

Determinación de la mineralización de nitrógeno a escala intralote para mejorar la fertilización sitio específica del cultivo de maíz en la Pampa Arenosa.

Nitrogen mineralization determination at field scale in the sandy Pampas to improve variable rate nitrogen application in maize.

Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,

Área Ciencias del Suelo.

Hernán Matías Redel

Ingeniero Agrónomo – Universidad de Buenos Aires – 2012

Lugar de trabajo: Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes



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



COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

Zubillaga, María de las Mercedes

Ingeniera Agrónoma, egresado de la Facultad de Agronomía, UBA

Magister Scientiae Área Ciencias del Suelo en la Escuela Para Graduados Facultad de
Agronomía UBA.

Doctor en Ciencia y Tecnología Ambiental en Facultad de Ciencias de Universidad La Coruña,
España.

Co-director de Tesis

Cipriotti, Pablo A.

Ingeniero Agrónomo, egresado de la Facultad de Agronomía, UBA

Doctor en Ciencias Agropecuarias en la Escuela para Graduados Facultad de Agronomía UBA.

2018

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.

INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
Abreviaturas	vii
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
Capítulo 1. Introducción general	1
Hipótesis general	11
Objetivo general	12
Objetivos e hipótesis específicos	12
Capítulo 2. Caracterización agroclimática, metodología y determinaciones	14
Ubicación y caracterización general de los sitios experimentales.....	15
Metodología	16
<i>Delimitación de ZM y muestreo sistemático en grilla y transecta</i>	<i>16</i>
<i>Determinaciones en planta</i>	<i>18</i>
<i>Índices Espectrales.....</i>	<i>19</i>
<i>Determinaciones en el Suelo</i>	<i>20</i>
Ensayo de fertilización	23
Análisis estadístico.....	25
Condiciones climáticas y meteorológicas.	29
Capítulo 3. Resultados y Discusión	32
Objetivo 1.....	33
Caracterización de la autocorrelación espacial en la mineralización del N.....	35
Interpolación kriging y mapas de validación cruzada	43
Caracterización de la variabilidad del proceso de mineralización de N en ambientes delimitados a escala intralote	46
Relación entre el N incubado en aerobiosis (N ₀) y el N incubado en anaerobiosis (N _{an}).....	48
Objetivo 2.....	50
Efecto de la mineralización de N y las ZM sobre los índices espectrales. Campaña 2012/13.	50
Relación entre los índices espectrales y la mineralización de N. Campaña 2012/13....	51
Efecto de la mineralización de N y las ZM sobre los índices espectrales. Campaña 2013/14.	58
Relación entre los índices espectrales y la mineralización de N. Campaña 2013/14....	59
Relación de los rendimientos de maíz, dosis de N y ambientes con índices obtenidos desde sensores remotos.....	65
Objetivo 3.....	74
Efecto de la mineralización de N en las funciones de producción de maíz.	74
Integración Final	81
Bibliografía	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1- ÍNDICES ESPECTRALES USADOS EN AGRICULTURA. TRANSFORMACIÓN MATEMÁTICA Y ATRIBUTO BIOFÍSICO CON EL QUE SE RELACIONA	10
TABLA 2-ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE N POTENCIALMENTE MINERALIZABLE (N0), N ANAERÓBICO (NAN), N MINERALIZADO APARENTE (NAP) PARA LAS CAMPAÑAS 2012/2013 Y 2013/2014. PARA LA CAMPAÑA 2013/2014 SE CONSIDERARON CONJUNTAMENTE TODOS LOS SITIOS.....	33
TABLA 3-ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA LAS VARIABLES TRANSFORMADAS N0 Y NAP	40
TABLA 4- ÍNDICE DE MORAN PARA NAN, LOGNAP Y RAÍZNO. CAMPAÑA 2012/13	41
TABLA 5- COEFICIENTES DE AUTOCORRELACIÓN PARA NAN, LOGNAP Y RAÍZNO. CAMPAÑA 2012/13	41
TABLA 6-COMPARACIÓN DE MEDIAS DE N POTENCIALMENTE MINERALIZABLE (N0), N ANAERÓBICO (NAN), N MINERALIZADO APARENTE (NAP) POR ZM Y CAMPAÑA PRODUCTIVA	46
TABLA 7-COMPARACIONES MÚLTIPLES DEL FACTOR ZM PARA LOS DISTINTOS IE. LETRAS DIFERENTES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ZM DENTRO DE UN MISMO ÍNDICE. SE INDICA EL VALOR-P DE COMPARACIÓN DE MEDIAS POR EL MÉTODO LSD FISHER (ALFA=0.05).....	50
TABLA 8-COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE PARÁMETROS DE MINERALIZACIÓN E ÍNDICES ESPECTRALES. CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA $P < 0.05$ *. CAMPAÑA 2012/13.	51
TABLA 9-MEDIDAS DE AJUSTE DE LOS MODELOS DE PARÁMETROS DE MINERALIZACIÓN E ÍNDICES ESPECTRALES SEGÚN SE AJUSTE CON ESTRUCTURA (E) O SIN ESTRUCTURA (SE). 58	
TABLA 10-COMPARACIONES MÚLTIPLES DEL FACTOR AMBIENTE PARA LOS DISTINTOS IE EN V8 Y R1 DE MAÍZ. LETRAS DIFERENTES INDICAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS POR EL MÉTODO LSD FISHER (ALFA=0.05). CAMPAÑA 13/14.....	59
TABLA 11-COEFICIENTES DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE PARÁMETROS DE MINERALIZACIÓN E ÍNDICES ESPECTRALES. CORRELACIÓN SIGNIFICATIVA $P < 0.05$ *.	59
TABLA 12-MEDIDAS DE AJUSTE DE LOS MODELOS DE PARÁMETROS DE MINERALIZACIÓN E ÍNDICES ESPECTRALES SEGÚN SE AJUSTE CON ESTRUCTURA (E) O SIN ESTRUCTURA (SE). 65	
TABLA 13-CORRELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CON LOS DIFERENTES IE PARA LA CAMPAÑA 2012-13	68
TABLA 14-CORRELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ CON LOS DIFERENTES ÍNDICES ESPECTRALES CAPTURADOS POR VUELO AÉREO PARA LA CAMPAÑA 2013-14.....	73
TABLA 15-FUNCIONES DE RENDIMIENTO DE MAÍZ (KG HA^{-1}) A ESCALA DE LOTE. * Y **, DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS AL 5 Y 1% DE PROBABILIDAD.....	74
TABLA 16-CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE RENDIMIENTO DE MAÍZ SEGÚN SE AJUSTE CON ESTRUCTURA (E) O SIN ESTRUCTURA (SE).	76
TABLA 17-MODELOS ESTIMADOS DE RESPUESTA AL AGREGADO DE FERTILIZANTE SEGÚN COMBINACIÓN DE DISTINTAS VARIABLES. * Y **, DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS AL 5 Y 1% DE PROBABILIDAD	77
TABLA 18-CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS MODELOS SEGÚN MODELOS CON ESTRUCTURA (E) O SIN ESTRUCTURA (SE) DE LA RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA	77
TABLA 19-ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS FUNCIONES DE RENDIMIENTO DE MAÍZ SEGÚN LA COMBINACIÓN DE VARIABLES EXPLICATIVAS. *Y**, DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS AL 5 Y 1% DE PROBABILIDAD RESPECTIVAMENTE	78
TABLA 20-FUNCIONES DE RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN N SEGÚN PARÁMETROS REESTIMADOS DE LOS MODELOS CON ESTRUCTURA. *Y**, DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS AL 5 Y 1% DE PROBABILIDAD.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- UBICACIÓN DE LOS SITIOS EXPERIMENTALES CON SUS CORRESPONDIENTES COORDENADAS Y LA SERIE DE SUELO A LA QUE PERTENECEN	15
FIGURA 2-ESQUEMA DEL DISEÑO DE MUESTREO SISTEMÁTICO PARA LA PRIMERA CAMPAÑA (2012-13). REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO INDICADOS CON LA LETRA "X". EL MUESTREO ANIDADO SOBRE TRES COLUMNAS ESTÁ REPRESENTADO POR LA LETRA "A". AP, MP Y BP REPRESENTA	17
FIGURA 3- ESQUEMA DEL DISEÑO DE MUESTREO SISTEMÁTICO PARA LA SEGUNDA CAMPAÑA (2013-14). REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO INDICADOS CON LA LETRA "X". AP, MP Y BP REPRESENTAN ALTA, MEDIA Y BAJA PRODUCTIVIDAD.	18
FIGURA 4-ESQUEMA DEL DISEÑO DEL ENSAYO DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA PARA LA CAMPAÑA 2012-2013. AP, MP Y BP REPRESENTAN ALTA, MEDIA Y BAJA PRODUCTIVIDAD. 23	
FIGURA 5-ESQUEMA DEL DISEÑO DEL ENSAYO DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA PARA LA CAMPAÑA 2013-2014. AP, MP Y BP REPRESENTAN ALTA, MEDIA Y BAJA PRODUCTIVIDAD. 24	
FIGURA 6-REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CÁLCULO DE RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA.	25
FIGURA 7-PRECIPITACIONES PROMEDIO MENSUALES PARA UNA SERIE DE 44 AÑOS (1970-2014) EN LA LOCALIDAD DE VEDIA (COLUMNAS) PARA LOS MESES COMPRENDIDOS ENTRE AGOSTO DE 2012 Y JULIO DE 2013 (LÍNEA LLENA) Y AGOSTO DE 2013 Y JULIO DE 2014 (LÍNEA PUNTEADA). LA LÍNEA NEGRA HORIZONTAL MUESTRA EL PERIODO DEL CULTIVO DE MAÍZ.....	30
FIGURA 8-TEMPERATURA MEDIA MENSUAL PARA UNA SERIE DE 44 AÑOS (1970-2014) EN LA LOCALIDAD DE VEDIA (COLUMNAS), PARA LOS MESES COMPRENDIDOS ENTRE AGOSTO DE 2012 Y JUNIO DE 2013 (LÍNEA LLENA) Y AGOSTO DE 2013 Y JUNIO DE 2014 (LÍNEA PUNTEADA). LA LÍNEA NEGRA HORIZONTAL MUESTRA EL PERIODO DEL CULTIVO DE MAÍZ.	31
FIGURA 9-DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL NAP, NAN Y N0 PARA LA CAMPAÑA 2012-2013.....	37
FIGURA 10-RELACION ENTRE LAS VARIABLES NAN, N0 Y NAP CON LA COTA CORRESPONDIENTE A CADA PUNTO DE LA GRILLA.	39
FIGURA 11-DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA PARA N0, NAN Y NAP.....	39
FIGURA 12- DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA PARA LAS VARIABLES TRANSFORMADAS N0 Y NAP.	40
FIGURA 13- SEMIVARIOGRAMAS DE LAS VARIABLES LOGNAP, NAN Y RAÍZN0.....	42
FIGURA 14-MAPAS INTERPOLADOS DE NAN, N0 Y NAP MEDIANTE KRIGING.....	43
FIGURA 15-GRÁFICOS DE VALIDACIÓN CRUZADA PARA LAS VARIABLES NAN, N0 Y NAP.....	45
FIGURA 16-RELACIÓN ENTRE N0 Y NAN PARA LA CAMPAÑA 2012-2013.....	48
FIGURA 17-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V8 Y N0.	52
FIGURA 18-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V10 Y N0.....	53
FIGURA 19-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V8 Y NAN.....	54
FIGURA 20-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V10 Y NAN.....	55
FIGURA 21-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V8 Y NAP.	56
FIGURA 22-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V10 Y NAP.....	57
FIGURA 23-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V8 Y NAN.....	61
FIGURA 24-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V10 Y NAN.....	62
FIGURA 25-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V8 Y NAP.....	63
FIGURA 26-RELACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS IE CAPTURADOS EN V8 Y NAP.....	64
FIGURA 27-MAPAS DE ÍNDICES ESPECTRALES (CAPTURADO EN V6) POR ZM Y DOSIS DE N. BARRAS GRIS OSCURO ZM BP, BARRAS GRIS CLARO ZM MP Y BARRAS BLANCAS ZM AP. LAS BARRAS SOBRE LAS COLUMNAS INDICAN EL ERROR ESTÁNDAR DE CADA VARIABLE.....	67
FIGURA 28-LOTE 1. MAPAS DE ÍNDICES ESPECTRALES DEL MAÍZ EN V8 SEGÚN ZM Y DOSIS DE N PARA LA CAMPAÑA 2013/14. BARRAS GRIS OSCURO ZM BP, BARRAS GRIS CLARO ZM MP Y	

BARRAS BLANCAS ZM AP. LAS BARRAS SOBRE LAS COLUMNAS INDICAN EL ERROR ESTÁNDAR DE CADA VARIABLE.....	70
FIGURA 29-LOTE 2. MAPAS DE ÍNDICES ESPECTRALES DEL MAÍZ EN V8 SEGÚN ZM Y DOSIS DE N PARA LA CAMPAÑA 2013/14. BARRAS GRIS OSCURO ZM BP, BARRAS GRIS CLARO ZM MP Y BARRAS BLANCAS ZM AP. LAS BARRAS SOBRE LAS COLUMNAS INDICAN EL ERROR ESTÁNDAR DE CADA VARIABLE.....	72
FIGURA 30-DISTRIBUCIÓN DE LOS RESIDUALES PARA LOS MODELOS DE RENDIMIENTO DE MAÍZ PARA LA CAMPAÑA 2012-13	75

Abreviaturas

AP	Agricultura de precisión
GNDVI	Índice verde de vegetación normalizado
GPS	Sistema de posicionamiento global
IE	Índice espectral
MSE	Manejo sitio específico
N	Nitrógeno
N0	Nitrógeno aeróbico
Nan	Nitrógeno incubado en anaerobiosis/N anaeróbico
Nap	Nitrógeno mineralizado aparente
NDVI	Índice de vegetación normalizado
NPM	Nitrógeno potencialmente mineralizable. Incluye a N0 y Nan
REIP	Punto de inflexión del borde rojo
SIG	Sistema de información geográfica
TCARI	Índice transformado de absorción de reflectancia de la clorofila
ZM	Zona de manejo
BP	Zona de manejo de Baja Productividad
MP	Zona de manejo de Media Productividad
AP	Zona de manejo de Alta Productividad

Resumen

La mineralización del nitrógeno (N) desde la materia orgánica es el principal proceso de aporte de N a los cultivos. Este puede variar espacialmente de manera considerable, siendo importante la predicción del mismo a escala intralote para el diagnóstico sitio específico de la fertilización nitrogenada. El objetivo de este trabajo fue identificar la variabilidad espacial de la mineralización de N a escala de lote a través de aproximaciones sencillas para poder realizar recomendaciones de fertilización variable en el cultivo de maíz. Además, se evaluó el desempeño de diferentes índices espectrales (IE) para explicar la variabilidad espacial del rendimiento del cultivo y de los parámetros de mineralización a nivel intralote en ensayos en franja con niveles crecientes de N. Los ensayos se llevaron a cabo en la Pampa arenosa húmeda realizándose un muestreo sistemático en grilla y un muestreo en transectas durante las campañas 2012/13 y 2013/14, respectivamente. Se encontraron marcados niveles de variabilidad espacial en las variables de mineralización a escala intralote para todos los parámetros analizados, donde se observaron estructuras espaciales definidas haciendo posible la confección de mapas de las variables. La relación entre el N potencialmente mineralizable (N₀) con el N mineralizado en anaerobiosis (N_{an}) en el espacio fue errática, no permitiendo utilizar el N_{an} como estimador confiable a escala de grilla. Los índices espectrales presentaron relaciones significativas y robustas con los rendimientos de maíz, siendo los coeficientes de correlación más altos de 0.43 (TCARI campaña 12/13) y 0.62 (NDVI campaña 13/14), y con los parámetros de mineralización (coeficiente de correlación 0.42 en la campaña 12/13 para el parámetro N_{ap} e IE TCARI/OSAVI en estadio R1 y coeficiente de correlación 0.37 en la campaña 13/14 para el parámetro N_{an} e IE OSAVI en estadio V8). La inclusión de los parámetros de mineralización en los modelos de explicación de rendimiento permitió mejorar el ajuste en un 20 por ciento, no así en los modelos de respuesta a la fertilización nitrogenada. Es necesario profundizar estas aproximaciones para definir con mejor precisión las dosis de N a emplear en cada sector de los lotes de producción.

