siembra, en primer nudo visible, en aparición de las espigas, y en madurez fisiológica de trigo, respectivamente.

DECLARACIÓN

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

ABREVIATURAS

ZM	ZONAS DE MANEJO
MR	MAPAS DE RENDIMIENTO
MS	MAPAS DE SUELOS
NDVIto	INDICE VERDE DE TRIGO, MAÍZ Y SOJA
NDVIgra	ÍNDICE VERDE DE TRIGO Y MAÍZ
FIS	FOTOINTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES
AM	ANTECEDENTES DE MANEJO
ALT	ALTIMETRÍA Y PENDIENTE
SE	SUMA ESTANDARIZADA
A	ZONA DE ALTA PRODUCTIVIDAD ESTIMADA
M	ZONA DE MEDIA PRODUCTIVIDAD ESTIMADA
B	ZONA DE BAJA PRODUCTIVIDAD ESTIMADA
COT	CARBONO ORGÁNICO TOTAL
Pe	FÓSFORO EXTRACTABLE
N ₂₀	NITRÓGENO DE NITRATOS EN LA CAPA DE 0 A 0,2 m DE SUELOS
N ₄₀	NITRÓGENO DE NITRATOS EN LA CAPA DE 0,2 A 0,4 m DE SUELOS
N _{Su}	NITRÓGENO DE NITRATOS EN LA CAPA DE 0 A 0,4 m DE SUELOS
Nd	NITRÓGENO DISPONIBLE
Ntotal	NITRÓGENO TOTAL
CE	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
IMO	ÍNDICE DE MATERIA ORGÁNICA SEGÚN TEXTURA
NG	NÚMERO DE GRANOS
NGmin	NÚMERO DE GRANOS MÍNIMO
NGmax	NÚMERO DE GRANOS MÁXIMO
PMG	PESO DE MIL GRANOS
Rmin	RENDIMIENTO MÍNIMO
Rmax	RENDIMIENTO MÁXIMO
EUN	EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO

Nd max	NITROGENO DISPONIBLE PARA RENDIMIENTO MÁXIMO
EUA	EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA
S10	LAMINA DE AGUA EN LA CAPA DE 0 A 0,2 M DE SUELO AL MOMENTO DE LA SIEMBRA
S20, S40, S60, y S120	CONTENIDO DE AGUA AL MOMENTO DE LA SIEMBRA DE 0 A 0,2 M, 0 A 0,4 M, 0 A 0,6 M, Y 0 A 1,2 M DE PROFUNDIDAD DE SUELO, RESPECTIVAMENTE.
Z ₃₁ 20, Z ₃₁ 40, Z ₃₁ 60, y Z ₃₁ 120	CONTENIDO DE AGUA AL DETECTAR EL PRIMER NUDO DEL CULTIVO DE TRIGO DE 0 A 0,2 M, 0 A 0,4 M, 0 A 0,6 M, Y 0 A 1,2 M DE PROFUNDIDAD DE SUELO, RESPECTIVAMENTE.
Z ₅₃ 20, Z ₅₃ 40, Z ₅₃ 60, y Z ₅₃ 120	CONTENIDO DE AGUA EN EMERGENCIA DE LA CUARTA PARTE DE LA ESPIGA DE 0 A 0,2 M, 0 A 0,4 M, 0 A 0,6 M, Y 0 A 1,2 M DE PROFUNDIDAD DE SUELO, RESPECTIVAMENTE.
C20, C40, C60, y C120	CONTENIDO DE AGUA AL MOMENTO DE LA COSECHA DE TRIGO DE 0 A 0,2 M, 0 A 0,4 M, 0 A 0,6 M, Y 0 A 1,2 M DE PROFUNDIDAD DE SUELO, RESPECTIVAMENTE.

RESUMEN

Las metodologías para la delimitación de zonas de manejo (ZM) dentro de lotes de producción han diferido según sus aplicaciones. Los objetivos de este trabajo fueron (i) cuantificar diferencias de propiedades de suelo y de productividad y uso de nitrógeno en trigo entre ZM definidas mediante 8 metodologías en Argiudoles representativos de la pampa ondulada (PO), y (ii) mediante una metodología seleccionada en (i) cuantificar diferencias de productividad de trigo entre ZM con diferentes niveles de nitrógeno aplicado: 0 y 160 kg N ha⁻¹ según años y regiones. Además, (iii) integrar los rendimientos de trigo con indicadores independientes de suelo. En 3 lotes de trigo de la PO durante la campaña 2007 se delimitaron ZM de alta (A), media (M) y baja (B) productividad según mapas de rendimiento (MR), posición en el relieve, índice de verdor de cultivos, índice verde de gramíneas, antecedentes de manejo, mapa de suelo, fotointerpretación (FIS), y suma estandarizada de MR y mapas de suelos. Utilizando FIS en la campaña 2008 se delimitaron ZM en 3 lotes de la subregión PO, y en 3 lotes de las subregiones pampa austral y pampa interior. Las diferencias entre ZM en propiedades de suelo y producción de trigo fueron dependientes de los lotes. La FIS determinó mayor contenido de carbono orgánico (>6%) en la ZM A y M que en la ZM B. Al incrementarse la productividad de las ZM, los máximos rendimientos fueron logrados con menores niveles de nitrógeno disponible. Diferencias mayores entre ZM de productividad A y B se tuvieron delimitado con FIS, la ZM de productividad A superó a ZM B en los rendimientos mínimos (>44%) y máximos (>7,5%), y en eficiencia uso de nitrógeno (<59%). En menor medida que la disponibilidad de nitrógeno las condiciones del año mostraron efectos sobre las diferencias de rendimientos entre ZM, con balances hídricos más favorables se incrementaron las diferencias de rendimientos entre la ZM A y ZM B en 6 %. En la subregión pampa

interior y pampa austral las ZM de productividad A mostraron rendimientos 53 y 56 % mayores que la ZM B, siendo las diferencias de rendimiento entre ZM menos afecta por la disponibilidad de nitrógeno que en la región pampa ondulada. Esta información sugiere la importancia de elección de la metodología de delimitación según el objetivo que persiga la delimitación de zonas de manejo. La instrumentación de estrategias de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización con N en trigo según ZM sería una estrategia recomendable para el uso eficiente de este nutriente, mejorando su retorno productivo y reduciendo los riesgos ambientales asociados a su sobredosificación.

Palabras clave: Zonas de manejo – Propiedades de suelo – Trigo – Fertilización con nitrógeno

ABSTRACT

The methodologies for delimitation of management zones (MZ) within production fields differed based on their application objectives. The objectives of the present study were (i) to quantify differences in soils properties and yields and nitrogen use in wheat crops (*Triticum aestivum L.*) among MZ in relation to the 8 selected methodologies and in relation to N-fertilization levels in Argiudoll soils representative of the Rolling Pampas (RP), and (ii) using one methodology selected in (i) to quantify differences in wheat productivity in MZ in relation to N-fertilization levels (0 and 160 kg N ha⁻¹) in differences years and regions. Furthermore, (iii) were integrated wheat yields with soil independent indicators. In 3 wheat production fields in RP high (H), medium (M) and low (L) productivity MZ were defined based on previous crop yield mapping (YM), elevation, normalized vegetation index of crops, NDVI of Gramineae, previous crop management practices, soil mapping, photo-interpretation of satellite images (PhSI), and standardized sums of YM and soil mapping. PhSI determined a higher content of organic carbon (>6%) in H and M MZ than in L MZ. When MZ productivity increased, maximum yields were obtained with lower levels of N available. Considering productivity and nitrogen use, higher differences among productivity MZ were found based on PhSI, productivity MZ H was higher than productivity MZ L in minimum (>44 %) and maximum (>7 %) yields, and in N use efficiency (<59 %). In lower nitrogen levels, differences between MZ increased. The conditions of the year showed effects on the yield gap between MZ. The more favorable water balances increased the yield gap between the H and L MZ at 6%. In pampa interior and pampa austral subregions, MZ H yields showed 53 and 56% higher than the MZ L, where the yield gap between MZ less affected by the availability of nitrogen in the rolling pampas subregion. The data presented suggests the relevance of the selection of delimitation

methodology based on the objective for delimitation of management zones. When MZ productivity in defined zones increases, N needs in terms of doses of fertilization decrease. Therefore, the instrumentation of strategies for diagnosing and recommending N fertilization needs in wheat crops defined zones would be a recommended strategy for the efficient use of this nutrient, improving its productive return, and reducing the environmental risks associated with its overdosing.

Key words: Management Zones - Soil Properties -Wheat - Nitrogen Fertilization

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1- DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO

1.1.1- Unidad de toma de decisiones

Un lote de producción ha sido considerado como una de las partes en que se divide un establecimiento agropecuario. En general el fraccionamiento de los establecimientos agropecuarios en lotes se ha debido a una división funcional y de manejo, según las actividades agrícolas y pecuarias desarrolladas. La mayoría de los lotes han tenido superficie continua y manejo uniforme, siendo la unidad de producción y de toma de decisiones. Para la toma de decisiones se ha considerado la situación promedio de toda el área del lote, en algunas situaciones incluyendo sectores que por diferente posición en el paisaje o manejo realizado presentaban diferencias en propiedades de suelo con el resto del lote. En muchos casos estas propiedades de suelo no han respondido a una distribución normal por lo que la información promedio utilizada para la toma de decisiones no se corresponde necesariamente con la de mayor frecuencia de ocurrencia (Di Pietro *et al.* 1986; Álvarez *et al.* 2006; Zubillaga *et al.* 2006a).

La agricultura de precisión ha sido definida como la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada a la producción agrícola (Pierce y Nowak, 1999); y ha permitido entre otras cosas modificar esta relación entre lote y unidad de producción. A partir de información independiente se han agrupado o dividido los lotes de producción definiendo nuevos sectores como unidad de producción y áreas objeto de un manejo diferencial.

1.1.2- Ambiente, zonas de manejo y manejo de zonas

La definición de ambiente depende del área de estudio. Las ciencias sociales han definido al ambiente como al entorno que afecta y condiciona especialmente las circunstancias de vida de las personas o las sociedades en su conjunto. En las ciencias naturales ambiente ha sido considerado como las condiciones o circunstancias de un lugar que parecen favorables o no para un organismo. La teoría general de sistemas definió al ambiente como un complejo de factores externos que actúan sobre un sistema y determinan su curso y su forma de existencia. De esta forma, un ambiente es un súper conjunto en el cual el sistema es un subconjunto (Adams y Lambert, 2006).

Para un ambiente en particular ha sido necesario definir el organismo o los organismos, para los cuales los factores externos afectaban su curso y su forma de existencia (Fig. 1). Analizados los ambientes dentro de un lote, por ejemplo como organismo puede haberse seleccionado al cultivo. Los límites de las condiciones que han favorecido o no la productividad del cultivo han sido diferentes que los límites encontrados para otros organismos que no estén relacionados con la producción del cultivo. Además, cuando se definió ambiente ha sido necesario considerar la posibilidad de realizar modificaciones en los factores externos. Cuando el objetivo de delimitar los ambientes fue una aplicación de insumos en forma variable dentro del lote de producción, fue necesario tener en cuenta las tecnologías disponibles en el mercado para estas aplicaciones (Taylor *et al.* 2007). El tamaño de los ambientes ha debido ser mayor a la menor área posible de modificar por la maquinaria utilizada. La posibilidad de considerar a cada organismo (cada planta de un cultivo) como subconjunto dentro de un lote ha requerido tecnología que permita modificar el ambiente para ese subconjunto.

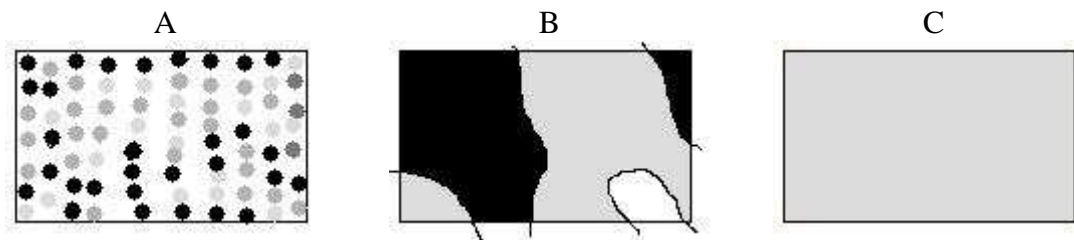


Figura 1: Ejemplos de selección de organismos individuales y en comunidad para la definición de ambiente. A = Organismo individual diferenciados en negro, gris oscuro y gris claro según sea planta dominante, normal o dominada. B = Organismo zonas del cultivo; se determinaron tres sistemas dentro del lote representados en negro, gris y blanco. C = Organismo cultivo; todo el cultivo se considera un sistema.

Si bien los términos zonas de manejo, manejo de zonas y ambientes se han utilizado como sinónimos, sus significados han sido diferentes. Las zonas de manejo fueron definidas como unidades dentro de los lotes, y se las definió como áreas continuas espacialmente donde un tratamiento particular puede ser aplicado (Taylor *et al.* 2007). Según Fraisse *et al.* (2001) y Plant *et al.* (2001) los principales requerimientos que deben cumplir las zonas de manejo son: i) las diferencias de rendimientos entre las zonas de manejo deben ser mayores que las diferencias dentro de la zona de manejo, y ii) los factores limitantes de rendimiento dentro de una zona deben ser los mismos.

La similitud entre las zonas de manejo y los ambientes ha dependido del cultivo y las condiciones climáticas, y sólo en algunas ocasiones estos términos han coincidido en representar la misma área. Las condiciones del año (temperaturas, precipitaciones, etc.), el manejo realizado (cultivo antecesor, tipo de labranza, etc.) y la adaptabilidad del cultivo determinaron que diferentes zonas de manejo coincidieran en un mismo ambiente para el cultivo (Terra *et al.* 2005; Andales *et al.* 2007; Kyveryga *et al.* 2009). Factores externos presentes en una determinada área fueron importantes para la producción de un cultivo y no generaron efectos relevantes sobre otro cultivo, habiéndose modificando los límites de los ambientes dependiendo del cultivo. Cuando

las zonas de manejo fueron delimitadas utilizando información de la producción de diferentes cultivos se lograron muchas zonas de manejo que dependiendo del cultivo se correspondieron a diferentes ambientes. La variabilidad de propiedades de suelos no siempre definieron los ambientes, dependieron del organismo (Ortega y Santibáñez, 2007).

Clase de manejo ha sido definida como un área con un tratamiento particular (Taylor *et al.* 2007). Una misma clase de manejo, como por ejemplo la fertilización con nitrógeno, ha podido ser realizada en diferentes zonas de manejo. Diferentes zonas de manejo han tenido igual clase de manejo.

1.1.3- Metodologías para la delimitación de zonas de manejo

Las metodologías para la delimitación de zonas de manejo dentro de lotes de producción difirieron según sus objetivos de aplicación tales como determinar la variabilidad en la oferta de nutrientes según tipos de suelos (Chang *et al.* 2003), minimizar la variabilidad de producción según resultados de cultivos anteriores (Taylor *et al.* 2007) y minimizar los errores o la variabilidad en la formulación de recomendaciones de fertilización (Fleming *et al.* 2000; Scharf *et al.* 2005). Según Taylor *et al.* (2007) la información para delimitar zonas de manejo para un lote debe considerar los factores que determinan el rendimiento, para lo cual se debe definir los factores limitantes o factores externos que son diferentes en cada lote.

Si bien el conocimiento de la variabilidad de rendimientos y la caracterización de los factores que la originan dentro de áreas delimitadas por su uniformidad relativa permiten la planificación de estrategias de manejo de los cultivos, las metodologías para

la delimitación de las zonas de manejo no han sido consistentes. Entre éstas las empleadas con mayor frecuencia han sido los muestreos intensivos y mapas de suelos, fotointerpretación de imágenes satelitales, análisis de índices de imágenes satelitales de diferentes cultivos anteriores, mapas de rendimientos de cultivos anteriores, posición en el relieve, y reconocimiento de prácticas previas de manejo. Las diferencias en las delimitaciones de zonas de manejo podrían afectar los parámetros considerados para el diagnóstico y la recomendación, por ejemplo de la necesidad de fertilización con nitrógeno y la respuesta de los cultivos a esta práctica.

La utilización de información de productividad provista por mapas de rendimiento o imágenes satelitales de cultivos en crecimiento ha tenido la ventaja de cuantificar cómo los factores externos afectaron al cultivo, y la desventaja de ser sensibles a variaciones aleatorias del año como son los factores reductores. Las herramientas para delimitar zonas de manejo que no utilizan la productividad de los cultivos, tales como conductividad eléctrica, espesor de suelo sobre una limitante permanente (ej. presencia de tosca, horizonte textural), posición en el relieve, pendiente, profundidad de la capa de agua y mapa de suelos, han sido de utilidad cuando caracterizan al factor causante de la variación de producción. Cuando la principal causa de variación de la producción de un cultivo estaba definida, por ejemplo por el espesor de suelo sobre una limitante permanente, y esta puede ser caracterizada directa o indirectamente, ésta metodología de delimitación puede resultar rápida, económica y adecuada para delimitar zonas de diferente rendimiento alcanzable.

Moral *et al.* (2010) en Badajoz (España) sobre suelos de textura gruesa, precipitaciones menores a 500 mm año⁻¹ y rendimientos de los cultivos asociados a propiedades físicas

de los suelos, mostraron una estrecha asociación entre la conductividad eléctrica en los primeros 0,3 y 0,9 m de profundidad de suelo con el contenido de arena y arcilla en la capa de 0 a 0,2 m de profundidad. Por lo tanto, el uso de la rastra de conductividad eléctrica fue un método adecuado, rápido y económico para delimitar zonas de manejo. Jaynes *et al.* (2005) para suelos Hapludoles Típicos en Iowa (USA) determinó que mediciones de conductividad eléctrica y de elevación permitieron delimitar zonas de manejo con diferencias en la productividad de soja (*Glycine max* L.) de forma rápida y económica, y fueron una alternativa cuando no se dispone de información de mapas de rendimiento de años anteriores.

En Chile, Ortega y Santibáñez (2007) delimitaron zonas de manejo mediante variables de fertilidad de suelo (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio extractables) utilizando diferentes métodos para analizar la información tales como análisis de clúster, análisis de componentes principales y coeficiente de variación. Los tres métodos mostraron resultados similares y fueron adecuados para definir zonas de manejo según la fertilidad de los suelos. Sin embargo, en el 77 % de los casos no explicaron las variaciones de rendimientos de maíz (*Zea mays* L.). Por lo tanto resultó más importante, identificar las variables responsables de la variación de los rendimientos de maíz que seleccionar el método más adecuado para el análisis de las variables y delimitación de zonas de manejo según atributos de suelo parcialmente relacionados con la productividad del cultivo en las condiciones estudiadas.

Ha sido descrito como las prácticas de manejo (rotaciones, fertilización con nitrógeno y fósforo, sistema de labranza) modifican los rendimientos de los cultivos. Pero no

abundan los trabajos que estudien como alguna de las prácticas de manejo más comunes, como al fertilización nitrogenada, modifica la capacidad de las metodologías de delimitación de zonas de manejo para diferenciar zonas según productividad del cultivo.

En algunos sitios la causa de variación de producción ha dependido del cultivo y las condiciones del año, y no resulta simple de determinar y estimar su presencia y su efecto sobre el cultivo, siendo necesario estudiar a los cultivos para definir ambientes dentro del lote. La posición en el relieve (ej. loma, media loma, bajo) en algunos sitios ha sido descripta asociada con algunas propiedades de suelo estáticas (propiedades de suelos con variaciones menores durante el ciclo de un cultivo) como el contenido de nutrientes, la textura, y el contenido de carbono orgánico total, y propiedades de suelo dinámicas (propiedades de suelos con variaciones mayores durante el ciclo de un cultivo) como el contenido de agua disponible, la temperatura, y la tasa de mineralización, y en muchas ocasiones se relacionada directamente con la producción de los cultivos. Pero, en algunas zonas de producción, las posiciones en el relieve han presentado dentro de cada una de ellas diferentes ambientes. Por ejemplo en las posiciones bajas en el relieve con diferencias en el espesor de suelos y variabilidad de producción dentro de una misma posición en el relieve. En este tipo de situaciones limita el uso generalizado de herramientas de delimitación que no estudian las variaciones de producción de los cultivos y sólo consideran atribuidas al paisaje o a las propiedades de los suelos.

1.2. HIPÓTESIS GENERAL

La hipótesis general de este estudio es que la información requerida para delimitar zonas de manejo de trigo (*Triticum aestivum* L.) dentro de lotes de producción de Argiudoles en la región pampa ondulada, depende del objetivo de manejo. Para agrupar áreas según propiedades superficiales de suelo se debe utilizar los mapas de suelos y la posición en el relieve (loma, media loma y bajo). Mientras que para agrupar áreas según nivel de producción de trigo con alta y baja disponibilidad de nitrógeno se requiere de información de productividad de cultivos anteriores.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Establecer relación entre los objetivos productivos, como la caracterización de propiedades de suelos y como la productividad y el uso de nitrógeno en trigo, y las metodologías de delimitación según productividad aparente de trigo dentro de lotes de producción de Argiudoles en la región pampa ondulada.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- METODOLOGÍA GENERAL

El estudio se desarrollo en lotes de producción de la región pampa húmeda de la provincia de Buenos Aires (Argentina) sobre suelos Molisoles, durante las campañas agrícolas de 2007-2008 y 2008-2009.

2.1.1- Ubicación de los sitios experimentales

Los experimentos fueron conducidos en 10 lotes de producción de trigo, 3 en la campaña 2007-2008 en San Antonio de Areco ($34^{\circ}11'31''\text{S}$; $59^{\circ}34'46''\text{S}$), y 7 en la campaña 2008-2009 en San Antonio de Areco (4 sitios), en Pehuajó ($35^{\circ}49'17''\text{S}$; $61^{\circ}50'0''\text{S}$), en Pasteur ($35^{\circ}8'7''\text{S}$; $62^{\circ}15'22''\text{S}$) y en Gonzales Chaves ($37^{\circ}57'53''\text{S}$; $60^{\circ}12'49''\text{S}$). Los sitios en San Antonio de Areco son representativos de las condiciones de la subregión pampa ondulada y corresponden al área homogénea de alta producción de trigo (Díaz-Zorita y Fernández Canigia, 1996). Los sitios en Pehuajó, Pasteur y Gonzales Chaves son representativos de la subregión pampa interior y de la subregión pampa austral, corresponden a zonas homogéneas de media a baja productividad dentro de la provincia de Buenos Aires (Díaz-Zorita y Fernández Canigia, 1996) (Fig. 2).

2.1.1.1- Caracterización edáfica general de los sitios experimentales

2.1.1.1.1- San Antonio de Areco

La zona de estudio corresponde a la pampa ondulada, región de la llanura pampeana comprendida desde las costas de la provincia de Buenos Aires entre el río Paraná y el río de La Plata al este; las sierras de Tandilia y de Ventania al sur; el río Carcarañá al norte y una línea imaginaria de la isohieta de 700 mm al oeste. Es una unidad

fisiográfica caracterizada por el relieve predominantemente ondulado recortado por cañadas, arroyos y ríos. El relieve posee pendientes que por lo general son inferiores al 2 %. Sin embargo, en algunos sectores, la pendiente puede superar al 3 % (León 1991).

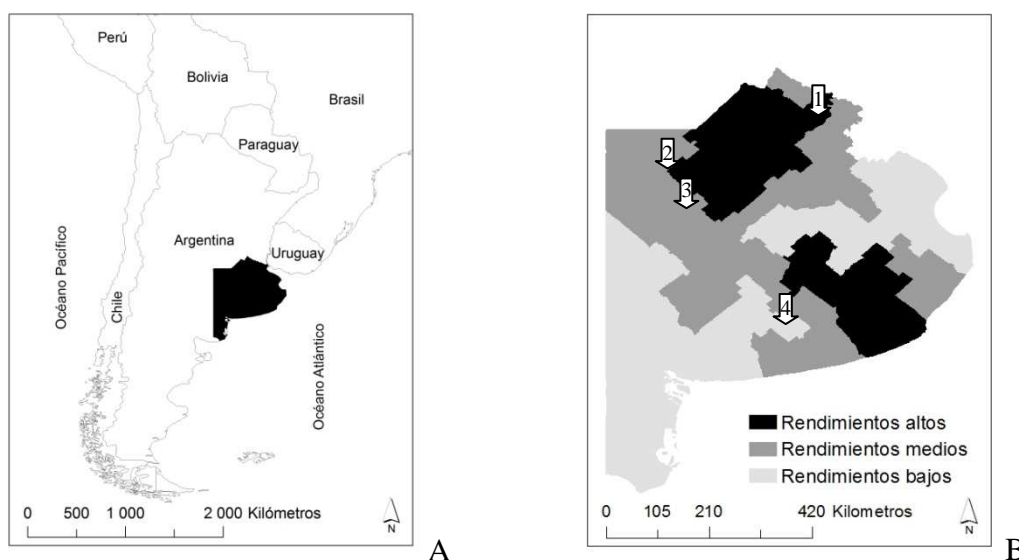


Figura 2: Ubicación de la provincia de Buenos Aires en Argentina (A), y áreas homogéneas de producción de trigo en la provincia de Buenos Aires según Díaz-Zorita y Fernández Canigia (1996) y ubicación de los sitios donde se realizaron experimentos (B). 1 = San Antonio de Areco. 2 = Pasteur. 3 = Pehuajó. 4 = Adolfo Gonzales Chaves.

El material originario de los suelos en las lomas es limo loésico de textura franco limosa, abundante en vidrio volcánico que meteoriza en minerales ricos en bases. A una profundidad aproximada de dos metros en las lomas y de alrededor de un metro en las áreas erosionadas, se presenta carbonato de calcio, que en posiciones cercanas a los arroyos puede formar un horizonte cementado.

Los bajos, cañadas y planos inferiores de ríos y arroyos presentan materiales de carácter aluvional depositados por las aguas. Estos suelos presentan una acumulación de material, debido al arrastre proveniente de las partes más altas del relieve y perfiles con carbonato de calcio.

La serie de suelo Capitán Sarmiento seleccionada para los estudios, es por superficie y capacidad productiva la más importante del partido de San Antonio de Areco, siendo representativa de los suelos de uso agrícola de la región pampa ondulada. Son suelos Argiudoles Típicos que se encuentran en lomas extendidas, con pendientes menores al 1 %. Es un suelo oscuro, profundo, bien drenado y relativamente pesado. Presenta un horizonte A de unos 30 cm de color muy oscuro, un corto horizonte Bl de transición y un horizonte arcilloso B2t de unos 60 o 70 cm de espesor, fuertemente estructurado, con contenidos de arcilla cercanos al 60 %. El horizonte C es un sedimento loésico aproximadamente a los 180 cm de profundidad, calcáreo a más de 200 cm. Todo el perfil de este suelo está desarrollado sobre un mismo material original franco arcillo limoso.

2.1.1.1.2- Pehuajó

En Pehuajó el experimento se realizó sobre suelo Hapludol Éntico serie Piedritas. Esta serie se ubica en las lomas algo pronunciadas y cordones medanosos, el material originario es loess, presenta una pendiente aproximada de 0 a 1 %, el drenaje es moderado a bueno con escurrimiento medio y permeabilidad moderada a rápida, ligeramente alcalino en profundidad, y su principal limitación de uso es la baja capacidad de retención de humedad.

2.1.1.1.3- Pasteur

El sitio Pasteur se ubicó sobre suelos Hapludol Típico serie Lincoln. Esta serie presenta un suelo profundo, oscuro y con aptitud agrícola, que se encuentra en un paisaje suavemente ondulado, ocupando los sitios de lomas de la subregión pampa arenosa, con

escaso a moderado desarrollo, habiendo evolucionado sobre un sedimento eólico franco arenoso, no alcalino, no salino con pendiente predominante de 0-1 %.

2.1.1.1.4- Adolfo Gonzales Chaves

En Gonzales Chaves el experimento se ubico sobre la serie Tres Arroyos clasificada como Argiudol Cálcico, moderadamente somera. Esta serie de suelo se caracteriza por tener material originario sedimentos loéssicos, pendiente de 1 a 4 % comprendiendo áreas suavemente onduladas a moderadamente onduladas, presentar buen drenaje con escurrimiento rápido y permeabilidad moderada. Las limitaciones de uso principales de la serie son la ligera erosión hídrica y la moderada profundidad del suelo.

2.1.1.2.- *Condiciones climáticas y agroclimáticas*

La región de la Pampa Ondulada presenta características de clima templado, con temperaturas medias del mes más cálido (enero) de 23°C y temperaturas medias durante el mes más frío (julio) de aproximadamente 10°C. La radiación solar alcanza valores máximos entre noviembre y enero, y valores mínimos durante junio.

En San Antonio de Areco durante la campaña 2007 la temperatura media fue de 13,5°C, tanto la temperatura media como la temperatura máxima y mínima fueron menores al promedio histórico. Las precipitaciones durante mayo hasta diciembre de 2007 fueron 513 mm, de magnitud inferior a los registros históricos en los meses de junio, julio y agosto, y superiores a los registros de precipitaciones históricas en los meses de septiembre, octubre y noviembre (Fig. 3).

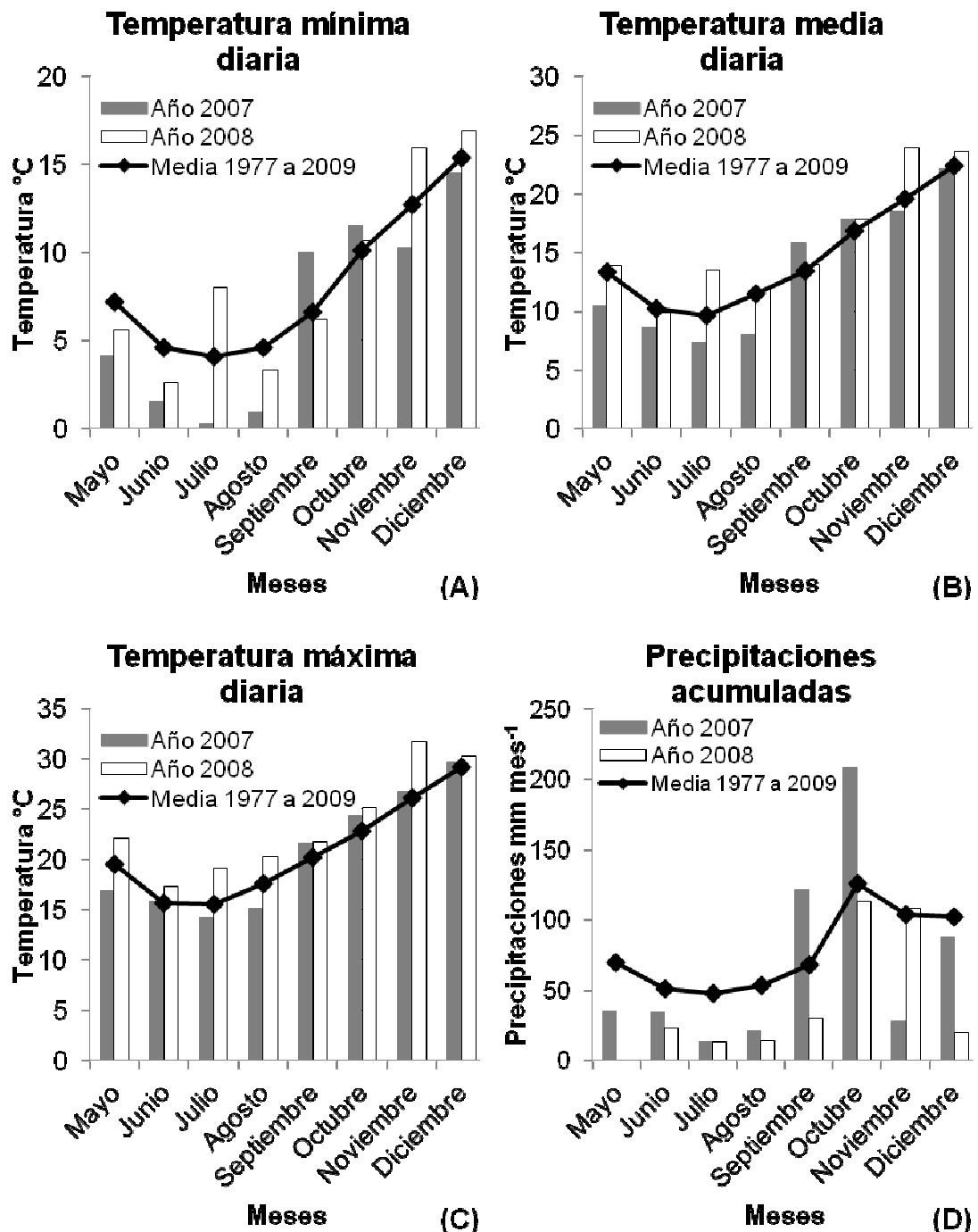


Figura 3: Resumen de promedios mensuales de temperatura mínima (A), media (B) y máxima (C), y precipitaciones (D) entre mayo y diciembre en San Antonio de Areco. Registros de temperaturas y precipitaciones de agencia de INTA San Antonio de Areco (com. pers.) desde 1977 hasta 2009.

En la campaña 2008-2009 las temperaturas fueron en magnitud similares al promedio histórico. La temperatura media durante el ciclo del cultivo fue de 16,3°C. Las

precipitaciones con excepción del mes de septiembre fueron inferiores al promedio histórico, aculándose durante mayo hasta diciembre 321 mm (Fig. 3).

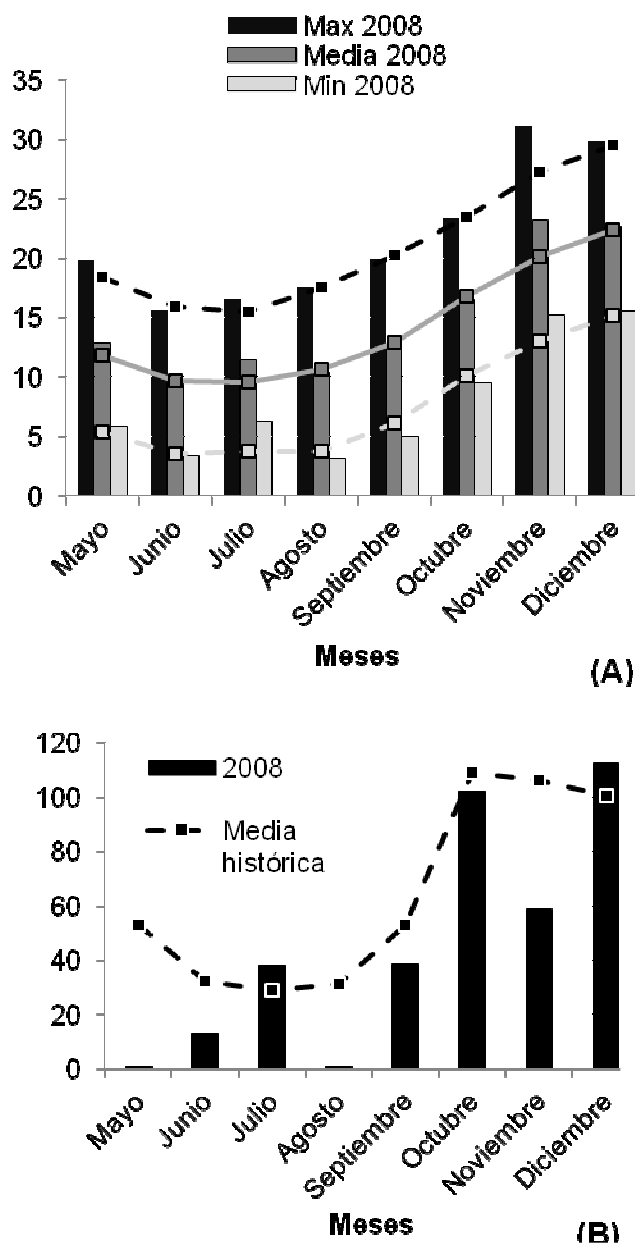


Figura 4: Resumen de temperaturas promedio mensuales (A) y precipitaciones acumuladas (B) entre mayo y diciembre en Pasteur para el año 2008 y para media histórica. Min 2008 = Temperatura mínima. Max 2008= Temperatura máxima. Media = Temperatura media. Registros de agencia de INTA Lincol (com. pers.) de temperaturas y precipitaciones desde 1969 hasta 2009.

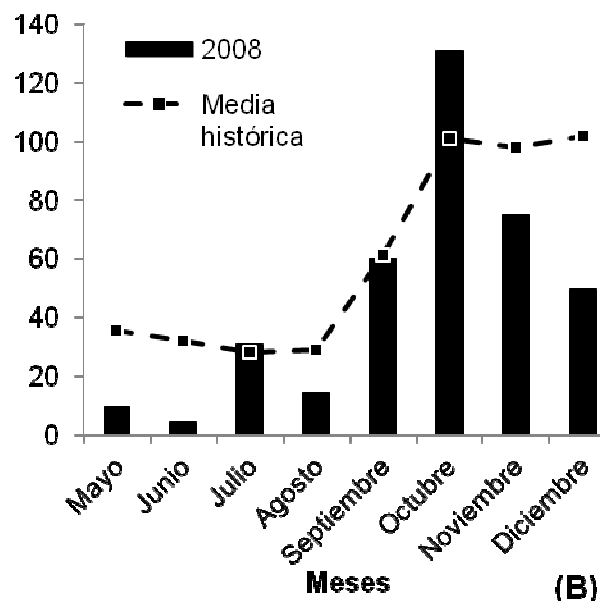
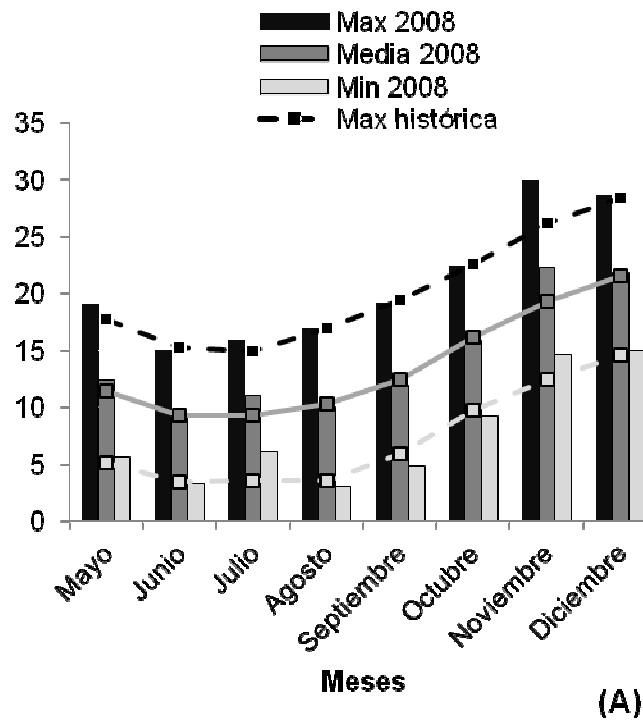


Figura 5: Resumen de temperaturas promedio mensuales (A) y precipitaciones acumuladas (B) entre mayo y diciembre en Pehuajó para el año 2008 y para media histórica. Min 2008 = Temperatura mínima. Max 2008= Temperatura máxima. Media = Temperatura media. Registros de temperaturas y precipitaciones de agencia de INTA Pehuajó (com. pers.). Temperaturas desde 1969 hasta 2009 y precipitaciones desde 1990 hasta 2009.

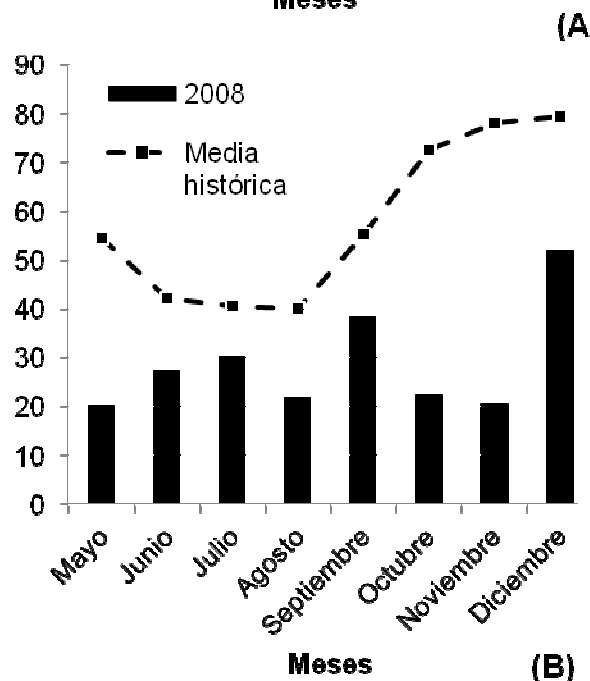
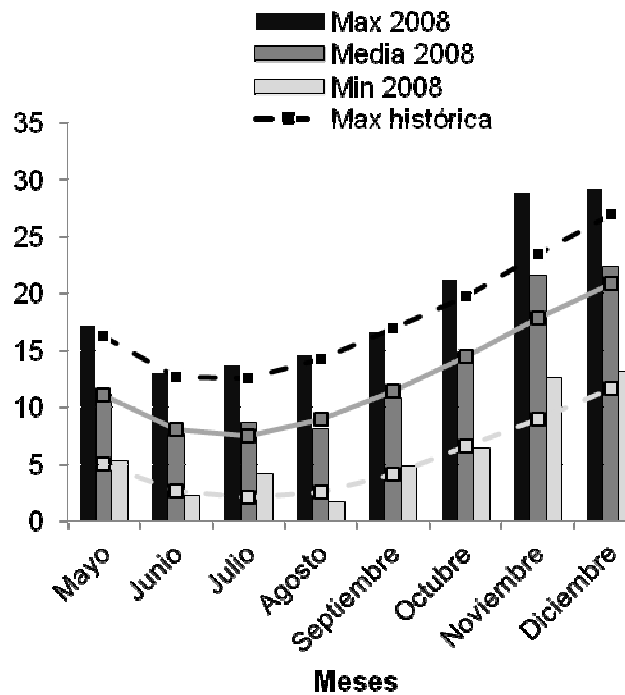


Figura 6: Resumen de temperaturas promedio mensuales (A) y precipitaciones acumuladas mensuales (B) entre mayo y diciembre en Adolfo Gonzales Chaves para el año 2008 y para media histórica. Min 2008 = Temperatura mínima. Max 2008= Temperatura máxima. Media = Temperatura media. Registros de temperaturas y precipitaciones de oficina de información técnica de INTA Adolfo Gonzales Chaves (com. pers.) desde 1972 hasta 2009.

En Pehuajó, Pasteur y Gonzales Chaves durante la campaña 2008 las temperaturas medias, mínimas y máximas no presentaron diferencias de magnitud con los promedios históricos en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, sin embargo las temperaturas de noviembre y diciembre fueron mayores a los promedios históricos. Las precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo fueron 23, 28 y 48 % menores en comparación a la media histórica, para Pehuajó, Pasteur y Gonzales Chaves, respectivamente (Fig. 4, 5, y 6).

2.1.2.- Delimitación de zonas de manejo y comparación de métodos

En tres lotes de producción de trigo (Lotes 1, 2 y 3. Tabla 1) se delimitaron zonas de manejo (ZM) empleando 8 metodologías:

- (i) Análisis de clúster de mapas de rendimiento (MR) de cultivos anteriores (Trigo, soja y maíz. Tabla 2) (Kitchen *et al.* 2004).
- (ii) Mapas de suelos (MS) escala 1:50000 (Tabla 3) (INTA, 1965).
- (iii) Análisis de clúster de índice verde de imágenes satelitales de cultivos anteriores (NDVIto) (Soja, maíz y trigo. Tabla 4) según la siguiente ecuación,

$$NDVI = (R_{NIR} - R_R) (R_{NIR} + R_R)^{-1} \dots\dots\dots ec.1$$

donde NDVI es el índice verde, R_{NIR} es la reflectancia en infrarrojo cercano (longitud de onda de 760-900 nm), y R_R es la reflectancia en rojo visible (longitud de onda de 630-690 nm).

- (iv) Análisis de clúster de NDVI (Ec. 1) de cultivos anteriores de trigo y maíz (NDVIgra) según tabla 4.

- (v) Fotointerpretación (FIS) de imágenes LandSat e NDVI de cultivos anteriores (Tabla 5). La fotointerpretación consistió en interpretación visual y análisis de contraste, de textura y de tono de imágenes LandSat en presencia y ausencia de cultivos, y en condiciones variables de agua en superficie. En presencia de cultivos se analizaron los atributos de las imágenes LandSat en longitudes de onda de 760-900, 630-690 y 520-600 nm. Para determinar condiciones variables de agua en superficie se analizaron las imágenes LandSat en longitudes de onda de 760-900, 1550-1750, y 2080-2350 nm.
- (vi) Antecedentes de manejo según información provista por el productor (AM). Las áreas del lote con menos tiempo a la última pastura fueron consideradas de mayor productividad. Además los sectores del lote donde el productor consideró que la producción era mayor también fueron considerados de mayor productividad estimada.
- (vii) Análisis de clúster de altimetría y pendiente (ALT). Se relevó la elevación del terreno recolectando datos de posicionamiento (latitud y longitud) y de elevación (m) con un GPS modelo Trimble® 4600LS durante el barbecho invernal previo a la siembra de trigo. El equipo de registro del posicionamiento se ubicó sobre un vehículo, con el que se recorrieron los lotes en transectas equidistantes cada 10 m y se confeccionó un mapa de elevación del terreno por medio de una interpolación con una grilla regular de 5 m de equidistancia según el método de “kriging”. La elevación se representó en mapas de curvas de contorno usando el programa Arcgis 9 (Arcgis desktop 9.3, copyright 1999-2008 ESRI). Se construyó un modelo

digital de elevación y se determinó la pendiente para cada punto de elevación. Luego, los registros procesados de elevación y de pendiente se ingresaron en el programa "Management Zone Analyst" (Mizzou-ARS, 2000) para su clasificación en zona homogéneas.

- (viii) Suma estandarizada (SE) descrita por Derby *et al.* (2007) integrando información de MR y e índice de productividad de MS (Fig. 7).

Tabla 1: Ubicación de los sitios experimentales, tipo de suelos y manejo de cultivo.

Lotes	Localidad	Tipo de suelo	Variedad	Superficie (ha)	Antecesor	Año
Lote 1	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	24	Soja	2007
Lote 2	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	29	Soja	2007
Lote 3	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	70	Soja	2007
Lote 4	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	15	Soja	2008
Lote 5	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	20	Soja	2008
Lote 6	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	34	Soja	2008
Lote 7	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	49	Soja	2008
Lote 8	Pehuajó	Hapludol Éntico	Nidera Baguette 10	35	Soja	2008
Lote 9	Pasteur	Hapludol Típico	Nidera Baguette 10	30	Soja	2008
Lote 10	Gonzales Chaves	Argiudol Cálculo	Nidera Baguette 10	40	Girasol	2008

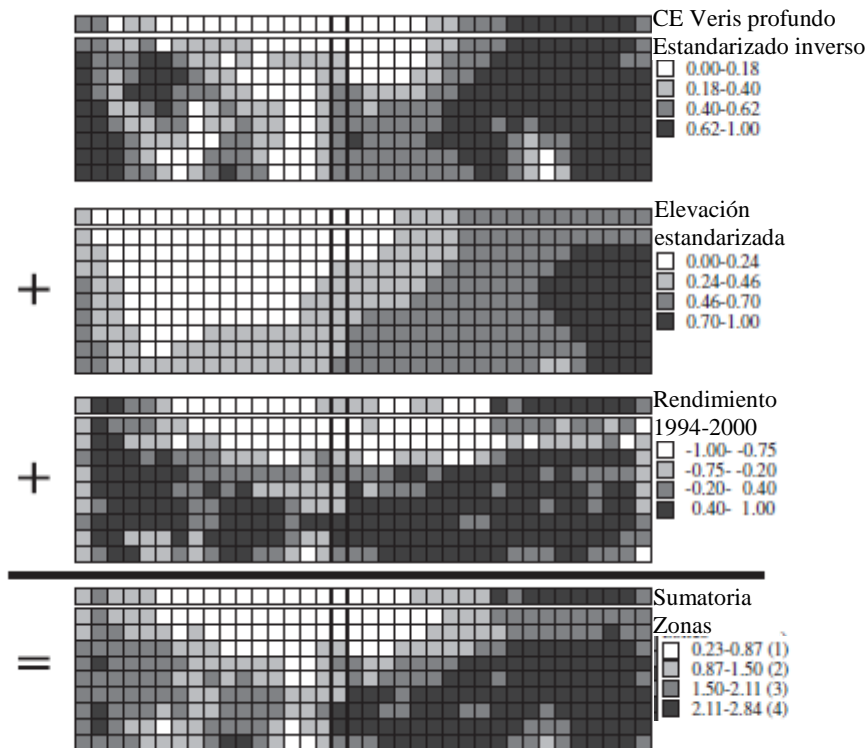


Figura 7. Suma estandarizada adaptada de Derby *et al.* (2007). Mapas de conductividad eléctrica profunda, elevación y promedio de 5 años de rendimientos, sumados para crear zonas mediante la suma estandarizada.

Las fuentes de información utilizadas, los atributos y los análisis realizados en cada metodología de delimitación de zonas de manejo se resumen en la Tabla 6. Para comparar las delimitaciones con los rendimientos de trigo en la campaña 2007 se utilizó la información proveniente de los mapas de rendimiento de la cosecha. La cosecha se realizó en los lotes 1, 2 y 3 con manejo representativo del área bajo estudio (antecesor soja, fecha de siembra de junio, fertilización con N, P y S, control de malezas y plagas). Todos los lotes fueron cosechados usando una máquina Gleaner, equipada con calibrado monitor de rendimiento Ag Leader Yield Monitor 2000 y sistema de posición geográfica diferencial Ag Leader 3050. La cosecha de trigo se realizó con un cabezal de 9,6 m (48 surcos), y los datos de rendimientos registrados cada 3 segundos. Los

rendimientos promedios determinados con el monitor de rendimiento tuvieron entre el 0,5 y el 1,5 % de diferencia con los promedios de todo el lote, indicando una buena calibración del monitor de rendimiento. Las ZM se agruparon en tres utilizando SMS Basic 1.01 con cortes naturales (Jenks) sobre los datos de rendimiento en kg ha^{-1} y se determinaron las zonas de alta, media y baja productividad observada.

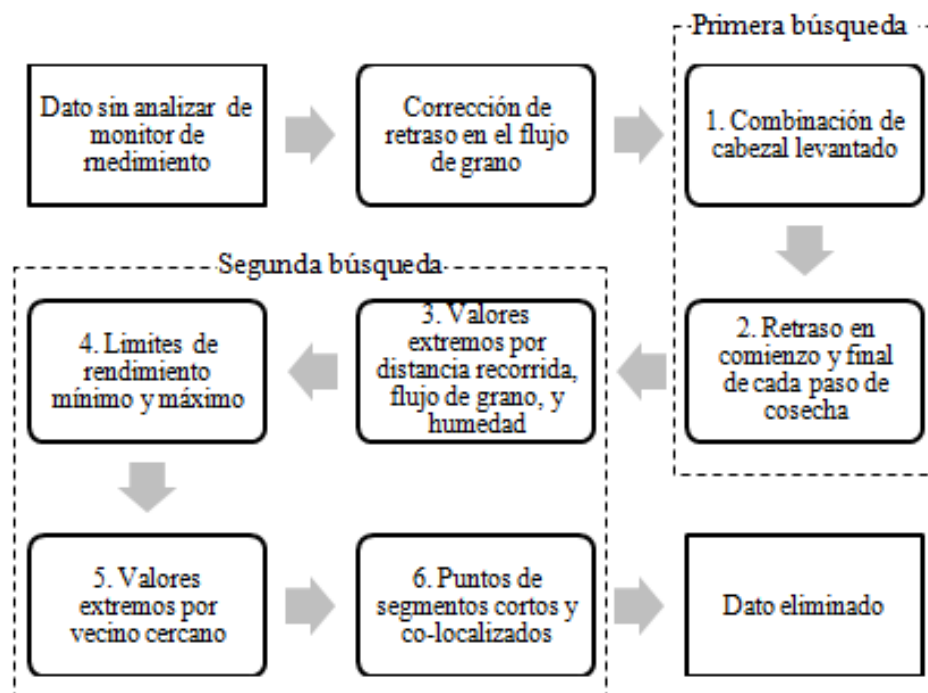


Figura 8. Modelo adaptado de Simbahan *et al.* (2004) para detectar 6 tipos de datos erróneos o inciertos de mapas de rendimientos.

Tabla 2: Cultivo de los mapas de rendimientos utilizados para la delimitación de zonas de manejo.

Año	Mes	Lote 1	Lote 2	Lote 3
2000	Abril		Maíz	
2003	Abril	Maíz	Soja	
2004	Abril	Soja		Soja
2004	Diciembre	Trigo		Trigo
2006	Abril	Maíz	Maíz	
2007	Abril	Soja	Soja	Soja

Tabla 3: Clasificación de zonas de productividad aparente según series de suelos. ZM = Zonas de manejo. INTA, 1965.

Lotes	ZM	Series de suelos	Superficie (ha)	Índice de productividad	Capacidad de uso
1	A	Capitán Sarmiento	11	80_A	I
	B	Capitán sarmiento severamente erosionada (35%), río tala ligeramente erosionada (30%), y gowland (35%).	13	53_A	IIIwe
2	A	Capitán Sarmiento moderadamente bien drenada y moderadamente erosionada.	6	64_A	I-II
	A	Capitán Sarmiento.	5	80_A	I
	A	Capitán sarmiento moderadamente bien drenada (70%), y río tala (30%).	10	70_A	I-II
	B	Capitán sarmiento severamente erosionada (35%), río tala ligeramente erosionada (30%), y gowland (35%).	8	53_A	IIIwe
3	A	Capitán sarmiento severamente erosionada (35%), río tala ligeramente erosionada (30%), y gowland (35%).	53	53_A	IIIwe
	A	Capitán sarmiento moderadamente bien drenada (70%), y río tala (30%).	8	70_A	I-II
	B	Complejo hidromórfico Cañada Honda	9	6_A	VIws

Cuando se utilizaron mapas de rendimiento se eliminaron errores en su confección utilizando la propuesta de Simbahan *et al.* (2004) (Fig. 8). Para las metodologías que requieren del agrupamiento de observaciones por análisis de clúster (MR, NDVIto, NDVIgra y ALT) se aplicó un procedimiento de agrupamiento difuso no supervisado utilizando el programa “Management Zone Analyst” (Fridgen *et al.* 2004). El procedimiento fue “no supervisado” porque no requiere conocimientos previos de las variables a clasificar sino que produce las agrupaciones naturales de los datos y fue

“difuso” porque permite que los datos que se están clasificando pertenezcan a distintos grupos.

Los resultados obtenidos se agruparon en zonas de alta (A), media (M) y baja (B) según su productividad aparente. En la delimitación realizada con MS y AM las ZM fueron dos: A y B.

Tabla 4: Cultivos utilizados para la delimitación de zonas de manejo según índices verdes de imágenes satelitales. + = Utilizado para la delimitación de zona de manejo con todos los cultivos. * = Utilizado para la delimitación de zona de manejo con gramíneas.

Año	Mes	Lote 1	Lote 2	Lote 3
2001	Enero		Soja+	
2001	Octubre			Trigo+*
2001	Diciembre		Maíz+*	
2002	Enero	Soja+		
2002	Diciembre	Maíz+*		Maíz y sorgo+*
2003	Enero		Soja+	
2003	Diciembre		Maíz+*	
2004	Enero	Soja+		Soja+
2004	Octubre	Trigo+*		Trigo+*
2005	Enero		Soja+	
2005	Diciembre	Maíz+*	Maíz+*	Maíz y sorgo+*
2007	Enero	Soja+	Soja+	Soja+

Para la comparación de coincidencia entre los métodos de delimitación se realizó para cada lote una cuadrícula de 10 m de lado con interpolación de cada capa de información utilizando la distancia inversa ponderada. La distancia máxima de inclusión de puntos fue de 20 m y la razón de influencia de los datos ubicados fuera del centro de la celdas fue de 0,4. En cada cuadrícula de la grilla se estudió si existió coincidencia total entre la clase de productividad de cada ZM (A, M ó B) según las metodologías de delimitación empleadas. Para cada comparación de métodos se calculó el porcentaje de coincidencias

sobre el total de puntos de la grilla. En las comparaciones entre métodos de delimitación que presentaban desigualdad en el número de zonas diferenciadas las zonas A y M se agruparon en una única zona con nivel de productividad A.

Tabla 5: Tipo de cobertura de suelos en las imágenes satelitales utilizadas para la delimitación de zonas de manejo mediante fotointerpretación. SC = Sin presencia de cultivo en crecimiento.

Año	Mes	Lote 1	Lote 2	Lote 3
2000	Junio	SC	SC	SC
2000	Septiembre	SC	SC	SC
2000	Noviembre	Maíz	Soja	Maíz
2001	Enero	Maíz	Soja	Maíz
2001	Febrero	Maíz	Soja	Maíz
2001	Marzo	Maíz	Soja	Maíz
2001	Abril	SC	Soja	SC
2001	Mayo	SC	SC	SC
2001	Agosto	SC	SC	Trigo
2001	Septiembre	SC	SC	Trigo
2001	Octubre	SC	Maíz	Trigo
2001	Noviembre	Soja	Maíz	Trigo
2001	Diciembre	Soja	Maíz	Trigo
2002	Enero	Soja	Maíz	Soja
2002	Abril	Soja	Maíz	Soja
2002	Mayo	SC	SC	SC
2002	Junio	SC	SC	SC
2002	Agosto	SC	SC	SC
2002	Octubre	Maíz	SC	Maíz y sorgo
2002	Diciembre	Maíz	Soja	Maíz y sorgo
2003	Enero	Maíz	Soja	Maíz y sorgo
2003	Marzo	Maíz	Soja	Maíz y sorgo
2003	Octubre	SC	Maíz	SC
2003	Diciembre	Soja	Maíz	Soja
2004	Enero	Soja	Maíz	Soja
2004	Octubre	Trigo	SC	Trigo
2005	Enero	Soja	Soja	Soja
2005	Diciembre	Maíz	Maíz	Maíz y sorgo
2007	Enero	Soja	Soja	Soja

Tabla 6: Resumen de fuente de información, atributo y tipo de análisis realizado para cada metodología de delimitación de zonas de manejo. NDVIgra = Índice verde diferencial normalizado de gramíneas. NDVIto = Índice verde diferencial normalizado de los cultivos de las rotación.

Metodología	Fuente de información	Atributos	Tipo de análisis
Mapas de rendimientos	Mapas de rendimientos	Rendimiento	Clúster no supervisado
Mapas de suelos	Mapas de suelos escala 1:50000	Índice de productividad	Sin análisis
NDVIto	Imágenes LandSat	Calculo de NDVI	Clúster no supervisado
NDVIgra	Imágenes LandSat	Calculo de NDVI	Clúster
Fotointerpretación de imágenes satelitales	Imágenes LandSat	Combinación de bandas y NDVI	Fotointerpretación
Antecedentes de manejo	Productor y asesor	Secuencia de cultivos	Selección por antecesor
Altimetría y pendiente	Altimetría geodésica en lote	Altimetría y pendiente	Clúster
Suma estandarizada	Mapas de rendimientos Mapas de suelos	Rendimiento Índice de productividad	Suma estandarizada

Para el manejo de la información georreferenciada de MR, FIS, AM, SE, NDVIto, NDVIgra, ALT y MS se utilizaron los programas SMS Basic 1.01 (Ag Leader Technol.) y GeoAgro GIS (GeoAgro).

Para analizar el grado de coincidencia entre las metodologías de delimitación y entre éstas y el rendimiento de trigo se consideró un modelo con 3 repeticiones (lotes) y un factor principal (métodos de delimitación). En todos los casos se utilizaron ANVA protegidos ($p < 0,10$) y pruebas de diferencias de medias de Fisher (Infostat 2003).

2.2- ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRATEGIAS DE DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO

2.2.1- Superficie asignada a cada ZM según metodología de delimitación

Los mapas de delimitaciones de zonas de manejo (Fig. 9, 10 y 11) mostraron diferencias en la proporción de la superficie asignada a cada ZM. En promedio las metodologías de delimitación de zonas de manejo determinaron 45,7 % de la superficie de los lotes a las zonas de productividad aparente alta, y el 31,1 % de la superficie a las zonas de productividad aparente baja (Tabla 7).

Tabla 7: Superficie de zonas de manejo en lotes 1, 2 y 3 según productividad aparente de 8 metodologías y según cada zona de rendimientos de trigo logrados.

Metodología De delimitación	Lote 1			Lote 2			Lote 3			Promedio		
	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja	Alta	Media	Baja
----- % -----												
MR	41,7	39,9	18,4	49,4	44,2	6,4	27,1	36,7	36,2	39,4	40,3	20,3
SE	32,8	19,6	47,5	27,1	44,4	28,5	46,6	42,2	11,3	35,5	35,4	29,1
NDVIgra	82,3	12,3	5,4	44,1	39,9	16,1	37,8	44,1	18,1	54,7	32,1	13,2
NDVItto	49,1	12,3	38,7	41,2	47,3	11,5	48,7	39,7	11,6	46,3	33,1	20,6
FIS	37,5	31,4	31,1	72,0	12,3	15,7	77,0	18,1	4,9	62,2	20,6	17,2
MS	32,9		67,1	70,9		29,1	91,1		8,9	65,0		35,0
AM	36,2		63,8	6,4		93,6	24,6		75,4	22,4		77,6
ALT	46,0	28,8	25,2	44,2	8,7	47,1	29,8	30,8	39,4	40,0	22,7	37,2
Promedio	44,8	24,1	37,1	44,4	32,8	31,0	47,8	35,3	25,7	45,7	30,7	31,3
Trigo 2007	33,3	30,9	35,8	18,9	47,4	33,8	29,3	41,3	29,4	27,1	39,8	33,0

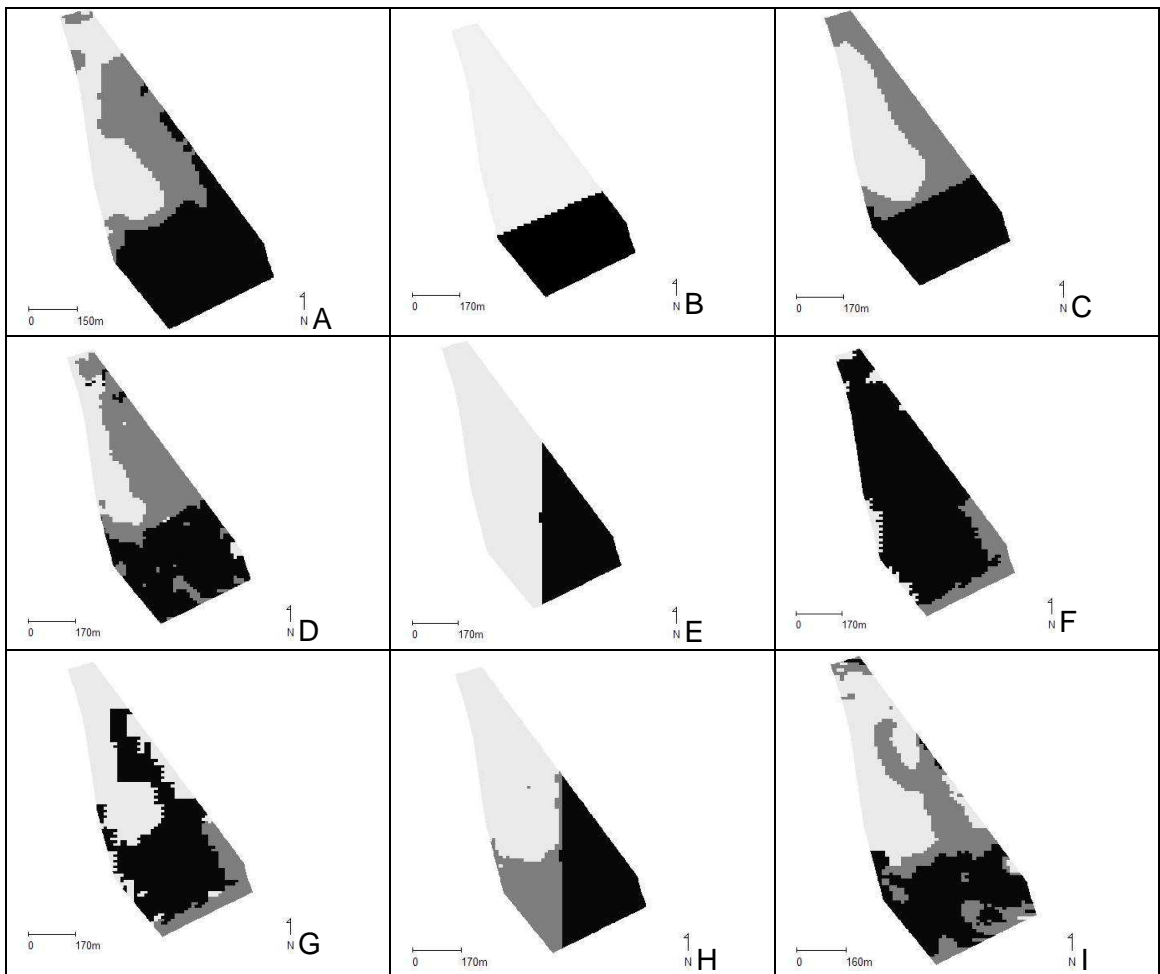


Figura 9: Delimitaciones realizadas en el lote 1. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos. I= Mapa de rendimientos de trigo 2007. Zonas de productividad alta, media y baja expresadas en negro, gris y blanco, respectivamente.

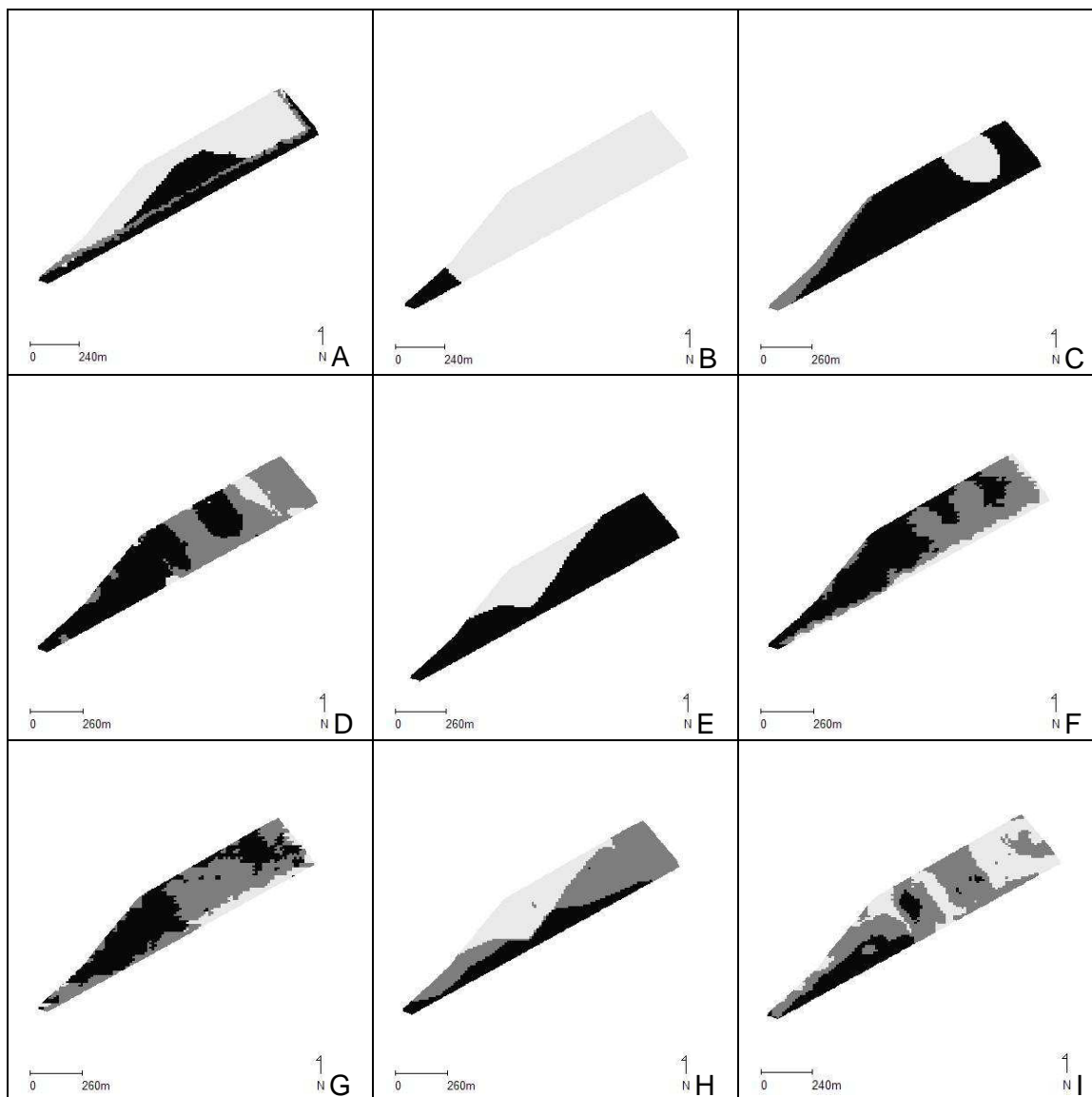


Figura 10: Delimitaciones realizadas en el lote 2. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos. I= Mapa de rendimientos de trigo 2007. Zonas de productividad alta, media y baja expresadas en negro, gris y blanco, respectivamente.

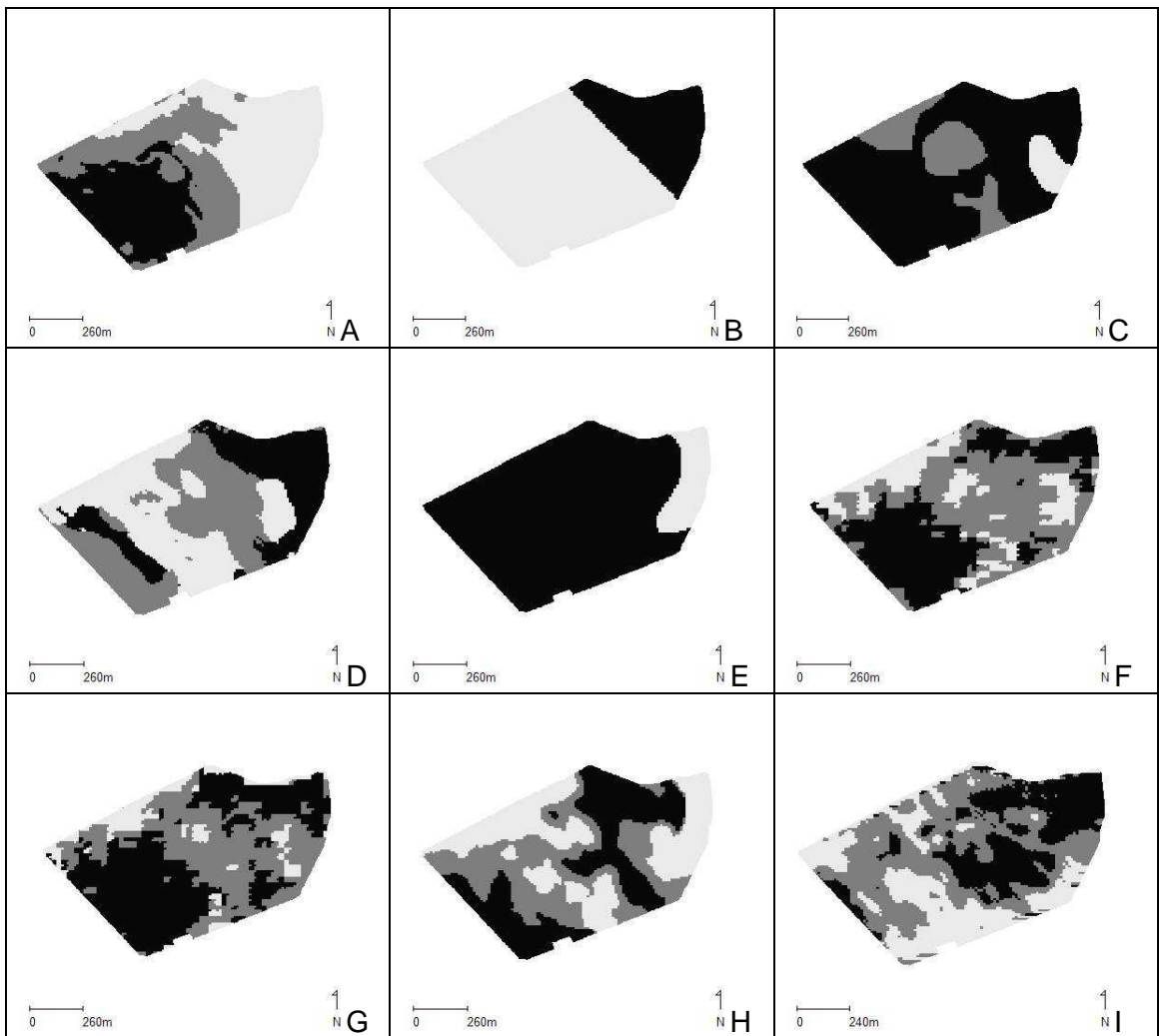


Figura 11: Delimitaciones realizadas en el lote 3. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos. I= Mapa de rendimientos de trigo 2007. Zonas de productividad alta, media y baja expresadas en negro, gris y blanco, respectivamente.

Los rendimientos de trigo logrados en cada lote se presentan en la tabla 8. Utilizando la metodología que considera los rendimientos logrados de trigo, en promedio el 27,1 % de la superficie corresponde las zonas de productividad alta y el 33,0 % de la superficie a zonas de productividad baja. El rango de variación de la superficie según productividad entre las 8 metodologías y la delimitación con los rendimientos de trigo

logrados fue de 61,0 a 0,1 %. Las mayores precisiones en las diferentes metodologías en la superficie según zonas de productividad al compararlas con los rendimientos de trigo se obtuvieron en el lote de mayor rendimiento y en la zona de alta productividad estimada. La metodología que tuvo diferencias menores con los rendimientos observados de trigo fue MR. En general, en todas las metodologías la superficie determinada como de baja productividad disminuyo cuando el rendimiento del lote promedio fue menor. El lote de menor rendimiento de trigo (Lote 3) tuvo para 5 de las 8 metodologías una superficie de baja productividad menor a 19,0 % (Tabla 7).

Tabla 8: Rendimientos de grano logrados en cada lote.

Lotes	Rendimiento		
	Promedio	Mínimo	Máximo
	----- kg ha ⁻¹ -----		
Lote 1	5765	3716	7092
Lote 2	3445	1846	5424
Lote 3	2647	1614	3700

2.2.2- Superposición de áreas con igual productividad según metodologías de delimitación

Las superposiciones de áreas con diferente productividad aparente empleando 8 metodologías de delimitación variaron entre el 12,9 y el 98,1 %. De las 23 combinaciones entre los métodos estudiadas, 5 determinaron zonas de manejo que presentaban coincidencia en ubicación y nivel de productividad mayor al 60 %. La similitud entre MS y SE fue mayor que el resto de las similitudes estudiadas, sin diferenciarse con la similitud encontrada entre MS y FIS, y MS y NDVIto, y con diferencias mayores al 20 % con el resto de las similitudes (Tabla 9).

Tabla 9: Similitud entre las metodologías de delimitación utilizadas. NDVIgra = índice verde diferencial normalizado de gramíneas. NDVIto = índice verde diferencial normalizado de los cultivos de las rotación. Letras diferentes muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre comparaciones de similitud entre métodos.

Métodos de delimitación	Similitud (%)	
Mapa de suelo - Suma estandarizada	92,1	A
Mapa de suelo – Fotointerpretación de imágenes	71,5	A B
Mapa de suelo – Índice de verdor todos los cultivos	69,4	A B C
Índice de verdor todos los cultivos – NDVIgra	66,3	B C D
Mapa de suelo – Altimetría y pendiente	63,3	B C D E
Altimetría y pendiente – Fotointerpretación de imágenes	58,8	B C D E F
Mapa de suelo – Mapa de rendimiento	57,6	B C D E F G
Mapa de suelo - NDVIgra	56,9	B C D E F G H
Altimetría y pendiente – Suma estandarizada	51,6	B C D E F G H I
Fotointerpretación de imágenes – Suma estandarizada	49,7	B C D E F G H I
Mapa de rendimiento - Fotointerpretación de imágenes	49,2	B C D E F G H I
Índice de verdor todos los cultivos – Mapa de rendimiento	47,7	C D E F G H I
NDVIgra – Mapa de rendimiento	47,3	C D E F G H I
NDVIto- Fotointerpretación de imágenes	46,0	C D E F G H I
Mapa de rendimiento – Altimetría y pendiente	45,8	D E F G H I
Antecedente de manejo – Suma estandarizada	45,6	D E F G H I
Índice de verdor todos los cultivos – Suma estandarizada	45,0	D E F G H I
Antecedente de manejo – Altimetría y pendiente	43,5	D E F G H I
Mapa de suelo – Antecedente de manejo	43,3	D E F G H I
Antecedente de manejo – Mapas de rendimiento	40,0	E F G H I
Antecedentes de manejo – Índice verdor todos los cultivos	39,5	F G H I
Índice verdor de todos los cultivos – Altimetría y pendiente	39,2	F G H I
Mapa de rendimiento – Suma estandarizada	38,1	F G H I
Antecedente de manejo – Fotointerpretación de imágenes	36,4	F G H I
NDVIgra – Fotointerpretación de imágenes	35,9	F G H I
NDVIgra – Altimetría y pendiente	34,6	G H I
NDVIgra – Suma estandarizada	34,1	H I
Antecedentes de manejo – NDVIgra	31,2	I

La mayor similitud (92,1 %) entre SE y MS, puede ser explicada debido a que la delimitación realizada con SE incluye información de MS. Las variaciones del índice

de productividad que determinan las diferencias entre las zonas de manejo del mapa de suelos (INTA, 1965) son mayores que las diferencias de rendimientos ponderado observados en los mapas de rendimientos. Justificando parcialmente porque las zonas delimitadas mediante SE mostro mayor similitud a la zonificación por MS que por los MR (Tabla 9).