Palabras clave: Nitrógeno, mineralización de N, índice espectral, fertilización variable

Abstract

The Nitrogen (N) mineralization from organic matter is the main process of nitrogen supply to crops. This process varies widely within the production field, being important the prediction at field scale for specific site nitrogen fertilization rate. The goal of this investigation was to identify the variability at field scale of N mineralization through simple approximations to make variable fertilization recommendations in the corn crop. Likewise, different spectral indices were related to corn crop with different management zones, N doses, yield and mineralization parameters. The investigation took place at Pampa Arenosa Húmeda performing a systematic sampling in grid and a transect sampling during two corn crops campaign (2012/13 and 2013/14 respectively). Widely differences were found in the variables of mineralization at field scale for all the parameters analyzed. Spatial structures were observed, making possible the mapping of the parameters. The relationship between the potentially mineralizable soil N (N₀) and the anaerobically incubated nitrogen (N_{an}) was erratic, not allowing N_{an} to be used as a reliable estimator at grid scale. The spectral indexes differentiated the management zones, doses and yield of corn crop, finding a relationship between these and the mineralization parameters. The inclusion of N mineralization parameters in the performance explanation models allowed to improve the fit to a 20 per cent, not so in the response models to N fertilization. It is necessary to deepen this approach to determine with better precision the N doses to be used in each sector of the production lots.

Keywords: Nitrogen, N mineralization, spectral index, variable fertilization

Capítulo 1. Introducción general

Nuevas tecnologías de producción se proponen entre las buenas prácticas agrícolas para lograr una producción sustentable (FAO, 2004) y con mayor retorno económico (Bazzi et al., 2015). La agricultura de precisión (AP) reúne un conjunto de tecnologías y principios que permiten manejar la variabilidad espacial y temporal de los atributos de un lote asociados a la producción agrícola (Pierce & Nowak, 1999). El advenimiento de esta tecnología ha tenido como pilares al uso de sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG) y el acople de los mismos a la maquinaria agrícola (Roberts, 2002; Cassman et al., 2002; Gebbers & Adamchuk, 2010). Los GPS permiten identificar y almacenar la ubicación precisa de objetos a través de un sistema de navegación que utiliza satélites. Por su parte, los SIG son sistemas de bases de datos diseñados para el tratamiento simultáneo de información geográfica y sus características asociadas, considerándose un instrumento poderoso para organizar, analizar e interpretar información (Urricariet & Zubillaga, 2013). Asimismo, es una herramienta para la visualización de la información espacial (Burrough, 2001). La toma de decisiones bajo este paradigma de AP requiere información consistente, es decir que esté asociada a la productividad sitio específica (Bullock & Bullock, 2000; Pagani, 2013).

La adopción de AP ha sido más acelerada en países donde el recurso tierra fue no limitante y por el contrario, la mano de obra lo ha sido (Swinton & Lowenberg-De Boer, 2002). Por lo tanto, la implementación de la AP es recomendable para los sistemas productivos pampeanos. Si bien los costos iniciales de implementación pueden ser altos, la extensión de la superficie agrícola permitió su adopción (Robertson et al., 2007).

La implementación de la AP más comúnmente utilizada consta de varias etapas. La primera es la recolección e ingreso de datos para la conformación del SIG, realizándose relevamientos topográficos, edáficos y de cultivos, entre otros. Luego se realiza un procesamiento, análisis e interpretación de la información con la finalidad de delinear áreas homogéneas dentro del lote o zonas de manejo (ZM) y posteriormente prescribir dosis de fertilizantes para cada uno. Por

último, se realiza una evaluación de la aplicación diferencial del fertilizante (Ortega & Flores, 1999) tanto físico como económico.

Las ZM son subregiones dentro de los lotes que expresan una combinación homogénea de factores determinantes del rendimiento y para las cuales resulta apropiada una proporción única de insumos (Deorge et al., 1999). El objetivo de la delineación de dichas áreas es identificar zonas dentro de un lote con diferente magnitud y probabilidad de respuesta diferencial en rendimiento a la aplicación de insumos para aumentar su eficiencia de utilización (Pagani, 2013). La identificación de ZM para ser tratadas de forma diferencial suele ser complejo, ya que deben evaluarse las interacciones de los factores limitantes del rendimiento y su distribución espacial en la unidad de producción. La superficie mínima debe corresponderse con el ancho de labor de los implementos agrícolas a utilizar, mientras que la distribución espacial debe ser tal que la velocidad de cambio entre las distintas dosis sea posible (Méndez & Melchiori, 2012). Frecuentemente los mapas de rendimiento han sido el punto de partida para la delimitación de ZM. Estos mapas son la representación gráfica de una serie de datos geoposicionados de rendimiento y humedad de granos, que permite visualizar la variabilidad espacial de la productividad de los cultivos (Peralta et al., 2012). Para su interpretación, es importante tener en cuenta las condiciones bajo las cuales se desarrollaron los cultivos, ya que el seguimiento del mismo permite comprender las causas de la variabilidad en el rendimiento (Méndez et al., 2014).

Por otra parte, las imágenes satelitales resultan adecuadas para analizar la variabilidad espaciotemporal de la productividad de los cultivos, debido a que integran los variados efectos de los factores que interactúan en el crecimiento del mismo. Numerosos estudios han demostrado que los índices espectrales (IE) se relacionan con variables de interés agronómicas como biomasa, índice de área foliar, cobertura, contenido de clorofila y rendimiento de los cultivos (Wanjura & Harfield, 1987; Thenkabail et al., 1994; Zhang et al, 1998; Rydberg & Söderström, 2000; Serrano et al., 2000).

Los relevamientos plani-altimétricos determinan la elevación del terreno y otras propiedades topográficas simples (pendiente y curvatura entre otros) que pueden ser usadas en la delimitación de ZM (Fraisse et al., 2001; Gregoret et al., 2011). Estas propiedades son características de sitio permanentes que afectan al rendimiento del cultivo directa o indirectamente (Kravchenko & Bullock, 2000). Los atributos del terreno determinan el flujo y acumulación del agua en diferentes posiciones del lote, así como también la redistribución de partículas minerales del suelo y materia orgánica, a través de la erosión, determinando la distribución espacial de los rendimientos (Pachepsky et al., 2001) y su alta correlación con los niveles de N disponibles (Franzen & Kitchen, 2000). Asimismo, estos relevamientos se asocian al nivel freático, el cual puede influenciar de manera negativa o positiva al cultivo según la profundidad a la que se encuentra la napa (Nosetto et al., 2009). La posición topográfica indicó distinta respuesta al N y se determinó que la aplicación variable fue rentable según este criterio de generar ZM (Bongiovanni & Lowenberg-DeBoer, 2000). Asimismo, Esposito (2013) propuso al índice topográfico compuesto, el cual tiene en cuenta la altimetría y parámetros determinados a partir de esta) como herramienta para definir ZM y diferenciar dosis óptima económica en cada uno.

La productividad de los cultivos es limitada principalmente por el N en los sistemas pampeanos (Caviglia & Melchiori, 2011; Maddonni, 2011). El objetivo del manejo de nutrientes de alta movilidad en el suelo como el N, debe ser lograr una sincronía entre demanda y oferta para minimizar pérdidas de N por desnitrificación (Sainz Rozas et al., 2001) y lixiviación (Rimski-Korsakov et al., 2004). La pérdida de nutriente del sistema ocurre si el fertilizante no se ajusta temporal y espacialmente a los requerimientos del cultivo (Schloter et al., 2003). Entre el 10 al 30% del N total utilizado en la producción de granos se pierde a través de lixiviación (Meisinger & Delgado, 2002), ocasionando tanto contaminación de aguas superficiales como subsuperficiales (Follett & Delgado, 2002). En este sentido, en la región pampeana se observó que las ZM donde el cultivo de maíz presentó limitaciones hídricas debido a condiciones de suelo (textura arenosa), la tecnología de dosis uniforme resultó en una menor eficiencia de uso

del N respecto al tratamiento de dosis por ZM (Delgado et al., 2005; Muschietti Piana et al., 2018). Asimismo, se estimaron las emisiones de gases de efecto invernadero bajo MSE y manejo uniforme de fertilización nitrogenada en un cultivo de maíz, siendo las mismas más bajas con el MSE (Muschietti Piana & Zubillaga, 2014).

Los sistemas de recomendación de fertilización nitrogenada presentan una elevada complejidad debido a la gran cantidad de factores que intervienen en la dinámica en el sistema suelo-planta-atmósfera (Havlin et al., 2005). En el país, la metodología más frecuentemente utilizada para el diagnóstico de la dosis de fertilización nitrogenada en maíz tiene en cuenta el contenido de N-nitrato al momento de la siembra en el estrato de 0-60 cm (Salvagiotti et al. 2002; Álvarez et al. 2003; Ruiz et al., 2004; García et al., 2005; Sánchez & Ascheri, 2005; Pagani et al., 2008; Barbieri et al., 2009; García, 2009; García et al., 2010). Los modelos que utilizan sólo la cuantificación de la disponibilidad de N-nitrato al momento de la siembra explican entre el 17 y 83% de la variabilidad de los rendimientos según el ajuste de los modelos citados anteriormente. Otros modelos de diagnóstico de la fertilización nitrogenada para el maíz proponen utilizar la concentración de N-nitrato en estadios de 5 a 6 hojas expandidas del cultivo (V5/V6) (Salvagiotti et al., 2002a; Bianchini et al., 2007; Reussi Calvo et al., 2014). La disponibilidad de N en V5/V6 y lo aportado por el fertilizante suelen explicar una mayor proporción de la variabilidad de rendimientos respecto a los modelos que solo contemplan el N-nitrato a la siembra (Reussi Calvo et al., 2014). Sin embargo, estos modelos empíricos no cuantifican el aporte de N por mineralización durante el ciclo del cultivo (Reussi Calvo et al., 2014).

La provisión de N por medio de la mineralización es el principal proceso por el cual este nutriente se encuentra disponible para los cultivos (Zubillaga et al., 2007; Bono & Álvarez, 2011). Realizar predicciones adecuadas del aporte de N mineralizado es importante para determinar las estrategias de fertilización (Wang et al. 2004). Es decir, el uso de fertilizantes debe adecuarse a los procesos relacionados con la provisión de nutrientes del suelo (Cassman, 1999; Tilman, 1999).

Una técnica de análisis de suelo que estime adecuadamente la mineralización del N ha sido buscada desde hace tiempo (Bushong et al., 2007; Ros et al., 2011). En este sentido, la técnica más consistente y confiable pertenece al grupo de las determinaciones biológicas (Stanford & Smith, 1972, Bundy & Meisinger 1994; Wilson et al., 1994). Particularmente, a partir de la incubación aeróbica de suelo se determinan los parámetros de la mineralización, el N potencialmente mineralizable (N₀) y su tasa de mineralización (k). La cantidad acumulada de N mineralizado se ajusta al siguiente modelo de cinética de primer orden (Ecuación 1):

$$N_m = N_0 (1 - e^{-kt}) \quad \text{Ec 1.}$$

Donde N_m es la cantidad acumulada de N mineralizado en el tiempo t, N₀ es el N potencialmente mineralizable y k es la tasa de mineralización.

La incubación aeróbica de suelo para obtener el N₀ presenta algunos inconvenientes para su uso como práctica de rutina (Genovese, et al., 2009). Entre los principales inconvenientes puede mencionarse el extenso período de incubación requerido (150 días de incubación hasta estabilización de producción de N-nitrato), con determinaciones periódicas de los mismos y por ende su elevado costo. Numerosos métodos han intentado estimar al N₀ por metodologías más sencillas (Soon, et al., 2007; Schomberg et al., 2009; Ros, et al., 2011). A nivel nacional, se estimó el N₀ en el SE bonaerense por Echeverría et al. (2000) sugiriendo como alternativa promisoría la estimación a través de incubaciones anaeróbicas (N_{an}) de muestras de suelo durante 7 días. También se utilizó este estimador en la región mesopotámica donde se ajustó un modelo lineal para estimar el N₀ a partir del N_{an} (Benintende et al., 2007). Éste permitió diferenciar suelos y manejos, siendo factible su uso como técnica rápida y sencilla para estimar el N₀.

Recientemente se han ajustado funciones de rendimiento en maíz (región pampeana) y trigo (SE bonaerense) utilizando como variables predictoras al N-nitrato a la siembra y el N_{an} (Reussi Calvo et al., 2014). Para el cultivo de maíz, el ajuste del modelo que incluyó el N_{an} mejoró respecto al que solo contempló el N-nitrato a la siembra. Esta mejora puede deberse a que el

proceso de mineralización durante el ciclo del cultivo es la principal fuente de provisión de N en los cultivos estivales.

Por otro lado, el método de balance de masas de N ha sido propuesto como un estimador del N mineralizado durante el ciclo del cultivo (Cabrera & Kissel, 1994; Egelkraut et al., 2003; Alvarez & Steinbach, 2012). Para la determinación del mismo se utiliza la ecuación propuesta por Schepers & Meisinger (1994) (Ecuación 2):

$$N_{\min} = N_{\text{veg}} - (N\text{-NO}_{3i} - N\text{-NO}_{3r}) \quad \text{Ec. 2}$$

Siendo N_{\min} el N mineralizado aparente durante el ciclo del cultivo de maíz, N_{veg} el N total aéreo acumulado por el vegetal (grano y planta), $N\text{-NO}_{3i}$ el N-nitrato inicial en el suelo a 0-60 cm y $N\text{-NO}_{3r}$ el N residual a madurez fisiológica del cultivo de maíz a 0-60 cm. En agroecosistemas como los pampeanos es un buen estimador del N mineralizado desde la materia orgánica humificada durante el ciclo del cultivo debido a que las pérdidas de N del sistema son bajas (Álvarez & Steinbach, 2012). Frecuentemente se utiliza el balance de masas, reorganizando los términos, para realizar el diagnóstico de la fertilización nitrogenada.