El resultado de la delimitación de zonas dependió de la información utilizada y de la metodología de análisis de la información. Las metodologías NDVIgra, NDVIto y FIS utilizaron información de imágenes satelitales. La similitud entre las metodologías que utilizaron el índice verde de gramíneas y de todos los cultivos fue del 66,3 %, la similitud entre éstas y FIS fue del 46,0 y del 35,9 % para NDVIto y para NDVIgra, respectivamente. La utilización del mismo tipo de información, tal como las imágenes satelitales, no determinó que se logre las mayores similitudes de ZM.

Son escasos los trabajos que comparen la similitud entre metodologías de delimitación, y en general integran información y no muestran diferencias entre las metodologías utilizadas. Las diferencias de similitud entre métodos observadas difiere con lo obtenido por Derby *et al.* (2007), utilizando métodos de delimitación con información de color de suelo sin cultivo e integrada con niveles de N del suelo, conductividad eléctrica aparente, rendimiento de cultivos de la rotación y altimetría en lotes de riego del norte de Dakota (USA). Khosla *et al.* (2006) en lotes bajo riego artificial del noreste de Colorado (USA) comparó dos métodos de información integrada con un testigo (análisis de clúster de rendimiento de tres años de cultivo de maíz) encontrando diferencias entre las metodologías y mejor estimación de la productividad de maíz con un método que integra información de imagen de suelo sin cultivo, topografía y conocimiento del

productor comparado con imagen de suelo sin cultivo, contenido de carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, textura y rendimiento de los cultivos. Ortega y Santibáñez (2007) en Chile utilizando la misma información de fertilidad de los suelos y con diferencias en el método de análisis de la información (análisis de clúster, análisis de componentes principales y coeficiente de variación) mostraron que las tres metodologías generaron patrones de agrupamiento de sitios similares y adecuada delimitación de zonas dentro de los lotes según la fertilidad de los suelos.

La delimitación de ZM con diferente nivel de productividad según las 8 metodologías evaluadas mostró una variada coincidencia con las ZM de alta, media y baja productividad lograda. La similitud entre áreas de productividad de métodos de delimitación con la delimitación según rendimientos observados varió entre 22,7 y 70,8 %, con promedios 60,6, 39,2 y 40,2 % para de los lotes 1, 2 y 3, respectivamente. En promedio la mayor similitud en las áreas delimitadas entre métodos predictivos y los rendimientos observados se logró utilizando MS (59,9 %). Este método mostró diferencias menores al 10 % con las similitudes observadas utilizando antecedentes de manejo (53,3 %) y mapas de rendimientos integrados (50,3 %) (Tabla 10). FIS y otros métodos que incluyen información de imágenes satelitales mostraron similitud inferior al 50 % con respecto a la delimitación con los rendimientos logrados. La utilización de información integrada de suelos y de rendimientos de cultivos previos no permitió mejorar los resultados de los métodos de información independiente en comparación con los rendimientos logrados de trigo (tabla 10).

Tabla 10: Similitud entre las metodologías de delimitación utilizadas y la delimitación con rendimientos observados de trigo. Letras diferentes muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) de similitud entre los métodos y los rendimientos observados de trigo

Método de delimitación	Similitud (%)	
Mapa de suelo	59,9	A
Antecedente de manejo	53,3	A B
Mapa de rendimiento	50,3	A B
Fotointerpretación de imágenes satelitales	46,0	B
Altimetría y pendiente	44,1	B C
Suma estandarizada	43,7	B C
Índice de verdor de todos los cultivos	43,0	B C
Índice de verdor de cultivos de gramíneas	32,8	C

Tanto para Khosla *et al.* (2006) en el noreste de Colorado (USA) como para las condiciones de este estudio, el conocimiento de los antecedentes productivos de los lotes por el productor permite diferenciar patrones de agrupamiento de rendimiento de trigo. Por el contrario, la posición topográfica que fue parte de la mejor información para determinar zonas de productividad de trigo en el noreste de Colorado (USA) mostro baja relación con los rendimientos logrados de trigo (44,1 %). Los rendimientos de cultivos de la rotación se utilizaron en una metodología integrada con imágenes de suelos sin vegetación, contenido de carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico y textura para delimitar zonas de manejo en Colorado (USA). Esta metodología no mostró buena similitud con los patrones de agrupamiento de rendimientos de trigo en el noreste de Colorado, pero utilizados como única información en la región pampa ondulada la similitud con los rendimientos observados de trigo fue de 50,3 %. MR fue una de las 3 metodologías que tuvo similitudes mayores al 50 % con los rendimientos logrados (Tabla 10).

Las diferencias de similitud entre los métodos estudiados y estos con los patrones de agrupamiento de rendimientos de trigo en la campaña bajo estudio (Tablas 9 y 10) sugieren la importancia de cuantificar la variabilidad en propiedades edáficas y de producción del cultivo entre las ZM delimitadas. También, sugieren establecer el efecto de esta moderada similitud de delimitación sobre la implementación de prácticas de manejo diferenciado según ZM en Argiudoles de la pampa ondulada.

CAPÍTULO III

PROPIEDADES DE LOS SUELOS SEGÚN ZONAS DE MANEJO DELIMITADAS MEDIANTE DIFERENTES METODOLOGÍAS

3.1- INTRODUCCIÓN

La productividad de los cultivos ha sido limitada por la disponibilidad de agua y de nutrientes. Las limitantes al consumo de agua fueron descritas como el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento de los cultivos de secano (Boyer, 1982). Se han determinado relaciones estrechas entre algunos parámetros de los suelos y la producción de cultivos. Por ejemplo, en trigo los rendimientos se asociaron positivamente con la disponibilidad de nitrógeno y de fósforo, el contenido de agua en el suelo en el momento de la siembra, el contenido de carbono orgánico y la profundidad efectiva (Álvarez y Grigera 2005; Diaz-Zorita *et al.* 1999). La variación espacial de las propiedades de suelo, tanto permanentes (textura y espesor de horizontes de suelo) como dinámicas (contenido de nutrientes y disponibilidad de agua), ha sido uno de los determinantes de la variación de los rendimientos que se observaron en un cultivo para una misma condición de clima (Terra *et al.* 2006; Gregoret *et al.* 2006a; Wong y Asseng. 2006).

Se han observado diferencias dentro del lote en el contenido nutrientes, materia orgánica (Zubillaga *et al.* 2006a) y en la textura (Di Pietro *et al.* 1986) como así también en los procesos presentes en el suelo como mineralización (Zubillaga *et al.* 1991; Zubillaga *et al.* 2005; Zubillaga *et al.* 2006b; Zubillaga *et al.* 2009) y retención de agua (Gregoret *et al.* 2005). Las propiedades físicas y químicas de los suelos tales como la capacidad de retención de agua, el contenido de materia

orgánica y de nutrientes, pueden variar espacialmente y en general se han asociado con la topografía del terreno (Chamran *et al.* 2002). Es por lo tanto importante cuantificar la variabilidad de propiedades de los suelos, ya que los cultivos han respondido a estas diferencias con distintos comportamientos en su desarrollo y crecimiento, dando lugar a la aplicación de diferentes prácticas de manejo aún dentro de un mismo lote (Timlin *et al.* 1998; Miao *et al.* 2006). La variabilidad biológica dentro de los lotes ha sido de magnitud similar a la variabilidad debida al tipo de suelo, e incluye diferencias en las poblaciones de microorganismos, de malezas, de insectos, y de enfermedades que afectan a la normal producción de los cultivos. Los nutrientes en el perfil del suelo representan el equilibrio que existe entre numerosos procesos. Específicamente en N, estos procesos han incluido mineralización, inmovilización, desnitrificación, volatilización, nitrificación, absorción de la planta, y lixiviación. Mulla y Schepers (1997) detallaron que las características que se relacionan con estos procesos varían con las características del suelo tales como contenido en agua, temperatura, pH, textura, contenido de materia orgánica, y estado del drenaje.

El muestreo de suelos es una práctica importante para definir las necesidades de fertilización según cultivos. Es estandarizada la realización de muestreos que contemplen la totalidad del lote, con muestras tomadas incluyendo zonas de manejo diferentes y resultados que no han expresado la variabilidad existente. Para observar la variabilidad y realizar manejos sitio específicos se han utilizado en general dos estrategias: (i) muestreos en grillas y (ii) muestreos dentro de zonas del lote delimitadas por diferentes metodologías. Algunas de las ventajas mencionadas del muestreo de zonas delimitadas en relación al sistematizado son

la disminución de costos y el tiempo requerido. Siendo una debilidad que las zonas delimitadas deben representar correctamente las variaciones presentes.

Las metodologías para la delimitación de zonas de manejo dentro de lotes de producción difieren según sus objetivos de aplicación. Uno de los objetivos ha sido determinar la variabilidad en la oferta de nutrientes según tipos de suelos. Taylor *et al.* (2007) han sugerido que para delimitar clases de manejo para un lote debe utilizarse información de la respuesta final del cultivo (e.g. registros de rendimientos georeferenciados) y de factores que determinen el rendimiento según la región a trabajar (e.g. humedad del suelo). La utilización de información de manejo de los lotes, suelos y/o productividad de los cultivos indican indirectamente la condición hídrica de las ZM de un lote determinado en cultivos donde ésta es un factor determinante de la variación. Por lo tanto, diferencias en las delimitaciones de ZM podrían afectar los parámetros considerados para el diagnóstico y recomendación de por ejemplo necesidades de fertilización con nitrógeno y la respuesta de los cultivos a esta práctica.

3.1.1- Hipótesis

Las propiedades de suelos que identifican las ZM intralote son diferentes según la productividad aparente y la metodología de delimitación considerada. Las propiedades de suelos permanentes durante el ciclo del cultivo, tales como textura y contenido de carbono orgánico, muestran diferencias entre zonas delimitadas considerando los tipos de suelos y las posiciones en el relieve. Las zonas de productividad baja delimitadas mediante posiciones en el relieve y tipos de suelos

tienen mayores contenidos de arcilla, y coinciden con fases de erosión de los suelos.

3.1.2- Objetivos

Establecer las diferencias en propiedades superficiales de suelos y en los contenidos de agua durante el ciclo de crecimiento de trigo de Argiudoles Típicos de la región pampa ondulada según ZM.

3.2- MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1- Ubicación de los sitios experimentales y delimitación de zonas de manejo.

Los experimentos fueron conducidos en 3 lotes de producción de trigo (Lotes 1, 2 y 3, de tabla 1) en la campaña 2007-2008 en San Antonio de Areco. Son suelos Argiudoles Típicos correspondientes a la serie de suelos Capitán Sarmiento. En cada lote se delimitaron zonas de manejo, previo a la siembra de trigo utilizando 8 metodologías: MR, MS, NDVIgra, NDVIto, FIS, AM, ALT y SE, y después de la cosecha de trigo utilizando los rendimientos observados de trigo.

3.2.2- Caracterización de propiedades superficiales de suelo y contenido de agua durante el ciclo del cultivo

En cada una de las zonas delimitadas se evaluó sus propiedades edáficas y el contenido de humedad de los suelos. Las propiedades edáficas se evaluaron antes de la siembra mediante muestreos estratificados con un mínimo de 30 submuestras (Fig. 12). En la capa de 0 a 0,2 m se determinó textura por

sedimentación (Método de la pipeta; Walter *et al.*, 1978), contenidos de carbono orgánico (COT) (Método combustión húmeda; Nelson y Sommers, 1996), fósforo extractable (Pe) (Método de Bray y Kurtz N°1; Kuo, 1996), pH en agua reacción 1:2,5 (pH) (Método potenciométrico), conductividad eléctrica (CE) (Método potenciométrico), nitrógeno total (N_{total}) (Método de combustión húmeda; Nelson y Sommers, 1996) y nitrógeno de nitratos (N₂₀) (Método ácido fenoldisulfónico; Bremmer, 1996). Además, en muestreos de las capas de 0,2 a 0,4 m de profundidad se determinó el contenido de nitrógeno de nitratos (N₄₀) (Método ácido fenoldisulfónico; Bremmer, 1996).

La densidad aparente se determinó en capas de 0,2 m hasta los 1,2 m de profundidad de suelos. Las determinaciones son promedio de 5 sitios de muestreos (Método de Blake y Hartge, 1986) (Tabla 11). La oferta de nitrógeno del suelo (N_{Su}) se estimó por la suma de los cocientes entre la densidad aparente de cada capa y los contenidos de nitrógeno de nitratos determinados. Se calculó el nitrógeno disponible (Nd) en los primeros 0,4 m de suelo considerando la densidad aparente. Se calculó el cociente IMO (Pieri, 1995) en la capa de los primeros 0,2 m de suelo:

$$\text{IMO} = (\text{MO}) (\text{Limo} + \text{Arcilla})^{-1} (100) \quad \text{ec. 2}$$

donde IMO es el índice de materia orgánica, MO es el contenido de materia orgánica en %, Limo es el contenido de limo en %, y Arcilla es el contenido de arcilla en %.

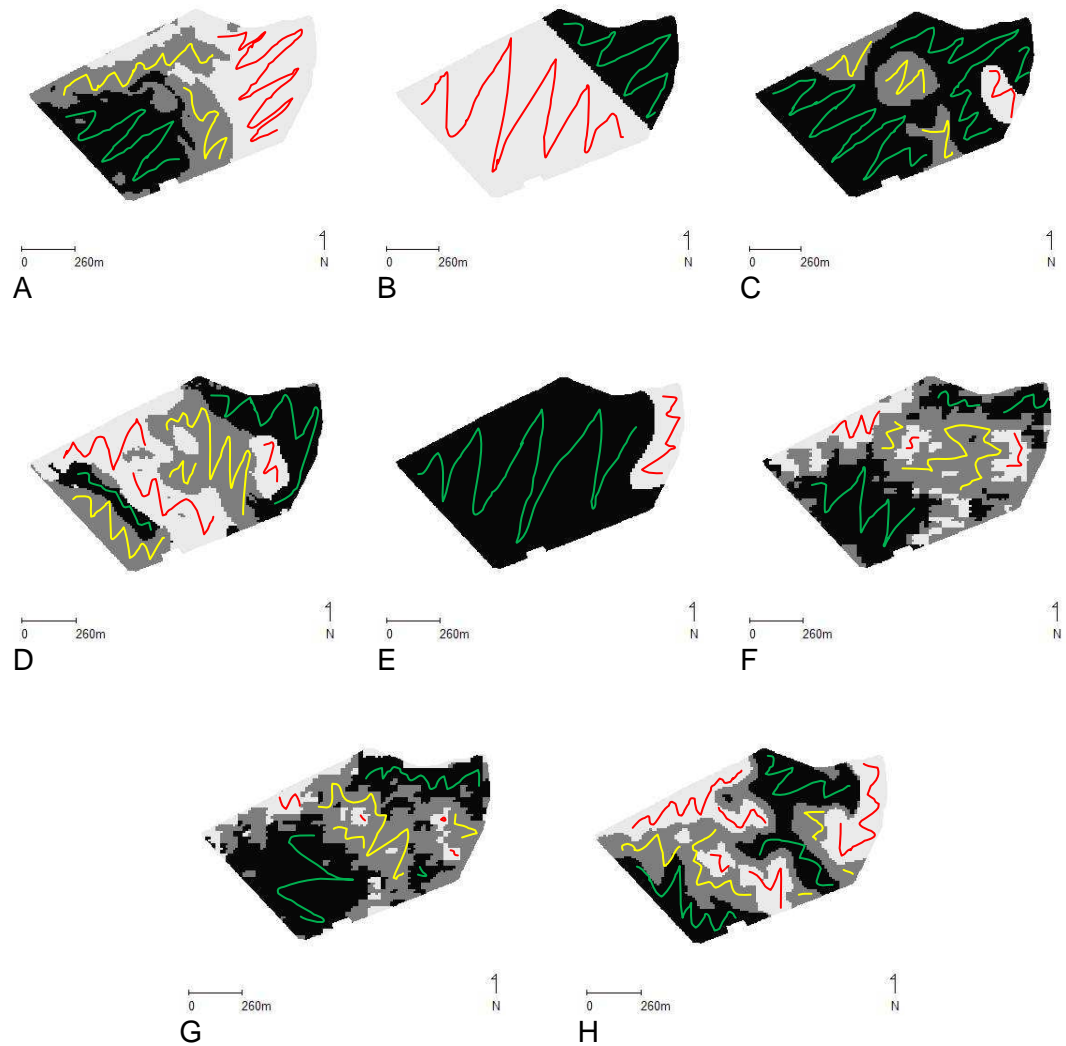


Figura 12: Muestreo estratificado por zonas de manejo. Estratificación del lote 3 para muestreo mediante delimitación de zonas de manejo de alta, media y baja productividad según áreas negras, gris oscuro y gris claro, respectivamente. Líneas en zigzag verdes, amarillas y rojas representan el trayecto realizado para muestreos de suelos en zonas de productividad alta, media y baja. Los sitios donde se toman las muestras resultaron de obtener 30 submuestras en la totalidad del trayecto realizado en cada zona de manejo. A= Altimetría. B= Antecedentes de manejo. C= Fotointerpretación de imágenes satelitales. D= Mapas de rendimientos. E= Mapas de suelos. F= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz y trigo. G= Análisis de clúster de índice de verdor normalizado de maíz, trigo y soja. H= Suma estandarizada de datos de mapas de rendimientos y mapas de suelos.

Los muestreos realizados fueron uno por ZM. En las ZM donde el área era superior a 100000 m² y en las ZM que no tenían superficie continua se realizó más de un muestreo.

Tabla 11: Resumen de densidad aparente promedio de todos los lotes y zonas de manejo según capas de 0,2 m hasta la profundidad de suelos de 1,2 m.

Profundidad (m)	0 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,6	0,6 a 0,8	0,8 a 1,0	1,0 a 1,2
Densidad (Mg m ⁻³)	1,30	1,37	1,42	1,42	1,47	1,47

Los contenidos de humedad gravimétrica se evaluaron en capas de 0,2 m de espesor hasta 1,20 m de profundidad. Los muestreos se realizaron por ZM con 5 sitios de muestreo por zona. Los momentos de muestreo fueron en la siembra, primer nudo visible, aparición del primer cuarto de la espiga y en la cosecha de trigo correspondiendo a los estados fenológicos (Zadok *et al.* 1974) de Z31, Z53 y Z90, respectivamente. Se calculó la lámina de agua cada 0,2 m utilizando datos de densidad aparente promedio. S20, S40, S60, S80, S100, S120 y S140 representan los contenidos de agua al momento de la siembra de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente. Z₃₁20, Z₃₁40, Z₃₁60, Z₃₁80, Z₃₁100, Z₃₁120, y Z₃₁140 representan los contenidos de agua al detectar el primer nudo del cultivo de trigo de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente. Z₅₃20, Z₅₃40, Z₅₃60, y Z₅₃80, Z₅₃100, Z₅₃120, y Z₅₃140 representan los contenidos de agua en emergencia de la cuarta parte de la espiga de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente. C20, C40, C60, C80, C100, C120, y C140

representan los contenidos de agua al momento de la cosecha de trigo de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente.

Para la descripción de las propiedades de suelo y el contenido de agua de las zonas de manejo delimitadas con la información de rendimientos observados de trigo se interpolaron los datos de la caracterización de las zonas de manejo de productividad aparente. La interpolación de cada capa de información se realizó utilizando la distancia inversa ponderada. La distancia máxima de inclusión de puntos fue de 20 m y la razón de influencia de los datos ubicados fuera del centro de la celda fue de 0,4.

3.2.3- Análisis estadístico

Para determinar las diferencias en las propiedades de suelo y los contenidos de humedad según las metodologías de delimitación y las zonas de productividad se consideró un modelo en bloques al azar con 3 repeticiones (lotes) y 2 factores principales ZM (A, M y B productividad) y metodologías de delimitación (MR, NDVIto, NDVIgra, ALT, FIS, HM, MS y SE). Se consideró que existe interacción entre los factores zonas de manejo y metodologías de delimitación. Además, las propiedades de suelos se analizaron mediante regresiones y mediante análisis de componentes principales.

En todos los casos se utilizaron ANVA protegidos ($p < 0,10$) y pruebas de diferencias de medias de Fisher (Infostat 2003).

3.3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1- Propiedades superficiales de los suelos

El rango de valores para las variables estudiadas según 8 metodologías de delimitación en los lotes 1, 2 y 3 se presenta en la tabla 12. Las mayores variaciones se observaron en el nitrógeno disponible en el suelo, fósforo extractable y conductividad eléctrica, 53, 73 y 80 % de diferencias entre los valores máximos y mínimos, respectivamente.

Los valores de las propiedades de suelo son representativos de los encontrados por otros autores en la región de estudio (Conti *et al.* 1980; Vázquez y Leroux, 1983; Di Pietro *et al.* 1986; Vázquez *et al.* 1990; Alvarez *et al.* 2006a; Zubillaga *et al.* 2006a). Di Pietro *et al.* (1986) mostraron valores de arcilla promedio de 281 mg kg⁻¹ y coeficiente de variación de 5 %. En este estudio las variaciones en los niveles de arcilla son mayores y el nivel promedio es menor (275 mg kg⁻¹).

El pH promedio fue de 5,92 estando en el rango de niveles promedio observados por Conti *et al.* (1980) (niveles de pH de 5,8 a 5,9) y por Alvarez *et al.* (2006a) (niveles de pH de 5,8 a 6,2). Las variaciones y los niveles promedio de COT y Nt fueron menores a los observados por Conti *et al.* (1980) y por Vázquez *et al.* (1990). El nivel promedio de COT fue de 17,1 g kg⁻¹. Para Conti *et al.* (1980) los niveles de COT mostraron en promedio un rango de 17,0 a 21,0 g kg⁻¹, para Vázquez *et al.* (1990) los niveles promedio fueron de 13,0 a 34,0 g kg⁻¹, y para Álvarez *et al.* (2006a) los niveles promedio fueron de 14,0 a 22 g kg⁻¹. Zubillaga *et al.* (2006a) encontraron niveles promedio de COT más bajos de 12,8 g kg⁻¹. El Ntotal promedio de los lotes y de las ZM fue de 1,61 g kg⁻¹. Los niveles promedio

de Ntotal observados por Conti *et al* (1980) y por Vázquez *et al* (1990) mostraron un rango de 1,6 a 2,0 g kg⁻¹ y de 1,3 a 3,0 g kg⁻¹, respectivamente.

El nivel promedio de Pe fue de 15,2 mg kg⁻¹. Este nivel es mayor al rango promedio observado por Álvarez *et al* (2006a) de 10,0 a 12,0 mg kg⁻¹, y menor a el promedio observado por Zubillaga *et al* (2006a) de 16,0 mg kg⁻¹. La variación en los niveles de Pe entre las ZM y los lotes (Tabla 12) es coincidente con los observado por otros autores en la misma región (Zubillaga *et al* 2006a; Álvarez *et al*. 2006a).

Tabla 12: Propiedades de suelos en 3 lotes de la Pampa ondulada. Rango de valores máximos y mínimos. CE = conductividad eléctrica. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). COT = Carbono orgánico total. N_{Su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0,4 m de suelos. N₂₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de los 0,0 a los 0,2 m de suelos. N₄₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de los 0,2 a los 0,4 m de suelos. Ntotal = Nitrógeno total en los primeros 0,2 m de suelos. Pe = Fósforo extractable.

Lote	Arcilla	Arena	Limo	CE	IMO	COT
	----- (g kg ⁻¹) -----			(dS m ⁻¹)		(g kg ⁻¹)
1	254 - 277	123 - 141	591 - 611	0,41 - 0,51	3,4 - 4,0	17,2 - 20,4
2	255 - 279	122 - 151	575 - 622	0,13 - 0,15	3,3 - 3,7	16,7 - 18,3
3	269 - 308	144 - 193	528 - 562	0,51 - 0,68	2,7 - 3,6	12,5 - 18,0
Lote	pH	N _{Su}	N ₂₀	N ₄₀	Ntotal	Pe
		(kg ha ⁻¹)	----- (mg kg ⁻¹) -----		(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
			--			
1	5,6 - 5,9	35 - 37	8,5 - 9,3	4,5 - 5,4	1,7 - 1,9	11,5 - 21,5
2	5,7 - 6,3	51 - 58	12,6 - 15,4	6,4 - 7,7	1,4 - 1,6	7,7 - 15,5
3	5,9 - 6,6	27 - 37	6,3 - 9,5	3,8 - 4,8	1,2 - 1,8	11,9 - 29,1

Las propiedades de los suelos de los diferentes lotes y zonas de manejo estuvieron en general correlacionadas. Los niveles de Pe mostraron menores relaciones con el resto de las variables, asociándose sus niveles positivamente con CE y pH, y asociándose negativamente con N₂₀ y N₄₀. La textura se correlacionó principalmente con COT, IMO y Ntotal. Los niveles de COT, IMO y Ntotal se

asociaron positivamente con los niveles de limo y negativamente con los niveles de arcilla. Además, los niveles de arena también se asociaron negativamente con el nivel de COT y Ntotal, y se correlacionaron positivamente con los niveles de IMO. El contenido de COT y Ntotal, y los valores de IMO son indicadores del nivel de degradación de los suelos, menores valores indican en general suelos más degradados (Pieri 1995. Quiroga et al. 2006). Los suelos con mayor contenido de arena tendrían los menores niveles de COT pero no necesariamente serían los más degradados. Considerando los niveles de IMO, los suelos con mayores niveles de arena serían los menos degradados (Tabla 13).

Los niveles de COT, de Ntotal y de IMO se asociaron fuertemente y de forma positiva. La relación de COT e IMO con N₂₀, con N₄₀ y con N_{Su} fue positiva pero en general moderada. Los niveles de N₂₀, de N₄₀ y de N_{Su} se asociaron en forma positiva y con correlaciones mayores al 80 %. Tanto N₂₀, como N₄₀ y como N_{Su} se asociaron fuertemente en forma negativa con la CE. Además, la conductividad eléctrica se asoció positivamente con los niveles de pH y los niveles de Arena (Tabla 13).

En promedio, el lote 1 se caracterizó por tener mayor contenido de materia orgánica, nitrógeno total e IMO, mientras que el lote 2 tuvo mayor contenido nitrógeno de nitratos en los primeros 0,4 m de suelo. Ambos lotes tienen textura más gruesa que el lote 3, este último se encuentra cercano a un cauce de agua, tiene mayor variabilidad de topografía, y es más heterogéneo en sus propiedades de suelos (COT, IMO, Ntotal y Pe) (Tabla 12).

Del análisis conjunto de la información por medio de componentes principales se observó el agrupamiento entre lotes de producción más que entre ZM con

diferente productividad aparente. Mayores niveles de arcilla, y de Pe se observaron en el lote 3, niveles mayores de COT, Ntotal, limo e IMO en el lote 1, y los mayores niveles de N de nitratos (0 a 0,2 m, y 0,2 a 0,4) y Nsu en el lote 2 (Fig.13a y Fig. 13b). Las propiedades de suelos de las zonas de productividad alta, media y baja fueron dependientes de los lotes. Es relevante destacar que estas observaciones sugieren que resulta más importante caracterizar las propiedades de suelos de los lotes que las propiedades de suelos de las diferentes zonas dentro de cada lote.

Si bien la principal diferencia en las propiedades de suelo se debe a los lotes, en los lotes 1 y 3 en general las zonas de manejo de productividad media y alta presentaron mayores niveles de COT, de Ntotal y mayor IMO. Las zonas de manejo delimitadas mediante la mayoría de las metodologías utilizadas agrupan como zonas de mayor productividad las que presentan suelos con mayor IMO, Ntotal y COT (Fig.13a y Fig. 13b). En el lote 2 las diferencias entre zonas de manejo según las propiedades de los suelos estudiadas no se agrupan claramente, esto puede asociarse a una menor variación en las propiedades de los suelos entre zonas de manejo, o a una limitada similitud entre las metodologías de delimitación y dónde una misma área del lote es clasificada en zonas de manejo diferente según la metodología de delimitación.

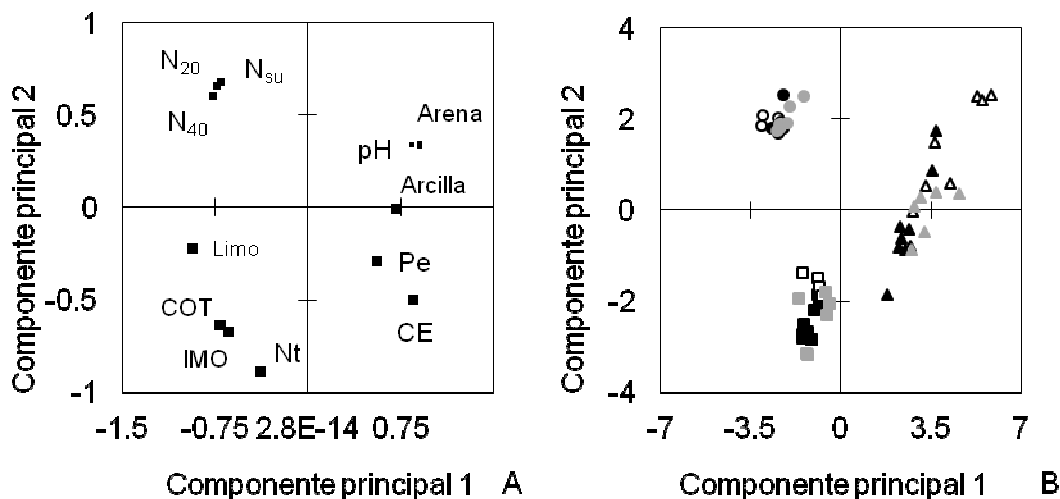


Figura 13= Representación en el plano de las 2 primeras componentes principales (84 % de explicación) de (A) variables de propiedades de suelo, y de (B) lotes de producción de la Pampa ondulada. Lotes 1, 2 y 3 representados como cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente. Zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. Pe= fósforo extractable. Nt= nitrógeno total. COT= carbono orgánico. CE= conductividad eléctrica. N₂₀= nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. N₄₀= nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de profundidad de suelos. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). N_{Su}= Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 de suelos.

El método de delimitación MR permitió describir diferencias entre zonas de manejo en un mayor número de propiedades superficiales de suelo: arcilla, arena, limo y pH que el resto de los métodos. Esta metodología es adecuada para diferenciar zonas con el objetivo de caracterizarlas según propiedades superficiales de los suelos. Además variaciones en la textura y en el pH pueden ser las causales de las diferencias de rendimientos dentro de los lotes en los cultivos anteriores. Las zonas de productividad alta delimitadas mediante MR presentaron valores mayores de pH, y menores contenidos de arcilla y de limo. Las zonas de productividad baja mostraron mayores contenidos de limo y menores contenidos de pH y de arcilla; mientras que la zona de productividad media tuvieron mayores contenidos de arcilla que las otras zonas. La erosión hídrica laminar es una de las principales causas de degradación de suelos en la

región Pampa ondulada y uno de sus efectos es la disminución de los rendimientos de los cultivos (Michelena *et al.* 1988; Michelena *et al.* 1989). La erosión modifica la textura de los horizontes superficiales y pueden determinar las variaciones de productividad de cultivos anteriores y las zonas que agrupa la metodología de MR (Tablas 14, 15 y 16).

En las zonas de productividad alta delimitadas con ALT y FIS, el IMO fue mayor que en las ZM de baja productividad. Las zonas de alta productividad mostraron texturas más finas que el resto de las zonas. En las dos metodologías el COT se incrementó con la productividad de la zona y la relación expresada por el IMO muestra suelos menos degradados. Cuando el objetivo de delimitación de zonas dentro de un lote de producción es diferenciar áreas según el nivel de degradación de COT el uso de ALT y FIS puede ser adecuado (Tablas 14, 15 y 16).

Las zonas de media productividad delimitadas mediante NDVI_{gra} tuvieron mayores contenidos de limo y de Pe que las ZM de alta y baja productividad. Las zonas de alta productividad según el antecedente de manejo tuvieron mayores niveles de CE y de N₄₀ que las zonas de baja productividad. Estas metodologías que permiten diferenciar áreas según la disponibilidad de Pe y N₄₀ pueden ser utilizadas para el diagnóstico y la recomendación de la fertilización con fósforo y con nitrógeno, respectivamente (Tablas 14, 15 y 16).

Las zonas de igual productividad no representaron la misma área dentro del lote según la metodología utilizada (Tabla 7). Las zonas de alta productividad mostraron diferencias en las propiedades de suelos tales como contenido de arena, pH, N_{su}, N₂₀ y N₄₀ según la metodología de delimitación. Las zonas de alta productividad delimitadas mediante ALT tuvieron menores contenidos de arena

que en las zonas de igual productividad delimitadas por MR y AM. Además estas zonas de alta productividad de AM mostraron mayor nitrógeno disponible en el suelo en los primeros 0,40 m que el resto de zonas de alta productividad. El contenido de limo y de arcilla también fue diferente según la metodología de delimitación en las zonas de productividad media y baja. Además, el Pe mostro diferencias entre metodologías en las zonas de media productividad (Tablas 14, 15 y 16).

En promedio las zonas de mayores rendimientos de trigo se asociaron con incrementos en los niveles de COT, de Ntotal, de N_{Su}, de IMO y de arena. Esas propiedades de suelos mostraron niveles mayores en las zonas de alta productividad de MR en relación con las ZM de menor productividad. La delimitación de ZM mediante MR mostro en general similitud con las áreas de las ZM de los rendimientos de trigo y además detectó en general las mismas diferencias en las propiedades superficiales de suelos (Tablas 14, 15 y 16).

En resumen, en las condiciones de este estudio se observa que las propiedades de suelos de la pampa ondulada se agrupan mayormente según lotes. Si bien, las diferencias en propiedades de suelo dentro de los lotes responden a patrones detectables utilizando NDVI_{gra}, antecedentes de manejo, posición en el relieve, mapas de rendimientos, e imágenes satelitales, estas diferencias son dependientes de los lotes.

En zonas de manejo de alta, media y baja productividad estimada las diferencias descriptas en sus propiedades superficiales de suelo son dependientes de la metodología de delimitación considerada. La identificación de zonas de alta productividad define diferentes contenidos de arena, de pH y de nitrógeno de

nitratos según métodos de delimitación. La identificación de zonas de media productividad define diferentes contenidos de arcilla, de fósforo extractables y de limo según métodos de delimitación. Además en la zona de productividad baja los contenidos de limo también son diferentes según los métodos de delimitación.

La textura, el contenido de carbono orgánico, el IMO, la conductividad eléctrica, el pH y el contenido de fósforo extractable difieren según las zonas de productividad. La variabilidad de las propiedades de suelo son coincidentes con lo descrito por Di Pietro *et al.* (1986), Zubillaga *et al.* (2006), y Alvarez *et al.* (2006) en sitios similares de la región. La instrumentación de métodos de delimitación tales como MR, HM, ALT, NDVIgra y FIS que permiten detectar diferencias en propiedades de los suelos es una estrategia recomendable para un adecuado manejo la fertilización de los cultivos. En las zonas de baja productividad según las posiciones en el relieve y los tipos de suelos los contenidos de arcilla no fueron mayores. Las zonas de productividad baja delimitadas mediante posición en el relieve tienen menores contenidos de COT y de IMO, y coinciden con fases de erosión de los suelos. Las propiedades de suelos como COT, IMO y textura que pueden ser utilizadas en las recomendaciones de la fertilización nitrogenada siendo las delimitaciones realizadas con MR, NDVIgra, ALT y FIS importantes para considerar en manejos de esta práctica.

Tabla 13: Coeficientes de correlación Spearman de las propiedades de suelos. COT = Carbono orgánico total. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). Pe = Fósforo extractable. Nt = Nitrógeno total. N₂₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de profundidad de suelos. N₄₀ = Nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de profundidad de suelos. N_{su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 m de suelos. CE = Conductividad eléctrica. * = Significativo al nivel de $p \leq 0,10$. ** = Significativo al nivel de $p \leq 0,05$.

	Arcilla	Limo	Arena	COT	IMO	Pe	Ntotal	N ₂₀	N ₄₀	N _{Su}	CE
Limo	-0,84**										
Arena	0,56**	-0,86**									
COT	-0,54**	0,69**	-0,72**								
IMO	-0,44**	0,56**	0,59**	0,97**							
Pe	0,18	-0,14	0,11	-0,10	-0,08						
Ntotal	-0,20*	0,46**	-0,58**	0,82**	0,84**	0,06					
N ₂₀	-0,50**	0,33**	-0,29**	0,17	0,08	-0,47**	-0,12				
N ₄₀	-0,73**	0,62**	-0,47**	0,35**	0,24**	-0,46**	-0,08	0,81**			
N _{Su}	-0,60**	0,44**	-0,34**	0,24**	0,14	-0,52**	-0,09	0,95**	0,90**		
CE	0,56**	-0,60**	0,62**	-0,39**	-0,28**	0,65**	-0,12	-0,80**	-0,82**	-0,82**	
pH	0,45**	-0,66**	0,77**	-0,56**	-0,45**	0,23*	-0,52**	-0,43**	-0,42**	-0,45**	0,74**

Tabla 14: Propiedades de suelo en Argiudoles de la pampa ondulada según productividad aparente de 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Promedio de 3 sitios experimentales. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. IMO = Índice materia orgánica según textura (Pieri 1995). p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo				Zona de manejo				Zona de manejo				Zona de manejo			
	Alta	Media	Baja	p	Alta	Media	Baja	P	Alta	Media	Baja	p	Alta	Media	Baja	p
	Arcilla (g kg^{-1})				Limo (g kg^{-1})				Arena (g kg^{-1})				IMO			
Altimetría y pendiente	282Aa	280Aab	271Aa	0,46	583Aa	578Abc	584Ab	0,22	135Ac	142Aa	145Aa	0,46	3,6Aa	3,4ABa	3,3Ba	0,07
Antecedentes de manejo	271Aa		279Aa	0,54	577Aa		582Abc	0,69	152Aa		139Aa	0,27	3,5Aa		3,4Aa	0,75
Fotointerpretación	273Aa	281Aa	270Aa	0,47	587Aa	571Ac	583Ab	0,18	140Abc	149Aa	146Aa	0,82	3,6Aa	3,4ABa	3,1Ba	0,07
Mapas de rendimiento	272Ba	283Aa	270Ba	0,08	581Ba	577Bbc	596Aa	0,09	147Aab	140ABa	135Ba	0,07	3,5Aa	3,5Aa	3,3Aa	0,39
Mapa de suelo	277Aa		272Aa	0,32	585Aa		576Abc	0,28	139Abc		152Aa	0,19	3,5Aa		3,3Aa	0,25
NDVIgra	279Aa	271Ac	275Aa	0,57	581Ba	588Aa	581Bbc	0,10	140Abc	141Aa	144Aa	0,81	3,5Aa	3,5Aa	3,4Aa	0,51
NDVIto	276Aa	272Abc	282Aa	0,19	583Aa	585Aab	581Abc	0,51	141Abc	142Aa	138Aa	0,68	3,5Aa	3,5Aa	3,3Aa	0,35
Suma estandarizada	280Aa	268Ac	279Aa	0,27	581Aa	589Aa	574Ac	0,25	139Abc	143Aa	147Aa	0,37	3,6Aa	3,4Aa	3,2Aa	0,13
P	0,58	0,03	0,57		0,61	0,01	0,02		0,10	0,69	0,49		0,88	0,80	0,46	
Rendimientos trigo 2007	271	276	278		584	580	585		145	143	137		3,5	3,5	3,4	

Tabla 15: Propiedades de suelo en Argiudoles de la pampa ondulada según productividad aparente de 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Promedio de 3 sitios experimentales. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. N_{total} = Nitrógeno total. N_{20} = nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. N_{40} = nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos. N_{Su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 de suelos. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo				Zona de manejo				Zona de manejo				Zona de manejo			
	Alta	Media	Baja	p	Alta	Media	Baja	P	Alta	Media	Baja	p	Alta	Media	Baja	p
	N_{total} (mg kg ⁻¹)				N_{20} (mg kg ⁻¹)				N_{40} (mg kg ⁻¹)				N_{Su} (kg ha ⁻¹)			
Altimetría y pendiente	1,7Aa	1,6Aa	1,6Aa	0,39	9,9Ab	10,1Aa	10,5Aa	0,56	5,2Ab	5,2Aa	5,3Aa	0,87	39Ab	40Aa	41Aa	0,59
Antecedentes de manejo	1,6Aa		1,6Aa	0,81	11,2Aa		10,0Aa	0,31	5,7Aa		5,1Ba	0,01	44Aa		39Aa	0,19
Fotointerpretación	1,7Aa	1,5Aa	1,5Aa	0,45	10,1Ab	9,9Aa	10,6Aa	0,76	5,4Ab	5,1Aa	5,6Aa	0,45	40Ab	39Aa	42Aa	0,47
Mapas de rendimiento	1,6Aa	1,7Aa	1,6Aa	0,21	10,3Ab	10,2Aa	9,7Aa	0,52	5,3Ab	5,3Aa	5,3Aa	0,98	41Ab	40Aa	39Aa	0,45
Mapa de suelo	1,6Aa		1,5Aa	0,44	10,0Ab		10,5Aa	0,34	5,3Ab		5,4Aa	0,34	40Ab		41Aa	0,36
NDVIgra	1,7Aa	1,6Aa	1,5Aa	0,13	10,3Ab	10,1Aa	9,6Aa	0,26	5,2Ab	5,4Aa	5,5Aa	0,25	40Ab	40Aa	39Aa	0,64
NDVIto	1,7Aa	1,6Aa	1,6Aa	0,25	10,2Ab	10,0Aa	9,9Aa	0,74	5,2Ab	5,4Aa	5,3Aa	0,53	40Ab	40Aa	40Aa	0,75
Suma estandarizada	1,7Aa	1,6Aa	1,5Aa	0,39	10,2Ab	9,9Aa	10,2Aa	0,33	5,3Ab	5,4Aa	5,3Aa	0,97	40Ab	40Aa	40Aa	0,58
P	0,75	0,37	0,72		0,08	0,99	0,14		0,10	0,46	0,78		0,04	0,96	0,27	
Rendimientos trigo 2007	1,6	1,6	1,6		10,4	10,2	9,9		5,4	5,2	5,2		42	41	40	

Tabla 16: Propiedades de suelo en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. CE = Conductividad eléctrica. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo				Zona de manejo				Zona de manejo				Zona de manejo			
	Alta	Media	Baja	p	Alta	Media	Baja	P	Alta	Media	Baja	p	Alta	Media	Baja	p
	Fósforo extractable (mg kg^{-1})				pH				Carbono orgánico (g kg^{-1})				CE (dS m^{-1})			
Altimetría y pendiente	13,0Aa	14,6Ab	16,7Aa	0,30	5,8Ac	5,9Aa	5,9Aa	0,69	18,3Aa	17,1ABa	16,2Ba	0,08	0,38Aa	0,41Aa	0,39Aa	0,71
Antecedentes de manejo	14,8Aa		14,8Aa	0,98	6,2Aa		5,8Aa	0,11	17,4Aa		17,2Aa	0,88	0,42Aa		0,38Ba	0,07
Fotointerpretación	14,8Aa	15,1Aab	19,8Aa	0,41	5,9Abc	6,1Aa	6,0Aa	0,62	17,8Aa	16,8Aa	15,6Aa	0,11	0,39Aa	0,43Aa	0,40Aa	0,65
Mapas de rendimiento	14,8Aa	16,6Aab	14,5Aa	0,48	6,0Ab	5,8Ba	5,8Ba	0,10	17,2Aa	17,5Aa	16,6Aa	0,52	0,41Aa	0,39Aa	0,38Aa	0,22
Mapa de suelo	15,5Aa		17,2Aa	0,62	5,9Abc		6,0Aa	0,23	17,7Aa		16,1Aa	0,23	0,40Aa		0,42Aa	0,76
NDVIgra	13,8Ba	18,1Aa	12,5Ba	0,10	5,9Abc	5,9Aa	6,0Aa	0,51	17,5Aa	17,7Aa	16,7Aa	0,51	0,38Aa	0,42Aa	0,40Aa	0,41
NDVIto	14,2Aa	18,1Aa	13,0Aa	0,13	5,9Abc	6,0Aa	5,9Aa	0,32	17,5Aa	17,6Aa	16,7Aa	0,46	0,38Aa	0,43Aa	0,38Aa	0,14
Suma estandarizada	15,0Aa	13,6Ab	16,2Aa	0,58	5,9Abc	6,0Aa	6,0Aa	0,72	18,0Aa	17,1Aa	16,0Aa	0,12	0,39Aa	0,40Aa	0,41Aa	0,87
P	0,90	0,10	0,17		0,03	0,27	0,55		0,82	0,71	0,46		0,23	0,42	0,51	
Rendimientos trigo 2007	14,2	15,9	15,0		6,0	5,9	5,8		17,3	17,3	16,9		0,40	0,40	0,38	

3.3.2- Agua total

El contenido de agua hasta 1,4 m de profundidad de suelos varió entre 443 a 707 mm dependiendo del momento de evaluación y del sitio evaluado. El rango de valores de contenido de agua según los momentos de evaluación (siembra de trigo, primer nudo visible, emergencia de la cuarta parte de las espigas y cosecha) se presenta en la Fig. 14. Las variaciones entre los sitios de evaluación y zonas de manejo fueron mayores que las diferencias promedio durante el ciclo del cultivo. Del análisis conjunto de la información por medio análisis de componentes principales se observó, de igual manera que en las propiedades superficiales de los suelos, diferencias de contenido de agua según los lotes. Mayores contenidos de agua a la siembra, Z31 y Z53 en la capa de 0 a 0,2 m de suelos en el lote 1, niveles de mayores de contenidos de agua en Z₅₃140, Co20, Co100, Co120 y Co140 en el lote 2, y mayores contenidos de agua en S60, S80, S100, Z₅₃60, Z₅₃80, y Z₅₃100 en el lote 3 (Fig.15a y Fig.15b). Las diferencias entre lotes se debieron principalmente a los contenidos de humedad al momento de la siembra y en la cosecha. Los mayores contenidos de agua en los primeros 0,2 m de suelos en estados iniciales (al momento de la siembra y Z31) del lote 1 pueden ser asociados a los mayores contenidos de COT y de IMO en comparación con los lotes 2 y 3.

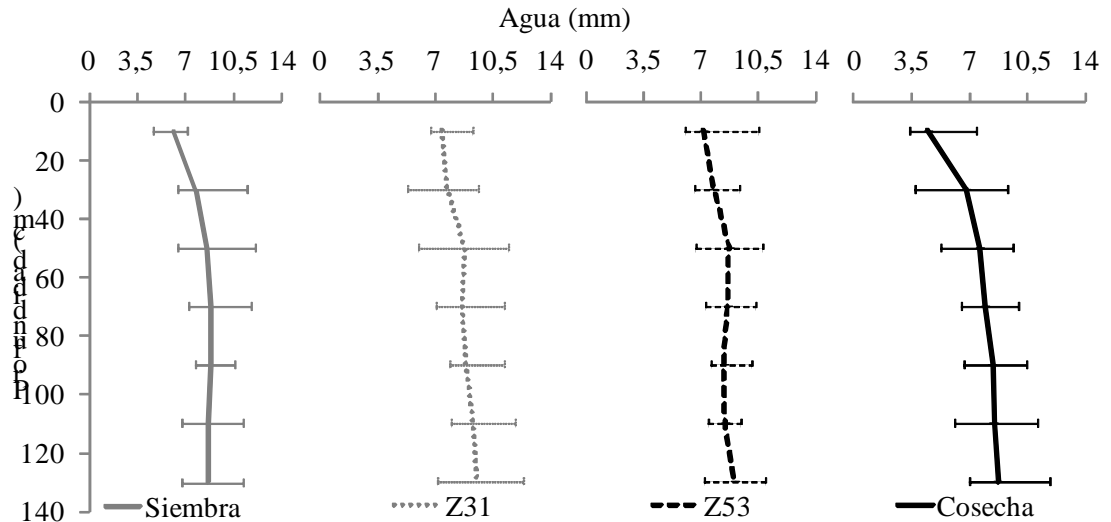


Figura 14 = Distribución vertical del contenido de agua (mm) en Argiudoles de la pampa ondulada al momento de la siembra de trigo, en primer nudo visible (Z31), en emergencia de una cuarta parte de las espigas (Z53) y en el momento de la cosecha. Promedio de 3 sitios experimentales y zonas de manejo. Las barras de error indican valores máximos y mínimos para cada momento de evaluación.

Al igual que en las propiedades superficiales de los suelos, las mayores diferencias entre zonas de manejo delimitadas mediante las 8 metodologías se dieron en los lotes 1 y 3. Dentro de cada lote las observaciones no se agruparon según zonas de productividad, esto puede estar asociado a la menor variabilidad de contenido de agua según las zonas de productividad, o a la similitud baja de las metodologías de delimitación (Fig. 15a, y Fig. 15b).

Las mayores diferencias entre zonas de manejo se observaron en los primeros 0,2 m de suelos. En los primeros 0,2 m de profundidad las diferencias de contenido de agua se presentaron según el método de delimitación y el momento de estudio, con mayor número de diferencias entre zonas a la siembra y en la cosecha de trigo. Las delimitaciones según HM, MR, NDVIgra y NDVIto mostraron mayores contenidos de agua en la siembra en los primeros 0,2 m suelos en las zonas de alta productividad. Estas diferencias se mantuvieron hasta Z31 en NDVIgra. En Z53 las zonas de alta productividad delimitadas con ALT mostraron mayores contenidos de agua que el resto de las zonas. Al momento de la cosecha, en los primeros 0,2 m de profundidad las

zonas de alta productividad de MS, NDVI_{gra}, NDVI_{to}, y SE mostraron mayores contenidos de agua que las zonas de productividad menor (Tabla 17).

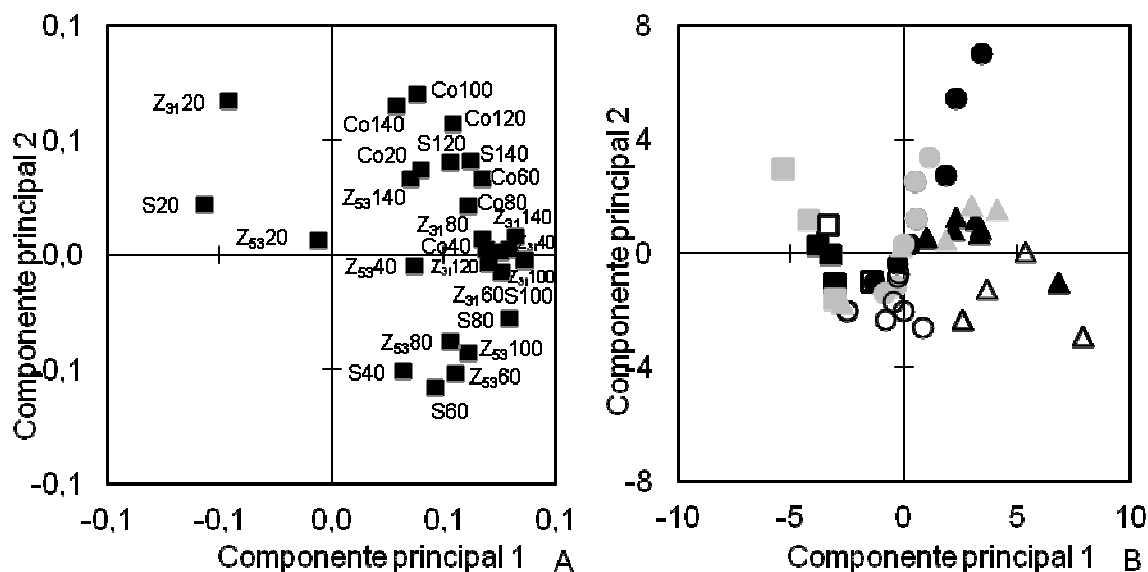


Figura 15 = Representación en el plano de las 2 primeras componentes principales (50 % de explicación) de (A) variables de contenido de agua en el suelo, y de (B) lotes de producción (lote 1, lote 2 y lote 3 representado como cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente) y zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. S20, S40, S60, S80, S100, S120 y S140= Contenido de agua al momento de la siembra de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente. Z₃₁20, Z₃₁40, Z₃₁60, Z₃₁80, Z₃₁100, Z₃₁120, y Z₃₁140= Contenido de agua al detectar el primer nudo del cultivo de trigo de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente. Z₅₃20, Z₅₃40, Z₅₃60, y Z₅₃80, Z₅₃100, Z₅₃120, y Z₅₃140= Contenido de agua en emergencia de la cuarta parte de la espiga de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente. C20, C40, C60, C80, C100, C120, y C140 = Contenido de agua al momento de la cosecha de trigo de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m, 0,4 a 0,6 m, de 0,6 a 0,8 m, de 0,8 a 1,0 m, de 1,0 a 1,2 m, y de 1,2 a 1,4 m de profundidad de suelo, respectivamente.

Tabla17: Contenido de agua (mm) en la capa de 0 a 0,2 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			p	Zona de manejo			P	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	61Aa	61Aa	61Aa	0,98	75Aa	80Aa	71Aa	0,45	77Aa	68Ba	68Ba	0,07	49Aa	45Aa	40Ab	0,39
Antecedentes de manejo	65Aa		60Ba	0,05	76Aa		76Aa	0,95	71Aa		69Aa	0,54	46Aa		45Aa	0,81
Fotointerpretación	62Aa	62Aa	59Aa	0,57	74Aa	76Aa	74Aa	0,74	73Aa	67Aa	70Aa	0,15	46Aa	46Aa	42Ab	0,34
Mapas de rendimiento	65Aa	60Ba	59Ba	0,05	77Aa	79Aa	71Aa	0,53	72Aa	69Aa	69Aa	0,41	47Aa	47Aa	40Ab	0,32
Mapas de suelo	63Aa		61Aa	0,53	74Aa		75Aa	0,85	73Aa		66Aa	0,28	47Aa		41Bb	0,04
NDVIgra	63ABa	66Aa	58Ba	0,07	77Aa	73ABa	71Ba	0,09	70Aa	72Aa	70Aa	0,69	48Aa	40Ba	40Bb	0,01
NDVIto	63Aa	65Aa	57Ba	0,03	77Aa	73Aa	71Aa	0,25	70Aa	72Aa	71Aa	0,87	48Aa	41Ba	40Bb	0,03
Suma estandarizada	62Aa	62Aa	60Aa	0,69	76Aa	79Aa	71Aa	0,48	72Aa	70Aa	66Aa	0,36	49Aa	45ABa	39Bb	0,08
p	0,37	0,19	0,44		0,79	0,56	0,58		0,30	0,32	0,42		0,99	0,38	0,06	

Tabla18: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			<i>P</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	72Ba	68Ba	86Aa	0,01	78Aa	71Aa	73Aa	0,70	74Aa	77Aa	79Aa	0,48	65Abc	63Aa	63Aa	0,97
Antecedentes de manejo	80Aa		76Aa	0,75	79Aa		73Aa	0,22	75Aa		77Aa	0,27	74Aa		62Aa	0,14
Fotointerpretación	76Aa	71Aa	90Aa	0,40	78Aa	74Aa	75Aa	0,89	77Aa	76Aa	76Aa	0,94	68Aabc	68Aa	62Aa	0,88
Mapas de rendimiento	73Aa	74Aa	85Aa	0,38	78Aa	78Aa	69Aa	0,13	74Aa	77Aa	78Aa	0,19	69Aab	69Aa	56Aa	0,40
Mapas de suelo	72Aa		89Aa	0,13	75Aa		80Aa	0,53	76Aa		77Aa	0,38	64Abc		73Aa	0,46
NDVIgra	73Aa	76Aa	85Aa	0,35	76Aa	76Aa	70Aa	0,36	74Aa	80Aa	77Aa	0,29	63Ac	69Aa	58Aa	0,33
NDVIto	73Aa	74Aa	93Aa	0,26	78Aa	74Aa	74Aa	0,86	74Aa	79Aa	76Aa	0,37	66Abc	68Aa	63Aa	0,89
Suma estandarizada	72Ba	70Ba	88Aa	0,01	77Aa	72Aa	73Aa	0,74	75Aa	79Aa	78Aa	0,47	64Abc	64Aa	63Aa	0,99
<i>p</i>	0,71	0,23	0,75		0,37	0,27	0,41		0,69	0,12	0,71		0,08	0,45	0,6	

Tabla19: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,4 a 0,6 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	83Aa	73Ba	93Aa	0,03	92Aa	71Bc	88Aa	0,06	83Aa	84Aa	92Aa	0,53	77Aa	70Aa	74Aa	0,53
Antecedentes de manejo	83Aa		83Aa	0,96	91Aa		84Aa	0,24	90Aa		85Aa	0,32	78Aa		74Aa	0,45
Fotointerpretación	85Aa	75Aa	96Aa	0,35	91Aa	76Ac	86Aa	0,24	84Aa	86Aa	97Aa	0,30	79Aa	72Aa	66Aa	0,36
Mapas de rendimiento	79Aa	80Aa	94Aa	0,21	91Aa	84Aabc	83Aa	0,67	87Ba	76Ca	97Aa	0,01	78Aa	79Aa	67Aa	0,15
Mapas de suelo	83Aa		89Aa	0,40	88Aa		87Aa	0,84	87Aa		86Aa	0,88	76Aa		75Aa	0,80
NDVIgra	80Ba	83Ba	94Aa	0,05	91Aa	93Aa	79Aa	0,17	86Aa	91Aa	94Aa	0,50	75Aa	79Aa	70Ba	0,03
NDVIto	80Aa	80Aa	103Aa	0,13	90Aa	89Aab	82Aa	0,39	86Aa	92Aa	95Aa	0,51	75ABa	77Aa	71Ba	0,11
Suma estandarizada	81Aa	78Aa	91Aa	0,19	89Aa	77Abc	88Aa	0,24	85Aa	84Aa	93Aa	0,45	79Aa	74Ba	70Ba	0,01
P	0,96	0,31	0,45		0,95	0,09	0,73		0,79	0,48	0,16		0,71	0,46	0,23	

Tabla20: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,6 a 0,8 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	89Aa	79Aa	91Aa	0,25	88Aa	79Aa	86Aa	0,38	88Aa	83Aa	86Aa	0,73	78Aa	74Aa	78Aa	0,65
Antecedentes de manejo	89Aa		86Aa	0,69	91Aa		83Aa	0,13	91Aa		83Aa	0,18	79Aa		79Aa	0,93
Fotointerpretación	89Aa	78Aa	95Aa	0,40	88Aa	78Aa	88Aa	0,37	89Aa	85Aa	86Aa	0,67	78Aa	76Aa	82Aa	0,64
Mapas de rendimiento	87Aa	87Aa	88Aa	0,62	90Aa	84Aa	83Aa	0,54	90Aa	81Aa	86Aa	0,21	80Aa	77Aa	79Aa	0,83
Mapas de suelo	86Aa		91Aa	0,50	86Aa		86Aa	0,93	88Aa		85Aa	0,73	80Aa		74Aa	0,98
NDVIgra	87Aa	86Aa	90Aa	0,32	90Aa	91Aa	81Aa	0,28	87Aa	91Aa	86Aa	0,56	82Aa	75Aa	73Aa	0,35
NDVIto	87Aa	83Aa	97Aa	0,18	90Aa	88Aa	84Aa	0,49	87Aa	91Aa	86Aa	0,57	81Aa	76Aa	73Aa	0,41
Suma estandarizada	87Aa	83Aa	88Aa	0,80	87Aa	81Aa	85Aa	0,26	88Aa	82Aa	86Aa	0,58	79Aa	77Aa	78Aa	0,85
P	0,94	0,53	0,48		0,69	0,25	0,84		0,79	0,30	0,66		0,96	0,95	0,64	

Tabla 21: Contenido de agua (mm) en la capa de 0,8 a 1,0 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	86Aa	82Aa	90Aa	0,29	87Aa	86Aa	93Aa	0,40	84Aa	80Aa	84Aa	0,29	79Aa	81Aa	85Aa	0,28
Antecedentes de manejo	92Aa		86Aa	0,45	95Aa		87Aa	0,33	83Aa		83Aa	0,97	87Aa		84Aa	0,76
Fotointerpretación	87Aa	84Aa	93Aa	0,44	88Aa	85Aa	94Aa	0,13	83Aa	81Aa	90Aa	0,25	83Aa	83Aa	83Aa	0,99
Mapas de rendimiento	89Aa	87Aa	87Aa	0,76	91Aa	86Aa	92Aa	0,23	84Aa	81Aa	86Aa	0,36	87Aa	86Aa	79Aa	0,61
Mapas de suelo	85Aa		92Aa	0,34	87Aa		91Aa	0,65	84Aa		84Aa	0,77	85Aa		81Aa	0,45
NDVIgra	89Aa	86Aa	85Aa	0,57	91Aa	90Aa	90Aa	0,99	86Aa	83Aa	82Aa	0,70	86Aa	85Aa	76Aa	0,45
NDVIto	89Aa	84Aa	90Aa	0,60	88Aa	89Aa	93Aa	0,19	86Aa	84Aa	83Aa	0,81	84Aa	84Aa	76Aa	0,38
Suma estandarizada	85Aa	84Aa	90Aa	0,28	88Aa	87Aa	92Aa	0,51	82Aa	80Aa	86Aa	0,23	84Aa	87Aa	82Aa	0,31
<i>P</i>	0,15	0,80	0,47		0,13	0,68	0,70		0,69	0,69	0,53		0,78	0,88	0,20	

Tabla22: Contenido de agua (mm) en la capa de 1,0 a 1,2 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	84Ab	84Aa	85Aa	0,99	88Ab	87Aa	102Aa	0,33	81Bd	84ABa	86Aa	0,70	78Aa	85Aa	88Aa	0,28
Antecedentes de manejo	99Aa		81Aa	0,14	102Aa		91Aa	0,45	85Aab		85Aa	0,94	94Aa		84Aa	0,46
Fotointerpretación	85Ab	84Aa	87Aa	0,96	89Ab	86Aa	100Aa	0,43	82Bcd	84Ba	90Aa	0,01	82Aa	86Aa	86Aa	0,76
Mapas de rendimiento	91Ab	85ABa	81Ba	0,10	93Ab	87Aa	100Aa	0,46	84Aabcd	84Aa	87Aa	0,46	93Aa	80Aa	84Aa	0,55
Mapas de suelo	84Ab		90Aa	0,54	88Ab		99Aa	0,35	83Abcd		87Aa	0,23	85Aa		82Aa	0,71
NDVIgra	88Ab	88Aa	82Aa	0,15	93Ab	93Aa	100Aa	0,59	85Aa	81Aa	85Aa	0,58	89Aa	81Aa	83Aa	0,75
NDVIto	86Ab	87Aa	88Aa	0,93	88Ab	92Aa	106Aa	0,14	84Aabc	82Aa	86Aa	0,61	84Aa	83Aa	85Aa	0,95
Suma estandarizada	89Ab	83Aa	84Aa	0,66	91Ab	87Aa	101Aa	0,39	82Bd	85ABa	87Aa	0,05	86Aa	87Aa	83Aa	0,81
<i>P</i>	0,09	0,97	0,45		0,07	0,66	0,54		0,66	0,41	0,52		0,25	0,78	0,51	

Tabla23: Contenido de agua (mm) en la capa de 1,2 a 1,4 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodologías de delimitación	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p	Zona de manejo			p
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra				Z31				Z53				Madurez fisiológica			
Altimetría y pendiente	82Ab	83Aa	84Aa	0,96	91Ab	87Aa	105Aa	0,40	88Aa	93Aa	92Aa	0,66	80Aa	88Aa	92Aa	0,31
Antecedentes de manejo	98Aa		80Aa	0,15	106Aa		93Aa	0,40	93Aa		90Aa	0,72	93Aa		88Aa	0,77
Fotointerpretación	83Ab	83Aa	86Aa	0,96	93Ab	90Aa	98Aa	0,75	89Aa	87Aa	92Aa	0,60	84Aa	89Aa	84Aa	0,84
Mapas de rendimiento	89Ab	83Aa	80Aa	0,12	96Ab	92Aa	100Aa	0,82	92Aa	88Aa	93Aa	0,70	93Aa	87Aa	86Aa	0,89
Mapas de suelo	82Ab		89Aa	0,51	93Ab		98Aa	0,47	89Aa		89Aa	0,90	85Aa		88Aa	0,76
NDVIgra	86Ab	86Aa	81Aa	0,18	96Ab	96Aa	100Aa	0,91	92Aa	85Aa	94Aa	0,16	91Aa	80Aa	86Aa	0,67
NDVIto	84Ab	85Aa	87Aa	0,87	90Ab	95Aa	105Aa	0,29	87Ba	85Ba	95Aa	0,08	85Aa	82Aa	87Aa	0,88
Suma estandarizada	87Ab	82Aa	83Aa	0,69	97Aab	90Aa	101Aa	0,61	89Aa	92Aa	90Aa	0,92	86Aa	89Aa	88Aa	0,93
P	0,08	0,99	0,45		0,10	0,90	0,64		0,44	0,45	0,54		0,45	0,51	0,65	

Tabla24: Contenido de agua (mm) en la capa de 0 a 1,2 m de suelos según 4 momentos durante ciclo de cultivo de trigo: siembra, primer nudo visible (Z31), emergencia de cuarta parte de las espigas (Z53) y madurez fisiológica en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre zonas de manejo según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada zona de manejo. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodología de delimitación	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>p</i>
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	Siembra 0 a 120 cm				Z31 0 a 120 cm				Z53 0 a 120 cm				Madurez fisiológica 0 a 120			
Altimetría y pendiente	475Aa	447Aa	506Aa	0,16	506Aa	474Aa	514Aa	0,43	487Aa	477Aa	495Aa	0,53	425Aa	418Aa	428Aa	0,90
Antecedentes de manejo	507Aa		472Aa	0,41	534Aa		494Aa	0,19	495Aa		482Aa	0,42	458Aa		427Aa	0,35
Fotointerpretación	485Aa	454Aa	520Aa	0,47	508Aa	476Aa	516Aa	0,43	488Aa	478Aa	508Aa	0,34	436Aa	431Aa	421Aa	0,84
Mapas de rendimiento	483Aa	474Aa	494Aa	0,45	521Aa	497Aa	497Aa	0,39	490ABa	469Ba	503Aa	0,06	455Aa	439Aa	405Aa	0,32
Mapa de suelo	472Aa		512Aa	0,37	498Aa		519Aa	0,52	491Aa		485Aa	0,78	437Aa		425Aa	0,12
NDVIgra	479Aa	483Aa	494Aa	0,44	517Aa	515Aa	492Aa	0,31	489Aa	499Aa	494Aa	0,70	444Aa	429Aa	399Aa	0,22
NDVIto	477Aa	473Aa	528Aa	0,34	511Aa	505Aa	510Aa	0,92	487Aa	499Aa	497Aa	0,65	438Aa	429Aa	408Aa	0,38
Suma estandarizada	477ABa	459Ba	499Aa	0,06	507Aa	482Aa	509Aa	0,20	484Aa	480Aa	498Aa	0,48	441Aa	433Aa	416Ba	0,02
<i>P</i>	0,45	0,29	0,58		0,19	0,40	0,53		0,95	0,36	0,44		0,73	0,93	0,17	

Al estudiar la disponibilidad de agua de 0,2 a 0,4 m de profundidad de suelos, las zonas de baja productividad delimitadas mediante ALT y SE en la siembra mostraron mayores contenidos de agua que las zonas de media y de alta productividad (Tabla 18). La disponibilidad de agua de 0,4 a 0,6 m de profundidad de suelos presentó diferencias según las metodologías de delimitación y zonas de manejo en todos los momentos estudiados (siembra, primer nudo visible, aparición de espiga y cosecha de trigo). Al momento de la siembra las zonas de baja y alta productividad delimitadas mediante ALT mostraron mayor contenido de agua. Estas diferencias se observaron también en Z53. En la cosecha 3 metodologías delimitaron zonas con diferencias en el contenido de agua de 0,4 a 0,6 m de profundidad de suelos. Las zonas de alta y media productividad delimitadas mediante NDVIgra, NDVIto y SE mostraron mayor contenido de agua que las zonas de baja productividad (Tabla 19).

Las diferencias entre zonas de manejo fueron menores en las profundidades de suelos de 0,6 a 0,8 m, 0,8 a 1,0 m, y de 1,2 a 1,4 m. Mayores diferencias entre zonas se observaron a profundidad de suelos de 1,0 a 1,2 m (Tablas 20, 21, 22 y 23). En esta capa de suelos en Z53 las zonas de baja y media productividad delimitada mediante ALT, FIS y SE mostraron mayor contenido de agua que la zona de alta productividad. Los mayores consumos de agua por el cultivo en las zonas de mayor producción podrían explicar en parte estas diferencias. (Tabla 22).

Cuando se analizó los primeros 1,2 m de profundidad la delimitación realizada mediante SE permitió diferenciar zonas con diferencias en el contenido de agua al momento de la siembra y en la cosecha de trigo. En la siembra las zonas de baja productividad presentaron mayores contenidos de agua que la zona de media productividad. Por el contrario en la cosecha mayores contenidos de agua mostraban las zonas de alta y de

media productividad que en las zonas de productividad baja. Mediante la delimitación MR en Z53 las zonas de baja productividad tuvieron mayores contenidos de agua que las zonas de productividad media (Tabla 24). En la región de la pampeana se han observado relación entre los rendimientos del cultivo de trigo y la disponibilidad de agua al momento de la siembra (Fontanetto *et al*, 2009). Las metodologías de delimitación como SE que mostró agrupar áreas con diferencias en el contenido de agua permitirían minimizar la variabilidad en la caracterización del contenido de agua de los suelos.

En resumen, el contenido de agua mostró diferencias en patrones detectables utilizando metodologías de delimitación. Las diferencias entre zonas de manejo son dependientes de los lotes. En la siembra y cosecha de trigo, y en la capa de suelos de 0,0 a 0,2 m se observaron las mayores diferencias entre zonas de manejo según el contenido de agua.

La utilización de información integrada de mapas de suelos y rendimientos permite diferenciar áreas del lote con diferencias en el contenido de agua al momento de la siembra y cosecha y con diferencias en la eficiencia de uso del agua. Delimitar zonas de manejo con esta metodología sería una estrategia recomendable para el uso eficiente del recurso mejorando su retorno productivo y reduciendo el riesgo de déficit de agua.

CAPÍTULO IV

MANEJO DEL CULTIVO Y PRODUCTIVIDAD SEGÚN ZONAS DE MANEJO DELIMITADAS

MEDIANTE DIFERENTES METODOLOGÍAS

4.1- INTRODUCCIÓN

Ha sido descripto que la producción de cultivos como trigo, maíz, girasol (*Helianthus annuus* L.) y soja presentó variación temporal y espacial (Roel y Plant 2004; Roel *et al.* 2004). La producción de los cultivos varió en función de la potencialidad del sitio o lugar. La productividad potencial de un sitio se ha sido explicada por la relación entre la radiación incidente y la temperatura, esta relación permitió explicar el rendimiento de trigo (Magrin *et al.* 1993) y en menor medida el de girasol (Cantagallo *et al.* 1997) y de maíz (Andrade *et al.* 2000). En trigo, el número de granos es un componente de rendimiento con alta relación con la producción final y se ha relacionado con el cociente fototermal (radiación solar media diaria para cada grado de temperatura media superior a 4,5 °C) en el período crítico (20 días antes y 10 días después de la antesis). Regiones con valores mayores de cociente fototermal presentaron mayor número de granos. Por ejemplo, el número de granos de trigo logrado en Balcarce (Buenos Aires, Argentina) es mayor que en Paraná (Entre Ríos, Argentina) (Magrin *et al.* 1993). En Balcarce, a diferencia de Paraná, las temperaturas medias diarias durante el período crítico de trigo fueron menores, explicando así las diferencias de cociente fototermal y el número de granos.

La productividad de los cultivos ha sido limitada por la disponibilidad de agua y de nutrientes. El nitrógeno es uno de los nutrientes que con mayor frecuencia limita el rendimiento de trigo en la región pampeana (Argentina), y en el diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización se dispone de información de estudios que relacionan la disponibilidad de nitrógeno (nitrógeno de nitratos en los primeros 0,6

m de suelo más el nitrógeno agregado al suelo como fertilizante) con los rendimientos logrados (Calderini *et al.* 1995; Satorre *et al.* 2001; Alvarez *et al.* 2003; Salvagiotti *et al.* 2004).

La respuesta de trigo al agregado de nitrógeno ha variado según la disponibilidad de otros nutrientes como azufre, y además ha variado según el momento de aplicación del nitrógeno. En Oliveros (Argentina), en suelos Argiudoles Típicos, se observaron diferencias de respuesta de rendimiento en trigo al agregado de nitrógeno según la disponibilidad de azufre. Con el agregado de azufre el incremento de rendimiento por la fertilización nitrogenada fue 11 % mayor que sin el agregado de azufre (Salvagiotti y Miralles 2007). En el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), en estudios realizados también sobre Argiudoles Típicos por Echeverría *et al.* (2005) y por Barbieri *et al.* (2008), los rendimientos máximos en trigo son mayores cuando la fertilización con nitrógeno es retrasada de la siembra hasta el macollaje, independientemente de la variedad utilizada. El retraso de la fertilización disminuyó las pérdidas de nitrógeno y sincronizó el aporte de nitrógeno con la mayor demanda del cultivo.

Las variaciones de producción son explicadas mejor por modelos que contemplaron tanto las características de cada sitio como el manejo realizado (fertilización con fósforo y nitrógeno, cultivo antecesor y sistema de labranza). En la región pampeana, Alvarez y Grigera (2005) han determinado que las variaciones de rendimiento de trigo y de maíz entre lotes de producción pueden ser explicadas considerando variables de suelo tales como materia orgánica, nitrógeno y fósforo. La explicación de las variaciones de rendimientos mejora cuando se tiene en cuenta el manejo realizado (fertilización con nitrógeno y fósforo, cultivo antecesor y sistema de labranza), y mejora aún más si se consideran las lluvias durante el ciclo del cultivo. En trigo, el 33 % de la variación de rendimientos pudo ser explicada con un modelo que incluyó el contenido de materia

orgánica y el nitrógeno disponible en el suelo. La explicación de las variaciones de los rendimientos de trigo fue mayor (48 %) cuando se consideró la fertilización con nitrógeno y fósforo, el cultivo antecesor y el sistema de labranza. Considerando variables de suelo (contenido de materia orgánica y nitrógeno disponible en el suelo) como de manejo de cultivo (fertilización con nitrógeno y fósforo, cultivo antecesor y sistema de labranza) se logró un modelo que permitió explicar el 55 % de las variación de los rendimientos de trigo, mientras que teniendo en cuenta además las precipitaciones durante el ciclo del cultivo las variación de los rendimientos pudieron explicarse en un 67 %.

Numerosos estudios han señalado que los rendimientos de trigo son variables dentro de un mismo lote (Bongiovanni *et al.* 2007; Robertson *et al.* 2008). Zubillaga *et al.* (2009) en San Antonio de Areco (Buenos Aires, Argentina) reportaron que los rendimientos de trigo variaron en un rango de 4295 a 5436 kg ha⁻¹ en función de su ubicación topográfica. Parte de la variabilidad en los rendimientos se asoció a la disponibilidad del agua y a su dinámica durante el ciclo de crecimiento del cultivo (Mulla y Schepers, 1997; Timlin *et al.* 1998) y a diferencias en la capacidad de mineralización de las zonas dentro un lote (Zubillaga *et al.* 2009). El contenido de agua del suelo afecta la producción directamente por su disponibilidad, e indirectamente por sus efectos sobre procesos del ciclo del N tales como la mineralización del N orgánico, la desnitrificación y la lixiviación. La distribución espacial del agua en el suelo dentro de un mismo lote, entre otras variables, ha sido afectada por la topografía (Western *et al.* 1999; Chamran *et al.* 2002). Las variables topográficas tales como pendiente (medida de la inclinación de una recta o plano), aspecto (dirección de la pendiente) y curvatura (forma plana, cóncava o convexa de la superficie del terreno) han influido en el flujo y la acumulación del agua del suelo según posiciones del terreno, así como en la redistribución de las

partículas minerales del suelo y de la materia orgánica debido a la erosión y otros procesos edafogénicos (Kravchenko *et al.* 2000; Pachepsky *et al.* 2001). Numerosos estudios en USA, Argentina y Canadá muestran que la topografía del terreno modifica la respuesta de cultivos de maíz, de trigo o de canola (*Brassica rapa var. Maverick*) a la fertilización nitrogenada en secano (Fiez *et al.* 1994; Manning *et al.* 2001; Pennock *et al.* 2001; Anselin *et al.* 2004). Estos resultados sugieren que el uso eficiente de tecnologías de agricultura de precisión permitiría realizar un manejo diferente del N según zonas de manejo y aplicar los insumos en forma variable, según la respuesta esperada en cada una de ellas.