Los principales factores que regulan la mineralización de N son la calidad y cantidad de la materia orgánica, la textura, la humedad y la temperatura del suelo (Rice & Havlin, 1994; Shahandeh et al., 2005; Sharifi et al., 2007; Ros et al., 2011). La textura afecta a la mineralización al limitar la accesibilidad de los microorganismos a la materia orgánica y a través de la humedad del suelo, al afectar la concentración del oxígeno del mismo. En suelos de textura fina, la materia orgánica se encuentra protegida de la degradación microbiana y esto limita la tasa de mineralización (Serna & Pomares, 1992; Piccolo et al., 2004; Galantini et al., 2004). El contenido de agua es un factor clave en la regulación de la mineralización (Linn & Doran, 1984; Wang et al., 2004). Es así que el potencial de mineralización varía ampliamente entre regiones. En las regiones de Pampa Ondulada y el Sudeste bonaerense el proceso se da principalmente en el horizonte superficial (Álvarez, 1999), mientras que en la región Semiárida

Pampeana el proceso también cobra relevancia en las capas subsuperficiales (Bono & Álvarez, 2013).

Recientemente se ha utilizado a la percepción remota en la predicción de la demanda de N por el cultivo (Raun et al., 2005; Teal et al., 2006; Melchiori et al., 2008) y la oferta de N desde la materia orgánica (Zubillaga et al., 2012;). La teledetección o percepción remota comprende una serie de técnicas y procesos que pueden registrar información de un objeto terrestre sin estar en contacto físico con el mismo. Dichos objetos absorben, reflejan y/o emiten energía, reaccionando de manera diferente a las distintas longitudes de onda presentando firmas espectrales características.

La respuesta espectral de los vegetales está dada por una importante absorción de energía en la porción visible del espectro (0.45-0.69 μm). La energía transmitida a través de la cubierta vegetal es muy baja, por lo tanto es mayor la proporción de la radiación incidente que es reflejada.

Las longitudes de onda de interés en estudios agronómicos corresponden a la longitud de onda óptica, correspondiente a las longitudes de onda del visible y al infrarrojo cercano y medio (Dampney et al., 1998; Zwiggelaar, 1998; Moran, 2000; Scotford & Miller, 2005). El patrón de distribución de las distintas longitudes de onda del espectro visible ha permitido caracterizar distintas situaciones (Lillesand & Kiefer, 2000).

La reflectancia de los objetos en la superficie terrestre puede ser capturada mediante distintos sensores montados sobre diversas plataformas, tales como satélites, aviones o proximales (Scotford & Miller, 2005). Las imágenes capturadas por los sensores se caracterizan por tener diferente resolución temporal, espacial, espectral y radiométrica.

La selección de la plataforma y sensor a utilizar dependerá del problema a resolver, clasificándose a las aplicaciones en simples o complejas (Dampney, 2002). Las simples tienen en cuenta objetivos generales, como la delimitación de ZM. Las aproximaciones complejas consideran objetivos más específicos, en muchos casos cuantitativos, como la recomendación

variable de fertilización de los cultivos. Para aplicaciones simples es adecuada la información obtenida mediante satélites, mientras que para aplicaciones complejas lo adecuado sería contar con información obtenida mediante plataformas proximales (Dampney, 2002) o imágenes multispectrales de alta resolución tomadas desde aviones o satélites (Miao et al., 2009). Estas consideraciones pueden estar desactualizadas, ya que hoy se cuenta con imágenes satelitales de alta resolución y con correcciones atmosféricas acordes para, por ejemplo, realizar aplicación variable de N (Melchiori et al., 2019).

La respuesta de los cultivos a la radiación electromagnética genera gran cantidad de información con distribución espacial continua (Goderya, 1998; Li et al., 2001; Mullen et al., 2003; Li et al., 2005; Scotford & Miller, 2005; Zubillaga & Urricariet, 2005) que se asociaron con variables relacionadas a la demanda y/u oferta de N (Raun et al., 2005; Fitzgerald et al., 2006). En este sentido, varios estudios han encontrado relaciones significativas entre el contenido de N en planta y suelo con la reflectancia del cultivo (Graeff & Claupein, 2003; Diker & Bausch, 2003). Las mediciones de las propiedades ópticas del canopy de maíz como la reflectancia y la transmitancia pueden considerarse técnicas tan eficientes como el análisis vegetal (Schepers et al., 1996).

La información captada por los sensores remotos generalmente se encuentra influenciada por la orientación de las hojas, la humedad del suelo y el ángulo de incidencia solar. Para minimizar la influencia de estos factores se determinan los índices espectrales (IE). Estos últimos, son transformaciones matemáticas adimensionales de la reflectancia de la vegetación tales como cocientes o diferencias de la reflectancia observada entre distintas porciones del espectro (Araus et al., 2001). Los IE se relacionan con distintos atributos biofísicos de la vegetación (Tabla 1).

Tabla 1- Índices espectrales usados en agricultura. Transformación matemática y atributo biofísico con el que se relaciona

IE	Abreviatura	Ecuación	Atributo biofísico
Índice diferencial de vegetación normalizado	NDVI	$(R810-R610)/(R810+R610)$	Biomasa Verde
Índice verde de vegetación normalizado	GNDVI	$(R780-R550)/(R780+R550)$	Biomasa Verde
Desplazamiento del borde rojo	REIP	$(700+40((R670+R780)/2-R700)/(R740-R700))$	Contenido de N
Índice de vegetación ajustado al suelo	SAVI	$(1,5*((R760-R660)/(R760+R660+0,5)))$	Biomasa Verde
Índice de reflectancia en la absorción de la clorofila transformado	TCAR	$(3*((R710-R670)-0,2*(R710-R550)*(R710/R660)))$	Clorofila

El índice de vegetación más utilizado para caracterizar la vegetación es el NDVI (índice de vegetación normalizado), índice asociado a la biomasa verde, con ciertas limitantes relacionadas con la saturación a altos niveles de biomasa (Rouse et al., 1973). Cuando el índice de área foliar (IAF) es elevado se utiliza el GNDVI (índice verde de vegetación normalizado), el cual utiliza la reflectancia del cultivo en la longitud de onda del verde e infrarrojo cercano, para reducir la

influencia de la cobertura vegetal (Cristiano et al., 2010). Otros índices, como el TCARI (Índice transformado de absorción de reflectancia de la clorofila) y el REIP (Punto de inflexión del borde rojo), fueron sensibles a las variaciones en los pigmentos fotosintéticos, materiales no fotosintéticos y también a la reflexión del suelo (Daughtry et al., 2000; Mosso & Zubillaga, 2012).

El rendimiento de los cultivos y el N disponible a través de la mineralización varía ampliamente dentro del lote de producción en aquellos casos en los que se presenta variabilidad en las propiedades edáficas y/o topográficas (Egelkraut, et al., 2003, Zubillaga et al., 2007a). La variabilidad espacial del proceso de mineralización del N a escala intralote ha sido atribuida a diversos factores tales como la heterogeneidad de suelos, la posición en el paisaje y la variabilidad microclimática (Gotway, et al., 1996; Mueller, et al., 2001; Zubillaga et al., 2009; Zubillaga et al., 2012). Sin embargo, dicho proceso no fue relacionado a los distintos IE presentados anteriormente.

Es así que, tanto la oferta como la demanda de N puede variar ampliamente dentro del lote de producción por lo que la dosis de N a utilizar debe ser específica para cada sitio. La demanda y oferta de N podría ajustarse a través de la delimitación de ZM y a la captura de IE en determinados momentos del cultivo de maíz.

Hipótesis general

La integración de información sobre análisis del suelo, topográfica y el uso de índices espectrales mejoran la predicción de la oferta de N por mineralización y la demanda de N para el cultivo de maíz y a su vez la recomendación de fertilización variable a escala intralote.

Objetivo general

Identificar la variabilidad intralote de la demanda y la mineralización de N a través de aproximaciones sencillas para incrementar la eficiencia de la recomendación de fertilización variable.

Objetivos e hipótesis específicos

Objetivo 1

Objetivo específico 1.1:

Caracterizar la variabilidad espacial del proceso de mineralización de N a escala intralote mediante la delineación de ZM.

Hipótesis 1.1

La delimitación de ZM basadas en la elevación del terreno permite evidenciar la variabilidad del N potencialmente mineralizable y el N mineralizado aparente.

Objetivo específico 1.2:

Caracterizar la autocorrelación espacial del proceso de mineralización de N a escala lote.

Hipótesis 1.2

La mineralización de N presenta una estructura espacial definida a escala de lote.

Objetivo específico 1.3:

Predecir el N potencialmente mineralizable a partir de técnicas de menor tiempo de incubación.

Hipótesis 1.3

La determinación del N potencialmente mineralizable puede acortarse a partir de técnicas de incubación anaeróbicas.

Objetivo 2

Objetivo específico 2.1:

Relacionar los índices espectrales capturados por un radiómetro proximal con la ZM delimitada a escala de lote y los parámetros de mineralización de N.

Hipótesis 2.1:

La variabilidad de la mineralización de N y las ZM delimitadas a escala de lote se relacionan con los índices espectrales capturados en etapas vegetativas y reproductivas del cultivo de maíz.

Objetivo específico 2.2:

Relacionar los índices espectrales del cultivo de maíz capturados por sensores remotos con el rendimiento, la disponibilidad de N (N fertilizante) y ZM delimitada.

Hipótesis 2.2:

Existe una estrecha relación entre la productividad de maíz y la disponibilidad de N, la ZM y los índices espectrales capturados por sensores remotos.

Objetivo 3

Evaluar la relación entre el rendimiento del cultivo de maíz y la disponibilidad de N al considerar la variabilidad espacial de la mineralización de N a escala de lote.

Hipótesis 3:

El diagnóstico de la fertilización nitrogenada es más preciso al incluir la variabilidad espacial del proceso de mineralización a la disponibilidad inicial de N en los sistemas de recomendación de fertilización.

Capítulo 2. Caracterización agroclimática, metodología y determinaciones

Ubicación y caracterización general de los sitios experimentales

El estudio se llevó a cabo en el Partido de L.N. Alem, siendo los sitios representativos de la región de la Pampa arenosa, donde el paisaje está formado por planicies onduladas con algunas áreas plano-cóncavas que ocupan poca extensión. Se llevaron a cabo dos ensayos durante las campañas 2012-2013 y 2013-2014. En la primera se realizó un muestreo en grilla en una superficie de 18 ha. Durante la campaña siguiente se realizaron muestreos en transectas en tres lotes productivos (Figura 1).

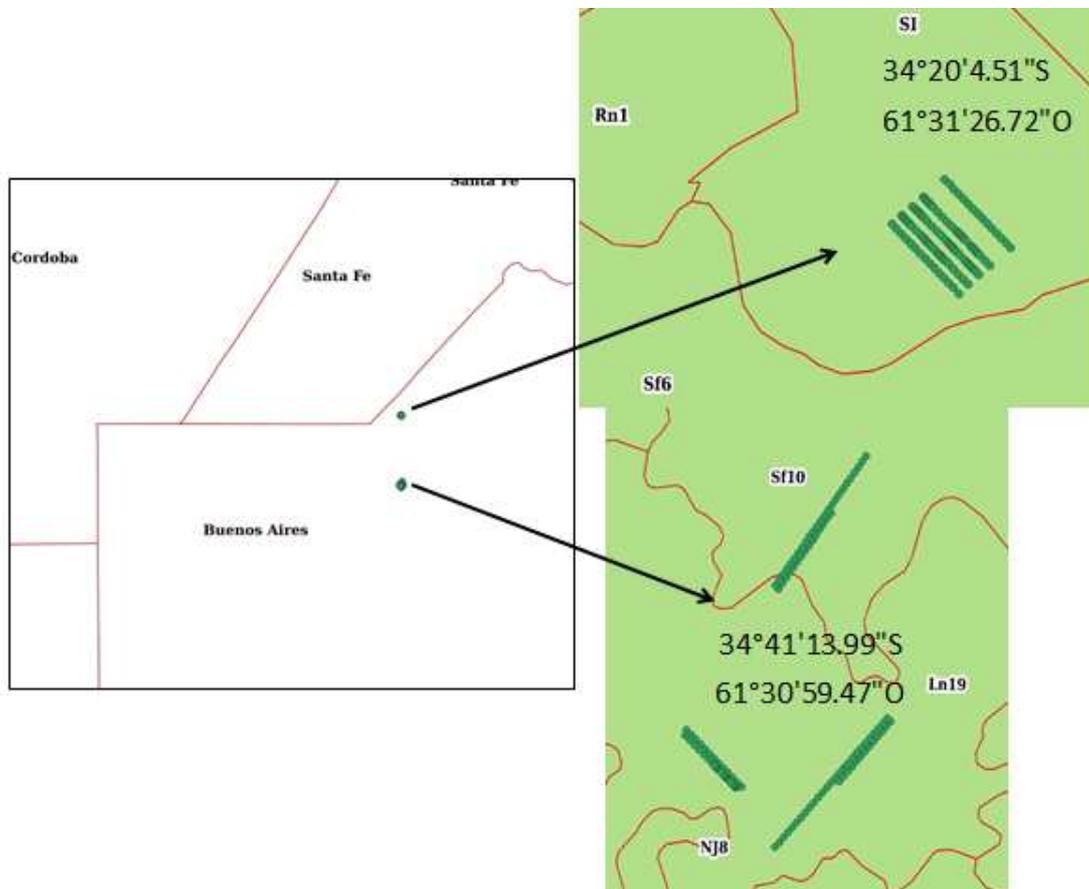


Figura 1- Ubicación de los sitios experimentales con sus correspondientes coordenadas y la serie de suelo a la que pertenecen

Los suelos son Hapludoles Enticos, franco grueso en las partes más elevadas y convexas de las planicies y Hapludoles Típicos, desarrollados entre las lomas (Salazar Lea Plaza & Moscatelli, 1989). Los ensayos se desarrollaron sobre las series Santa Isabel, Saforcada y Lincoln.

Metodología

Delimitación de ZM y muestreo sistemático en grilla y transecta

Se realizó un relevamiento planialtimétrico con estación total para determinar la cota. La delimitación de ZM se realizó con la determinación de la cota relativa (CR). Esta fue calculada como la altura en relación a un plano de referencia. En cada sitio, se escalaron las mediciones de altimetría, calculándose la cota relativa como $((\text{cota actual} - \text{cota mínima}) / (\text{cota máxima} - \text{cota mínima})) * 100$. Las ZM se clasificaron en baja elevación (BE), media elevación (ME) y alta elevación (AE), coincidente con las posiciones del relieve de lomas (CR > 66%), medias lomas (CR entre 33 y 66%) y bajos (CR < 33%), respectivamente. Se decidió utilizar la variable ZM en forma categórica ya que en la zona es usual la delimitación de ambientes utilizando esta variable. Esta forma de clasificación permite que los distintos lotes fuesen comparables al ser un índice relativo.

En la primera campaña (2012-2013) se realizó un muestreo sistemático en grilla georreferenciado en un área de 18 has que contempla una equilibrada sectorización de los 3 ambientes. La distancia entre los puntos de muestreo fue de 30 m distribuidos en 15 filas (paralelas a la pendiente principal) y por 5 columnas (perpendiculares a la pendiente principal) con un muestreo anidado (cada 10 m) en un sector de cada ZM, siendo la cantidad total de nodos de la grilla de 111 (Figura 2). El muestreo anidado es aquel donde se redujo la distancia de muestreo a 10 m para poder analizar la variabilidad a corta distancia. La ZM AP presentó en promedio una cota de 0,63 m inferior al promedio del lote y BP una cota de 0,48 m superior a la cota media del lote.