Cada zona delimitada dentro del lote, cuando presentó características homogéneas manifestadas por similares rendimientos, permitió optimizar la eficiencia en la utilización de insumos, maximizar el beneficio económico, y reducir riesgos de contaminación del ambiente al minimizar sobredosis de aplicación de insumos (Dampney y Moore 1998; Miao *et al.* 2006). La agricultura de precisión potencialmente permite mejorar la rentabilidad, a través del aumento del valor de la producción (cantidad y/o calidad de granos), de la reducción en la cantidad de insumos (semillas, fertilizantes, agroquímicos, etc.) o de ambos simultáneamente (Griepentrog *et al.* 2000; Bongiovanni 2004) y así reducir la contaminación ambiental (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004). Griepentrog *et al.* (2000) en ensayos a campo en el norte de Alemania, lograron reducir el 36 % del nitrógeno aplicado con el uso de dosis variable de fertilizantes en trigo y en cebada (*Hordeum vulgare* L.) sin disminuir los rendimientos de ambos cultivos. Roberts *et al.* (2001) en el estado de Tennessee (USA) simuló la percolación de nitrógeno utilizando el modelo de simulación EPIC, y observaron que, a pesar de la aplicación de mayores dosis de fertilizantes con dosificación variable, la percolación simulada fue menor al mejorar su eficiencia de uso.

Tian *et al.* (1999) aplicando tecnologías de agricultura de precisión en el estado de Illinois (USA) determinaron reducciones en la aplicación de insumos en cultivos de maíz con disminuciones del 42 % en el uso de herbicidas.

Robertson *et al.* (2008) en el oeste de Australia, analizaron los beneficios económicos del manejo de la fertilización con nitrógeno y con fósforo en zonas de productividad delimitadas en lotes de trigo según tamaño del lote y rendimientos promedios. La superficie de los lotes (variaron entre 10 y 172 ha) y los rendimientos promedios (variaron entre 600 y 4900 kg ha⁻¹) no tuvieron relación con la diferencia de rendimiento entre zonas de manejo, y tampoco asociación con el desvío estándar de los rendimientos dentro de los lotes. Los mayores beneficios económicos los observaron con mayores diferencias de rendimiento alcanzable entre zonas de manejo y precios altos de fertilizantes y granos. Para capturar el máximo beneficio económico se requirió determinar el rendimiento alcanzable de cada zona de manejo y una correcta dosis de fertilización.

Scharf *et al.* (2005) estudiaron las dosis óptimas económicas de fertilización con nitrógeno según diferentes zonas de lotes de producción de maíz en Mississippi (USA) sobre suelos principalmente Argiudoles y Hapludoles. Las dosis óptimas económicas promedio de los lotes tuvieron un rango de 63 a 208 kg N ha⁻¹, con dosis óptimas económicas dentro de los lotes que en la mayoría de los casos variaban en más de un 100 % del promedio del lote. Bongiovanni *et al.* (2007) mostraron diferencias de rendimientos y contenidos de proteínas en granos de trigo dentro de zonas de manejo en Manfredi (Córdoba, Argentina) en suelos Haplustoles Típicos con antecesores soja y maíz. El incremento de rendimientos por fertilización con nitrógeno fue mayor con antecesor maíz, siendo en los dos antecesores mayores las respuesta de rendimientos en las posiciones del relieve bajas que en las zonas altas. Este autor concluye que,

considerando el rendimiento y la calidad del cultivo de trigo, la delimitación de zonas de manejo, la consideración del antecesor y la adecuada fertilización con nitrógeno permite incrementar los beneficios económicos en relación al manejo convencional sin delimitar zonas de manejo.

Las variaciones de prácticas de manejo según ambientes pueden ser clasificadas teniendo en cuenta el momento donde se deciden las modificaciones. Por un lado aquellas en las que se observa al organismo mediante diferentes sensores y en el momento se modifican la práctica de manejo del cultivo. Son numerosos los estudios donde la dosis de fertilización nitrogenada es modificada al momento de la observación del sensor según el estado de cultivos, por ejemplo de trigo y de maíz (Zillmann *et al.* 2006; Solari *et al.* 2008; Solari *et al.* 2010). Por otro lado las prácticas de manejo que son decididas con anterioridad al paso de la maquinaria para realizar la labor y donde se requiere de una prescripción previa.

Se debe tener en cuenta que la maquinaria disponible no permite realizar variaciones de algunas prácticas de manejo. La fertilización con nitrógeno puede modificarse según el ambiente, mientras que en la actualidad no se dispone de maquinaria que modifique según el ambiente el fungicida con que es tratada la semilla al realizarse la siembra.

Si bien el conocimiento de la variabilidad de rendimientos y la caracterización de los factores que los originan dentro de áreas delimitadas por su uniformidad relativa permiten la planificación de estrategias de manejo del cultivo, las metodologías para la delimitación de estas ZM no son consistentes. Las metodologías para la delimitación de ZM difieren según sus objetivos de aplicación, tales como minimizar la variabilidad de producción según resultados de cultivos anteriores (Taylor *et al.* 2007), o minimizar los errores (o variabilidad) en la formulación de recomendaciones de fertilización (Fleming *et al.* 2000; Scharf *et al.* 2005). Por lo tanto, diferencias en las delimitaciones de ZM

podrían afectar los parámetros considerados para el diagnóstico y recomendación de, por ejemplo, necesidades de fertilización con N y la respuesta de los cultivos a esta práctica.

Existen pocos trabajos que estudien el efecto de las diferentes prácticas de manejo sobre la capacidad de las metodologías de delimitación de ZM de agrupar zonas según los rendimientos logrados. Las variaciones de rendimientos entre zonas de manejo de lotes de producción han sido modificadas por la rotación y las precipitaciones (Pavia *et al.* 2010). De igual manera la fertilización con nitrógeno en trigo podría modificar la capacidad de las diferentes metodologías de delimitar zonas según, por ejemplo, los rendimientos alcanzados. Por lo tanto las diferentes metodologías podría presentar diferencias en determinar áreas según los rendimientos logrados, y además estas diferencias entre metodologías podrían ser afectadas por los niveles de fertilización con nitrógeno.

4.1.1- Hipótesis

Las mayores producciones de trigo se asocian a zonas de antecedentes de mayor productividad y se relacionan a zonas con mayor disponibilidad de nitrógeno y fases de suelos menos afectadas por erosión. Las diferencias de producción entre ZM no son afectadas por la fertilización con nitrógeno. Las respuestas productivas a la fertilización con nitrógeno son mayores en las zonas con antecedentes de mayor producción, mayor disponibilidad de agua y fases de suelos menos erosionadas.

4.1.2- Objetivos

Cuantificar diferencias en el diagnóstico y recomendación de fertilización con N y uso del nutriente en cultivos de trigo según zonas de manejo definidas mediante 8

metodologías de delimitación, y establecer en qué medida los aspectos indicados varían según condiciones de producción en Argiudoles representativos de la región de la pampa ondulada.

Determinar la metodología que mejor permita diferenciar zonas de manejo según productividad de trigo y uso de nitrógeno.

4.2- MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1- Ubicación de los sitios experimentales y delimitación de zonas de manejo.

Los experimentos fueron conducidos en 3 lotes de producción de trigo (Lotes 1, 2 y 3, de tabla 1) en la campaña 2007-2008 en San Antonio de Areco. Son suelos Argiudoles Típicos correspondientes a la serie de suelos Capitán Sarmiento. En cada lote se delimitaron zonas de manejo utilizando 8 metodologías: MR, MS, NDVIgra, NDVIto, FIS, AM, ALT y SE.

4.2.2- Caracterización de propiedades superficiales de suelo y contenido de agua durante el ciclo del cultivo

En el momento de la siembra de trigo se tomaron muestras compuestas de los suelos (0 a 0,2 m) para la determinación de MO, pH en agua y textura. N_{-NO_3} se determinó hasta 0,4 m de profundidad. Las muestras de suelos fueron estratificadas por ZM. Los niveles de N del suelo hasta los 0,4 m de profundidad se estimaron a partir de los contenidos de N_{-NO_3} (0 a 0,2 + 0,2 a 0,4 m) y considerando una densidad aparente media de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ para el estrato de 0 a 0,2 m de profundidad, y de $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ para el estrato de 0,2 a 0,4 m de profundidad.

En cada lote y ZM se evaluó la contenido de humedad gravimétrica en suelo cada 0.2 m hasta 1,40 m. Los muestreos se realizaron por ZM con 4 lugares de muestreo por zona.

Los momentos de muestreo fueron a la siembra y cosecha. Se calculo la lámina de agua cada 0,2 m utilizando datos de densidad aparente promedio de varias unidades de muestreo realizadas en los lotes.

4.2.3- Caracterización de la productividad de trigo

En cada uno de los 3 lotes y ZM se instalaron ensayos en bloques al azar con cuatro repeticiones y 5 tratamientos de fertilización nitrogenada, a razón de 0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N aplicado como urea (46-0-0) en el momento de la siembra de los cultivos. Las unidades experimentales fueron de 10 surcos por 6 m (alrededor de 10,5 m²) y en todos los casos fueron fertilizados en la siembra con 30 kg ha⁻¹ de P. El manejo realizado (fecha de siembra, variedad y control de plagas) fue el correspondiente a cultivos de alta producción para cada región.

En cada parcela se determinó el número de plantas y espigas por metro cuadrado, materia seca aérea en estado de madurez fisiológica, número de granos, peso de granos, contenido de nitrógeno en grano y rendimiento. La producción de los cultivos se determinó en madurez fisiológica por cosecha mecánica (Cosechadora de parcelas Wintersteiger Classic) de la porción central de cada unidad experimental.

El número de granos y los rendimientos se ajustaron en cada ZM a modelos cuadráticos de respuesta según los niveles de Nd según

$$Nd = Nsu + Nfe \quad \text{ec.3}$$

donde Nd es nitrógeno disponible, Nsu es nitrógeno de nitratos en los primeros 0,4 m de suelos en kg ha⁻¹ y Nfe es nitrógeno aplicado como fertilizante en kg ha⁻¹. Los niveles Nd para alcanzar los máximos rendimientos (Nd max) se estimaron cuando la primer

derivada de los modelos cuadráticos correspondientes es igual a cero, y con esta información se calculó el número de granos máximo (NGmax) y los rendimientos máximos (Rmax). El número de granos mínimo (NGmin) y los rendimientos mínimos (Rmin) se estimaron a partir de la ordenada al origen. La eficiencia de uso del N (EUN) se calculó como:

$$EUN = (R_{max} - R_{min}) (Nd \text{ max})^{-1} \quad \text{ec.4}$$

donde EUN es la eficiencia de uso del nitrógeno fertilizado (kg de trigo kg de nitrógeno fertilizado⁻¹), Rmax es el rendimientos máximo kg ha⁻¹, Rmin es el rendimiento mínimos en kg ha⁻¹ y Nd max es el nitrógeno disponible para alcanzar los rendimientos máximos en kg ha⁻¹.

Para calcular la eficiencia de uso del agua se utilizó Rmin y Rmax en cada lote y ZM.

Se calculó la eficiencia de uso del agua (EUA) como:

$$EUA_{Rmax} = R_{max} (AC - AS + PP)^{-1} \quad \text{ec.5}$$

$$EUA_{Rmin} = R_{min} (AC - AS + PP)^{-1} \quad \text{ec.6}$$

donde EUA Rmax es la eficiencia de uso del agua con alta disponibilidad de nitrógeno en kg mm⁻¹, EUA Rmin es la eficiencia de uso del agua con baja disponibilidad de nitrógeno en kg mm⁻¹, Rmax es el rendimiento máximo en kg ha⁻¹, Rmin es el rendimiento mínimo en kg ha⁻¹, AC es el contenido de humedad en los primeros 1,2 m de suelos en la cosecha de trigo en mm, AS es el contenido de humedad en los primeros 1,2 m de suelos en la siembra de trigo en mm, y PP es las precipitaciones durante el

ciclo del cultivo (Después de la determinación de AS y antes de la determinación de AC) en mm.

4.2.4- Análisis estadístico

Al determinar las diferencias en los rendimientos en grano, en el uso del nitrógeno y en el uso del agua según las metodologías de delimitación y las zonas de productividad se consideró un modelo en bloques al azar con 3 repeticiones (lotes) y 2 factores principales ZM (A, M y B productividad) y metodologías de delimitación (MR, NDVIto, NDVIgra, ALT, FIS, HM, MS y SE). Se considero que existe interacción entre los factores zonas de manejo y metodologías de delimitación. Además, las propiedades de suelos y de cultivos se analizaron mediante regresiones y mediante análisis de componentes principales.

Para compara la delimitación de ZM de las diferentes metodologías según la productividad de trigo y uso de nitrógeno se consideró el nivel de error relativo (Ec. 7)

$$Er = Ei (Emax)^{-1} \times 100 \dots\dots\dots ec.7$$

donde Er es el nivel de error relativo para la variable estudiada y metodología de delimitación, Ei es el nivel de error para la variable estudiada y metodología de delimitación, y $Emax$ es el nivel de error máximo para la variable estudiada considerando las 8 metodologías de delimitación.

Se seleccionó la metodología de delimitación de ZM que considerando las 4 variables de productividad y uso de nitrógeno (EUN, Nmax, Rmin y Rmax) tuvo la suma de los niveles de error relativos el valor menor.

En todos los casos se utilizaron ANVA protegidos ($p < 0,10$) y pruebas de diferencias de medias de Fisher (Infostat 2003).

4.3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El número de granos (NG) varió entre 3726 y 21477 m⁻², mostrando en todos los lotes y ZM respuestas con incrementos decrecientes, ajustadas según modelos cuadráticos, según los niveles de nitrógeno disponible. El peso de mil granos (PMG) varió entre 21 y 34 g. En promedio tanto el NG, como el PMG y como el rendimiento fueron mayores en el lote 1. En el lote 1 las zonas de mayor productividad estimada mostraron niveles mayores de NG, de PMG y de rendimiento (Tabla 25).

Tabla 25: Productividad de trigo en 3 lotes de la Pampa ondulada según zonas de productividad estimada. ZM = Zonas de manejo. NG = Número de granos. PMG = Peso de mil granos. DE = Desvío estándar de la población.

Lotes	ZM	NG granos m ⁻²		PMG g		Rendimiento kg ha ⁻¹	
		Promedio	DE	Promedio	DE	Promedio	DE
1	Alta	17645	1444	30,5	1,2	5403	408
	Media	16730	1917	30,2	1,5	5029	608
	Baja	15148	2433	29,0	1,4	4379	634
2	Alta	13815	1243	26,4	1,7	3660	274
	Media	14165	1001	26,5	1,7	3718	258
	Baja	13327	1485	25,8	2,0	3444	316
3	Alta	9745	1485	25,6	1,7	2472	301
	Media	9500	1710	27,1	2,5	2554	265
	Baja	7819	1975	28,7	2,4	2317	397

Los rendimientos de trigo mostraron mayor asociación con los NG que con los PMG, esto fue independiente del nivel de fertilización con nitrógeno. La asociación de los NG y de los PMG con los rendimientos dependió de la zona de productividad estimada y del nivel de fertilización con nitrógeno. Las variaciones en los NG de las ZM de productividad alta mostraron modificaciones de los rendimientos 14,7 y 30,5 % mayores que las modificaciones de los rendimientos en las ZM de media y baja productividad estimada, respectivamente (Fig. 16 y 17).

Las zonas de media y de alta productividad delimitadas mediante FIS y MR mostraron mayores NGmin que las zonas de baja productividad. Además las zonas de alta productividad delimitadas mediante MR también mostraron mayor NGmax que las zonas de baja productividad (Tabla 26).

El número de granos es un componente que muestra alta relación con el rendimiento final (Fig. 16 y 17). El mapa de rendimiento fue la metodología que con menor nivel de error permitió diferenciar zonas según el número de granos tanto en condiciones de alta como de baja disponibilidad de nitrógeno (Tabla 26). Las características de cada sitio que determinan las diferencias de producción entre zonas de manejo afectan al cultivo de trigo antes que éste defina el número de granos por metro cuadrado. Las estrategias de manejo de cultivo que busque disminuir las diferencias de productividad entre zonas de manejo deberían considerar incrementar el número de granos en las zonas de productividad menor.

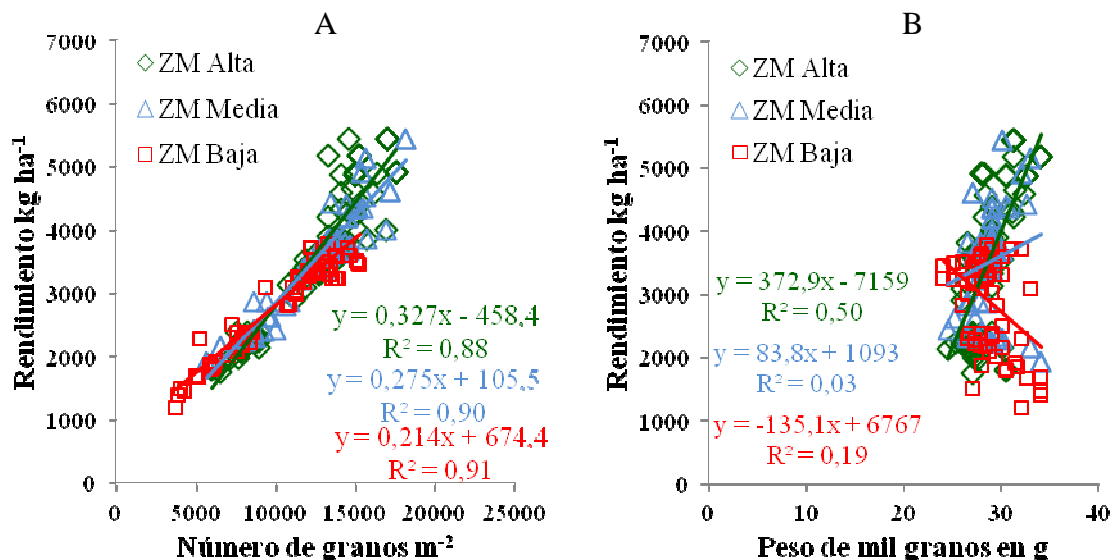


Figura 16: Rendimientos de trigo sin fertilización con nitrógeno según (A) el número de granos y según (B) el peso de mil granos. Zonas de alta, de media y de baja productividad estimada en 3 lotes de la Pampa ondulada. ZM = Zonas de manejo.

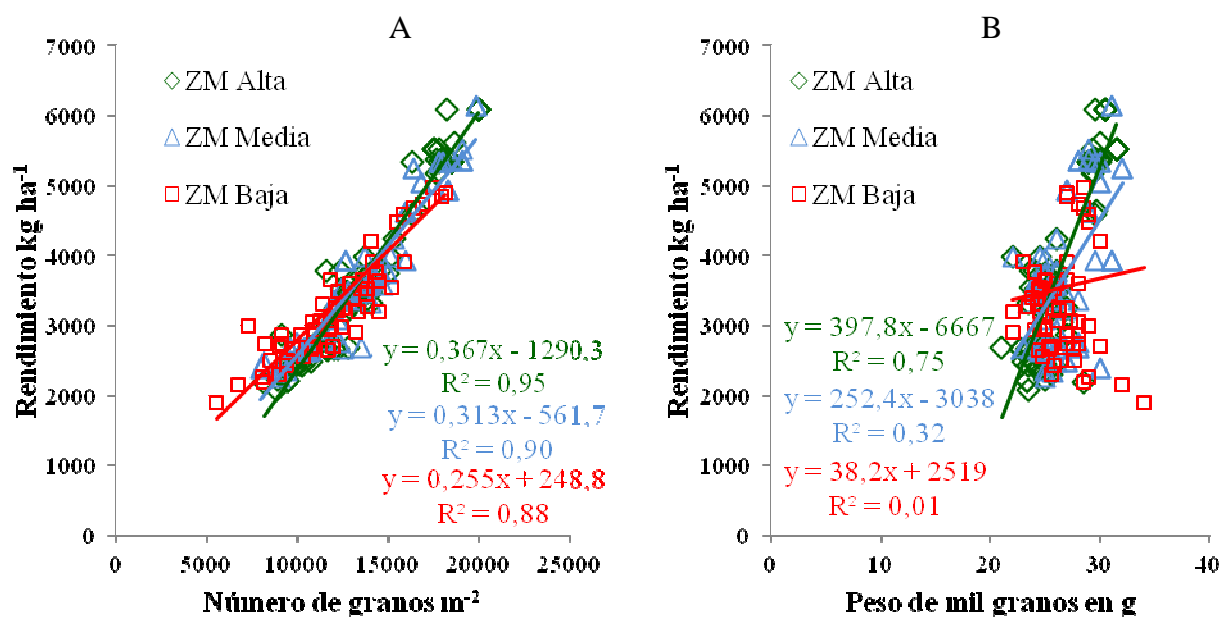


Figura 17: Rendimientos de trigo fertilizados con 160 kg de nitrógeno ha⁻¹ según (A) el número de granos y según (B) el peso de mil granos. Zonas de alta, de media y de baja productividad estimada en 3 lotes de la Pampa ondulada. ZM = Zonas de manejo.

Analizando las diferencias entre metodologías de delimitación según cada ZM, se observó que en las zonas de manejo de alta productividad las metodologías mostraron diferencias en la eficiencia de uso de nitrógeno para la obtención de número de granos. Las zonas de FIS mostraron menor EUN para NG que las zonas de NDVIto y de NDVIgra (Tabla 26). Tanto las variaciones de NGmin y NGmax son similares entre las diferentes metodologías y además presentaron valores similares de nitrógeno disponible en el suelo y de nitrógeno total al inicio del cultivo (Tabla 15). La zona de productividad alta delimitada mediante FIS tiene en promedio mayores valores de COT y de IMO (Tablas 14 y 16). Los valores mayores de IMO y de COT se asocian con mejores condiciones de zonas de manejo. En sitios similares de la Pampa ondulada Zubillaga *et al.* (2009) describieron diferencias en el nitrógeno potencialmente mineralizable durante el ciclo de crecimiento de trigo. Los sitios con mayores niveles de mineralización se caracterizaban por tener mayores niveles de COT y de IMO. Posiblemente los mayores aportes de nitrógeno por mineralización de las zonas de alta

productividad determinen incrementos menores de número de granos con los aumentos del nitrógeno fertilizado.

Los rendimientos de trigo variaron entre 1191 y 6091 kg ha⁻¹, mostrando en todos los lotes y ZM respuestas con incrementos decrecientes, ajustadas según modelos cuadráticos, según los niveles de Nd. En 4 de los 66 ajustes realizados los requerimientos de Nd max fueron mayores que el rango explorado de Nd. La eficiencia de uso de nitrógeno varió entre 0,8 y 18,9 kg de grano kg de Nd⁻¹, mientras que la eficiencia de uso del agua varió entre 1,9 y 11,0 kg de grano mm de agua⁻¹ para los Rmin y 5,1 y 12,7 kg de grano mm de agua⁻¹ para los Rmax. Con niveles de nitrógeno disponible para alcanzar los rendimientos máximos de entre 69 a 322 kg Nd ha⁻¹. Los Rmin variaron entre 1004 y 4760 kg grano ha⁻¹, y los Rmax variaron entre 2410 y 5691 kg de grano ha⁻¹. En general las principales diferencias entre ZM se observaron en las eficiencias de uso de nitrógeno, en la eficiencia de uso del agua, y en el nivel de nitrógeno disponible para alcanzar los Rmax. Diferencias menores entre ZM se mostraron en los rendimientos, donde los Rmin mostraron mayores diferencias entre ZM que los Rmax (Tablas 27 y 28).

Del análisis conjunto de la información utilizando componentes principales se observó fundamentalmente el agrupamiento entre lotes de producción, y entre zonas de media y de alta productividad con respecto a las zonas de baja productividad. Las diferencias de eficiencia de uso de nitrógeno y en rendimientos máximos fueron mayores entre lotes de producción que dentro de zonas de productividad dentro de cada lote. En cambio las diferencias en los rendimientos mínimos y en la cantidad de nitrógeno disponible para alcanzar los rendimientos máximos se asocian a la productividad de la zona de manejo. Mayor eficiencia de uso del nitrógeno y rendimiento máximo se observó en el lote 1,

niveles mayores de requerimiento de N para rendimiento máximo en el lote 3, y una situación intermedia con mayor rendimiento mínimo en el lote 2 (Fig. 18).

En coincidencia con el observado en las propiedades de suelos en el capítulo III, la productividad y uso de nitrógeno en trigo tiene una mayor asociación a los lotes que a las zonas de productividad dentro de los lotes. Las zonas de productividad alta, media y baja son dependiente del lote, no pudiendo ser agrupadas para decidir, por ejemplo, el rendimiento objetivo. En la actualidad los productores consideran como unidad de toma de decisiones a los lotes, sin considerar en la mayoría de los casos las diferentes áreas de productividad que pudiera haber dentro de estos. Para las condiciones estudiadas esa primera división en la unidad de toma de decisión es adecuada. Un segundo nivel a considerar para la toma de decisiones debería ser los niveles de productividad dentro de cada lote.

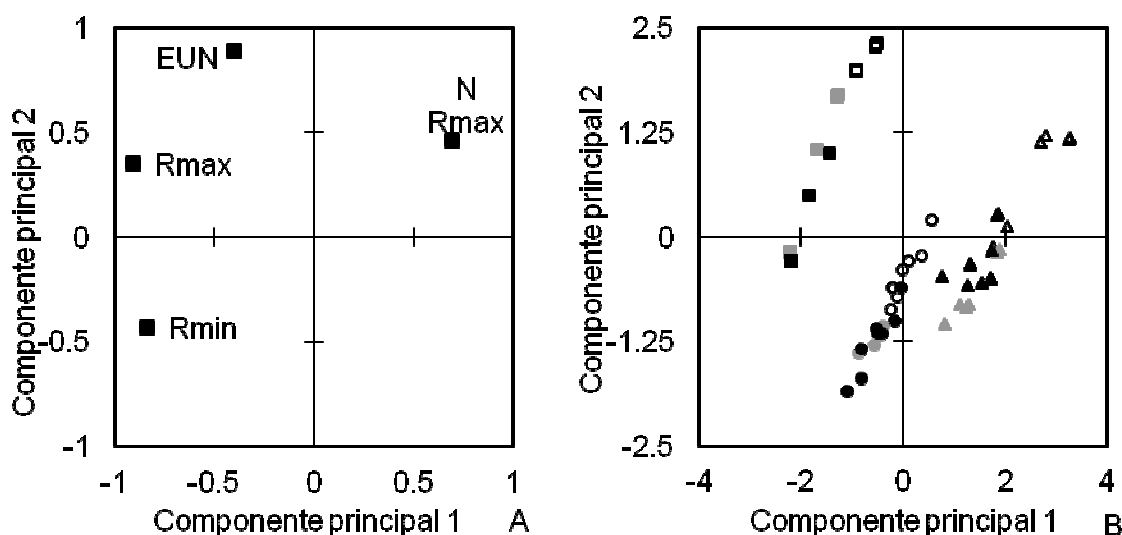


Figura 18: Representación en el plano de las 2 primeras componentes principales (87 % de explicación) de (A) variables de producción de trigo y uso del N, y (B) 3 lotes de producción de la Pampa ondulada según zonas de manejo. Lotes 1, 2 y 3 representados en cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente. Zonas de manejo de alta, de media y de baja productividad en negro, gris y blanco, respectivamente. EUN = eficiencia de uso del N, Rmax = rendimientos máximos, Rmin = rendimientos mínimos, Nmax = nitrógeno disponible para alcanzar Rmax.

Las zonas de media y de alta productividad, independientemente de la metodología de delimitación utilizada, mostraron mayores rendimientos tanto sin nitrógeno como con fertilización con nitrógeno. Las zonas de baja productividad en general presentaron una mayor eficiencia de uso de nitrógeno y mayores requerimientos de Nd para alcanzar los Rmax. Del análisis descriptivo de componentes principales surge que las diferentes metodologías discriminan entre zonas de alta y de baja productividad con respecto a las zonas de baja productividad (Fig. 18).

Las variables de productividad y de uso de nitrógeno y del agua (EUN, Nmax, Rmin, Rmax y EUA) mostraron diferencias entre zonas de manejo dependiendo de la metodología de delimitación utilizada. Cuando se utilizó MR, los Rmax y los Rmin de las zonas de alta productividad fueron 12 y 40 % mayores que los rendimientos de las zonas de baja productividad. Las delimitaciones mediante FIS y NDVIto permitieron mostrar zonas con diferencias en los Rmin, en ambas las zonas de alta productividad mostraron rendimientos 40 % mayores que en la zona de baja productividad. Antecedentes de manejo fue la única metodología que mostró niveles de error más bajos para determinar diferencias de rendimiento en Rmax que en Rmin. En las zonas de alta productividad de AM se observaron Rmin y Rmax 30 y 10 % mayores que en las ZM de baja productividad, respectivamente (Tabla 27).

Las zonas de baja productividad mostraron eficiencias de uso de nitrógeno 35 % mayores que las zonas de alta y de media productividad, según se delimitaron mediante FIS y NDVIto. Los requerimientos de N para alcanzar los rendimientos máximos fueron 32 % mayores en las zonas de baja productividad delimitadas con SE que en las zonas de media y alta productividad (Tabla 27).

De los 8 métodos de delimitación de zonas estudiados, 6 permitieron diferenciar zonas con diferente eficiencia de uso del agua (EUA). Las delimitaciones realizadas con MR,

FIS y NDVIto diferenciaron zonas de media y de alta productividad que tuvieron mayor eficiencia de uso del agua que las zonas de baja productividad. Estas diferencias se dieron en los dos niveles de producción analizados: EUA Rmin y EUA Rmax. La delimitación realizada mediante SE y MS determinaron zonas de alta y de media productividad con mayor EUA Rmax que las zonas de productividad baja. Las zonas de productividad media de NDVIgra tuvieron mayor EUA Rmin que las zonas de productividad baja (Tabla 28).

Las diferencias entre metodologías de delimitación para una misma zona de manejo en general fueron menores. La diferencia mayor se observó en las zonas de alta productividad y según los rendimientos máximos, las ZM de MR mostraron rendimientos 6 % mayores que las zonas de ALT, de SE, de NDVIgra, de NDVIto y de MS (Tabla 27).

La eficiencia de uso de agua tuvo diferencias en las zonas de productividad baja y analizando los niveles de producción mínimos (EUA Rmin). En esas condiciones las delimitaciones realizadas mediante NDVIto, IS, MR y SE diferenciaron zonas con menor eficiencia de uso del agua (tabla 28). En las zonas de manejo de alta y media productividad de trigo las diferencias descritas en la eficiencia de uso del agua serían independientes de la metodología de delimitación considerada. Sin embargo, la identificación de zonas de manejo de bajos rendimientos define eficiencia de uso del agua según métodos de delimitación.

Tabla 26: Producción de número de granos de trigo en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. NG = Número de granos. Nd = Nitrógeno disponible en la capa de los primeros 0,4 m de suelos más nitrógeno agregado como fertilizante. NGmínimo = Número de granos sin nitrógeno. NGmáximo = Número de granos con fertilización con nitrógeno. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodología de delimitación	Zona de manejo			<i>P</i>	Zona de manejo			<i>P</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>P</i>
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	EUN NG kg Nd ⁻¹				Nd para NG máximo kg ha ⁻¹				NG mínimo granos m ⁻²				NG máximo granos m ⁻²			
Altimetría y pendiente	23,0Aab	24,4Aa	32,1Aa	0,61	145Aa	160Aa	193Aa	0,33	11050Aa	9845Aa	8376Aa	0,44	14416Aa	13716Aa	13863Aa	0,62
Antecedentes de manejo	19,8Aab		28,6Aa	0,41	177Aa		161Aa	0,34	11262Aa		9171Aa	0,43	14754Aa		13677Aa	0,16
Fotointerpretación	22,3Ab	21,7Aa	26,0Aa	0,85	152Aa	169Aa	261Aa	0,14	11311Aa	10691Aa	7609Ba	0,10	14622Aa	14277Aa	13343Aa	0,27
Mapas de rendimiento	28,2Aab	23,1Aa	31,6Aa	0,55	146Aa	167Aa	186Aa	0,39	10720Aa	10449Aa	7616Ba	0,08	14889Aa	14142ABa	13178Ba	0,06
Mapa de suelo	20,2Aab		30,5Aa	0,27	157Ba		180Aa	0,06	11247Aa		8618Aa	0,25	14343Aa		13880Aa	0,56
NDVIgra	26,5Aa	16,0Aa	34,1Aa	0,28	149Aa	166Aa	182Aa	0,57	9884Aa	12303Aa	7664Aa	0,14	13899Aa	14756Aa	13456Aa	0,16
NDVIto	25,1Aa	16,0Aa	34,4Aa	0,27	147Aa	162Aa	222Aa	0,44	10389Aa	12070Aa	7143Aa	0,13	14098Aa	14554Aa	13768Aa	0,37
Suma estandarizada	19,4Aab	21,8Aa	31,7Aa	0,40	156Aa	255Aa	182Aa	0,49	11673Aa	10245Aa	8006Aa	0,16	14646Aa	14248Aa	13469Aa	0,24
<i>P</i>	0,06	0,58	0,41		0,15	0,50	0,28		0,58	0,35	0,52		0,50	0,69	0,44	

Tabla 27: Rendimientos de trigo en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. Nd = Nitrógeno disponible en la capa de los primeros 0,4 m de suelos más nitrógeno agregado como fertilizante. Mínimo = Sin nitrógeno. Máximo = Con fertilización con nitrógeno. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodología de delimitación	Zona de manejo			<i>P</i>	Zona de manejo			<i>P</i>	Zona de manejo			<i>p</i>	Zona de manejo			<i>P</i>
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	EUN kg grano kg Nd ⁻¹				Nd para rendimiento máximo kg de N ha ⁻¹				Rendimiento mínimo kg ha ⁻¹				Rendimiento máximo kg ha ⁻¹			
Altimetría y pendiente	4,8Aa	7,0Aa	8,7Aa	0,55	133Aa	137Aa	155Aa	0,23	3282Aa	2830Aa	2370Aa	0,49	3936Ac	3827Aa	3698Aa	0,61
Antecedentes de manejo	4,5Aa		7,8Aa	0,49	147Aa		146Aa	0,88	3460Aa		2591Aa	0,38	4152Aab		3714Ba	0,08
Fotointerpretación	4,3Ba	6,1ABa	10,5Aa	0,08	129Aa	144Aa	182Aa	0,11	3435Aa	3156Aa	1935Ba	0,03	4000Aabc	4020Aa	3708Aa	0,31
Mapas de rendimiento	3,8Aa	7,3Aa	9,5Aa	0,30	118Aa	130Aa	199Aa	0,26	3538Aa	2890ABa	2129Ba	0,08	4187Aa	3875ABa	3683Ba	0,07
Mapa de suelo	3,8Aa		9,1Aa	0,20	140Aa		162Aa	0,16	3431Aa		2442Aa	0,28	3952Ac		3851Aa	0,75
NDVIgra	6,6Aa	4,2Aa	9,2Aa	0,21	140Aa	122Aa	193Aa	0,43	2942Aa	3522Aa	2204Aa	0,12	3873Ac	4043Aa	3701Aa	0,26
NDVIto	6,7ABa	3,7Ba	10,4Aa	0,05	135Aa	130Aa	166Aa	0,36	2979Aa	3557Aa	1986Aa	0,06	3884Ac	4032Aa	3665Aa	0,24
Suma estandarizada	3,5Aa	7,0Aa	8,9Aa	0,26	124Ba	134Ba	176Aa	0,05	3486Aa	2893Aa	2288Aa	0,26	3965Abc	3841Aa	3722Aa	0,58
<i>P</i>	0,12	0,43	0,13		0,30	0,81	0,64		0,12	0,37	0,13		0,09	0,32	0,50	

Tabla 28: Eficiencia de uso del agua (EUA) según rendimientos máximos (Rmax) y mínimos (Rmin) en Argiudoles de la pampa ondulada según 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. Letras mayúsculas diferentes en sentido horizontal muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre ZM según métodos de delimitación. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical muestran diferencias (LSD Fisher, $p < 0,10$) entre métodos de delimitación en cada ZM. p = nivel de significancia del factor tratamientos en el análisis de la varianza.

Metodología de delimitación	Zona de manejo			<i>P</i>	Zona de manejo			<i>p</i>
	Alta	Media	Baja		Alta	Media	Baja	
	EUA Rmin				EUA Rmax			
Altimetría y pendiente	7,48Aa	6,90Aa	5,23Aabc	0,40	9,03Aa	9,29Aa	8,03Aa	0,17
Antecedentes de manejo	8,37Aa		6,13Aa	0,42	9,90Aa		8,64Aa	0,42
Fotointerpretación	7,91Aa	7,82Aa	4,14Bcd	0,03	9,22Aa	9,85Aa	7,88Ba	0,05
Mapas de rendimiento	9,02Aa	6,94Aa	4,55Bbcd	0,03	10,25Aa	9,26Aa	7,82Ba	0,03
Mapa de suelo	8,14Aa		5,28Aab	0,13	9,36Aa		8,32Ba	0,08
NDVIgra	7,10ABa	8,09Aa	4,64Bbcd	0,10	9,26Aa	9,27Aa	7,78Aa	0,13
NDVIto	7,05Aa	8,33Aa	4,03Bd	0,02	9,18Aa	9,43Aa	7,41Ba	0,01
Suma estandarizada	8,24Aa	7,15Aa	4,97Abcd	0,13	9,37Aa	9,39Aa	8,00Ba	0,05
<i>P</i>	0,41	0,66	0,07		0,62	0,81	0,12	

La utilización de información integrada de mapas de suelo y rendimiento permite diferenciar áreas del lote con diferencias en el contenido de agua al momento de la siembra y madurez fisiológica de los cultivos de trigo y con diferencias en la eficiencia de uso del agua (Tabla 20 y 28). Delimitar zonas de manejo con esta metodología es una estrategia recomendable para el uso eficiente del recurso mejorando su retorno productivo y reduciendo el riesgo de déficit de agua.

El rendimiento es el principal factor que determina el ingreso económico del cultivo de trigo. La inclusión de un cultivo en un lote o ZM se basa en general en los ingresos que genere su producción. La delimitación ZM utilizando MR permite diferenciar áreas según los rendimientos e ingresos económicos. Además la delimitación de ZM según MR puede delimitar áreas según rendimientos utilizando diferentes manejos de cultivo tales como sin fertilización con nitrógeno y con fertilización con nitrógeno.

Considerar la delimitación de zonas de manejo según FIS, NDVIto y SE para los diagnósticos y las recomendaciones de fertilización nitrogenadas tiene ventajas ambientales y económicas. Estas metodologías mostraron áreas con diferencias en la eficiencia de uso de nitrógeno. La dosis única en lotes con variaciones en la eficiencia de uso de nitrógeno produce zonas de sobredosificación y subdosificación. La reducción de la sobredosificación y subdosificación de la fertilización nitrogenada disminuye la contaminación ambiental e incrementar el retorno económico de la fertilización.

La delimitación mediante mapas de rendimientos es la metodología de delimitación más adecuada cuando el objetivo principal es caracterizar las zonas según la productividad. Solamente el 20 % de las cosechadoras utilizadas en Argentina cuentan con monitores de rendimiento (Bragachini *et al.* 2010). La delimitación de zonas mediante FIS determinó áreas con diferencias en el número de granos mínimos y en los rendimientos

mínimos, y con mayor nivel de error determinó áreas con diferencias en el número de granos máximo y en los rendimientos máximos. Además de caracterizar zonas con diferencias de eficiencia de uso de nitrógeno para producción de granos. Tanto FIS como MR son metodologías que observaron a los cultivos para determinar las zonas de productividad dentro de los lotes. Estos resultados concuerdan con Ortega y Santibáñez (2007) que sugieren analizar la productividad de cultivos anteriores para diferenciar zonas de productividad cuando no se han identificado las causas de variación de producción dentro de lotes.

Las diferencias de productividad entre zonas de manejo tanto en rendimiento como en número de granos son menores al incrementar la disponibilidad de nitrógeno. Las diferentes metodologías de delimitación de ZM mostraron mayores niveles de error al diferenciar ZM según R_{max} y NG_{max} en comparación con R_{min} y NG_{min} . De las 8 metodologías estudiadas las delimitaciones de ZM realizadas con FIS y con MR mostraron las mayores diferencias entre zonas de alta productividad y baja productividad para los R_{min} , fueron de 43 y de 40 % respectivamente. Para los R_{max} las zonas de alta productividad delimitadas mediante FIS y MR mostraron rendimientos 8 y 12 % mayores que las zonas de menor productividad, respectivamente. La fertilización con nitrógeno disminuyó las diferencias entre ZM en un 75 %. No existen evidencias de los efectos de la fertilización con nitrógeno sobre las diferencias de productividad entre zonas de manejo según diferentes metodologías de delimitación. Estos resultados sugieren que la fertilización con nitrógeno tiene efectos sobre las diferencias entre ZM disminuyendo las diferencias de producción entre zonas de alta y baja productividad. Además, la fertilización con nitrógeno tiene efectos sobre la

capacidad de las diferentes metodologías de diferenciar áreas según la producción de trigo.

De todas las propiedades de suelo y de cultivo analizadas utilizando las 8 metodologías de delimitación en los capítulos III y IV, las diferenciaciones de áreas dentro de los lotes según los contenidos de nitrógeno de nitratos en las capas de 0 a 0,2 y de 0,2 a 0,4 m mostraron un mayor nivel de error. Por el contrario, en promedio el nivel de error fue menor para mostrar diferencias en los rendimientos mínimos, los números de granos mínimos y la eficiencia de uso del agua para rendimientos mínimos y para rendimientos máximos. Los contenidos de nitrógeno disponible en el suelo en los primeros 0,2 y 0,4 m de profundidad son propiedades dinámicas en relación al resto de las propiedades de suelo estudiadas. Las metodologías de delimitación utilizadas en este estudio tienen en general como objetivo delimitar zonas según la productividad estimada de los cultivos. Mostraron diferencias entre zonas según la productividad de trigo, en especial en condiciones de baja disponibilidad de nitrógeno, con menor nivel de error que las diferencias en las propiedades de suelos.

Para las condiciones de este estudio en Argiudoles de la pampa ondulada, la metodología FIS mostró los menores niveles de errores relativos (Ec. 7) en la diferenciación de áreas dentro de los lotes según los rendimientos (R_{min} y R_{max}) y el uso de nitrógeno de trigo (EUN y $Nd R_{max}$) (Fig. 19 y Anexo III).

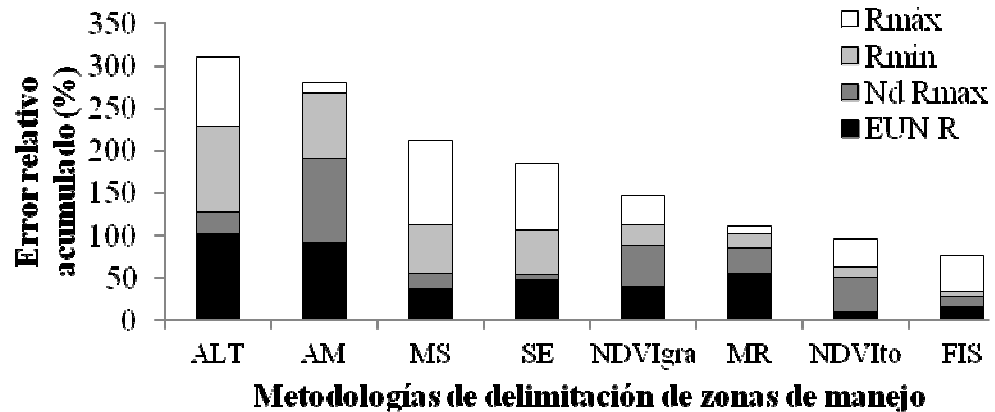


Figura 19: Error relativo acumulado de 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo. ALT = Altimetría y pendiente. AM = Antecedentes de manejo. MS = Mapas de suelos. SE = Sumas estandarizadas. NDVIgra = Índice verde diferencial normalizado de gramíneas NDVIto = Índice verde diferencial normalizado de trigo, maíz y soja. MR = Mapas de rendimientos. FIS = Fotointerpretación de imágenes satelitales. Rmax = Rendimientos máximos. Rmin = Rendimientos mínimos. Nd Rmax = Nitrógeno disponible para alcanzar Rmax. EUN = Eficiencia de uso de nitrógeno.

Del análisis conjunto de la información de propiedades de suelos y de cultivos delimitados mediante fotointerpretación de imágenes satelitales por medio de componentes principales se observó el agrupamiento principalmente entre lotes de producción. Al considerar solo la metodología seleccionada para el análisis, en coincidencia con lo observado cuando se analizaban todas las metodologías las diferencias de propiedades de suelos y de cultivos entre los 3 lotes tienen mayor peso para explicar la variabilidad de los datos que las diferencias entre zonas de productividad estimada. Las zonas de media y de alta productividad mostraron mayores niveles de COT, de IMO, de NGmin y de Rmin. Mientras que las zonas de baja productividad mostraron mayores contenidos de agua al momento de la siembra de trigo en los 1,2 m de profundidad, mayores contenidos de Pe y de requerimientos de Nd para alcanzar el número de granos y rendimiento máximo (Fig. 20).

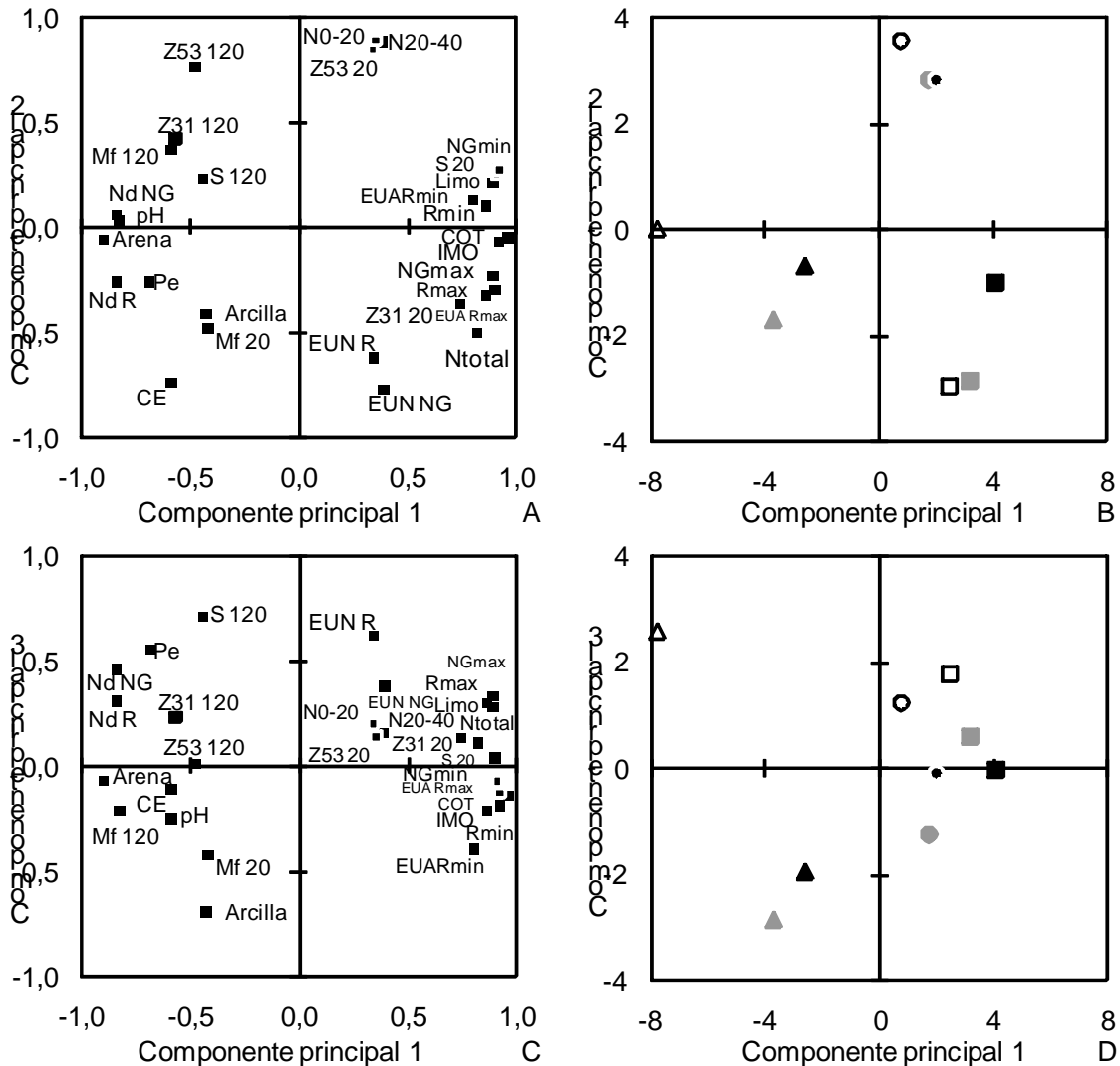


Figura 20: Representación en el plano de las 3 primeras componentes principales, en A y en B componentes principales 1 y 2 (73 % de la explicación), y en C y D componentes principales 1 y 3 (63 % de la explicación), de (A y C) variables de propiedades de suelo, y de (B y D) lotes de producción. Lotes 1, 2 y 3 representados como cuadrados, círculos y triángulos, respectivamente. Zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. Pe = Fósforo extractable. COT = Carbono orgánico. CE = Conductividad eléctrica. N₀₋₂₀ = nitrógeno de nitratos en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. N₂₀₋₄₀ = nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995). EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. NG = Número de granos por metro cuadrado. Ntotal = Nitrógeno total en la capa de 0 a 0,2 m de suelos. NGmax = Número de granos máximos. NGmin = Número de granos mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. Rmin = Rendimiento mínimo. S 20, Z31 20, Z53 20 y Mf 20 = Contenido de agua en los primeros 0,2 m de suelo al momento de la siembra, en primer nudo visible, en aparición de la espiga, y en madurez fisiológica de trigo, respectivamente. S 120, Z31 120, Z53 120 y Mf 120 = Contenido de agua en los primeros 1,2 m de suelo al momento de la siembra, en primer nudo visible, en aparición de la espiga, y en madurez fisiológica de trigo, respectivamente.

Los suelos erosionados en la zona de estudio tienen menores contenidos de COT y de arcilla en la capa de 0 a 0,2 m de suelos (Michelena *et al.* 1989). Sin modificaciones de la textura los menores valores de COT indican en general suelos más erosionados. El IMO relaciona los niveles de materia orgánica y la textura de los suelos (Pieri 1995) y puede ser considerado indicador del nivel de degradación de los suelos. Las zonas de manejo delimitadas mediante fotointerpretación de imágenes satelitales muestran mayores contenidos de de IMO y de COT al aumentar la productividad de la zonas. Los rendimientos máximos y mínimos son mayores con la productividad de la zona de manejo y con los incrementos de IMO y de COT. Las variaciones de rendimientos según los niveles de IMO y de COT se ajustaron en un único modelo lineal para los rendimientos mínimos y para los rendimientos máximos. El IMO varió entre 2,7 y 4,0, y los rendimientos mostraron aumentos de 2912 kg ha^{-1} por cada unidad de aumento de IMO. El COT varió entre 12,5 y 20,4 g kg^{-1} , y los rendimientos aumentaron 494 kg ha^{-1} por cada unidad de aumento de COT. El contenido de nitrógeno total mostro diferencias principalmente entre las zonas de baja y media productividad y las zonas de alta productividad. Por cada unidad de mayores contenidos de nitrógeno total los rendimientos máximos y mínimos fueron mayores en 3341 kg ha^{-1} (Fig. 21).

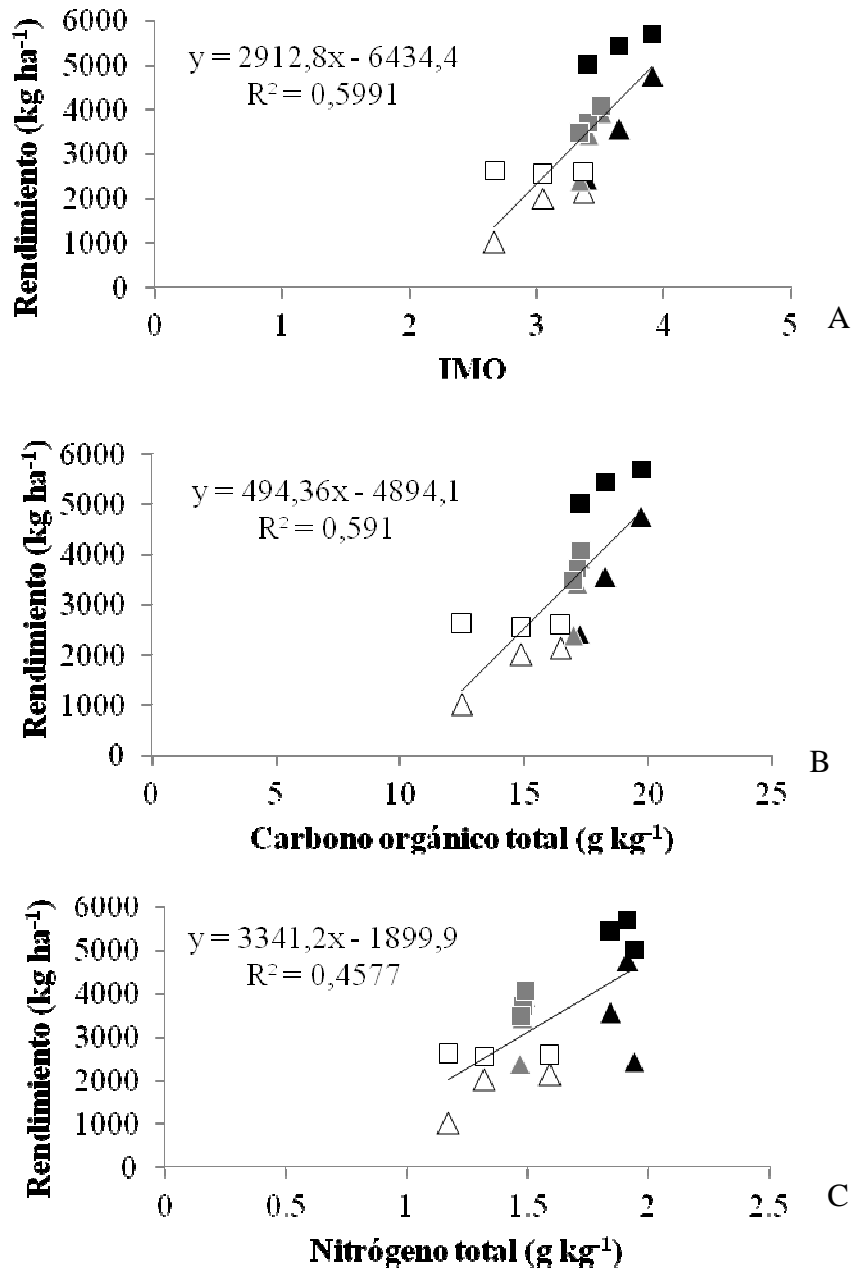


Figura 21 = Asociación entre propiedades de suelo: IMO (A), carbono orgánico total (B) y nitrógeno total (C), y rendimientos mínimos (triángulos) y máximos de trigo (cuadrados) según zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995).

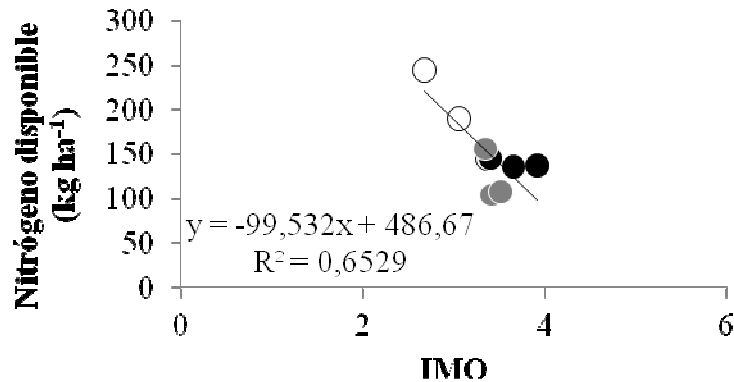


Figura 22 = Nitrógeno disponible para alcanzar los rendimientos máximos según IMO. Zonas de productividad alta, media y baja en negro, gris y blanco, respectivamente. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995).

Los contenidos de nitrógeno disponible para lograr los rendimientos máximos se incrementaron al disminuir en la productividad de las zonas de manejo. Por cada unidad de aumento de IMO los requerimientos de nitrógeno disponible para alcanzar los rendimientos máximos disminuyeron en 99 kg N ha⁻¹. Suelos menos degradados, con mayores IMO mostraron menores requerimientos de fertilización para lograr los rendimientos máximos (Fig. 22).

En resumen, la productividad y el uso de nitrógeno del cultivo de trigo presentaron diferencias entre zonas de manejo siendo las zonas de productividad dependiente de lote de producción. Las diferentes metodologías no tienen igual capacidad de diferencias ZM según la productividad y uso de nitrógeno, siendo la más adecuada la fotointerpretación de imágenes satelitales. Es importante destacar que la fertilización con nitrógeno afecta la capacidad de las 8 metodologías estudiadas en diferencias áreas según la productividad del cultivos de trigo. La fertilización con nitrógeno determinó menores diferencias de rendimiento entre zonas de manejo. Además, al incrementarse la productividad de las ZM delimitadas, las necesidades de N en términos de dosis de fertilización o de Nd (Nsu + N fertilizante) para alcanzar los rendimientos máximos

decrecen. Por lo tanto la instrumentación de estrategias de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización con N en trigo según ZM delimitadas con fotointerpretación de imágenes satelitales dentro de lotes independientes sería una estrategia recomendable para el uso eficiente de este nutriente, mejorando su retorno productivo y reduciendo los riesgos ambientales asociados a su sobredosificación (Anexos I y II). Resulta necesario evaluar esta metodología de delimitación en diferentes años y en diferentes regiones productoras de trigo.

CAPÍTULO V

VALIDACIÓN DE LA FOTOINTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES ENTRE AÑOS Y REGIONES PRODUCTORAS DE TRIGO. INTEGRACIÓN DE INDICADORES INDEPENDIENTES DE SUELOS.

5.1- INTRODUCCIÓN

Las precipitaciones modifican los efectos de la fertilización con nitrógeno en la producción de los cultivos según zonas dentro del lote. En el oeste de Australia, sobre suelos de textura arenosa, Won y Asseng (2006) delimitaron zonas dentro de lotes según la capacidad de retención de agua, y mostraron que los incrementos de rendimientos de trigo por fertilización con nitrógeno dependieron de la disponibilidad de agua al iniciar el ciclo del cultivo en cada zona, las lluvias durante el ciclo del cultivo, y la capacidad de almacenar agua útil en cada zona dentro del lote. Cuando las precipitaciones fueron mayores al promedio histórico los sitios con mayor capacidad de almacenar agua en el perfil mostraron los rendimientos mayores. Además, el incremento en la fertilización con nitrógeno determinó mayores diferencias de rendimiento entre las zonas con diferente capacidad de almacenar agua, esto fue independiente de la condición de humedad inicial del cultivo. Mayores niveles de fertilización con nitrógeno (60 y 150 kg de N ha⁻¹) determinaron rendimientos mayores en relación a menores niveles de fertilización cuando las precipitaciones fueron normales o mayores a la media histórica, sin efecto de la condición de humedad inicial del cultivo.

En Sterling (Colorado, USA), sobre suelos Argiustoles y precipitaciones promedio anuales de 440 mm, Andales *et al.* (2007) estudiaron durante 14 años las variaciones de rendimiento de trigo y de maíz dentro de un lote de producción según diferentes

rotaciones, capacidad almacenar agua del suelo y posición en el relieve. La posición en el relieve explicó las variaciones de los rendimientos de trigo y de maíz en rangos de 69 a 86 % y de 86 a 90 % respectivamente, y explicó las variaciones de contenido de agua del perfil de suelo en rangos de 75 a 85 % en trigo y de 65 a 78 % en maíz. Las diferentes rotaciones (trigo-barbecho, trigo-maíz-barbecho, trigo-maíz-mijo (*Panicum miliaceum* L.) o girasol-barbecho) no modificaron las variaciones de rendimientos dentro del lote tanto en maíz como en trigo, siendo los rendimientos y el contenido de agua del perfil del suelo explicado por la posición en el relieve.

Pravia *et al.* (2010) en Treinta y Tres (Uruguay), sobre suelos clasificados como Argiudoles Vérticos y Argiaquoles Abruptos y precipitaciones con promedios anuales de 1375 mm, observaron que la rotación modificaba las variaciones de rendimiento dentro del lote en sorgo (*Sorghum bicolor*), principalmente en años con menores precipitaciones. Las variaciones de rendimientos de sorgo mostraron asociación con las precipitaciones (años con mayores precipitaciones se observaron rendimientos mayores) y la capacidad del suelo para almacenar agua útil (con mayor capacidad para almacenar agua útil en el suelo se observaron los mayores rendimientos). Con mayor cantidad de años con pasturas en las rotaciones (raygrass (*Lolium multiflorum* Lam.)-sorgo-raygrass-soja, 2 años de pastura- raygrass-sorgo-raygrass-soja, y 4 años pastura-raygrass-sorgo-raygrass-soja) las variaciones de rendimiento de sorgo dentro de los lotes fueron menores. Las variaciones de rendimientos de sorgo fueron menores en años con mayores precipitaciones y en rotaciones con mayor cantidad de años con pasturas.

En Alabama (USA), sobre suelos de textura limosa (Paleudoles Típicos), los atributos de suelo y de relieve explicaron entre el 16 a 64 % de las variaciones de rendimientos en Algodón (*Gossypium hirsutum* L.), con variaciones según años, tratamientos de

fertilización y sistema de labranza. Para las condiciones de ese estudio la delimitación de zona de manejo fue más adecuada para sistemas de manejo conservacionistas en relación con sistemas convencionales, y las diferencias de productividad entre zonas de manejo dependieron del tratamiento de agregado de fertilizantes (Terra *et al.* 2006b).

Kyveryga *et al.* (2009) caracterizaron los incrementos de rendimientos de maíz según fertilizaciones con nitrógeno en suelos principalmente Hapludoles de Iowa (USA), en diferentes años y zonas delimitadas dentro de lotes de producción mediante series de suelo, elevación relativa, conductividad eléctrica y unidades de mapas de suelos. La variabilidad de las respuestas de rendimientos dependió principalmente del año y en segundo lugar de la metodología de delimitación de zonas de manejo. La variabilidad temporal de la respuesta de rendimientos fue más importante que la variabilidad espacial.

En Córdoba (Argentina), Bongiovanni *et al.* (2007) mostraron diferencias de respuestas a la fertilización con nitrógeno en trigo y Anselin *et al.* (2004) y Gregoret *et al.* (2006a) en maíz según zonas dentro de lotes delimitadas según posición en el relieve (loma, media loma y bajo). Las respuestas de rendimientos a la fertilización con nitrógeno dependieron de la posición en el relieve, siendo las zonas bajas del relieve de mayor producción y con mayores respuestas a la fertilización con nitrógeno en ambos cultivos. El rendimiento de los cultivos ha sido el resultado de los insumos utilizados, las características del sitio, las condiciones de clima y la interacción de todos estos factores (Bullock y Bullock 2000). La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas en función de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Los principios de la agricultura de precisión son los mismos para todas las regiones y cultivos, pero los factores que hacen

a la variación de rendimientos y sus interacciones hacen necesario un desarrollo local de información para el uso de insumos por zonas de manejo y cultivos (Bravo *et al.* 2004. Vieira *et al.* 2006. Siqueira *et al.* 2006). Resulta necesario validar las metodologías de delimitación de zonas de manejo en años con diferentes precipitaciones, y validar las metodologías en diferentes regiones.

5.1.1- Hipótesis

En años con balances hídricos más favorables durante el ciclo de crecimiento de trigo las diferencias de producción entre zonas de manejo son menores que en años con balances hídricos menos favorables.

Las diferencias en la productividad y en el uso de nitrógeno entre zonas de manejo en Argiudoles en la región pampa ondulada son menores a las diferencias entre zonas de manejo delimitadas en otras zonas de producción de trigo de la región pampeana.

En Argiudoles de la región pampa ondulada, las propiedades de los suelos que caracterizan las zonas de manejo y que explican las variaciones de rendimientos de trigo son independientes de las condiciones del año.

5.1.2- Objetivos

Cuantificar las diferencias de producción y de uso de nitrógeno en trigo entre zonas de manejo según diferentes condiciones del año y disponibilidad de nitrógeno en Argiudoles de la región pampa ondulada, y cuantificar diferencias de producción y uso de nitrógeno entre zonas de manejo en otras zonas productoras de trigo.

Determinar las propiedades de suelo que explican las variaciones de rendimiento de trigo en la campaña 2007-08 y 2008-09 en Argiudoles de la región pampa ondulada.

5.2- MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrollo en lotes de producción de la región pampa húmeda de la provincia de Buenos Aires (Argentina) sobre suelos Molisoles, durante las campañas agrícolas de 2007-2008 y 2008-2009. En cada lote se delimitaron ZM de A, M y B productividad mediante fotointerpretación de imágenes satelitales.

5.2.1- Ubicación de los sitios experimentales

Los experimentos fueron conducidos en 10 lotes de producción de trigo, 3 en la campaña 2007-2008 en San Antonio de Areco, y 7 en la campaña 2008-2009 en San Antonio de Areco (4 sitios), en Pehuajó, en Pasteur y en Gonzales Chaves (Tabla 1). Los sitios en San Antonio de Areco son representativos de las condiciones de la subregión pampa ondulada y corresponden al área homogénea de alta producción de trigo (Díaz-Zorita y Fernández Canigia, 1996). Los sitios en Pehuajó, Pasteur y Gonzales Chaves son representativos de la subregión pampa interior y de la subregión pampa austral, corresponden a zonas homogéneas de media a baja productividad dentro de la provincia de Buenos Aires (Díaz-Zorita y Fernández Canigia, 1996). La campaña 2007-08 se caracterizó por tener mayores precipitaciones y un balance hídrico más favorable que la campa 2008-09.

5.2.2- Caracterización de propiedades superficiales de suelo y contenido de agua durante el ciclo del cultivo

En el momento de la siembra de trigo se tomaron muestras compuestas de los suelos (0 a 0,2 m) para la determinación de MO, pH en agua y textura. N-NO₃ se determinó hasta 40 cm de profundidad. Las muestras se estratificaron según ZM. Los niveles de N del

suelo (Nsu) hasta los 40 cm de profundidad se estimaron a partir de los contenidos de N-NO₃ (0 a 20 + 20 a 40 cm) y considerando una densidad aparente media de 1,30 Mg m⁻³ para el estrato de 0 a 0,2 m de profundidad, y de 1,37 Mg m⁻³ para el estrato de 0,2 a 0,4 m de profundidad.

5.2.3- Caracterización de la productividad de trigo

En cada uno de los 10 lotes y ZM se instalaron ensayos en bloques al azar con cuatro repeticiones y 5 tratamientos de fertilización nitrogenada, a razón de 0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N aplicado como urea (46-0-0) en el momento de la siembra de los cultivos. Las unidades experimentales fueron de 10 surcos por 6 m (alrededor de 10,5 m²) y en todos los casos fueron fertilizados en la siembra con 30 kg ha⁻¹ de P. El manejo realizado (fecha de siembra, variedad y control de plagas) fue el correspondiente a cultivos de alta producción para cada región.

En cada parcela se determinó el número de espigas por metro cuadrado, materia seca aérea en estado de madurez fisiológica, número de granos, peso de granos, contenido de nitrógeno en grano y rendimiento. La materia seca se determinó mediante la cosecha manual de 1 metro lineal del surco central de cada parcela, las muestras luego fueron secadas en estufa hasta lograr un peso constante. La producción de los cultivos se determinó en madurez fisiológica por cosecha mecánica de la porción central de cada unidad experimental.

El número de granos y los rendimientos se ajustaron en cada ZM a modelos cuadráticos de respuesta según los niveles de Nd según ec. 3. Los niveles Nd para alcanzar los máximos rendimientos (Nd max) se estimaron a partir de la igualdad de la primer

derivada de los modelos cuadráticos correspondientes con cero, y con esta información se estimaron el número de granos máximo (NGmax) y los rendimientos máximos (Rmax). El número de granos mínimo (NGmin) y los rendimientos mínimos (Rmin) se estimaron a partir de la ordenada al origen. La eficiencia de uso del N (EUN) se calculó según la ec. 4.

5.2.4- Análisis estadístico

Se consideró un modelo con 3 repeticiones (lotes) y 2 factores principales ZM de A, M y B productividad y condiciones del año (año 2007 y año 2008) o región de producción (región pampa ondulada campaña 2008 y otras zonas productoras campaña 2008). El diseño experimental fue completamente aleatorizado.

Las relaciones entre las propiedades de los suelos y los rendimientos de trigo según niveles de nitrógeno y según condiciones del año se analizaron mediante correlaciones y regresiones. Se seleccionaron variables independientes por "Stepwise" para lograr el modelo con el mayor R^2 . Sólo se incluyeron en los modelos términos significativos a $P=0,15$ y se buscó que el modelo completo fuera significativo a $P = 0,05$ según la prueba de F.

En todos los casos se utilizaron ANVA protegidos ($p<0,10$) y pruebas de diferencias de medias de Fisher (Infostat 2003).

5.3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1- Producción de trigo dentro de zonas de manejo delimitadas con imágenes satelitales en diferentes años y en regiones productoras según nivel de nitrógeno fertilizado

5.3.1.1-Producción de trigo dentro de zonas de manejo en diferentes años y nivel de nitrógeno fertilizado en Argiudoles de la pampa ondulada

Los rendimientos de trigo en los dos años de evaluación (2007 y 2008) y los 6 sitios variaron entre 1191 y 6091 kg ha⁻¹, con promedios de 3761 y 3267 kg ha⁻¹ para la campañas 2007 y 2008, respectivamente. El número de granos y rendimiento mostró en todos los lotes y ZM respuestas con incrementos decrecientes ajustadas según modelos cuadráticos en función de los niveles de nitrógeno disponible. Los requerimientos de Nd max en 2 de los 6 ajustes realizados para las condiciones del año 2008 fueron mayores al rango de explorado. En el año 2007 solo 1 de los 6 ajustes realizados mostró Nd max mayor al rango explorado de Nd. Al incrementarse la productividad de las ZM, los máximos rendimientos se lograron con menores niveles de fertilización nitrogenada (Tabla 29).

Las variaciones de productividad y en el uso del nitrógeno en trigo entre ZM fueron dependientes del nitrógeno fertilizado, y de las condiciones del año. En el año 2007, las ZM de alta productividad mostró un 15 % menos de EUN NG y un 84 % menos de EUN R que la ZM de baja productividad. Estas diferencias se modificaron en el año 2008. En el año 2008, la ZM de alta productividad mostró un 6 % más de EUN NG y un 46 % menos de EUN R que ZM de baja productividad. Las condiciones del año 2008

con menores precipitaciones (Fig. 3), disminuyeron un 42 % las diferencias promedio de EUN R entre ZM en comparación con el año 2007 (Tabla 29).

Los rendimientos promedios ajustados según la disponibilidad de nitrógeno de las ZM de alta productividad fueron 20 % mayores que en las ZM de baja productividad. Las diferencias se modificaron según el año y la disponibilidad de nitrógeno. En promedio de los dos años (2007 y 2008) en la región pampa ondulada las diferencias entre zonas fueron mayores con baja disponibilidad de nitrógeno, los rendimientos sin fertilización y R_{min} de las zonas de alta productividad fueron 24 y 38 % mayores que en las zonas de baja productividad, respectivamente. Con 160 kg de N ha^{-1} o al considerar los R_{max} las zonas de alta productividad mostraron 9 y 10 % más de rendimientos que las zonas de baja productividad. En menor medida que la disponibilidad de nitrógeno, las condiciones del año mostraron efectos sobre las diferencias de rendimiento entre las zonas de manejo. En promedio de las condiciones de fertilización (0 y 160 kg N ha^{-1}) en el año 2007 las zonas de alta productividad mostraron rendimientos 19 % mayores que las zonas de baja productividad, esa diferencia fue de 13 % en el año 2008. Las mayores diferencias entre las zonas de productividad alta y baja se tuvieron en condiciones de R_{min} y en el año de mayores precipitaciones (2007). Donde las zonas de alta productividad mostraron rendimientos 55 % mayores que las zonas de baja productividad (Tabla 29).

Variaciones en las diferencias entre zonas de manejo según las condiciones del año también han sido observadas en Iowa (USA) sobre suelos Hapludoles Típicos. Zonas delimitadas mediante análisis de productividad de cultivos anteriores que presentaban asociación con la posición en el relieve (loma, media loma y bajo) los rendimientos del cultivo de soja mostraron variaciones según la posición en el relieve. En Iowa, con bajas

precipitaciones las zonas de manejo asociadas a áreas bajas de los lotes tuvieron los rendimientos más altos. Mientras que cuando las condiciones de año eran de precipitaciones mayores al promedio anual, esas zonas asociadas a sitios bajos tuvieron los menores rendimientos (Jaymes *et al.* 2005),

Tabla 29: Productividad y uso de nitrógeno en trigo según zonas de manejo y año de evaluación (2007 y 2008) en sitios de la región pampa ondulada. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. Nd = Nitrógeno disponible. Rmin = Rendimiento mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. NGmin = Número de granos mínimo. Nmax = Número de granos máximo. PMG = Peso de mil granos. p = nivel de error según año, según zona de manejo y según interacción año por zona de manejo.

T	Zona de manejo			Zona de manejo			Zona de manejo			Zona de manejo		
	Alta	Baja	P	Alta	Baja	P	Alta	Baja	p	Alta	Baja	p
	EUN Rendimiento kg grano kg N ⁻¹			Nd para Rmax kg N ha ⁻¹			Rmin kg ha ⁻¹			Rmax kg ha ⁻¹		
2007	4,3	10,5		129	182		3435	1935		4000	3708	
2008	3,2	5,1	0,07	181	149	0,74	2973	2422	0,05	3576	3150	0,55
p	0,13	0,31		0,74	0,19		0,97	0,33		0,42	0,91	
	EUN Número de granos Granos kg N ⁻¹			Nd para NGmax kg N ha ⁻¹			NGmin granos m ⁻²			NGmax granos m ⁻²		
2007	22,3	26,0		152	261		11311	7609		14622	13343	
2008	12,8	12,1	0,85	327	216	0,99	7215	6883	0,33	12516	8878	0,43
p	0,17	0,78		0,52	0,29		0,25	0,41		0,30	0,70	
	PMG g			Número de granos Granos m ⁻²			Rendimiento Kg ha ⁻¹			Proteína g kg ⁻¹		
	Sin fertilización con nitrógeno											
2007	28,9	29,1		12682	9505		3667	2668		101	93	
2008	31,7	31,9	0,89	8067	7347	0,37	3160	2659	0,19	124	122	0,44
p	0,10	0,99		0,14	0,57		0,64	0,65		0,01	0,65	
	Fertilizado con 160 kg de N ha ⁻¹											
2007	26,6	27,4		14047	12579		3854	3582		115	110	
2008	29,4	30,5	0,70	10114	8464	0,53	3374	3031	0,60	132	145	0,63
p	0,25	0,95		0,13	0,97		0,38	0,95		0,01	0,32	

En resumen las diferencias de productividad entre zonas de manejo en la región pampa ondulada presentan diferencias según el año y la disponibilidad de nitrógeno. En condiciones de baja disponibilidad de nitrógeno se evidenció las mayores diferencias entre zonas de manejo las cuales se incrementan con condiciones de año de mayores precipitaciones, Por el contrario con disponibilidad alta de nitrógeno ($160 \text{ kg de N ha}^{-1}$) las mayores diferencias se observaron en el año con menores precipitaciones. Al considerar un manejo de trigo diferencial según zona de manejo se debe tener en cuenta principalmente la disponibilidad de nitrógeno para definir las diferencias de rendimiento entre zonas. En segunda instancia las condiciones del año porque condicionarían la fertilización nitrogenada para alcanzar los rendimientos máximos según zona de manejo. Los rendimientos máximos se logran con mayores niveles de nitrógeno disponible en las zonas de alta productividad que en las zonas de baja productividad en años de menores precipitaciones, y mayores niveles de nitrógeno disponible en las zonas de baja productividad que en las zonas de alta productividad en años con mayores precipitaciones (Tabla 29).

5.3.1.2-Producción de trigo dentro de zonas de manejo según región y nivel de nitrógeno fertilizado

Si bien las diferencias de producción entre zonas de manejo en la región pampa ondulada están modificadas por la disponibilidad de nitrógeno estas diferencias de rendimiento no necesariamente se observarían con igual comportamiento en otras regiones (Bongiovanni *et al.* 2007). Para las condiciones de este estudio, los sitios fuera de la región pampa ondulada mostraron diferencias de rendimientos entre zonas menos afectadas por la disponibilidad de nitrógeno. En las zonas de alta productividad en los

sitios fuera de la región pampa ondulada tanto los Rmin y como los Rmax fueron 53 y 56 % mayores que en las zonas de baja productividad (Tabla 30).