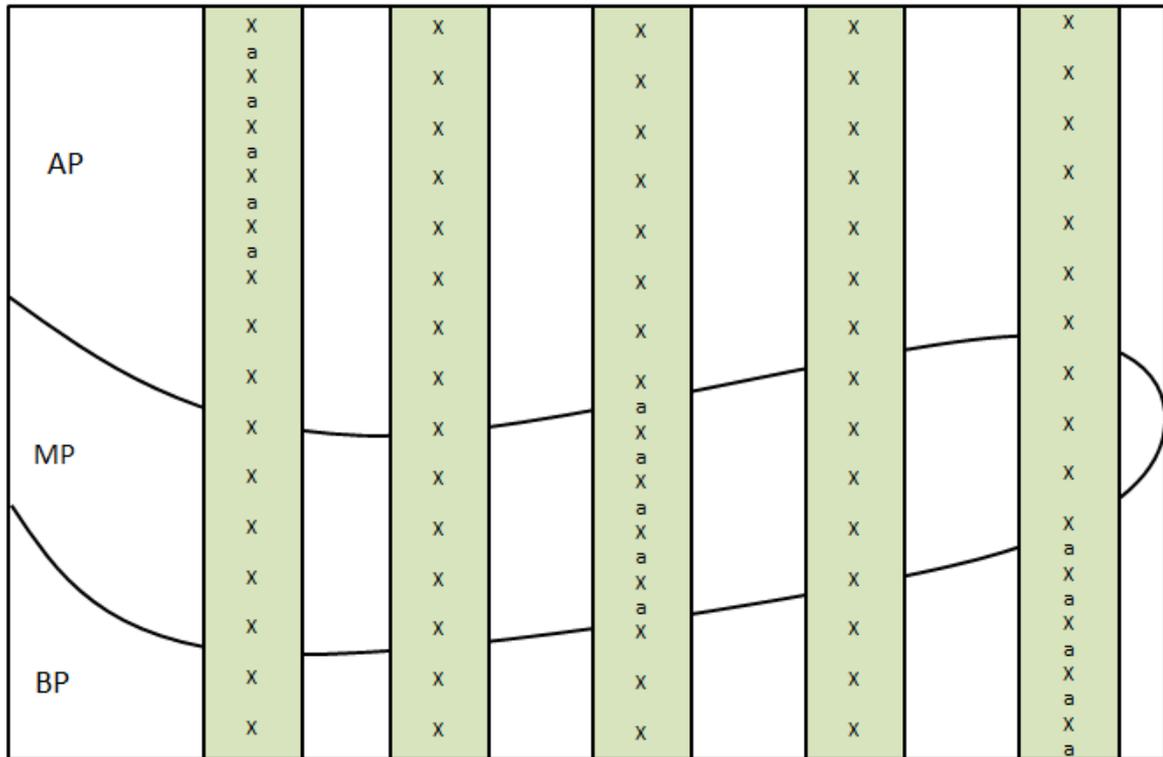


Figura 2-Eschema del diseño de muestreo sistemático para la primera campaña (2012-13).

Representación gráfica de los puntos de muestreo indicados con la letra "X". El muestreo anidado sobre tres columnas está representado por la letra "a". AP, MP y BP representa

Se sembraron tres híbridos de maíz Dekalb (AJ 6601 VT3P, AJ 6905 VT3P y AJ 7303 VT3P) con una densidad de 7 semillas m² y una distancia entre hileras de 0,525 m. Los ensayos se llevaron a cabo bajo siembra directa con un barbecho prolongado libre de malezas para maximizar la acumulación de agua en el perfil.

En la segunda campaña (2013-14), se seleccionaron otros tres lotes donde se delimitaron las ZM como se describió anteriormente. La ZM AP presentó en promedio una cota de 0.4 m inferior al promedio del lote y BP una cota de 0.9 m superior a la cota media del lote.

El muestreo se realizó a través de una única transecta por lote en la cual cada una contó con 40 puntos de muestreo, con una distancia entre los mismos de 50 m (Figura 3).

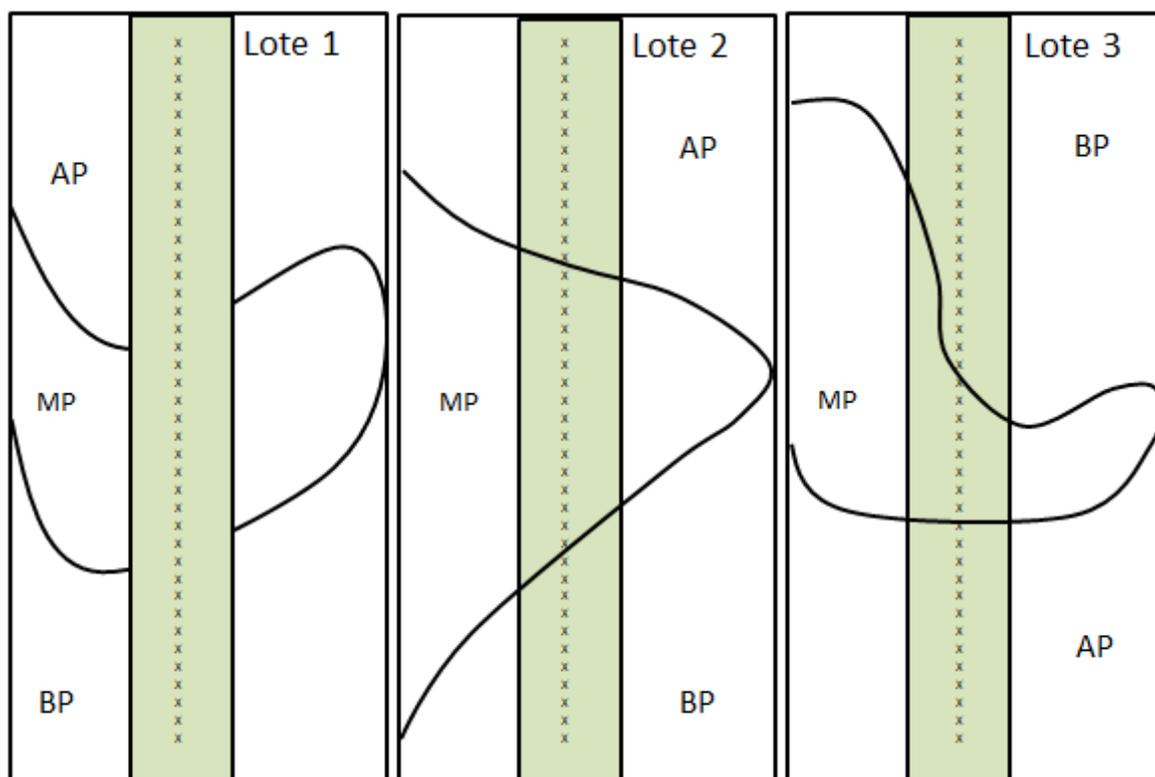


Figura 3- Esquema del diseño de muestreo sistemático para la segunda campaña (2013-14).

Representación gráfica de los puntos de muestreo indicados con la letra "X". AP, MP y BP representan alta, media y baja productividad.

La siembra del cultivo de maíz se realizó bajo un sistema de siembra directa sobre rastrojo de soja para los Lotes 1 y 3, mientras que el Lote 2 se sembró sobre un rastrojo de vicia. En el lote 1 se sembró un híbrido Dekalb 692 YR-RR, para el Lote 2 se utilizó el híbrido PANNAR 5E-203, mientras que para el Lote 3 se utilizó Pioneer 1778 YRRR. La producción de los Lotes 1 y 3 se destinó a granos mientras que el Lote 2 se destinó a la producción de silo, por lo que no se pudo contar con la información de rendimiento en este lote.

En ambas campañas se utilizó una dosis de fósforo de 160 kg/ha de superfosfato triple (0-20-0).

Determinaciones en planta

Biomasa Aérea (grano y planta)

El rendimiento del cultivo se registró de forma manual en cada punto de muestreo. También se cosechó mecánicamente con cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento y GPS. Los

mapas de rendimiento generados se analizaron para extraer los valores atípicos y así realizar el análisis con los datos corregidos. El tamaño de cada píxel generado se correspondió al ancho de labor de la maquinaria y el tiempo transcurrido entre tomas sucesivas de observaciones generando pixeles de aproximadamente 26 m². Los datos obtenidos por el monitor fueron utilizados en los objetivos 2 y 3, mientras que el muestreo manual se utilizó en el objetivo 1 y en la determinación de Nap.

En madurez fisiológica del maíz (R6, Ritchie & Hanway, 1982), para cada punto de muestreo se recolectaron plantas en una superficie equivalente a 0,625 m² para estimar la producción de biomasa aérea. Dichas muestras fueron secadas en estufa a 60° C hasta alcanzar constancia de peso. Posteriormente, se pesaron y molieron (1 mm de malla) para realizar las determinaciones correspondientes.

Concentración de N en planta y grano

La concentración de N vegetal en planta (tallo más hoja) y grano fue determinada analíticamente mediante digestión Kjeldhal (Page et al., 1982). El N total acumulado por el vegetal fue calculado como la suma entre el peso de los granos por su concentración de N y el peso del resto de la planta por su concentración de N (ambos componentes expresados en base seca).

Índices Espectrales

Se realizó un muestreo proximal con radiómetro multiespectral portátil (Cropscan MSR16, Rochester, EE.UU.) Las longitudes de onda registradas fueron 450, 500, 550, 610, 660, 680, 710, 730, 760, 780, 810, 870, 950, 1080, 1220 y 1600 nm. El radiómetro se dispuso sobre el tope del canopeo a 1,1 m de altura, integrando una superficie de 0,52 m².

Con el radiómetro portátil se tomaron 2 lecturas por cada punto de muestreo obteniéndose luego un promedio. Con la reflectancia en las distintas longitudes de onda se calcularon índices

espectrales NDVI, GNDVI, OSAVI, Viopt, REIP, TCARI según las ecuaciones 3, 4, 5, 6, 7 y 8 respectivamente.

$$\text{Ec. 3. } NDVI = [(r810_{nm} - r670_{nm}) / (r810_{nm} + r670_{nm})] \text{ (Rouse et al., 1973)}$$

$$\text{Ec. 4. } GNDVI = [(r810_{nm} - r550_{nm}) / (r810_{nm} + r550_{nm})] \text{ (Kemerer, 2007)}$$

$$\text{Ec. 5. } OSAVI = [(r800_{nm} - r670_{nm}) / (r800_{nm} + r670_{nm} + 0.16)] \text{ (Rondeaux et al., 1996)}$$

$$\text{Ec. 6. } Viopt = (1 + 0.45) * [(r800_{nm}^2 + 1) / (r670_{nm} + 0.45)] \text{ (Reyniers et al., 2006)}$$

$$\text{Ec. 7. } REIP = 700 + \{40 * [(r670_{nm} + r780_{nm}) / 2] - r700_{nm}\} / (r740_{nm} - r700_{nm}) \text{ (Vogelmann et al., 1993)}$$

$$\text{Ec. 8. } TCARI = (3 * (r710_{nm} - r660_{nm}) - 0.2 * (r710_{nm} - r550_{nm})) * (r710_{nm} / r660_{nm}) \text{ (Haboudane et al., 2002)}$$

Asimismo, se realizó un vuelo de captura, a una altura de 920 m (Resolución 0,5 m), con un vehículo aéreo con cámara multiespectral Tetracam modelo MCA Series - High Quality Multi-Spectral Imaging (longitudes de onda capturadas: 470, 550, 660, 690, 710 y 810 nanómetros), cuando el cultivo se encontraba con ocho y diez hojas totalmente expandidas (V8 y V10). A partir de la combinación de las distintas longitudes de onda se obtuvieron los IE NDVI, OSAVI, TCAR y la relación TCARI/OSAVI (Haboudane et al., 2002).

Determinaciones en el Suelo

Nitrógeno potencialmente mineralizable (N0) y tasa de mineralización (k)

Se incubaron las muestras superficiales de suelo (0-30 cm) de cada punto de muestreo de la grilla a 35 °C y a capacidad de campo durante 150 días. La mineralización de N ocurre en mayor medida en los estratos superiores por lo que se propone calcularlo sobre los primeros 30 cm de perfil de suelo (Alvarez, et al. 2015). Se determinaron con técnicas colorimétricas el amonio y nitrato producidos después de 0, 7, 14, 28, 56, 90, 120 y 150 días de iniciada la incubación (Egelkraut. et al. 2000). Los parámetros del modelo de cinética de primer orden

fueron el N potencialmente mineralizable (N₀) y la tasa de mineralización (k). Esta determinación se realizó solo para los puntos de muestreo de la grilla de la campaña 2012-2013. Las muestras de suelos superficiales (0-30 cm) fueron secadas al aire, molidas y tamizadas (2mm). Se dispusieron en bolsas Ziploc 80 g de suelo humedecido a capacidad de campo. Las muestras de suelos fueron ubicadas en un acuario de vidrio (38 L) suspendidas a 2,5 cm del fondo para minimizar el secado. El fondo del acuario se completó con 1 cm de agua para proveer agua libre para mantener saturado de humedad el aire, que fue bombeado a una tasa de 1L min⁻¹ para mantener los niveles de oxígeno. Desde cada repetición, y para cada fecha, se tomaron 10 g de suelo húmedo para la determinación de amonio (según metodología de Keeney & Nelson, 1982) y nitrato (Marban, 2005).

Nitrógeno incubado en anaerobiosis (N_{an})

En las incubaciones cortas el N potencialmente mineralizable (N_{an}) fue determinado mediante la incubación de muestras de suelo en condiciones de anaerobiosis, colocando 5 g de suelo en tubos de ensayo (150 mm de largo x 16 mm de diámetro) y adicionando 12,5 ml de agua destilada. Se cerraron herméticamente los tubos y se incubaron en estufa durante 7 d a 40°C (Waring & Bremner, 1964). Al finalizar la incubación, se completó el tubo con 12,5 ml de KCl 4 M y se determinó el N-NH₄ (Keeney & Nelson, 1982). El N_{an} se calculó como la diferencia entre el N-NH₄ producido durante la incubación y el amonio producido de la misma muestra sin incubarse.

N-Nitrato

De cada punto de muestreo de la grilla y las transectas se tomaron tres muestras compuestas por profundidad (0-30, 30-60 y 60-90 cm). Se muestreo en estos estratos para cuantificar con mayor precisión el contenido de nitratos. Cada muestra compuesta por seis submuestras a profundidad de 0-30 cm, cuatro submuestras de 30-60 cm y dos submuestras de 60-90 cm. Las mismas fueron acondicionadas en frío hasta la determinación analítica. Se plantearon dos momentos de muestreo, siembra (N inicial) y madurez fisiológica (N residual). El contenido de N en forma de

nitrate en el perfil del suelo fue determinado siguiendo la técnica de diazotación de SNEDD (Marbán, 2005). Dicha técnica supone una extracción de NO_3^- sobre una muestra de suelo húmeda con una solución de CuSO_4 y H_3BO_3^- y una posterior colorimetría. El extracto fue floculado con el agregado de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y luego de agitado se dejó decantar por 24 hs. Para la colorimetría, se tomó una alícuota del extracto y se adicionó un agente catalizador ($\text{CuSO}_4 + \text{NaOH}$) y el sulfato de hidracina como agente reductor. Se desarrolló el color mediante el reactivo SNEDD, compuesto de una mezcla de sulfanilamida (N-Naftil) y etilendiaminadichlorhidrato. La concentración de N-NO_3^- fue determinada por espectrofotometría en la longitud de onda de 540 nm. Todas las muestras de suelo fueron determinadas por duplicado.