Tabla 30: Productividad y uso de nitrógeno en trigo según zonas de manejo y región (R1 = Pampa ondulada, R2 = Pasteur, Pehuajó y G, Chaves) en el año 2008. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. Nd = Nitrógeno disponible. Rmin = Rendimiento mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. NGmin = Número de granos mínimo. Nmax = Número de granos máximo. PMG = Peso de mil granos. p = nivel de error según región, según zona de manejo, y según interacción de región y zona de manejo,

Región	Zona de manejo			Zona de manejo			Zona de manejo			Zona de manejo		
	Alta	Baja	P	Alta	Baja	p	Alta	Baja	p	Alta	Baja	p
	EUN Rendimiento kg grano kg N ⁻¹			Nd para Rmax kg Nd ha ⁻¹			Rmin Kg ha ⁻¹			Rmax Kg ha ⁻¹		
R1	3,2	5,1	0,66	181	149	0,20	2973	2422	0,19	3576	3150	0,04
R2	7,6	8,0		404	166		3368	1952		6071	3410	
p	0,19		0,78	0,25	0,32	0,95	0,55	0,06	0,11			
	EUN Número de granos Granos kg N ⁻¹			Nd para NGmax Kg Nd ha ⁻¹			NGmin Granos m ⁻²			NGmax Granos m ⁻²		
R1	12,8	12,1	0,25	327	216	0,30	7215	6883	0,42	12516	8878	0,03
R2	81,9	32,3		307	128		6984	4301		24530	8462	
p	0,07		0,27	0,69	0,80	0,45	0,53	0,15	0,13			
	PMG G			Número de granos Granos m ⁻²			Rendimiento Kg ha ⁻¹			Proteína g kg ⁻¹		
	Sin fertilización con nitrógeno											
R1	31,7	31,9	0,50	8067	7347	0,07	3160	2659	0,06	124	122	0,76
R2	34,6	30,8		12328	5913		3856	2447		110	119	
p	0,73		0,45	0,43	0,14	0,60	0,34	0,45	0,64			
	Fertilizado con 160 kg de N ha ⁻¹											
R1	29,4	30,5	0,76	10114	8464	0,14	3374	3031	0,34	132	145	0,48
R2	25,7	26,5		15026	7890		4479	3291		162	169	
p	0,25		0,96	0,44	0,34	0,39	0,59	0,09	0,80			

Las variaciones de rendimiento entre zonas de manejo independientemente de la disponibilidad de nitrógeno y de los años se asocian principalmente a las variaciones en el número de granos. El PMG muestra variaciones entre ZM menores al número de de

granos, y para igual fertilización con nitrógeno los mayores PMG se muestran en zonas de manejo de menor productividad. En los sitios que no corresponden a la pampa ondulada y sin fertilización con nitrógeno los PMG de las zonas de alta productividad fueron 11 % mayores que en las zonas de baja productividad. Los rendimientos de las zonas de alta productividad fueron 44 % mayores que en las zonas de baja productividad. Diferencias principalmente asociadas a números de granos m^{-2} mayores (70 %). Con fertilización con nitrógeno las ZM con mayor productividad mostraron menor PMG (Tabla 30).

El contenido de proteína se incrementó con la fertilización nitrogenada independientemente de los sitios y del año. En los sitios no pertenecientes a la región pampa ondulada el incremento de productividad de la zona de manejo mostro disminuciones en el contenido de proteína en granos, la disminución fue mayor al 7,5 % sin fertilización con nitrógeno y fue mayor al 3,5 % con 160 kg N ha^{-1} . En la región pampa ondulada en condiciones de mayores precipitaciones y rendimientos (año 2007) las zonas de alta productividad mostraron mayores contenidos de proteína en granos que las zonas de baja productividad, sin fertilización mayores al 7 % y con 160 kg N ha^{-1} mayores al 4 %. En condiciones de menores precipitaciones y rendimientos (año 2008) las zonas de alta productividad mostraron 1,5 % más de proteína cuando no se fertilizó con nitrógeno, y 9,6 % menos de proteína cuando la fertilización fue de 160 kg N ha^{-1} en relación a la zona de baja productividad (Tabla 30).

En todos los casos los incrementos de la fertilización con nitrógeno aumentaron los contenidos de nitrógeno en grano. En condiciones de menores precipitaciones (año 2008) y fertilización con nitrógeno se incrementaron las variaciones de proteína entre zonas de manejo (Tabla 30). Bajo estas situaciones estrategias de cosecha diferencias

agrupadas por zonas de manejo pueden ser una alternativa para clasificar la calidad y variaciones de los niveles de proteína en grano.

La información analizada es insuficiente para generalizar el agrupamiento entre lotes de producción, siendo conveniente el análisis independiente de los ambientes para la elaboración de recomendaciones de fertilización nitrogenada con el objetivo de incrementar los rendimientos y la calidad de los trigos.

5.3.2- Propiedades de suelo y producción de trigo según diferentes condiciones de año y disponibilidad de nitrógeno en Argiudoles de la región pampa ondulada

Los coeficientes de correlación entre propiedades de suelo y zonas de manejo con rendimientos de trigo según cada año y fertilización con nitrógeno son presentados en la tabla 31. Si bien la correlación mostró variaciones entre años y tratamientos, los contenidos de arcilla y de arena y el IMO fueron las variables que se correlacionaron más estrechamente con los rendimientos de trigo. En el año de mayores precipitaciones (2007) los niveles de limo, de IMO, de COT, y de Ntotal mostraron correlación con los rendimientos independientemente de la fertilización con nitrógeno. Las áreas en el lote con mayores niveles de IMO y de COT corresponden a zonas con suelos menos erosionados. En el año con menores precipitaciones (2008) fueron menos las variables que se correlacionaron con los rendimientos de trigo. Sin fertilización con nitrógeno los rendimientos de las zonas de baja productividad delimitadas mediante FIS fueron menores. En el año con menores precipitaciones y sin fertilización con nitrógeno no tuvo correlación las propiedades de suelo con los rendimientos de trigo. Con fertilización con 160 kg de N ha⁻¹ el contenido de arcilla y Nsu fueron negativamente correlacionados con los rendimientos, y los contenidos de arena y de IMO mostraron

una correlación positiva con los rendimientos. En condiciones de adecuada humedad y rendimientos mayores, las variaciones de rendimientos de trigo pudieron ser explicadas por variaciones en las propiedades de los suelos (Tabla 31).

Tabla 31: Coeficientes de correlación y coeficientes de determinación (R^2) para regresión Stepwise relacionando rendimientos de trigo en lotes de la región pampa ondulada y zonas de manejo y propiedades superficiales de suelo según año (2007 y 2008) y fertilización con 0 (N 0) y 160 (N 160) kg de N ha^{-1} (n=15). Pe = Fósforo extractable. COT = Carbono orgánico. Ntotal = Nitrógeno total. CE = Conductividad eléctrica. N_{su} = Nitrógeno disponible en la capa de 0 a 0,4 m de suelos. IMO = Materia orgánica según textura (Pieri 1995). ZM B = Zona de manejo de baja productividad delimitadas con fotointerpretación de imágenes satelitales. * = Variable retenida en modelo de regresión Stepwise. NS = No significativo a nivel de $P \leq 0,15$.

Tratamiento	2007		2008	
	N 0	N 160	N 0	N 160
Variable				
Arcilla	-0,51*	-0,55*	NS	-0,78
Limo	0,80	0,74	NS	NS
Arena	-0,74	-0,65	NS	0,74
IMO	0,94*	0,80	NS	0,27*NS
COT	0,94	0,81	NS	NS
Ntotal	0,79	0,86*	NS	NS
N _{su}	NS	NS	NS	-0,93*
Pe	-0,53	NS	NS	NS
CE	NS	NS	NS	NS
pH	-0,67	-0,62	NS	NS
ZM B	NS	NS	-0,73*	NS
R^2	0,96	0,94	0,54	0,98

Los resultados son consistentes con otros estudios. En Alabama (USA) en suelos de textura limosa (Paleudol Típico) los rendimientos de algodón mostraron correlaciones negativas con los contenidos de arcilla. Esta correlación rendimientos con contenidos de arcilla fue variable con las condiciones del año y el manejo realizado (Terra *et al*, 2006b). Además en Texas (USA), también en cultivos de algodón, los rendimientos

correlacionaron negativamente con los contenidos de arcilla (Li *et al*, 2002). Los contenidos de COT y de IMO han mostrado asociaciones positivas con los rendimientos de trigo en la región pampeana (Diaz-Zorita *et al*, 1999; Quiroga *et al*, 1996), esta correlación presenta variaciones según las condiciones del año y manejo realizado.

Los modelos de regresión que relacionaron las propiedades superficiales de los suelos y zonas de manejo con los rendimientos de trigo explicaron entre el 54 y 98 % de la variabilidad. En el año de mayores precipitaciones (2007), los coeficientes de determinación mostraron menores diferencias según el tratamiento de fertilización en relación al año de menores precipitaciones (2008), dónde sin fertilización la delimitación de la zona de baja productividad explicó parte de la variación de los rendimientos de trigo. Las variables que explicaron las variaciones de rendimiento de trigo dependieron del año y tratamiento de fertilización, siendo en condiciones de mayor producción el IMO y la textura las variables que principalmente explicaron las variaciones de rendimientos de trigo (Tabla 31).

CAPÍTULO VI

INTEGRACIÓN FINAL

En esta tesis se abordó el uso de diferentes metodologías de delimitación de zonas de manejo para caracterizar propiedades de suelos y de producción de trigo según diferentes niveles de fertilización con nitrógeno. Además seleccionando una metodología de delimitación de zonas de manejo se validó en diferentes años y regiones, y se integró los rendimientos de trigo con indicadores independientes de los suelos. Utilizando 8 metodologías de delimitación de zonas de manejo con moderada similitud (Capítulo 2), los estudios realizados tuvieron enfocados en mostrar las como las 8 metodologías diferenciaron áreas dentro de lotes de producción según las propiedades de suelos como: MO, pH en agua, textura, N-NO₃, Nsu, y las láminas de agua cada 0,2 m hasta 1,4 m de profundidad (Capitulo 3), y según las productividades de trigo y el uso del nitrógeno y del agua según diferentes niveles de fertilización con nitrógeno (Capitulo 4). También se realizó esfuerzo en validar una metodología seleccionad en el capítulo 4 (por la capacidad de delimitar áreas según la productividad y uso de nitrógeno) en diferentes años y regiones productoras según dos niveles de nitrógeno (0 y 160 kg N ha⁻¹) (Capitulo 5), e integrar los rendimientos de trigo con indicadores independientes de suelo según años y fertilización con nitrógeno (Capitulo 5). La secuencia del estudio realizado se presenta en la figura 23.

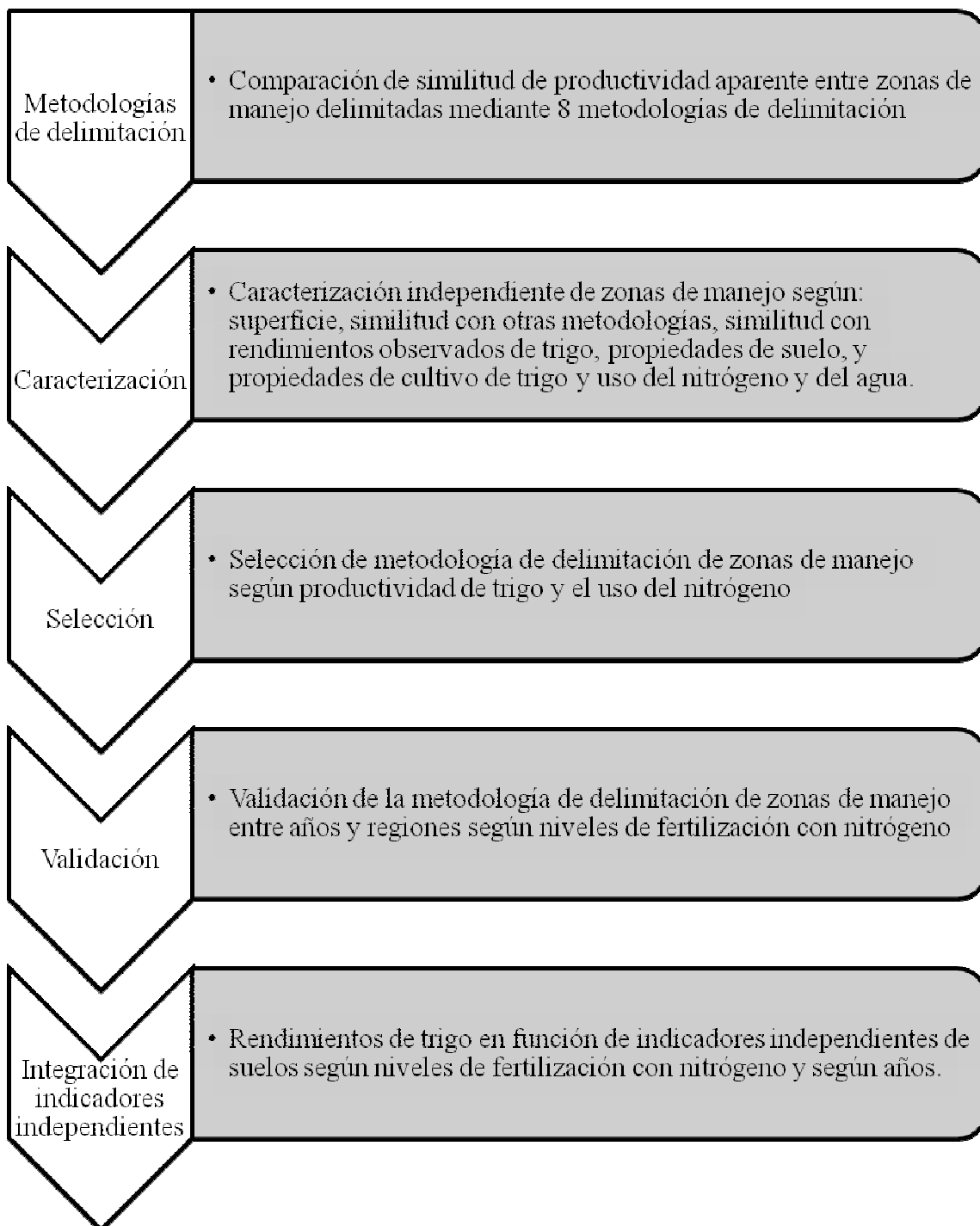


Figura 23 = Secuencia del estudio.

6.1- METODOLOGÍAS DE DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO Y PROPIEDADES DE SUELOS

En Argiudoles de la pampa ondulada, las propiedades de suelos mostraron diferencias entre zonas de manejo dependiendo del lote de producción. Las propiedades de los suelos se agruparon en primer lugar según lotes de producción y en segundo término según zonas de productividad estimada (Tabla 12, Fig. 13, y Fig. 15).

En zonas de manejo de alta, media y baja productividad estimada las diferencias descritas en sus propiedades superficiales de suelo son dependientes de la metodología de delimitación considerada. La identificación de zonas de alta productividad define diferentes contenidos de arena, de pH y de nitrógeno de nitratos en las capas de 0 a 0,2 m y de 0,2 a 0,4 m de suelos según métodos de delimitación. Las zonas de media productividad mostraron diferentes contenidos de arcilla, de fósforo extractables y de limo según métodos de delimitación. Además en la zona de productividad baja los contenidos de limo también son diferentes según los métodos de delimitación (Tablas 14, 15 y 16).

Variables como arcilla, limo, arena, carbono orgánico, IMO, nitrógeno de nitratos en la capa de 0,2 a 0,4 m de suelos, fósforo extractable, pH y conductividad eléctrica difieren con variaciones de la productividad de las ZM delimitadas. La instrumentación de métodos de delimitación tales como MR, ALT, NDVI_{gr}, AM, y FIS que permiten encontrar variabilidad en las propiedades de los suelos son una estrategia recomendable para un adecuado manejo de cultivo. En las zonas de baja productividad según las posiciones en el relieve y los tipos de suelos los contenidos de arcilla no fueron mayores. Las zonas de productividad baja delimitadas mediante posición en el relieve tienen menores contenidos de COT y de IMO, y coinciden con fases de erosión de los suelos. Las variables como COT y N₄₀ son utilizadas en las recomendaciones de la

fertilización nitrogenada siendo las delimitaciones realizadas con ALT y AM importantes para considerar en manejos de esta práctica (Tablas 14, 15 y 16).

La utilización de información integrada de mapas de suelos y rendimientos permite diferenciar áreas del lote con diferencias en el contenido de agua al momento de la siembra y cosecha. Delimitar zonas de manejo con esta metodología sería una estrategia recomendable para el uso eficiente del recurso mejorando su retorno productivo y reduciendo el riesgo de déficit de agua (Tabla 24).

6.2- METODOLOGÍAS DE DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO Y PRODUCTIVIDAD DE TRIGO

En Argiudoles de la pampa ondulada la productividad y el uso del nitrógeno en trigo presento diferencias que fueron explicadas principalmente por los lotes, y en segundo lugar por las zonas de manejo de productividad aparente (Tabla 25 y Fig. 18).

En zonas de media y de baja productividad aparente las diferencias descritas en sus rendimientos y en el uso del N serían independientes de la metodología de delimitación considerada. Sin embargo, la identificación de zonas de manejo de alta productividad define diferentes comportamientos medios de los cultivos según los rendimientos alcanzables. La delimitación de zonas de alta productividad mediante MR, FIS y AM identifica áreas con R_{max} mayores que las zonas de alta productividad del resto de las metodologías (Tablas 26, 27 y 28).

La productividad y el uso de nitrógeno del cultivo de trigo presentaron diferencias entre zonas de manejo siendo las zonas de productividad dependiente de lote de producción (Figura 18). Las diferentes metodologías no tienen igual capacidad de diferencias ZM

según la productividad y el uso del nitrógeno, siendo las más adecuadas MR y FIS (Tabla 27). Estas metodologías consideran la producción de los cultivos anteriores. Es importante destacar que la fertilización con nitrógeno afecta la capacidad de las 8 metodologías estudiadas en diferencias áreas según la productividad del cultivos de trigo. La fertilización con nitrógeno determinó menores diferencias de rendimiento entre zonas de manejo (Tablas 26, 27 y 28). Además, las mayores producciones de trigo, independientemente de los niveles de fertilización con nitrógeno, se asociaron a fases de suelos menos afectadas por erosión y con mayor IMO, COT y Ntotal (Fig. 21).

Al incrementarse la productividad de las ZM delimitadas, las necesidades de N en términos de nitrógeno disponible decrecen (Tabla 27). Por lo tanto la instrumentación de estrategias de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización con N en trigo según ZM delimitadas con fotointerpretación de imágenes satelitales dentro de lotes independientes sería una estrategia recomendable para el uso eficiente de este nutriente, mejorando su retorno productivo y reduciendo los riesgos ambientales asociados a su sobredosificación.

6.3- VALIDACIÓN DEL USO DE FOTOINTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES EN AÑOS Y REGIONES PRODUCTORAS SEGÚN NIVEL DE FERTILIZACIÓN CON NITRÓGENO. INTEGRACIÓN DE RENDIMIENTOS DE TRIGO E INDICADORES INDEPENDIENTES DE SUELOS.

En Argiudoles de la pampa ondulada, las diferencias de producción entre zonas de manejo delimitadas mediante fotointerpretación de imágenes satelitales según los balances hídricos son dependientes de la fertilización con nitrógeno. Con fertilización

con nitrógeno en años con balances hídricos más favorables durante el ciclo de crecimiento de trigo, las diferencias de producción entre zonas de manejo son menores que en años con balances hídricos menos favorables. Sin fertilización con nitrógeno las diferencias de rendimientos entre zonas de manejo son independientes del balance hídrico del trigo (Tabla 29).

Las diferencias en la productividad y en el uso de nitrógeno entre zonas de manejo en Argiudoles en la región pampa ondulada son menores a las diferencias entre zonas de manejo delimitadas en otras zonas de producción de trigo de la región pampeana. Además, en la región pampa ondulada la fertilización con nitrógeno produce una mayor disminución en las diferencias de rendimientos entre las zonas de alta y de baja productividad que en otras regiones de producción de trigo (Tabla 30).

En Argiudoles de la pampa ondulada las propiedades de los suelos que caracterizan las zonas de manejo y que explican las variaciones de rendimientos de trigo son dependientes de las condiciones del año y de la fertilización nitrogenada. En años con mayores precipitaciones y rendimientos promedios, las propiedades de los suelos tienen mayor asociación con los rendimientos observados. La fertilización con nitrógeno en años con menores precipitaciones y rendimientos, aumenta la asociación entre las propiedades de suelos y los rendimientos de trigo (Tabla 31).

6.4- APLICACIONES FUTURAS

En esta tesis se lograron delimitar zonas de manejo según algunas de las metodologías que son utilizadas en la actualidad para realizar delimitaciones en condiciones de campo. Se observó que dos metodologías que utilizan información de cultivos

anteriores, como mapas de rendimiento y fotointerpretación de imágenes satelitales, son adecuadas para delimitar zonas de manejo según la productividad y el uso del nitrógeno en trigo. No se utilizaron metodologías que miren solamente a los cultivos anteriores de trigo, y otros cultivos en forma independiente, como tampoco se seleccionaron metodologías que analicen cultivos anteriores seleccionados según las condiciones de balance hídrico. Resulta evidente que la variabilidad de producción dentro de lotes de depende de cada cultivo, del año y del manejo realizado. No se dispone de la información precisa que determine para cada manejo realizado, para cada cultivo y para cada año que información de cultivo anterior y de año sería adecuada utilizar para estimar las variaciones de producción.

Si bien en esta tesis se pudo observar como una práctica de manejo como la fertilización con nitrógeno modifico los resultados de las diferentes metodologías en agrupar áreas según la productividad y uso del nitrógeno, resulta necesario estudiar los efectos de otras prácticas de manejo como la fertilización fosfatada, cultivo antecesor, años de última pastura, sistema de labranza, etc.

En el estudio realizado, se han mostrado diferencias entre zonas de manejo de las propiedades de suelos y de las productividades de trigo. Estas diferencias entre zonas son dependientes de los lotes. Es necesario caracterizar los lotes e incrementar la clasificación de las zonas de manejo para integrar los rendimientos logrados y las variables independientes de los suelos.

Fuera de la región pampeana, en esta tesis se utilizó la fotointerpretación de imágenes satelitales para delimitar zonas de manejo en lotes con diferencias de productividad y uso de nitrógeno según zonas de productividad. Es necesario estudiar el uso de otras

metodologías de delimitación de zonas de manejo en cada región para determinar según el objetivo propuesto que metodología sería más adecuada.

CAPÍTULO VII

BIBLIOGRAFÍA

- Adams S., y D. Lambert, 2006. *Earth Science: An illustrated guide to science*. New York NY 10001: Chelsea House. pp. 20. ISBN 0-8160-6164-5.
- Akaike H. 1981. "Likelihood of a model and information criteria," *Journal of Econometrics* 16, 3-14.
- Álvarez R. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 18: 14– 20.
- Álvarez R., y S. Grigera, 2004. Analysis of Soil Fertility and Management Effects on Yields of Wheat and Corn in the Rolling Pampa of Argentina. *J. Agronomy y Crop science* 191: 321-321.
- Álvarez R., H.S. Steinbach, B. Bauschen, y J.N. Enjalbert. 2006a. Variabilidad espacial de propiedades de los suelos de la pampa ondulada: efecto sobre el número de submuestras a tomar para el diagnóstico de fertilidad. CD-R XX Congreso Argentino de Ciencia de Suelo, Salta, Argentina.
- Álvarez R., H.S. Steinbach, R. Lavado, y F. Gutiérrez Boem. 2006b. *Materia orgánica: Valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. 1º Ed. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 256 p.
- Andales A.A., T.R. Green, L.R. Ahuja, R.H. Erskine, y G.A. Peterson, 2007. Temporally stable patterns in grain yield and soil water on a dryland catena. *Agricultural Systems* 94:119-127.
- Andrades F., M.E. Otegui, C.R.C. Vega, 2000. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. *Agronomy Journal* 92:92-97.
- Anselin L. 2001. "Spatial effects in econometric practice in environmental and resource economics". *American Journal of Agricultural Economics*. 83 (3) 705-710.
- Anselin L., R. Bongiovanni, y J. Lowenberg-DeBoer. 2004. A spatial econometric approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. *American Journal of Agricultural Economics* 86 (3) 675-687.

- Barbieri P. A., H. E. Echeverria, y H. R. Sainz Rozas, 2008. Nitratos en el suelo a la siembra o en macollaje como diagnóstico de la nutrición nitrogenada en trigo en el sudeste bonaerense. CD XXI Congreso Argentino de ciencia de suelo.
- Blake G.R., y K.H. Hartge. 1986. Bulk Density. In: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis. Part 1 Physical and mineralogical Methods 2th Ed. Soil Science Society of America. Madison, WI (EEUU).
- Bongiovanni R., C.W. Robledo, y D.M. Lambert, 2007. Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat. *Computers and electronics in agriculture* 58:13-24.
- Bongiovanni R. 2004. La agricultura de precisión en la cosecha. *Revista idiaXXI*. 85-90.
- Bongiovanni R., y J. Lowenberg-DeBoer, 2004. "Precision agriculture and sustainability." *Journal of Precision Agriculture*. 5, 359–387.
- Bono A., y R. Álvarez, 2008. Estimación del rendimiento de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana usando una red neuronal artificial. VII Congreso nacional de trigo.
- Boyer J.S., 1982. Plant Productivity and environment. *Science* 218:443-448.
- Bragachini M., 2010. Rol de la red de agricultura de precisión en el proceso productivo y sobre el desarrollo de la maquinaria agrícola argentina y su futuro hacia la competitividad global. En: 9no Curso internacional de agricultura de precisión. Resumen de trabajos presentados. INTA Manfredi. 1-32.
- Bravo O., N. Amiotti, J.P. Rhollauser, y P. Zalva, 2004. Variabilidad de suelos y su incidencia en el rendimiento de trigo a nivel de predio. *Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Paraná Argentina* (en CD)
- Bray R.H., y Kurtz L.T., 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soil. *Soil Sci.* 59: 39-45.
- Bremner J.M., 1996. Nitrogen - Total. En: D.L. Sparks (Editor), *Methods of soil analysis. Part 3 - Chemical Methods. Chapter 37*. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EEUU), 1085-1121.
- Bullock D.S., y D.G. Bullock, 2000. "From agronomic research to farm management guidelines: A primer on the economics of information and precision technology." *Precision Agriculture* 2(1): 71-101.

- Calderini D.F., G Maddonni, D.J. Miralles, R.A. Ruiz, y E.H. Satorre, 1995. Trigo: modelos de alta producción. *Rev. CREA* 177:44-47.
- Cantagallo J.E., Chimenti, y A.J. Hall, 1997. Number of seeds per unit area in sunflower correlates well with a photopermal quotient. *Crop Science* 37:1780-1786.
- Chamran F., P.E. Gessler, y O.A. Chadwick, 2002. Spatially explicit treatment of soil-water dynamics along a semiarid catena. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1571-1583.
- Chang J., D. Clay, C. Carlson, S. Clay, D. Malo, R. Berg, J. Kleinjan, y W. Weibold, 2003. Different techniques to identify management zones impact nitrogen and phosphorus sampling variability. *Agronomy Journal* 95:1550–1559.
- Conti M.E., N. Arrigo, y R.M. Palma, 1980. Variabilidad espacial en determinaciones de carbono, nitrógeno, fósforo y pH de un muestreo sistemático de suelo. *Rev. Facultad de Agronomía* 1:43-48.
- Cox, M.S., P.D Gerard, M.C Wardlaw, y M.J Abshire. 2003. Variability of selected soil properties and their relationship with soybean yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1296-1302.
- Dampney P.M.R., y M. Moore, 1998. Precision agriculture in England: Current practice and reserch-based advice to farmers. In: 4th International Conference on Precision Agriculture, July 19-22, 1999. St. Paul. MN (EEUU). 661-674.
- Dardanelli, J.L., O.A. Bachmeier, R. Sereno, y R.C. Gil, 1997. Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil. *Field Crops Res.* 54:29-38.
- Derby N.E., F.X.M. Casey, y D.W. Franzen, 2007. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield. *Agronomy Journal* 99:405-414.
- Dharmakeerthi R.S., B.D Kay, y E.G. Beauchamp, 2005. Factor contributing to changes in plant available nitrogen across a variable landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 453-462.
- Di Pietro L., L. Marbán, y V. Richter, 1986. Variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. *Ciencia del suelo* 4:99-106.

- Díaz-Zorita M., y M.V. Fernández Canigia, 1996. Áreas homogéneas de producción agrícola en la provincia de Buenos Aires. *Revista de La Facultad de Agronomía de La Plata*. 101:143-150.
- Díaz-Zorita M., D. E. Buschiazzo, y N. Peinemann, 1999: Soil organic matter and wheat productivity in the Semiarid Argentine Pampas. *Agron. J.* 91, 276-279.
- Domínguez, G.F., G.A. Studdert, H.E. Echeverría, y F.H. Andrade, 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del suelo* 19 (1): 47-56.
- Echeverría H., P. Barbieri, H. Sainz Rozas, y F. Covacevich, 2005. Fertilización nitrogenada y métodos de diagnóstico de requerimiento de nitrógeno en trigo. *Informaciones Agronómicas* 26:8-15.
- Fiez, T.E., B.C. Miller, y W.L. Pan, 1994. Winter Yield And Grain Protein Across Varied Landscape Positions. *Agron. J.* 86:1026-1032.
- Fleming K., D. Westfall, D. Wiens, y M. Brodahl, 2000. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. *Prec. Agric.* 2:201-215.
- Fontanetto H., O. Keller, J. Albrecht, P. Rufino, J. Borsarelli, M. Sillón, L. Belotti, C. Negro, y D. Giailevra, 2009. La importancia del agua edáfica a la siembra como estimador de los rendimientos del trigo en el área central de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas* 41:09-10.
- Fraisse C.W., K.A. Sudduth, y N.R. Kitchen, 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans ASAE.* 44(1):155–166.
- Franzen, D.W., T. Nanna, y W.A. Norvell, 2006. A survey of soil attributes in North Dakota by landscape position. *Agron.J.* 98:1015-1022.
- Fridgen, J.J., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, W.J. Wiebold, y C.W. Fraisse, 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agron. J.* 96:100–108.
- GeoAgro GIS. 2007. Sistema de información geográfica. GeoAgro.
- González Montaner J.H., G.A. Maddonni, y M.R. Di Napoli, 1997. Modeling grain yield and grain response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean southern pampas. *Field Crop Research* 51: 241-252.

- Gregoret M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni, y M. Diaz-Zorita, 2006a. Modelo de respuesta sitio-especifica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ciencia de Suelo (Argentina)* 24(2):147-159.
- Gregoret M.C., J. Dardanelli, R.C. Bongiovanni, y M. Diaz-Zorita, 2005. Análisis de la respuesta sitio específica al nitrógeno en maíz. Parte I: Caracterización de ambientes. VIII Congreso nacional de maíz Rosario 2005. 137-140.
- Gregoret, M.C., J. Dardanelli, R. Bongiovanni, y M. Díaz Zorita, 2006. Profundidad mínima de suelo para estimar la disponibilidad de nitrógeno para maíz en Haplustoles énticos de la provincia de Córdoba. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta (Argentina)*. p 338.
- Griepentrog H.W., y M. Kyhn, 2000. Strategies for site specific fertilization in a highly productive agricultural region. Department of Agricultural Sciences. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen, Denmark. In: Robert, P. et al (ed.), *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*. July 16-19, 2000. Bloomington, MN. (ASA-CSSA-SSSA, Madison, Wisconsin, 2001).
- Infostat/Profesional. 2003. Versión 1.1. Paquete de análisis estadístico. Estadística y diseño. F.C.A. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.
- INTA. 1965. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3560-4. Capitán Sarmiento. INTA.
- Jaynes D.B., T.S. Colvin, y T.C. Kspar, 2005. Identifying potential soybean management zones from multi-year yield data. *Computers and electronics in agriculture* 46:309-327.
- Jaynes D.B., T.C. Kaspar, T.S. Colvin, y D.E. James, 2003. Cluster analysis of spatiotemporal corn yield patterns in an Iowa field. *Agronomy Journal* 95: 574-586.
- Jaynes D.B., y T.S. Colvin, 1997. Spatiotemporal variability of corn and soybean yield. *Agronomy Journal* 89:30-37.
- Kahabka J.E., H.M. Van Es, E.J. McClenahan, y W.J.Cox, 2004. Spatial analysis of maize response to nitrogen in fertilizer in central New York. *Precision Agriculture*, 5, 463-476.

- Kaspar, T.C., T.S. Colvin, D.B. Jaynes, D.L. Karlen, D.E. James, D.W. Meek, D. Pulido, y H. Butler, 2003. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture* 4:87-101.
- Khosla R., A. Hornung, R. Reich, D. Inman, y D.G. Westfall, 2006. Comparison of site-specific management zone: soil-color-based and yield-based. *Agronomy Journal* 98:407-415.
- Kitchen N.R., J.J. Fridgen, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, W.J. Wiebold, y C.W. Fraisse, 2004. Management zone analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal* 96:100-108.
- Kravchenko A., y D. Bullock, 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-83.
- Kuo S., 1996. Phosphorus. En: D.L. Sparks (Editor), *Methods of soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods*. Chapter 32. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EEUU), 869-920.
- Kyveryga P.M., A.M. Blackmer, y J. Zhang, 2009. Characterizing and classifying variability in corn yield response to nitrogen fertilization on subfield and field scales. *Agronomy Journal* 101:269-277.
- Lambert D.M., J. Lowenberg-Deboer, y R. Bongiovanni, 2004. A comparison of four spatial regression models for yield monitor data: a case study from Argentina. *Precision Agriculture* 5:579-600.
- Lark R.M., y J.V. Stafford, 1998. Information of within-field variability from sequences of yield maps: multivariate classification as a first step of interpretation. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 50:271-281
- León R.J.C., 1991. Geographic limits of the region, geomorphology and geology, regional subdivisions, floristic aspects, description of the vegetation. Pages 369-387 in R. T. Coupland, editor. *Natural grasslands: introduction and western hemisphere*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Li H., R.J. Lascano, J. Booker, L.T. Wilson, K.F. Bronson, y E. Segarra, 2002. State-space description of field heterogeneity: Water and nitrogen use in cotton. *Agron. J.* 66:585-595.

- Liu Y., S.M. Swinton, y N.R. Millar, 2006. Is site specific yield response consistent over time? Does it pay?. *American Journal of Agricultural Economics* 88 (2): 471-483.
- Magrin G., A.J. Hall, C. Baldy, y M. Grondona, 1993. Spatial and intrannual variations in the photothermal quotient: implications for the potential kernel number of wheat crops in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorol.* 67(1-2):29-41.
- Mamo M., G.L. Malzer, D.J. Mulla, D.R. Huggins, y J. Strock, 2003. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn. *Agron. J.* 95:958-964.
- Manning G., L.G. Fuller, D.N. Flaten, y R.G. Eilers. 2001. Wheat yield and grain protein variation within an undulating soil landscape. *Canadian Journal of Soil Science* 81:459-467.
- Miao Y., D.J. Mulla, W.D. Batchelor, J.O Paz, P.C. Robert, y M. Wiebers, 2006. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. *Agron. J.* 98:545-553.
- Michelena R.O., C.B. Irurtia, A. Pittaluga, y F.A. Vavruska, 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la pampa ondulada. *Ciencia de suelo.* 6:60-66.
- Michelena R.O., C.B. Irurtia, F.A. Vavruska, R. Mon, y A. Pittaluga, 1989. Degradación de suelos en el norte de la región pampeana. Proyecto de agricultura conservacionista INTA.
- Moral F.J., J.M. Terrón, y J.R. Marques da Silva, 2010. Delineation of management zone using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil y Tillage Research* 106: 335-342.
- Mousegne F., M.J. López de Sabando, y J. Hilbert, 2007. Fertilización con dosis de fósforo y nitrógeno variable en trigo. *Actas de IX Congreso Argentino de Ingeniería Rural.*
- Mulla D.J, y J.S. Schepers, 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In F.J. Pierce and E.J. Sadler (ed.) *The state of site specific management for agriculture*, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. p.1-18.
- Mulvaney R.L., 1996. Nitrogen – Inorganic Forms. In: D.L. Sparks (ed.). *Methods of soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods. Chapter 38.* ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EEUU) 1123-1184.

- Nelson D.W., y L.E. Sommers, 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: D.L. Sparks (Editor), *Methods of Soil Analysis. Part 3 – Chemical Methods*. Chapter 34. ASA, SSSA, CSSA, Madison WI (EEUU), 961-1010.
- Oikeh S.O., J.G.Kling, y A.E. Okoruwa, 1998. Nitrogen fertilizer management effect on maize quality in the west African moist savanna. *Crop.Sci.* 38: 1056-1061.
- Ortega R.A., y O.A. Santibáñez, 2007. Determination of management zone in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Computers and electronics in agriculture* 58:49-59.
- Pachepsky Y.A., D.J. Timlin, y W.J. Rawls, 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1787-1795.
- Paruelo J.M., J.P Guerschman, y S.R Verón, 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*. Volúmen 15 - N° 87, p 14-23.
- Pennock D., F. Walley, M. Solohub, B. Si, y G. Hnatowich, 2001. Topographically controlled yield response of canola to nitrogen fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:1838-1845.
- Pierce F.J., y P. Nowak, 1999. Aspects of precision agriculture. In: D. Spark (Ed) *Advance in Agronomy Academic Press*. 67: 1-85.
- Pieri C., 1995. Long term soil management experiments in semiarid Francophone Africa. *Adv. Soil Sci.* 225–264.
- Plant R.E., 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 30, 9-29.
- Pravia M.V., J.A. Terra, y A. Roel, 2010. Does pasture longevity under direct grazing affect field-scale sorghum yield spatial variability in crop-pasture rotation systems?. 10th International Conference of Precision Agriculture. July 18-21 de 2010. Abstract 403.
- Quiroga A. R., D. Funaro, E. Noellemeyer, y N. Peinemann, 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 90:63–68.
- Quiroga A.R., D.E. Buschiazzo, y N. Peinemann, 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of the semi-arid argentinean pampas. *Soil Science* 161:104-108

- Roberts, R., B. English, y S. Mahajanashetti, 2001. Environmental and economic effects of spatial variability and weather. Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture. Montpellier, France, June 2001. Pp. 545-550.
- Robertson M., B. Isbister, I. Maling, Y. Oliver, M. Wong, M. Adams, B. Bowden, y P. Tozer, 2007. Opportunities and constraints for managing within-field spatial variability in western Australian grain production. *Field Crops Research* 104:60-67.
- Robertson M.J., G. Lyle, y J.W. Bowden, 2008. Within-field variability of wheat yield and economic implications for spatially variable nutrient management. *Field Crops Research* 105:211-220.
- Roel A., E. Deambrosi, R. Méndez, N. Saldain, S. Ávila, G. Belderrain, L. Casales, y O. Bonilla, 2004. Variabilidad Espacial del Rendimiento. Resultados Experimentales 2003-04, INIA Treinta y Tres, 373.
- Roel A., y R.E. Plant, 2004. Spatiotemporal Analysis of Rice Yield Variability in Two California Fields. *Agronomy Journal*. 96:77-90.
- Salvagiotti F., y D. J. Miralles, 2007. Radiation interception, biomass production and grain yield as affected by the interaction of nitrogen and sulfur fertilization in wheat. *Europ. J. Agronomy* 28:282-290.
- Salvagiotti F., G. Cordone, J. Castellerin, S. Basigalupo, J. Capurro, H. Pedrol, G. Gerster, F. Martinez, J. Méndez, y N. Trentino, 2004. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en trigo utilizando un umbral de disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para mejorar la producción. *INTA Oliveros* 25:50-52.
- Satorre E.H., R. Ruíz, D. Miralles, D. Calderini, y G. Maddonni, 2001. Bases de decisión para la fertilización nitrogenada en las zonas norte de buenos aires, sur de santa fe y centro de AACREA. *CREA cuaderno de actualización técnica* 63:30-38.
- Scharf P.C., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, J.G. Davis, V.H. Hubbard, y J.A. Lory, 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agronomy journal* 97:452-461.
- Simbahan G.C., A. Dobermann, y J.L. Ping., 2004. Screening yield monitor data improves grain yield maps. *Agronomy Journal* 96:1091-1102.