En forma simultánea a la extracción de NO_3^- , se determinó el contenido de humedad gravimétrica de cada muestra de suelo a fin de expresar los resultados en base seca. El contenido de N-NO_3^- (kg ha^{-1}) fue calculado como la suma de los productos entre la concentración de NO_3^- (mg kg^{-1}), la densidad aparente (g cm^{-3}) y el espesor de cada estrato de suelo muestreado (cm) a lo largo del perfil.

N-Amonio

Sobre las mismas muestras especificadas en el punto anterior se determinó el contenido de amonio según la metodología propuesta por Keeney & Nelson, 1982.

Nitrógeno mineralizado aparente (Nap)

Para la determinación de la mineralización aparente del N se realizó el método de balance de masas de la fracción de N mineral del suelo. Utilizando la ecuación propuesta por Scheppers y Meisinger (1994) se calcula el N mineralizado aparente (Ecuación 9).

$$\text{Ec. 9. Nap} = \text{Nveg} + (\text{N-NO}_3)_{\text{residual}} - (\text{N-NO}_3)_{\text{inicial}}$$

Donde el Nap es el N mineralizado aparente; N-NO_3 (inicial) es el N de nitrato disponibles para el cultivo al momento de la siembra y N-NO_3 (residual) es el N de nitrato al momento de la cosecha; y Nveg es el N acumulado aéreo por el vegetal al momento de madurez fisiológica.

Ensayo de fertilización

Para ambas campañas estudiadas se realizaron ensayos de respuesta a la fertilización nitrogenada. Para la campaña 2012-2013, entre las columnas de las grillas se adicionaron nuevas columnas sobre las que se aplicaron tres dosis de N (0, 75 y 150 kg N ha⁻¹) con fertilizante líquido UAN (32-0-0, densidad 1.3 kg l⁻¹) cuando el cultivo de maíz se encontraba con dos hojas totalmente expandidas (Figura 4).

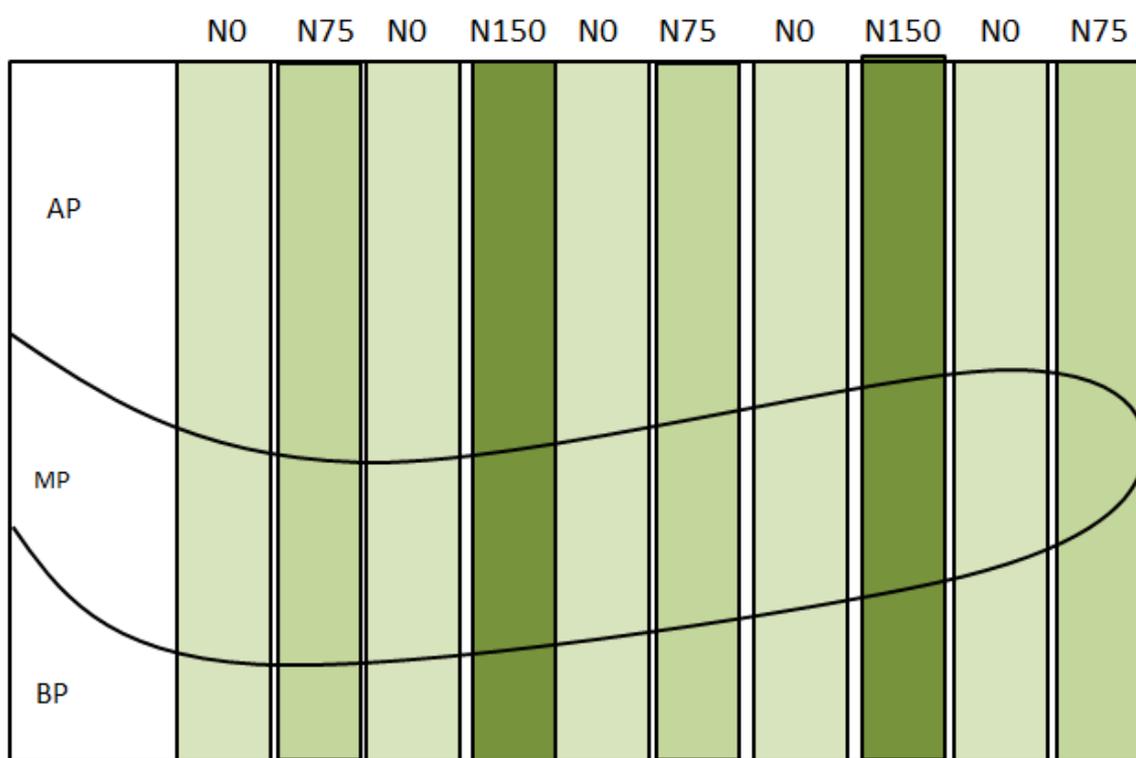


Figura 4-Esquema del diseño del ensayo de fertilización nitrogenada para la campaña 2012-2013. AP, MP y BP representan alta, media y baja productividad.

Para la campaña 2013-2014 el procedimiento fue similar, realizándose la fertilización con UAN en 6 hojas expandidas del maíz (V6). Las dosis de N fueron 0, 60, 120 y 160 kg de N ha⁻¹ para los tres lotes (Figura 5).

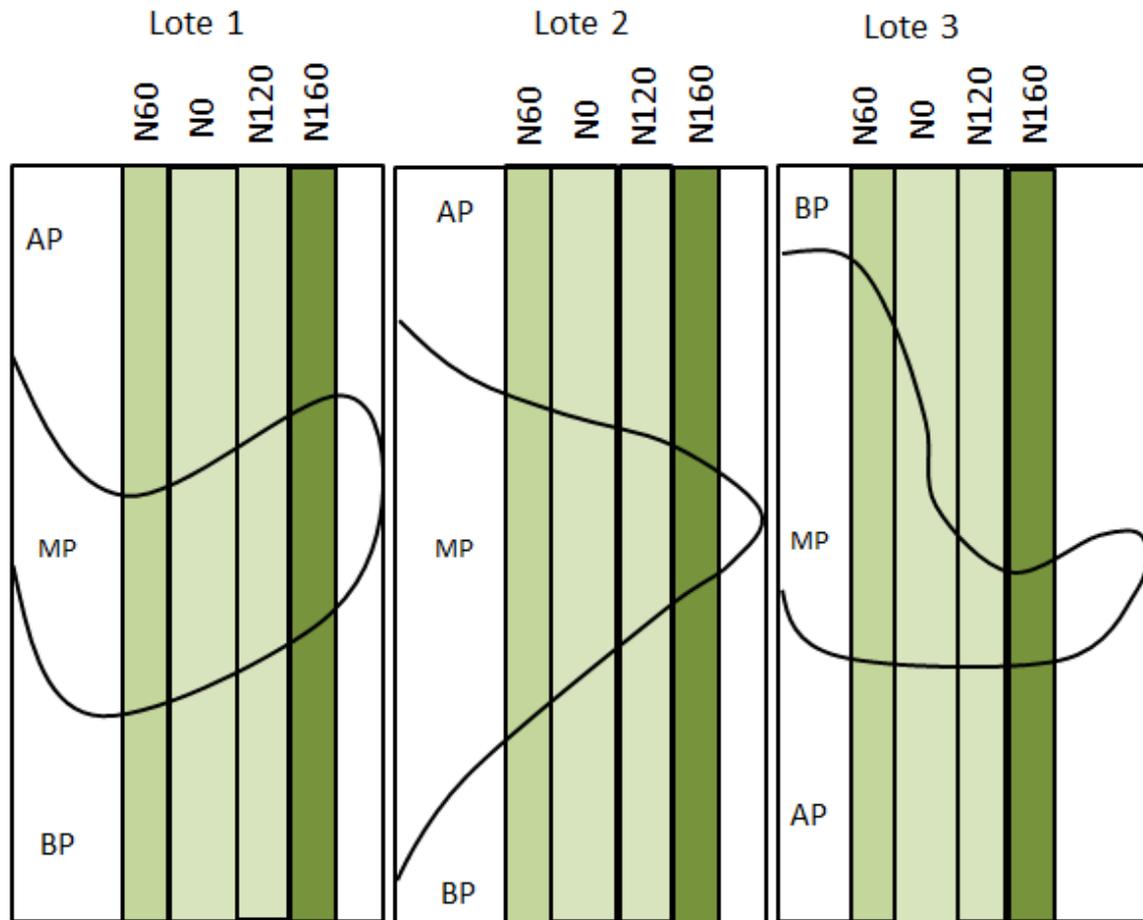


Figura 5-Eschema del diseño del ensayo de fertilización nitrogenada para la campaña 2013-2014. AP, MP y BP representan alta, media y baja productividad.

La respuesta a la fertilización para cada dosis de N se calculó como la diferencia entre los rendimientos del tratamiento fertilizado con N y el tratamiento sin N. Para este cálculo se utilizaron los rendimientos obtenidos del monitor de la cosechadora. Para obtener la respuesta se utilizaron los datos de rendimiento, provistos por la cosechadora, más próximos en el espacio (Figura 6).

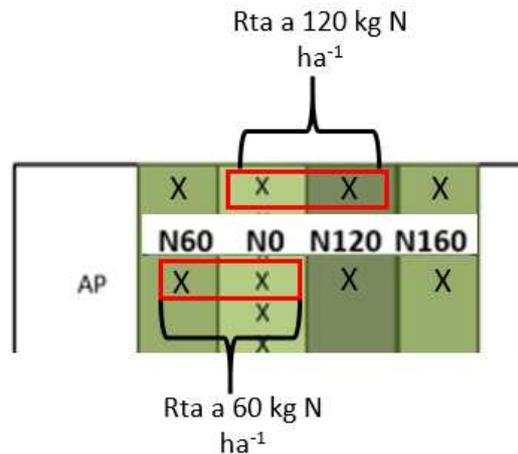


Figura 6-Representación gráfica del cálculo de respuesta a la fertilización nitrogenada.

Análisis estadístico

Objetivo 1.

Se realizó un análisis exploratorio sobre los resultados de los parámetros de mineralización N0, Nan y Nap de cada sitio de la grilla o transecta. En una primera aproximación se analizaron los parámetros de mineralización de cada lote en función de su media, valor máximo, mínimo, asimetría y desvío estándar. Si el coeficiente de asimetría es mayor a 1, la transformación del set de datos a logaritmo es la sugerida, mientras que si el coeficiente se encuentra entre 0.5 y 1 la transformación sugerida para normalizar los datos es la raíz cuadrada (Oliver & Webster, 2014). Se debieron utilizar las dos transformaciones mencionadas, siendo la del logaritmo para la variable Nap y la raíz cuadrada para la variable N0. Se estudió el patrón de variabilidad espacial de los parámetros de mineralización, donde se evaluó la continuidad espacial mediante técnicas geoestadísticas (Rossi et al. 1992, Goovaerts, 1997; GS+5.0 de Gamma Design Software, 2004). Los outliers causan serias distorsiones en el análisis geoestadístico (Kerry & Oliver, 2007), por lo que fueron analizados a través de gráficos de burbujas.

Las variables fueron analizadas como funciones aleatorias, haciendo uso de los métodos propuestos por Matheron (1973), conocidos como la teoría de las variables regionalizadas. Es así que se asumió el supuesto de estacionariedad de primer y segundo orden para poder realizar

el análisis geoestadístico. Se confeccionaron los semivariogramas de cada una de las variables y se determinó el grado de dependencia espacial.

De los semivariogramas se obtienen distintos parámetros (rango, nugget y variación estructural). Al ajustar los datos a los modelos se estimaron los parámetros del mismo: rango (Ao), variación en el origen o nugget (Co) y variación estructural (C). El rango es el valor de la distancia a la cual la semivarianza se vuelve constante, es decir, indica la distancia a partir de la cual las muestras son independientes. El Ao depende de la escala de observación y de la interacción espacial de procesos que afecten la variación de cada variable a la escala de muestreo usada, por lo que los rangos de una misma variable pueden ser distinto debido a que el muestreo se realizó en distintos sitios o a distintos intervalos (Castrignano, 2011). El Co es la varianza no explicada por el modelo, la cual se debe a la variabilidad a corta distancia que no puede ser captada por la escala de muestreo utilizada y debido a los errores en la determinación de la variable estudiada (Journel & Huijbregts, 1978; Isaaks & Srivastava, 1989). El Co+C o meseta corresponde a la máxima semivarianza encontrada entre pares de puntos, el cual coincide con la varianza de la población (Gallardo, 2006).

Posteriormente, para evaluar el efecto de la ZM sobre los parámetros de mineralización se analizaron modelos mixtos según campaña productiva. El modelo mixto correspondiente fue:

$$\text{Ec. 9. } Y_i = \beta_0 + \beta_i X_i + Z_i b_i + \varepsilon_i$$

Donde Y_i contiene los i valores de N_0 , N_{an} o N_{ap} . Las variables explicativas están dadas por dos componentes: efecto fijo corresponde a $ZM=X_i$; y el efecto aleatorio b_i correspondiente a la estructura espacial de los residuos. ε_i corresponde al error aleatorio para el punto i (con distribución normal, media cero y desviación típica σ). La relación espacial de los errores de los modelos se ajustaron a tres diferentes funciones de covarianza isotrópicas de la distancia, como esférica, exponencial, cuadrática y gaussiana. Se obtuvo el estimador del efecto fijo ZM como estimación generalizada de mínimos cuadrados y al REML estimación de los parámetros de covarianza. Los parámetros B del modelo fueron estimados mediante máxima verosimilitud haciendo uso del programa Infostat Profesional (Di Rienzo et. Al., 2011) y R. Se analizaron los

modelos teniendo en cuenta la estructura espacial de los residuos y modelos que no lo contemplaban, seleccionando el modelo que presentó menor criterio de información de Akaike (AIC) y criterio de información bayesiano (BIC).

La predicción de N0 a partir de Nan se evaluó a través de modelos lineales mixtos. En este caso la variable dependiente fue el N0, mientras que la variable explicativa fue el Nan. Se evaluaron modelos con distinta estructura de correlación de errores (gaussiana, cuadráticas, lineales, esférica y exponencial) eligiéndose el mejor modelo a través del criterio AIC y BIC

Objetivo 2.

Los datos obtenidos de índices espectrales mediante radiómetro proximal se analizaron a través de modelos mixtos. En un primer paso se analizaron los IE en función de las ZM para dos estadios fenológicos en ambas campañas. En este caso el efecto fijo corresponde a las ZM y el aleatorio correspondiente a la estructura espacial de los residuos. Este análisis se realizó sobre la grilla (campaña 2012-2013) y transecta (campaña 2013-2014).

Por último, se relacionaron los IE en función de los distintos parámetros de mineralización. Se realizaron correlaciones de Pearson entre los IE y los parámetros de mineralización. Asimismo, en aquellas correlaciones estadísticamente significativas, se ajustaron los correspondientes modelos mixtos (IE en función de los distintos parámetros de mineralización).

Para todos los casos se evaluaron modelos que contemplaron la estructura espacial de los errores y modelos que no lo hicieron. La selección del modelo fue aquel que presentó menor AIC y BIC. En todos los casos pertinentes se realizaron comparaciones de medias mediante el método LSD Fisher.

Los IE capturados mediante plataforma aérea se analizaron a través de modelos mixtos. Se evaluó el efecto de los ambientes y dosis para los distintos IE. Asimismo, se realizó la correlación de Pearson entre los IE y los rendimientos obtenidos mediante el monitor.

Objetivo 3

Los datos de rendimiento, N_{s+f} , N_{ap} y N_{an} se estudiaron a través de un análisis estadístico descriptivo (Di Rienzo et al., 2011). Se ajustaron funciones de rendimiento y de respuesta a

escala de lote a partir de variables explicativas (N-nitrato a la siembra más fertilizante, N mineralizado aparente, N anaeróbico y zonas de manejo (como variable dummy)), a través de modelos lineales de efectos mixtos (R. R Core Team, 2013). Los modelos lineales pueden ser definidos de manera estándar a partir de la siguiente forma (Ecuación 11):

$$\text{Ec. 11. } Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{p-1} X_{p-1} + \epsilon_i$$

Donde: Y_i se denomina al valor de la variable respuesta (rendimiento de maíz o respuesta), β_0 la intercepta en el origen de coordenadas, β_i valor particular de la pendiente de la recta, X_i valor de la variable explicativa (N_{s+f} , Nap, Nan y ZM) en ese mismo punto de muestreo i y ϵ_i representa el error aleatorio siguiendo una distribución normal con media cero y desviación típica σ : $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$.

El modelo lineal de efectos mixtos combina los pasos anteriores en un único modelo (Ecuación 12):

$$\text{Ec. 12. } Y_i = X_i \beta_i + Z_i b_i + \epsilon_i$$

Al igual que antes, Y_i contiene uno de los valores de la variable respuesta rendimiento de maíz o respuesta y ϵ_i el error aleatorio para el punto i siguiendo una distribución normal con media cero y desviación típica σ : $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$. Hay dos componentes en este modelo que contienen las variables explicativas; X_i fijo \times término β_i , correspondiente a las variables N_{s+f} , Nan, Nap y ZM, y al azar $Z \times$ término b_i . Por lo tanto, los modelos se denominan de efectos mixtos debido a un efecto fijo y un componente aleatorio. Una restricción impuesta a las variables dummy es que su sumatoria debe ser igual a cero; lo que permite la estimación del efecto de las diferentes ZM dentro del lote. Los parámetros del modelo de regresión fueron estimados mediante máxima verosimilitud haciendo uso del programa de estadística R (R. R Core Team, 2013).

Estos modelos evalúan la dependencia espacial de los residuos, por lo que cada muestra fue georreferenciada a una posición dentro de las parcelas en estudio. Se evaluó la estructura espacial de los modelos por medio de gráficos de burbujas. En este tipo de gráficos el tamaño de las burbujas es proporcional al valor de los residuales, siendo las burbujas oscuras los residuos negativos y las claras los residuos positivos.

Se ajustaron modelos con distinta estructura de correlación de errores (gaussiana, cuadráticas, lineales, esférica y exponencial) eligiéndose el mejor modelo a través del criterio AIC y BIC (Akaike, 1974).

Condiciones climáticas y meteorológicas.

El partido de Leandro N. Alem se caracteriza por tener un clima templado húmedo, ubicándose ligeramente por encima de la isohieta de los 1.000 mm anuales.

La campaña 2012-2013 presentó precipitaciones por debajo de la media para los meses de diciembre y enero. Sin embargo, las elevadas precipitaciones de los meses de octubre y noviembre permitieron la recarga del perfil por lo que las bajas precipitaciones de los meses mencionados parecieron no ser determinantes en el rendimiento. La campaña siguiente, 2013-2014, presentó lluvias más cercanas a la media en los meses de octubre y noviembre, un déficit en diciembre y seguido de abundantes precipitaciones durante el mes de enero. Las precipitaciones acumuladas en el periodo del cultivo de maíz (septiembre a marzo) fueron de 893 y 750 mm para las campañas 2012-2013 y 2013-2014, respectivamente (Figura 7).

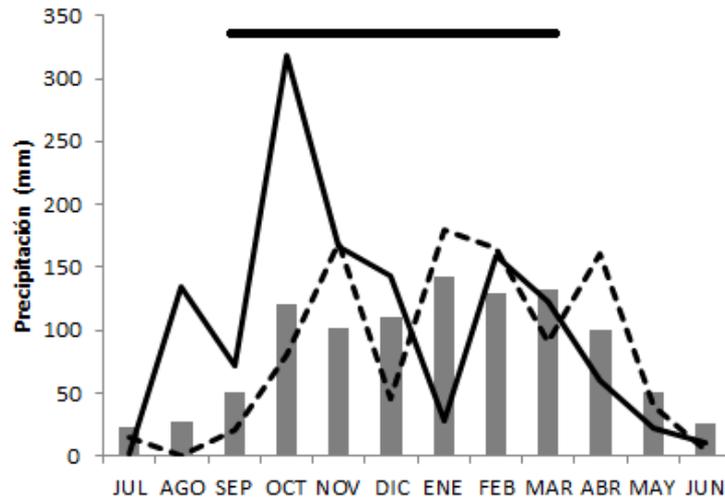


Figura 7-Precipitaciones promedio mensuales para una serie de 44 años (1970-2014) en la localidad de Vedia (columnas) para los meses comprendidos entre agosto de 2012 y julio de 2013 (línea llena) y agosto de 2013 y julio de 2014 (línea punteada). La línea negra horizontal muestra el periodo del cultivo de maíz.

En cuanto a las temperaturas, en ambas campañas no se observaron mayores diferencias con respecto a la media histórica, excepto para el mes de julio donde en ambas se observó que la media de las campañas es algo menor a la histórica, tendencia que se revirtió en el mes de mayo (Figura 8).

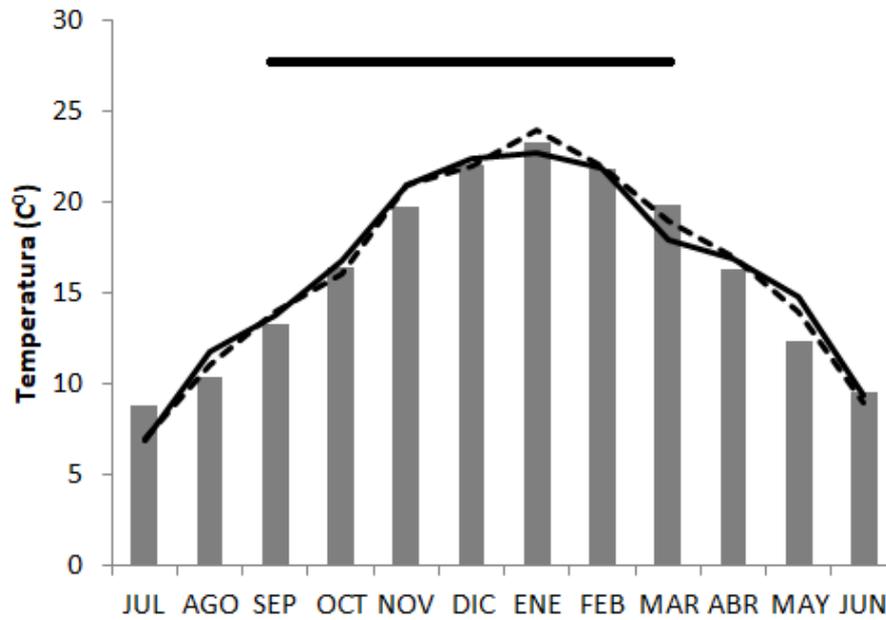


Figura 8-Temperatura media mensual para una serie de 44 años (1970-2014) en la localidad de Vedia (columnas), para los meses comprendidos entre agosto de 2012 y junio de 2013 (línea llena) y agosto de 2013 y junio de 2014 (línea punteada). La línea negra horizontal muestra el periodo del cultivo de maíz.

Capítulo 3. Resultados y Discusión

Objetivo 1

La variabilidad de la mineralización se muestra en la Tabla 2, habiéndose determinado una amplia dispersión a escala intralote. Los coeficientes de variación de las 3 variables para la campaña 12/13 fueron medios según el criterio de Dahiaya et al, 1984 (siendo de 30, 27 y 29 % para el N0, Nan y Nap, respectivamente). Para la campaña siguiente los coeficientes de variación presentaron mayor diferencia, siendo de 25 y 35% para el Nan y Nap, respectivamente. El mayor coeficiente observado en Nap, respecto a Nan se debe a la variabilidad de este parámetro entre los dos lotes muestreados.

Tabla 2-Estadística descriptiva de N potencialmente mineralizable (N0), N anaeróbico (Nan), N mineralizado aparente (Nap) para las campañas 2012/2013 y 2013/2014. Para la campaña 2013/2014 se consideraron conjuntamente todos los sitios.

		Media	Desvío Estandar	Mínimo	Máximo	Asimetría	n
2012/2013	N0 kg N ha ⁻¹	419	125	137	819	0.71	111
	Nan mg kg ⁻¹	31.5	8.5	14	54	0.46	111
	Nap kg N ha ⁻¹	142	41.3	81	293	1.17	111
2013/2014	Nan mg kg ⁻¹	40.3	10.2	12	66	0.31	120
	Nap kg N ha ⁻¹	130	45.9	52	275	0.88	80

Los resultados de N0 presentaron un rango de 682 kg N ha⁻¹. Estos resultados fueron menores a los hallados en el SE bonaerense (Echeverría et al., 2000). El promedio de N0 fue de 104 mg N kg⁻¹ suelo, mientras que los reportados por Echeverría fue de 160 mg N kg⁻¹. Esta diferencia puede surgir de que los suelos del SE bonaerense presentaron mayor concentración de materia orgánica, variando entre 20,9 y 71,6 g kg⁻¹ (diferencia del 57% superior respecto a este ensayo)

y mayor concentración de arcilla, desde 124 a 293 g kg⁻¹ y a la menor profundidad de muestreo (20 cm) respecto al muestreo de este estudio (30 cm). En el SE bonaerense el rango de potencial de mineralización fue de 50 a 250 kg de N ha⁻¹ (Echeverría & Bergonzi, 1994). No solo factores edáficos afectan la magnitud del N₀, sino también factores metodológicos en la técnica de laboratorio (Cabrera & Kissel, 1988; Rice & Havlin, 1994) y también en los modelos de ajustes de los datos (Cabrera & Kissel, 1988, Sharifi et al., 2007). Entre los primeros se encuentran el procedimiento y el tiempo de duración de la incubación y la estación del año para la obtención de la muestra (Cabrera & Kissel, 1988). También es regulado por el grado de disturbio de la muestra (secado y tamizado vs. no disturbado), ciclos de humedecimiento-secado y ciclos de congelado-descongelado (Rice & Havlin, 1994). Entre los modelos de ajustes hay variaciones según se aplique modelos exponenciales simples o doble exponencial (Cabrera & Kissel, 1988, Sharifi et al., 2007).

Considerando los 4 sitios, el Nan presentó valores entre 12 y 66 mg kg⁻¹ (Tabla 3). A nivel provincial se realizó un mapa de la distribución Nan, siendo los resultados del presente estudio similares con los encontrados en dicha publicación (Reussi Calvo et al., 2014). Por otro lado, difieren respecto a los publicados por Zubillaga et al. (2009) donde se encontraron valores entre 33 y 70 mg kg⁻¹ en un ensayo a escala intralote para Hapludoles típicos y énticos del oeste bonaerense.

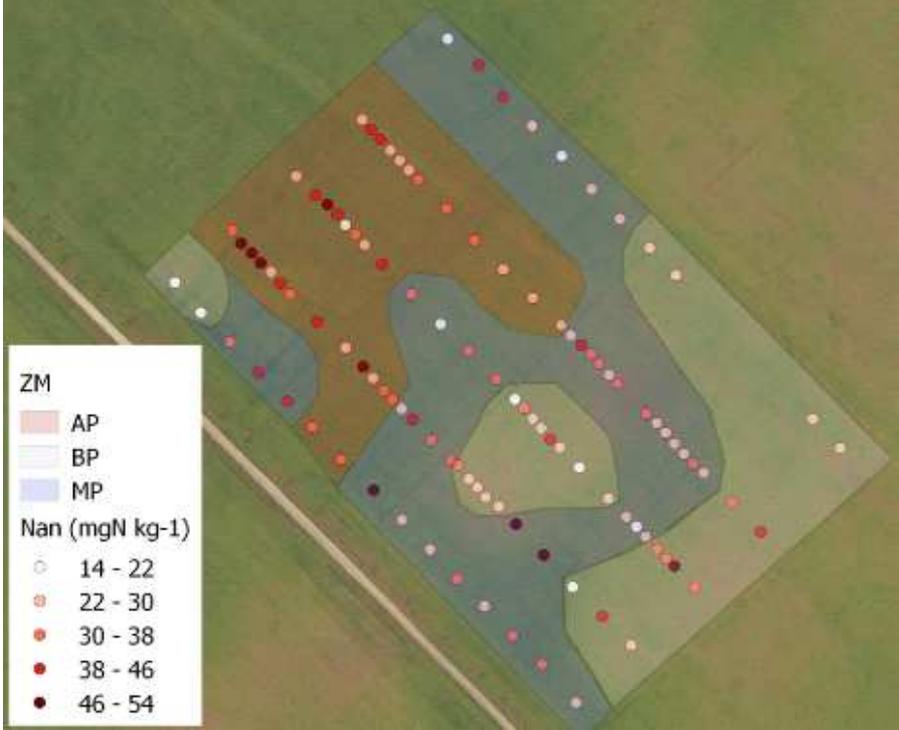
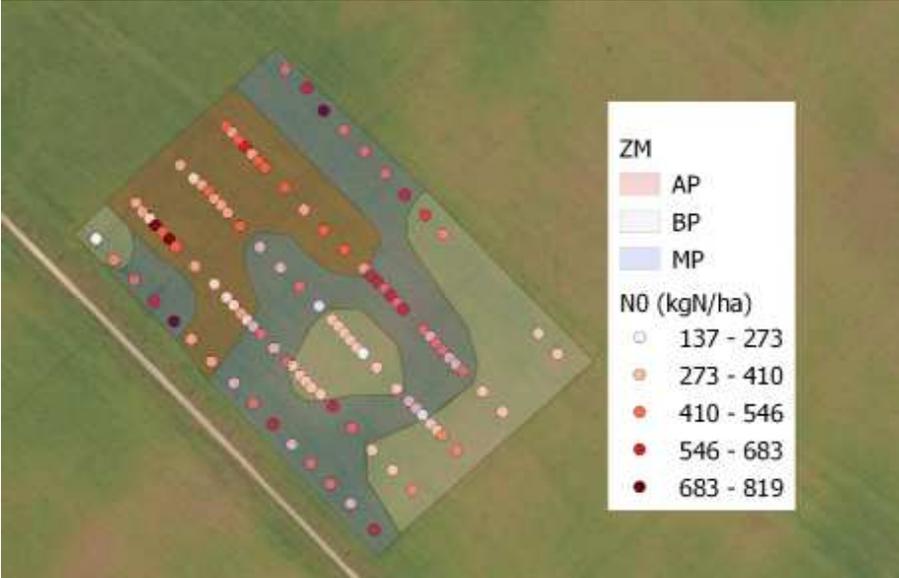
Los valores promedio, mínimos y máximos de Nap fueron similares para ambas campañas. En concordancia con el resto de los parámetros se observa un amplio rango de valores obtenidos, siendo el promedio del valor máximo y mínimo de 284 y 66 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Los valores de asimetría de las variables N₀ y Nap para la primera campaña sugieren que la distribución no es normal. Por esta razón, y debido a que es necesario corregir normalidad antes del análisis geoestadístico se prosiguió a hacer la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov (prueba recomendada sobre la de Shapiro cuando el set de datos es mayor a 50 muestras). Los

valores p de dicha prueba de bondad de ajuste fueron menores a 0.001 indicando falta de normalidad en el set de datos y la necesidad de transformarlos.