- Siqueira G., RG.Gregg, S. Vieira, y M. Ceddía, 2006. Variabilidad espacial y temporal de la permeabilidad del suelo en el cultivo de Triticale en sistemas de siembra directa. Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta (Argentina). p.179.
- SMS basic 1.01. 2006. Spatial Management System. Ag Leader Technologic.
- Sofield I., I.F. Wardlaw, L.T Evans, y S.Y. Zee, 1997. Nitrogen, phosphorus and water contents during grain development and maturation in wheat. *Aust. J. Plant Physiol.* 4: 799-810.
- Solari F., J. Shanahan, R. Ferguson, J. Schepers, y A. Gitelson, 2008. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agron. J.* 100:571-579.
- Solari F., J.F. Shanahan, R.B. Ferguson, y V.I. Adamchuk. 2010. An active sensor algorithm for corn nitrogen recommendations based on a chlorophyll meter algorithm. *Agron. J.* 102:1090-1098.
- Taylor J.A., A.B. McBratney, y B.M. Whelan, 2007. Establishing management classes for broadacre agricultural production. *Agronomy Journal* 99:1366-1376.
- Terra J.A., J.N. Shaw, D.W. Reeves, E. van Santen, R.L. Raper, K.S. Balkcom, E.B. Schwab, y P.L. Mask, 2006. Soil management practices and landscape attributes impacts on field-scale corn productivity. 17th International Soil Tillage Research Organization (ISTRO) Conference. Kiel, Germany. Pag. 1275-1281.
- Terra J.A., J.N. Shaw, D.W. Reeves, R.L. Raper, E. van Santen, E.B. Schwab, y P.L. Mask, 2006b. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Soil Science Society of America Journal* 70:98-107.
- Tian, L., J. Reid, y J. Hummel, 1999. Development of a precision sprayer for sitespecific weed management. *Transactions of the ASAE* 42: 893-900.
- Timlin, D.J., Y. Pachepsky, V.A. Snyder, y R.B. Bryant, 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:764-773.
- Vázquez M. E., y G. Leroux, 1983. Estudio de la variabilidad edáfica de algunas determinaciones químicas a través de un muestreo compuesto. *Rev. Facultad de Agronomía* 4:7-13.
- Vázquez M.E., C.A. Berasategui, E.R. Chamorro, L.A. Taquini, y L.A. Barberis, 1990. Evaluación de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según

- el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ciencias del suelo* 8:203-210.
- Vieira S.R., C.R. Grego, G.M. Siqueira, F.M. Miguel, y F.A. Pavlu, 2006. Variabilidad espacial del almacenamiento de agua del suelo bajo siembra directa. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Salta (Argentina). p.178.
- Walter N.F., G.R. Hallberg, y T.E. Fenton, 1978. Particle size analysis by the Iowa State University soil survey laboratory. P61-90. En G.R. Hallberg (ed) *Standard procedures for evaluation of quaternary materials in Iowa*. Iowa Geol.Surv.Tech.Info.Ser.nº.8. Iowa Geol.Surv., Iowa City, IA.
- Western A.W., R.B. Grayson, G. Blöschl, G.R. Willgoose, y T.A. McMahon, 1999. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resour. Res.* 35:797-810.
- Wong M.T.F., y S. Asseng, 2006. Determining the causes of spatial and temporal variability of wheat yields at sub-field scale using a new method of up scaling a crop model. *Plant and Soil* 283:203-215.
- Wright R.J., D.G. Boyer, W.M. Winant, y H.D. Perry, 1989. The influence of soil factors on yield differences among landscape positions in an Appalachian cornfield. *Soil Sci*, 149:375-382.
- Zadoks J.S., T.T. Chang, y C.F. Konzak, 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14:415-421.
- Zillmann E., S. Graeff, J. Link, W.D. Batchelor, y W. Claupein, 2006. Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. *Agron. J.* 98:682-690.
- Zubillaga M.M., J. Barros, P. Cipriotti, y J. Pastori, 2005. Variación espacial del N mineralizado a nivel lote en Vedia. VII Congreso nacional de maíz. 150-153.
- Zubillaga M.M., J. Sierra, y L. Barberis, 1991. Nitratos en un suelo cultivado con trigo: variabilidad espacial e influencia del cultivo antecesor. *Turrialba* 41:217-222.
- Zubillaga M.M., M. Carmona, A. Latorre, M. Falcon, y M.J. Barros, 2006a. Estructura espacial de variables edáficas a nivel de lote en Vedia. CD-R XX Congreso Argentina de la Ciencia de Suelo, Salta, Argentina.
- Zubillaga M.M., M.J. Lopez de Sabando, M.S. Zubillaga, y M.V. Vilches, 2009. Nitrógeno potencialmente mineralizable en zonas diferenciales de manejo de un

lote de producción de trigo de San Antonio de Areco. En Avances en Ingeniería Agrícola 2007-2009. ISBN 978-950673-752-8.ED. Montico et al. pág. 500-506

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

APÉNDICE

Apéndice I: FERTILIZACIÓN NITROGENADA DENTRO DE AMBIENTES DE TRIGO

López de Sabando M.J.¹, M. Díaz-Zorita², y F. Mausegne¹.

(1) Agencia de Extensión INTA San Antonio de Areco, Zapiola 237, (5730) San Antonio de Areco, Bs.As. Argentina. mlopezdesabando@pergamino.inta.gov.ar.

(2) CONICET-FAUBA y Merck Crop Bioscience Arg. SA, Argentina, mdzorita@agro.uba.ar.

INTRODUCCIÓN

La productividad de los cultivos como trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.) y soja (*Glycine max* L) presenta variaciones temporales y espaciales. Al estudiar las variaciones de producción dentro de un lote la disponibilidad de agua y de nutrientes y otros factores como manejo realizado por el hombre y presencia de plagas y adversidades climáticas modifican los rendimientos logrados. Los suelos presentan variabilidad horizontal, vertical y temporal asociada a fuentes naturales y fuentes antrópicas. Se ha observado relación entre parámetros de suelo y la producción de cultivos. En el caso de trigo, sus rendimientos muestran relaciones estrechas con varias propiedades de los suelos, tales como los contenidos de nutrientes y de materia orgánica, la textura y la capacidad de retención de humedad (Díaz-Zorita et al., 1999; Echeverría et al., 2005; Bono y Alvarez, 2008). El nitrógeno es uno de los nutrientes que con mayor frecuencia limita el rendimiento de trigo en la región pampeana, y en el diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización se ha considerado principalmente la disponibilidad de nitrógeno (nitrógeno de nitratos en el suelos más el nitrógeno agregado al suelo como fertilizante). Cuando se considera los diferentes ambientes dentro un lote de producción para definir la fertilización nitrogenada en trigo algunas de las propiedades de los suelos consideradas y no consideradas en éstos modelos muestran variaciones dentro de los lotes de producción (Zubillaga et al., 1991). Los objetivos de este estudio fueron (i) establecer si las diferentes zonas de productividad de trigo presentan comportamiento diferente en relación con la fertilización con N, y (ii) cuantificar en qué medida la fertilización con N puede incrementar los rendimientos del cultivo de trigo según zonas de productividad de trigo en Argiudoles representativos de la región de la Pampa Ondulada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en 7 lotes de producción de trigo ubicados en el partido de San Antonio de Areco (Buenos Aires, Argentina) con predominio de Argiudoles Típicos durante la campaña 2007 y 2008, 3 y 4 lotes respectivamente en cada año. En cada uno se delimitaron zonas de manejo (ZM) de alta (A) y baja (B) productividad a partir de información de imágenes satelitales (López de Sabando et al., 2008). En cada lote y ZM se instalaron ensayos en bloques al azar con cuatro repeticiones y 5 tratamientos de fertilización nitrogenada, a razón de 0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N aplicado como urea en el momento de la siembra de los cultivos. Las unidades experimentales fueron de 30 surcos por 10 m y en todos los casos fueron fertilizados en la siembra con 30 kg ha⁻¹ de P. En el momento de la siembra se tomaron muestras compuestas de los suelos (0 a 0,2 m) para la determinación de carbono orgánico total, fósforo extractable, pH en agua y textura. N-NO₃ se determinó hasta 0,4 m de profundidad. Los niveles de N del suelo hasta los 0,40 m de profundidad se estimaron a partir de los contenidos de N-NO₃ (0 a 0,2 + 0,2 a 0,4 m) y considerando una densidad aparente media de 1,3 Mg m⁻³. El N disponible (Nd) se estimó a partir de la suma del N del suelo hasta el 0,4 m de profundidad y el N fertilizado (Tabla 32).

Tabla 32: Resumen de propiedades edáficas de cada zona de productividad en 7 lotes de producción de trigo en Argiudoles de la Pampa Ondulada. Datos máximos y mínimos.

Productividad	Arcilla	Limo	Arena	Carbono	Pe	pH	N-NO ₃
				orgánico			
----- g kg ⁻¹ -----							
					mg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	
Alta	287-195	607-334	470-122	24,3-15,1	19,9-7,9	6,1-5,6	95,0-33,7
Baja	300-93	610-98	798-122	21,6-7,3	29,1-10,9	6,6-5,5	54,7-30,0

La producción de los cultivos se determinó en madurez fisiológica por cosecha mecánica de la porción central de cada unidad experimental. Se calculó el incremento de rendimiento (IR) producido por la fertilización con N como:

$$IR = (1 - (R_0 \cdot R_f^{-1})) \cdot 100 \quad \text{ec.8}$$

donde IR es el incremento de rendimiento relativo por fertilización en %, R₀ el rendimiento sin fertilización expresado en kg ha⁻¹ y R_f el rendimiento del tratamiento fertilizado en kg ha⁻¹.

El análisis estadístico consistió en modelos de regresión lineal incorporando términos lineales, cuadráticos e interacciones que tuvieran como variables dependientes el incremento de rendimiento y el rendimiento. Las variables regresoras incluyen las propiedades de suelo, la fertilización realizada y la zona de manejo A y B como variable "dummy". Se seleccionaron variables independientes por "Stepwise" para lograr el modelo con el mayor R². Sólo se incluyeron en los modelos términos significativos a P = 0,15 y se buscó que el modelo completo fuera significativo a P = 0,05 según la prueba de F (InfoStat/P ver 2,0).

RESULTADOS

Los rendimientos de trigo variaron entre 1191 y 6091 kg ha⁻¹, con IR de -36 a 47 %. En promedio la ZM A tuvo un 11 % más de rendimientos que la ZM B, pero los IR fueron mayores en la ZM B. En promedio la ZM B tuvo un 65 % más de IR por fertilización que la ZM A. En la ZM A como en la ZM B los mayores IR fueron con 80 y 120 kg de N fertilizado ha⁻¹ (Tabla 33). Los coeficientes de regresión muestran que los modelos de estimación de rendimiento difieren entre ZM, la ZM B tiene rendimientos menores que la ZM A (<418,14 kg ha⁻¹). Los rendimientos aumentan con mayores contenidos de limo, nitrógeno total, y menores contenidos de carbono orgánico total. La interacción Nd y Pe incrementa el rendimiento, y el rendimiento presenta una respuesta con incrementos decrecientes ajustadas según modelos cuadráticos en función de los niveles de Nd (Tabla 34).

El IR fue mayor con mayores niveles de N total, y la interacción Pe y Nd, y disminuyó con mayores contenidos de arcilla y limo. El IR tuvo una respuesta con incrementos decrecientes ajustada según modelos cuadráticos en función de los niveles de Nd. La ZM B tuvo mayor IR con aumento del Nd, la tasa de incremento de rendimiento por aumento en el Nd es 26 % mayor en la ZM B que en la ZM A (Tabla 35).

Tabla 33: Resumen de rendimiento promedio e incremento de rendimientos promedio de las zonas de productividad alta y baja en las diferentes dosis de N de fertilizante aplicado.

N fertilizado (kg N.ha ⁻¹)	Rendimiento (kg.ha ⁻¹)	Incremento de rendimiento (%)
Zona de alta productividad		
0	3381	0,0
40	3546	3,8
80	3625	6,6
120	3659	7,3
160	3506	2,1
Zona de baja productividad		
0	2748	0,0
40	3109	12,0
80	3393	19,2
120	3257	15,1
160	3198	11,8

Tabla 34: Coeficientes estimados y errores estándar (entre paréntesis) de la respuesta de rendimiento al contenido de limo, N total, carbono orgánico total (COT), zona de productividad baja, fósforo extractable (Pe) y nitrógeno disponible de suelo más fertilizante (Nd), en el cultivo de trigo de las campañas 2007 y 2008, Pampa Ondulada. ***, **, *, y ⁺ representan significancia de 0,0001, 0,001, 0,05 y 0,15 nivel de probabilidad, respectivamente.

Constante	-14752,25***	(1707,72)
Limo	28,05***	(3,20)
N total	3947,89***	(441,84)
COT	-303,26***	(36,14)
Prod. baja	-418,14**	(113,05)
Nd*Pe	0,25*	(0,12)
Nd	8,47 ⁺	(5,16)
Nd2	-0,04*	(0,02)
Medidas de ajuste		
R ² ajustado	0,75	

Tabla 35: Coeficientes estimados y errores estándar (entre paréntesis) de la respuesta de incremento de rendimiento al contenido de nitrógeno disponible de suelo más fertilizante (Nd), zona de productividad baja, limo y N total, en el cultivo de trigo de las campañas 2007 y 2008. **, *, y ⁺ representan significancia de 0,001, 0,01 y 0,05 nivel de probabilidad, respectivamente.

Constante	173,67**	(49,52)
Prod. baja*Nd	0,06**	(0,02)
Limo	-0,29**	(0,07)
Arcilla2	-0,0989*	(0,032)
Nd*Pe	0,01 ⁺	(0,129)
N total	13,57 ⁺	(6,36)
Nd	0,23 ⁺	(0,10)
Nd2	-0,1742*	(0,064)
Medidas de ajuste		
R ² ajustado	0,54	

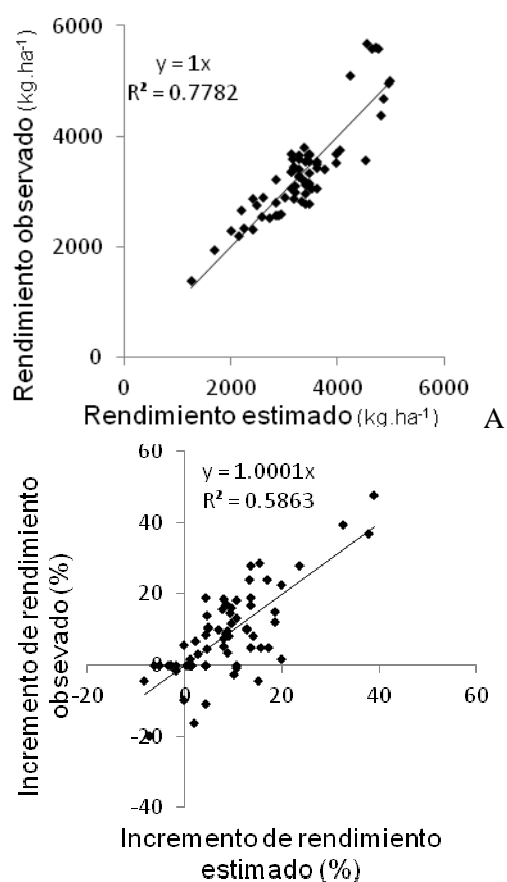


Figura 24: Relación entre valores estimados por el modelo y observados: A= Rendimiento y B= Incremento de rendimientos.

En los dos modelos la ordenada de la regresión observados con respecto a los valores estimados no difirió de cero y la pendiente fue similar a 1. La distribución de residuales del modelo de rendimiento fue levemente asimétrica, tendiendo el mejor modelo logrado a subestimar en rangos altos y bajos y a sobrestimar en rangos medios de rendimiento. En el modelo de IR la distribución de residuales fue simétrica (Figura 24).

DISCUSIÓN

En las condiciones de este estudio se observa que las diferencias en rendimientos dentro de lotes de producción responden a patrones detectables, estos resultados son coincidentes con lo descrito por otros autores que diferencian zonas con diferente productividad dentro de los lotes (Bongiovanni et al. 2007. Taylor et al. 2007). La información analizada es insuficiente para generalizar el agrupamiento entre lotes de producción, siendo conveniente el análisis independiente de las zonas de productividad para la elaboración de recomendaciones de fertilización nitrogenada. Los IR más altos con mayor Nd se lograron en los sectores de productividad baja, éste comportamiento difiere con los modelos regionales utilizados donde las variaciones de productividad dentro del lote no son tenidas en cuenta para la decidir la dosis de N a aplicar. Estos sitios de menor producción también podrían haber presentado menores tasas de mineralización (Zubillaga et al. 2005).

CONCLUSIONES

Las zonas de productividad alta y baja explican parte de los rendimientos del cultivo trigo. Los niveles de nitrógeno disponible y otras características del sitio afectan los rendimientos independientemente del la zona de productividad.

Los incrementos de rendimiento por fertilización con N son dependientes de la zona de productividad, al incrementarse la zona de productividad los incrementos de rendimiento son menores con mayor Nd. Por lo tanto, la instrumentación de estrategias de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización con N en trigo según zona de productividad sería una estrategia recomendable para el uso eficiente de este nutriente, mejorando su retorno productivo y reduciendo los riesgos ambientales asociados a su sobredosificación.

BIBLIOGRAFÍA

- Bongiovanni R.G., C.W. Robledo y D.M. Lambert. 2007. Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat. *Computers and electronics in agriculture* 58:13-24.
- Bono A. y R. Álvarez, 2008. Estimación del rendimiento de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana usando una red neuronal artificial. VII Congreso nacional de trigo.
- Diaz-Zorita, M., D. E. Buschiazzo, and N. Peinemann, 1999: Soil organic matter and wheat productivity in the Semiarid Argentine Pampas. *Agron. J.* 91, 276-279.
- Echeverría H., P. Barbieri, H. Sainz Rozas y F. Covacevich. 2005. Fertilización nitrogenada y métodos de diagnóstico de requerimiento de nitrógeno en trigo. *Inf. Agronómicas* 26:8-15.
- López de Sabando M.J., M. Diaz-Zorita, F. Mousegne y P. Mercuri. 2008. Zonas de manejo agrícola en argiudoles: I. Comparación entre metodologías de delimitación. Congreso. XXI Congreso argentino de ciencia del suelo. San Luis, Argentina. P 329.
- Taylor J.A., McBratney A.B. y B.M. Whelan, 2007. Establishing management classes for broadacre agricultural production. *Agronomy Journal* 99:1366-1376.
- Zubillaga M.M., J. Barros, P. Cipriotti y J. Pastori, 2005. Variación espacial del N mineralizado a nivel lote en Vedia. VII Congreso nacional de maíz. 150-153.
- Zubillaga M.M., J. Sierra y L. Barberis, 1991. Nitratos en un suelo cultivado con trigo: variabilidad espacial e influencia del cultivo antecesor. *Turrialba* 41:217-222.

Apéndice II: VARIABILIDAD EN LOS RENDIMIENTOS Y LA CALIDAD DE GRANOS DE TRIGO DENTRO DE LOTES DE PRODUCCIÓN.

López de Sabando M.J.¹, M. Díaz-Zorita², y F. Mausegne¹.

(3) Agencia de Extensión INTA San Antonio de Areco, Zapiola 237, (5730) San Antonio de Areco, Buenos Aires, Argentina. mlopezdesabando@pergamino.inta.gov.ar.

(4) CONICET-FAUBA y Merck Crop Bioscience Arg. SA, Argentina, mdzorita@agro.uba.ar.

INTRODUCCIÓN

El nitrógeno es uno de los nutrientes que con mayor frecuencia limita el rendimiento de trigo en la región pampeana, y en el diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización se ha considerado principalmente la disponibilidad de nitrógeno (nitrógeno de nitratos en el suelos más el nitrógeno agregado al suelo como fertilizante). El contenido de proteína del grano de trigo depende de la duración del período de acumulación de proteína y la tasa de acumulación: Ésta última depende del genotipo, la disponibilidad de nitrógeno y la temperatura (Sofield et al., 1994). En lotes de producción de la región subhúmeda pampeana central la disponibilidad de nitrógeno y la temperatura pueden presentar variación espacial con cambios en el contenido de proteína en grano en patrones.

El conocimiento de la variabilidad de calidad y productividad del cultivo de trigo, y la caracterización de los factores que los originan dentro de áreas delimitadas por su uniformidad relativa permiten la planificación de estrategias de manejo del cultivo. Los objetivos de este estudio fueron (i) cuantificar las diferencias de productividad y calidad del cultivo de trigo entre zonas productivas con variaciones en el nivel de nitrógeno disponible, y (ii) confeccionar un modelo predictivo del contenido de proteína en grano de trigo según zonas de productividad en lotes de la región subhúmeda pampeana central.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en 10 lotes de producción de trigo durante las campañas 2007 y 2008 (Tabla 36). En cada uno, a partir de información de imágenes satelitales, se delimitaron zonas de manejo (ZM) de alta (A), media (M) y baja (B) productividad (López de Sabando *et al.* 2008).

En el momento de la siembra se tomaron muestras compuestas de los suelos en cada ZM (0 a 0,2 m) para la determinación de carbono orgánico total (CO), fósforo extractable por el método de Bray Kurtz 1 (Pe), pH en agua y textura. N-NO₃ se determinó hasta 0,4 m de profundidad. Los niveles de N del suelo hasta los 0,40 m de profundidad se estimaron a partir de los contenidos de N-NO₃ (0 a 0,2 + 0,2 a 0,4 m) y considerando una densidad aparente media de 1,3 Mg m⁻³. El N disponible (Nd) se estimó a partir de la suma del N del suelo hasta el 0,4 m de profundidad y el N fertilizado (Tabla 37).

En cada lote y ZM se instalaron ensayos en bloques al azar con cuatro repeticiones y 5 tratamientos de fertilización nitrogenada, a razón de 0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N aplicado como urea en el momento de la siembra de los cultivos. Las unidades experimentales fueron de 30 surcos por 10 m y en todos los casos fueron fertilizados en la siembra con 30 kg ha⁻¹ de P. La producción de los cultivos se determinó en madurez fisiológica por cosecha mecánica de la porción central de cada unidad experimental. Se determinó el contenido de materia seca aérea, número de espigas, peso de mil granos, número de granos, rendimiento y contenido de proteína en grano (PrG). En Zadoks *et al.* (1974) 6 se evaluó el estado de hoja bandera con Minolta SPAD.

El análisis estadístico consideró un modelo en bloques al azar con 10 repeticiones (sitios) y un factor principal ZM de A, M y B productividad, utilizándose ANVA protegidos ($p < 0,10$) y pruebas de diferencias de medias (LSD) de Fisher. Además se realizó una regresión lineal entre PrG y las distintas variables considerando términos lineales, cuadráticos e interacciones. Las variables regresoras incluyen las propiedades de suelo, mediciones de SPAD, la fertilización

realizada (0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹ de N), estimación de rendimiento (EstR) por ZM (López de Sabando *et al.* 2010) y la ZM A, M y B como variable "dummy". Se seleccionaron variables independientes por "Stepwise" para lograr el modelo con el mayor R². Sólo se incluyeron en los modelos términos significativos a P= 0,15 y se buscó que el modelo completo fuera significativo a P = 0,05 según la prueba de F (InfoStat/P ver 2,0).

Tabla 36: Ubicación de los sitios experimentales y características de suelo y manejo.

Denominación	Localidad	Tipo de suelo	Variedad	Superficie (ha)	Año
Lote 1	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	24	2007
Lote 2	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	29	2007
Lote 3	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	70	2007
Lote 4	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	15	2008
Lote 5	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	20	2008
Lote 6	San Antonio de Areco	Argiudol Típico	Don Mario Cronox	34	2008
Lote 7	Baradero	Argiudol Vértico	Don Mario Cronox	49	2008
Lote 8	Pehuajo	Hapludol Típico	Nidera Baguette 10	35	2008
Lote 9	Pasteur	Hapludol Típico	Nidera Baguette 10	30	2008
Lote 10	Gonzales Chaves	Argiudol Típico	Nidera Baguette 10	40	2008

Tabla 37: Resumen de propiedades edáficas en 10 lotes de producción de trigo en la región Pampa Ondulada. Pe= Fósforo extractable, CO = carbono orgánico. Datos promedio más menos desvío estándar.

Pe	pH en agua	CO	Arena	Limo	Arcilla	N NO ₃ 0 a 0,4 m
mg kg ⁻¹		-----	-----	g kg ⁻¹	-----	kg ha ⁻¹
16,7±4,2	5,9±0,3	18,0±2,5	142,3±18,8	587,5±24,7	270,1±11,8	41,3±8,5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos de trigo variaron entre 600 y 6091 kg ha⁻¹, con promedio de 3668 y 3223 kg ha⁻¹ para la campaña 2007 y 2008, respectivamente. Las variaciones de productividad de cultivo difirieron según el nivel de nitrógeno aplicado al fertilizar. La ZM A presentó mayor número espigas (>25%), de materia seca (>29%), de granos (>26%) y rendimiento (>887 kg ha⁻¹) que la ZM B, y mayor materia seca que (>20%) ZM M cuando no se fertilizó con nitrógeno. Cuando el cultivo dispone de altos niveles de nitrógeno el número de granos de la ZM A fue mayor (>22%) que la ZM B. La ZM M cuando no se fertilizó con nitrógeno tuvo mayor número de espigas (>20%), de granos (>21%) y de rendimiento (>17%) que la ZM B (Tabla 38).

Tabla 38: Propiedades de cultivo en diferentes zonas de productividad de trigo (alta, media y baja) en dos niveles de nitrógeno fertilizado: sin fertilización y con 160 kg de N ha⁻¹. PMG= Peso de mil granos. IC= Índice de cosecha. Letras diferentes indican diferencias (LSD Fisher, p<0,10) entre zonas de productividad.

Propiedades del cultivo		Productividad	Productividad	Productividad
		alta	media	baja
Sin fertilización con nitrógeno				
Espigas	(espigas m ⁻²)	393 A	369 A	295 B
Materia seca	(g m ⁻²)	883 A	706 B	625 B
Granos	(granos m ⁻²)	10628 A	10010 A	7833 B
PMG	(g)	31,2	31,5	30,7
Rendimiento	(kg ha ⁻¹)	3493 A	3170 A	2606 B
IC		0,34	0,36	0,32
SPAD		40,3	40,7	40,4
Proteína	(g kg ⁻¹)	111,6	105,9	109,9
Fertilizado con 160 kg de N ha ⁻¹				
Espigas	(espigas m ⁻²)	454	379	355
Materia seca	(g m ⁻²)	974	747	706
Granos	(granos m ⁻²)	12530 A	11272 AB	9783 B
PMG	(g)	27,8	29,25	28,6
Rendimiento	(kg ha ⁻¹)	3870	3591	3318
IC		0,29	0,32	0,28
SPAD		44,7	43,3	45,7
Proteína	(g kg ⁻¹)	131,8	132,4	135,5

El contenido de PrG de trigo varió entre 87,5 y 163,8 g kg⁻¹ con promedios de 101,8 y 117,6 g kg⁻¹ según la fertilización con N fue de 0 y 160 kg N ha⁻¹, respectivamente. Las diferencias entre zonas de productividad son menores a 3 % con 160 kg N ha⁻¹ y de 5 % sin fertilización. Los coeficientes de regresión muestran que el modelos de estimación de PrG en trigo difieren entre ZM, la ZM A tiene mayor contenido que la ZM B. El PrG se incrementa con mayor Nd, CO y Pe, y disminuye con el mayor contenido de arena y mayor EstR. La ZM B tiene menor PrG (mayor valor de SPAD 52) que la ZM M y A, y el PrG es mayor con mayores valores de SPAD (Tabla 39).

El modelo tiene un aceptable ajuste entre los valores de proteína de trigo estimados y observados. La ordenada de regresión observados con respecto a los valores estimados no difirió de cero y la pendiente fue 1. La distribución de residuales fue levemente asimétrica,

tendiendo el mejor modelo logrado a subestimar en rangos altos y bajos y a sobrestimar en rangos medios de contenido de proteína (Figura 25).

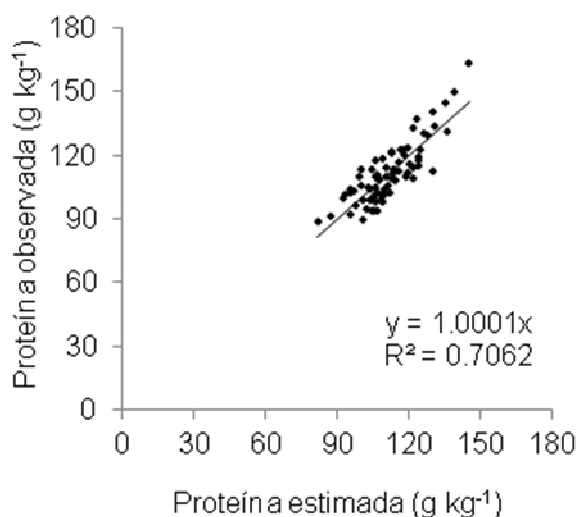


Figura 25: Relación entre valores de proteína de trigo estimados y observados. Campaña 2007 y 2008.

Tabla 39: Coeficientes estimados y errores estándar (entre paréntesis) de contenido de proteína en grano de trigo en función del contenido de nitrógeno disponible (Nd), carbono orgánico (CO), fósforo extractable (Pe), arena, rendimiento estimado (EstR), zona de productividad baja (ZM B) y SPAD. R^2 ajustado 0,68. Campaña 2007 y 2008. ***, ** y * representan significancia de 0,0001, 0,10 y 0,15 nivel de probabilidad, respectivamente.

Constante	158,75***	(20,06)
Nd	0,13***	(0,02)
CO	2,04***	(0,46)
Pe	2,48***	(0,33)
Arena	-0,72***	(0,10)
EstR	-0,01***	(0,03)
ZM B	-49,40**	(27,11)
ZM		
B*SPAD	0,94*	(0,62)

CONCLUSIONES

Las variaciones de productividad del cultivo entre zonas de manejo son diferentes según el nivel de nitrógeno aplicado. Sin agregado de nitrógeno adicional las variables de productividad de cultivo: espigas, materia seca, número de granos y rendimiento tuvieron diferencias en promedio entre ZM mayores al 26 %, cuando se fertiliza con 160 kg N ha⁻¹ las diferencias son en promedio de 21,4 %.

El contenido de proteína en grano de trigo puede ser estimado mediante modelo propuesto siendo variables predictivas el nitrógeno disponible, carbono orgánico, fósforo extractable, arena, estimación de rendimiento, SPAD (solamente en la zona de productividad baja), y la zona de productividad baja.

BIBLIOGRAFÍA

- López de Sabando M.J., M. Díaz-Zorita, F. Mousegne y P. Mercuri. 2008. Zonas de manejo agrícola en argiudoles: I. Comparación entre metodologías de delimitación. Congreso. XXI Congreso argentino de ciencia del suelo. San Luis, Argentina. P 329.
- López de Sabando M.J., M. Díaz-Zorita, y F. Mousegne, 2010. Fertilización nitrogenada dentro de ambientes de trigo. CD XXII Congreso Argentino de Ciencia de suelo.
- Sofield I., I.F. Wardlaw, L.T Evans y S.Y. Zee. 1997. Nitrogen, phosphorus and water contents during grain development and maturation in wheat. Aust. J. Plant Physiol. 4: 799-810.
- Zadoks J.C., T.T. Chang y C.F. Konzak, 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. Weed Res. 14:415-421.

Apéndice III: NIVELES DE ERRORES DE 8 METODOLOGÍAS DE DELIMITACIÓN SEGÚN DIFERENCIACIÓN ENTRE ZONA DE MANEJO PROPIEDADES DE SUELO Y PROPIEDADES CULTIVO DE TRIGO Y USO DE NITRÓGENO

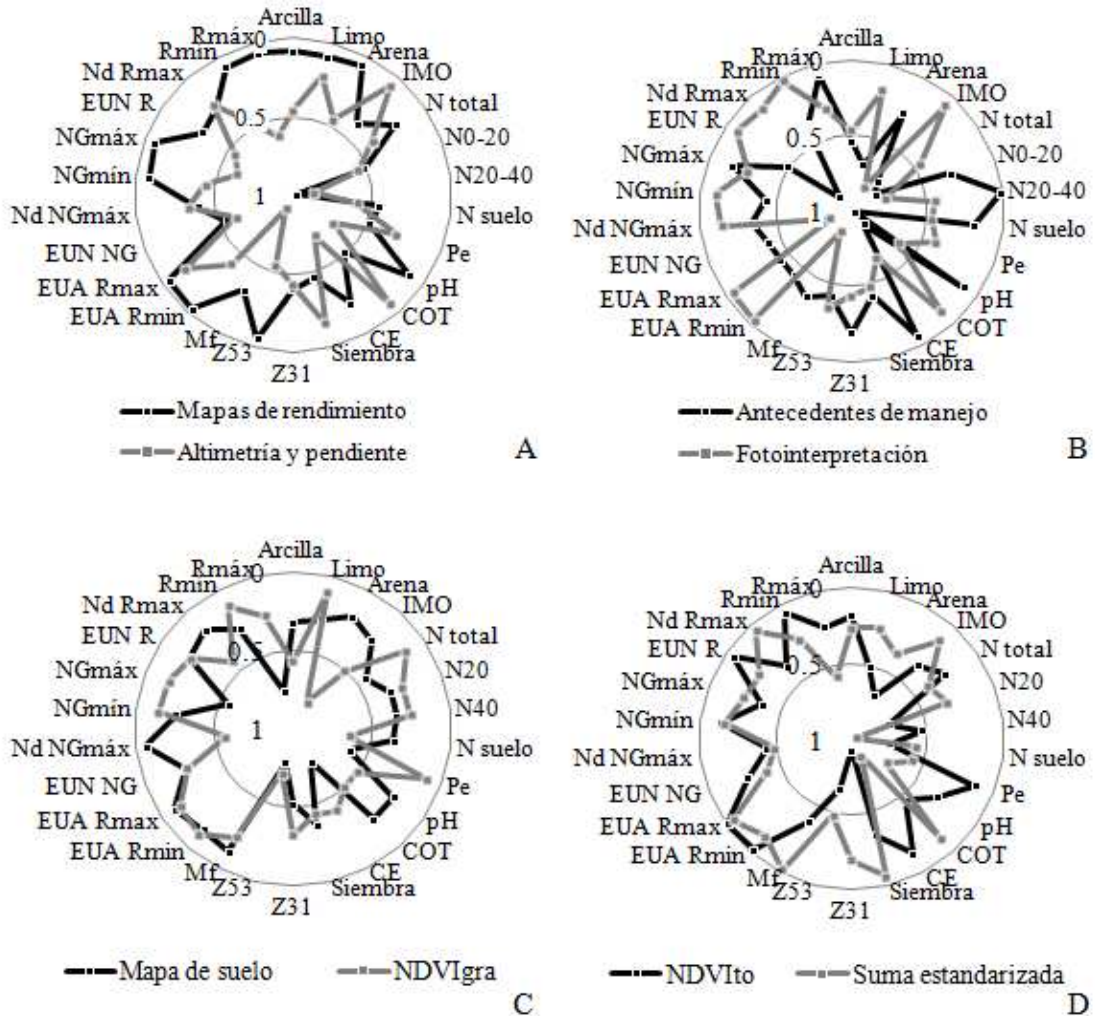


Figura 26: Nivel de errores de 8 metodologías de delimitación según diferenciación entre zonas de manejo de propiedades de suelos y propiedades de trigo y uso de nitrógeno. Metodologías de delimitación: Mapas de rendimiento y altimetría y pendiente en A, antecedentes de manejo y fotointerpretación de imágenes satelitales en B, mapas de suelos e índice verde de gramíneas (NDVIgra) en C, e índice de verde de todos los cultivos (NDVIto) y suma estandarizada de mapas de suelos y mapas de rendimientos en D. Pe= fósforo extractable. COT= carbono orgánico. CE= conductividad eléctrica. N₂₀= nitrógeno de nitratos de 0 a 0.2 m de profundidad de suelos. N₄₀= nitrógeno de nitratos de 0.2 a 0.4 m de profundidad de suelos. IMO = (materia orgánica) (limo+arcilla)⁻¹. Nsuelo= Nitrógeno disponible entre los primeros 0.4 m de suelos. EUN = Eficiencia de uso del nitrógeno. NG = Número de granos por metro cuadrado. Nd = Nitrógeno disponible en los primeros 0.4 m de suelo más nitrógeno agregado como fertilizante. NGmax = Número de granos máximos. NGmin = Número de granos mínimo. Rmax = Rendimiento máximo. Rmin = Rendimiento mínimo. Siembra, Z31, Z53 y Mf = Contenido de agua en los primeros 1.2 m de suelo al momento de la siembra, en primer nudo visible, en aparición de las espigas, y en madurez fisiológica de trigo, respectivamente.