Caracterización de la autocorrelación espacial en la mineralización del N

La campaña 2012-2013 presentó una gran variabilidad para los parámetros Nan, Nap y N0, donde se observaron sectores con mayor frecuencia de valores altos hacia el noroeste y sectores con mayor frecuencia de valores relativamente más bajos hacia el sudeste (Figura 9). La variabilidad, según los rangos propuestos anteriormente, es considerada media para los tres parámetros analizados.



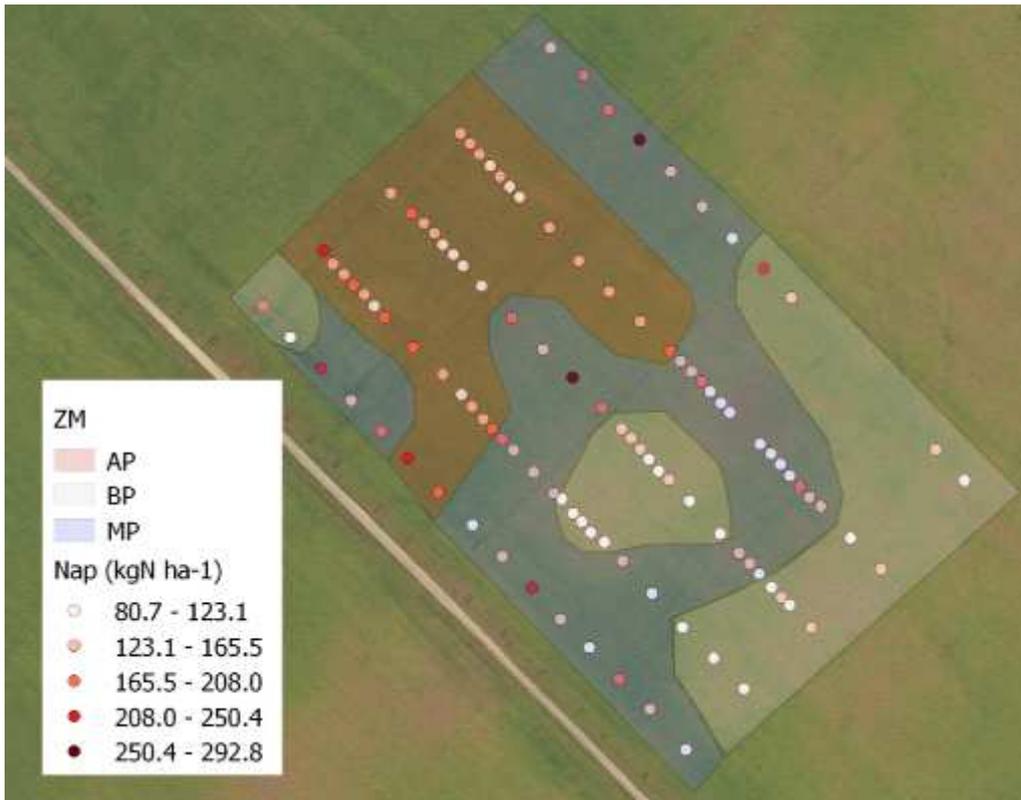
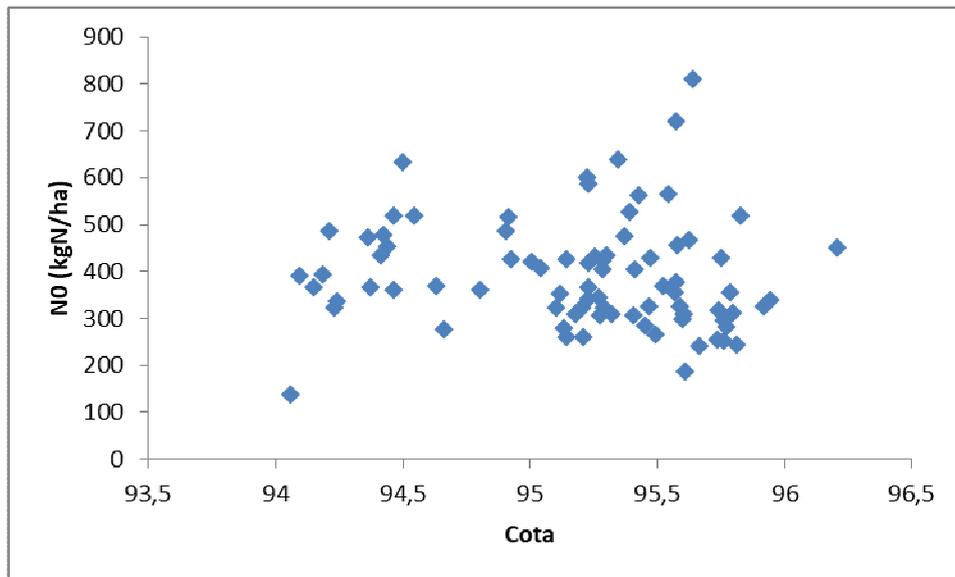
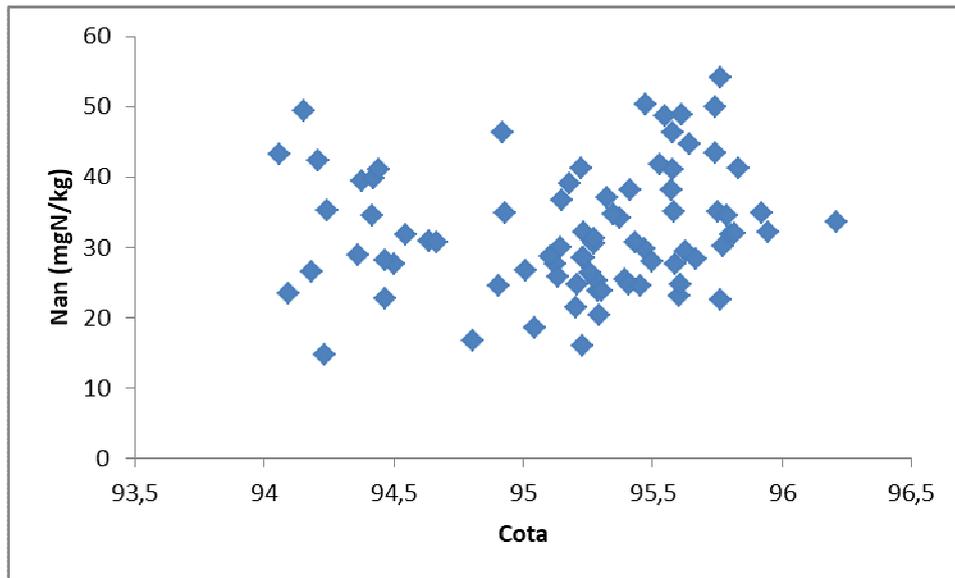


Figura 9-Distribución espacial del Nap, Nan y N0 para la campaña 2012-2013.

Al relacionar los valores de las variables con el valor de cota se observa una baja relación entre ambas variables (Figura 10).



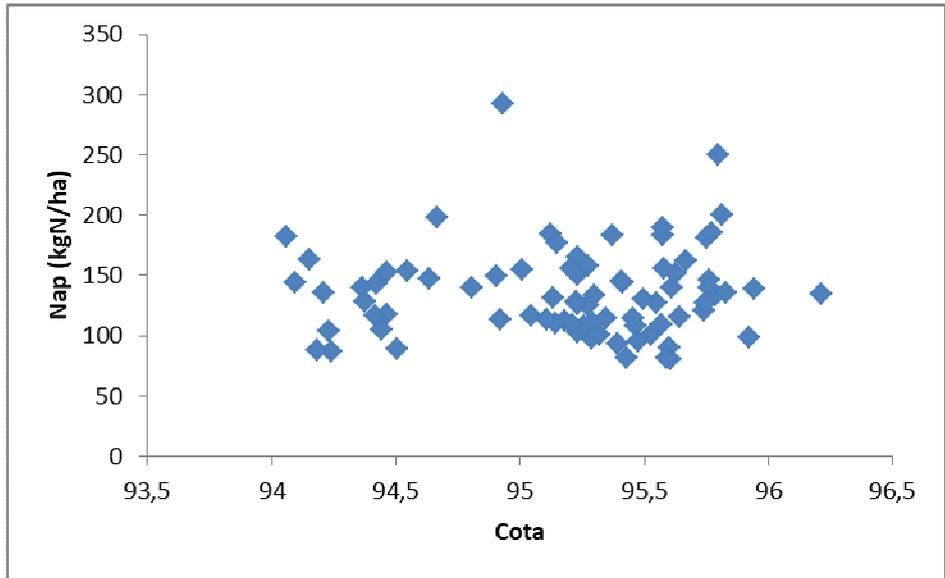


Figura 10-Relacion entre las variables Nan, N0 y Nap con la cota correspondiente a cada punto de la grilla.

Los coeficientes de asimetría son distintos según el parámetro analizado. El Nan muestra una distribución normal, el N0 se aleja levemente de la normalidad mientras que el Nap es definitivamente no normal (Tabla 2). Para observar la normalidad en el set de datos también se realizan gráficos de distribución (Figura 11). En los gráficos se observa que el N0 y Nap presentan asimetría positiva siendo necesario realizar una transformación para normalizar los datos.

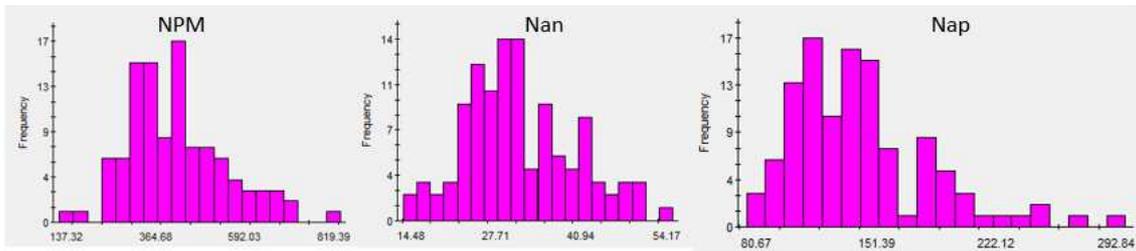


Figura 11-Distribución de frecuencia para N0, Nan y Nap.

La transformación logarítmica para el Nap y la raíz cuadrada para el N0 permitieron normalizar los datos, siendo los coeficientes de asimetría de 0.43 y 0.27 respectivamente, por lo que se

reestimaron los parámetros (Tabla 3). Asimismo, se observan los gráficos de frecuencia para las variables transformadas (Figura 12).

Tabla 3- Estadística descriptiva para las variables transformadas N0 y Nap

	RaizN0 (kgn ha ⁻¹)	LogNap (kgn ha ⁻¹)
Media	20.3	2.1
Min	11.7	1.9
Max	28.6	2.5
Desvío St	3.01	0.1
Asimetría	0.27	0.43

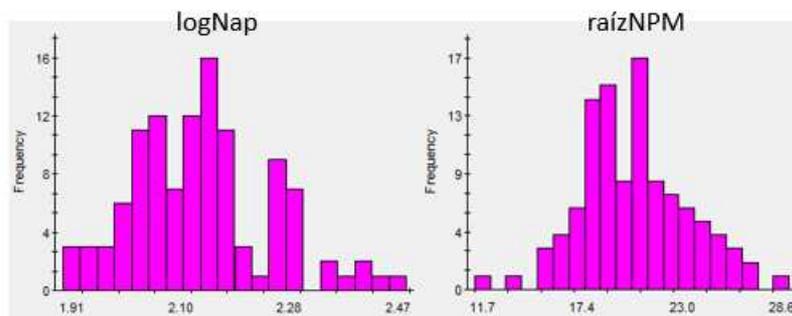


Figura 12- Distribución de frecuencia para las variables transformadas N0 y Nap.

Se determinaron los índices de Moran y la autocorrelación espacial para determinar la presencia de dependencia espacial. El índice de Moran varía de -1 a +1, donde en ambos extremos se observa alta dependencia espacial, mientras que valores cercanos a cero significan ausencia de dependencia espacial (Moran, 1950). Este índice es semejante al coeficiente de correlación de Pearson, pero agregándose una matriz de distancia. Las tres variables presentaron dependencia espacial, observándose la misma a corta distancia (Tabla 4). La variable con mayor dependencia fue el logaritmo de Nap, observándose esta dependencia hasta los 24 m. La raíz de N0 mostró dependencia hasta los 35 m. La variable con menor dependencia fue el Nan, siendo la misma solo en los primeros 10 metros. Estas dependencias se pudieron capturar por el muestreo anidado, el cual permitió introducir puntos de muestreo a corta distancia.

Tabla 4- Índice de Moran para Nan, logNap y raízN0. Campaña 2012/13

Distancia (m)	Índice de Moran			
	Nan	LogNap	RaízN0	Pares de datos
10	0.27	0.44	0.39	49
24	0.09	0.28	0.32	96
35	-0.09	0.00	0.14	81

Asimismo, se observaron las mismas tendencias para los coeficientes de autocorrelación espacial (Tabla 5).

Tabla 5- Coeficientes de autocorrelación para Nan, logNap y raízN0. Campaña 2012/13

Distancia (m)	Coeficiente de autocorrelación			
	Nan	LogNap	RaízN0	Pares de datos
10	0.24	0.45	0.34	49
24	0.1	0.29	0.32	96
35	-0.09	-0.02	0.17	81

En un segundo paso se realizaron los semivariogramas, los cuales modelan la estructura, a partir de los cuales se obtienen distintos parámetros (rango, nugget y variación estructural). Al ajustar los datos a los modelos se estimaron los parámetros del mismo: rango (A_0), variación en el origen o nugget (C_0) y variación estructural (C) (Figura 13).

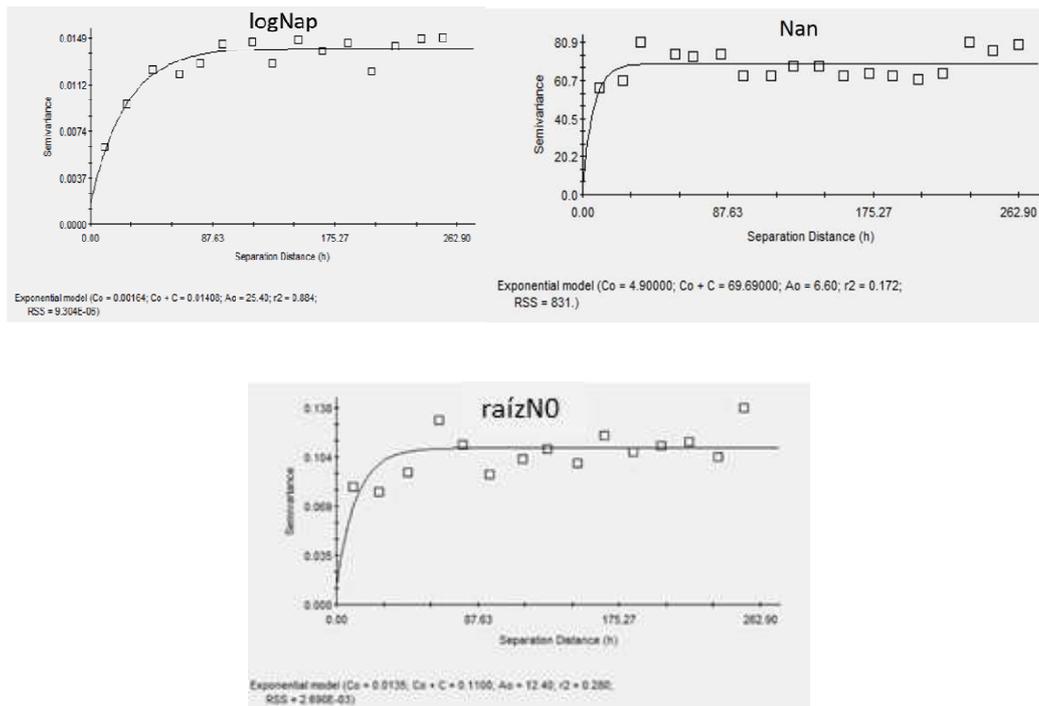


Figura 13- Semivariogramas de las variables logNap, Nan y raízN0.

El grado de autocorrelación espacial se analizó mediante la relación $C/(C_0+C)$, adoptando tres clases propuestas en Cambardella et al. (1994): débil ($< 0,25$), moderada ($0,25-0,75$), y fuerte ($> 0,75$). Bajo este criterio se observó para las tres variables fuerte dependencia espacial, ya que los valores de la relación fueron de 0.88, 0.88 y 0.93 para el logNap, raízN0 y Nan respectivamente. Este criterio, muy utilizado en la bibliografía, no tiene en cuenta que se forzó a la semivarianza a pasar por cero, por lo que, al tener este dato en cuenta, la única variable con fuerte autocorrelación es el LogNap. Ortega & Mardonez (2005), utilizando el mismo criterio de ajuste del semivariograma encontraron estructura especial en parámetros de mineralización en Chile. En el estado de Kansas Mahmoudjafari et. al. (1997) encontraron una baja autocorrelación del N0 en un muestreo intensivo de 108 nodos. A diferencia de los resultados obtenidos en esta tesis, Alesso et al. (2012), no encontraron variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del horizonte superficial en un suelo de la pampa llana santafesina. Los suelos analizados presentan mayor variabilidad que las del estudio citado, y además se contó con el muestreo intensivo por ambiente (anidado) lo que permitió un mejor estudio de la variabilidad a corta distancia.

Interpolación kriging y mapas de validación cruzada

Una vez ajustados los variogramas de cada una de las variables se confeccionaron los distintos mapas interpolados (Figura 14). Las tres variables se comportan de distinta forma en el espacio. El Nan parece diferenciar la ZM AP respecto del de BP y MP. Las variables N0 y Nap presentan un comportamiento similar en el espacio, donde diferencian el ambiente de BP que se encuentra en el medio del lote y al sudeste pero no así el que se encuentra en el extremo noroeste.

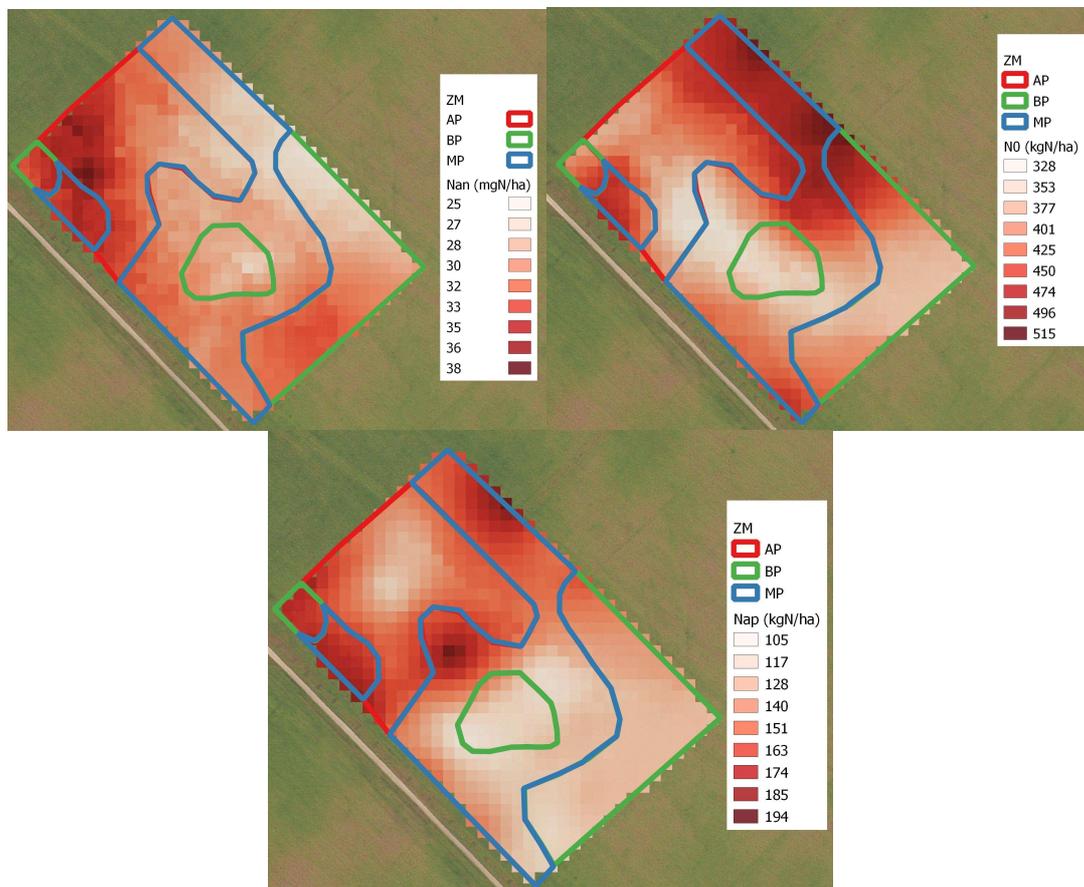


Figura 14-Mapas interpolados de Nan, N0 y Nap mediante kriging

Para estudiar el grado de ajuste del mapa previamente presentado se realizaron las correspondientes validaciones cruzadas (Figura 15). Se puede observar que el peor ajuste es el que corresponde al Nan que presenta un R2 de 0.026 y un error estándar de la predicción de 8.6 mgN kg⁻¹. A este lo sigue el N0 con una mejora considerable en el coeficiente de ajuste siendo

este 0.17 y un error de la predicción de 112 kg N/ha. La variable con mejor predicción fue el Nap, con un R^2 de 0.18 y un error de 36.5 kg N/ha. Estos datos corroboran lo observado en los semivariogramas analizados en la sección anterior. Estos ajustes se podrían mejorar si se utilizaran covariables que estén relacionadas a la variable respuesta (Zubillaga et. al 2012).

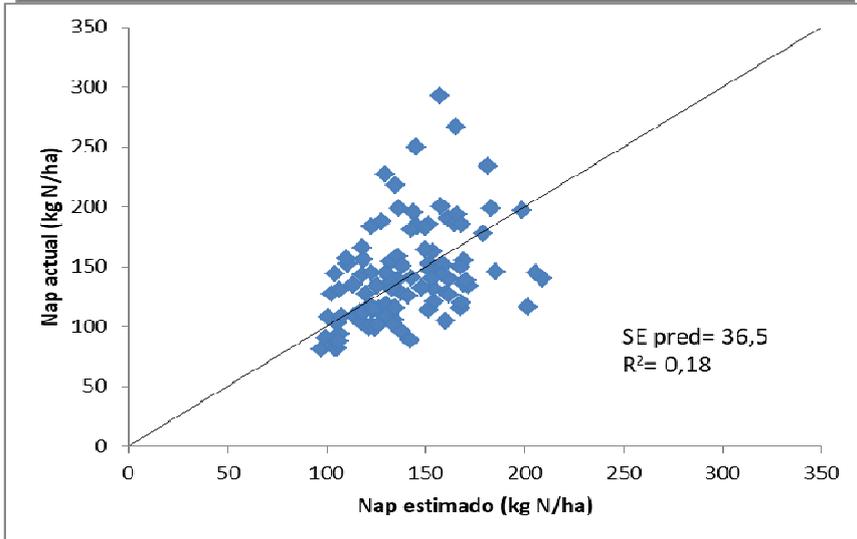
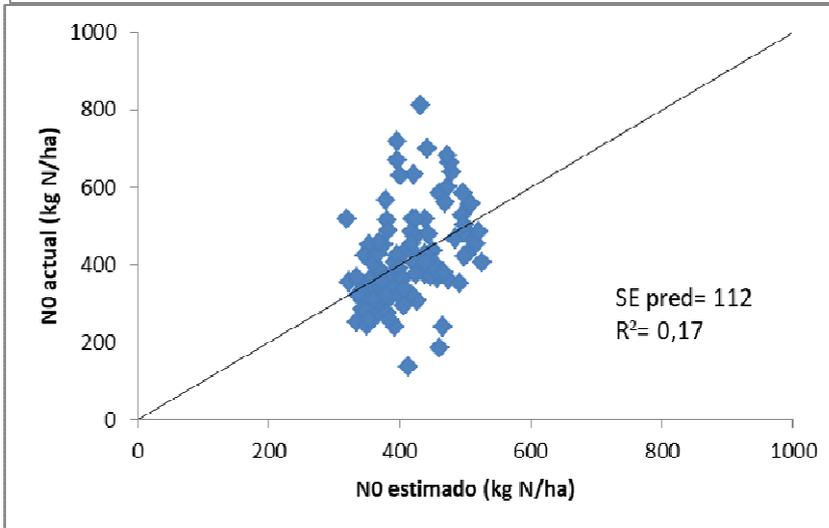
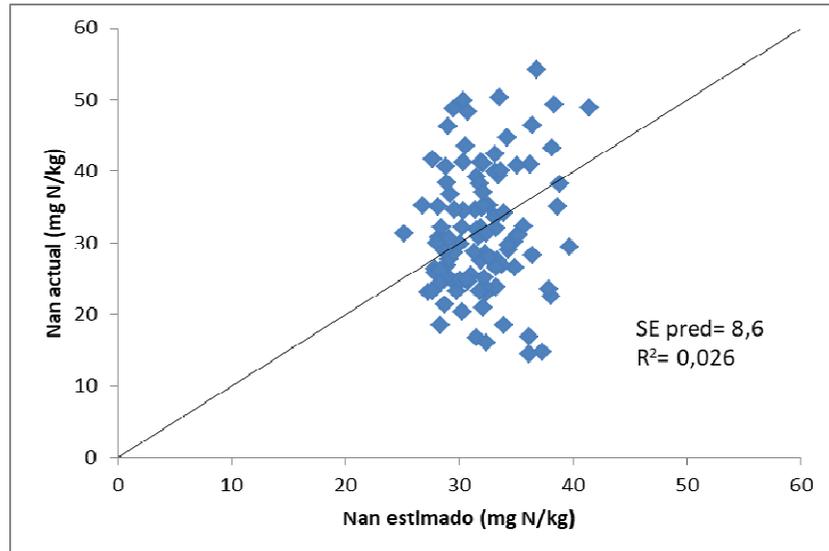


Figura 15-Gráficos de validación cruzada para las variables Nan, NO y Nap.

Caracterización de la variabilidad del proceso de mineralización de N en ambientes delimitados a escala intralote

Los resultados por ZM de los distintos parámetros de la mineralización fueron diferentes según la campaña (Tabla 6). Para la campaña 2012-2013 se observaron diferencias significativas entre ZM en los tres parámetros analizados. Para el N0, la ZM de media productividad se diferenció de las demás, siendo superior en un 21%. Por otro lado, el Nan y el Nap presentaron diferencias significativas entre las ZM contrastantes (AP y BP).

Tabla 6-Comparación de medias de N potencialmente mineralizable (N0), N anaeróbico (Nan), N mineralizado aparente (Nap) por ZM y campaña productiva

		N0 (kg N ha ⁻¹)		Nan (mg kg ⁻¹)		Nap (kg N ha ⁻¹)	
2012-2013	AP	395	b	34.29	a	157	a
	MP	474	a	31.34	ab	153	a
	BP	387	b	28.78	b	127	b
	valor <i>p</i>		0.0132		0.0281		0.0354
2013-2014	AP			41.7	a	134.2	a
	MP			43.3	a	139.3	a
	BP			40.4	a	111.4	a
	valor <i>p</i>				0.4496		0.1096

En la campaña 2013-14, no se encontraron interacciones entre ZM y lote. Asimismo, no se determinaron diferencias significativas entre ZM, pudiendo deberse a la mayor variabilidad encontrada entre lotes y ZM dentro de ellos y al análisis del set de datos conjunto y no por lote. Por ejemplo, las diferentes historias agrícolas, el Lote 2 tuvo pasturas desde el 2008 hasta el 2012, luego de la misma hubo vicia/soja (2012/2013) y posteriormente se implantó maíz para conducir el ensayo. Este lote fue el que presentó los mayores valores de Nan. Este parámetro es sensible a los cambios producidos por las prácticas de manejo y sistemas de labranza (Fabrizzi et al., 2003; Genovese et al., 2009). En el SE bonaerense se encontró que el Nan tiene una relación inversa con los años desde la última pastura. En este sentido, después de 20 años de agricultura se redujo un 35% la cantidad de Nan, pasando de 61 mg kg⁻¹ a valores cercanos a 40

mg kg⁻¹ (Calviño & Echeverría, 2003). También en suelos bajo pastura el Nan fue de 200 mg kg⁻¹ mientras que en situaciones de manejo agrícola prolongado fue de 154 mg kg⁻¹ (Echeverría et al., 2000), representando una disminución del 33% del original.

Numerosos trabajos determinaron incrementos en los niveles de Nan frente a aumentos en la fracción fina de los suelos como los observados en el presente trabajo, tanto a nivel nacional (Reussi Calvo et al., 2013, Diovisalvi et al., 2010) como internacional (Sharifi et al., 2008). Las ZM con menor proporción de arena presentaron mayor Nan. Entre los ambientes BP y AP hay una diferencia textural de un 8% para el contenido de arena y 3% en el contenido de arcilla para los ambientes de la campaña 2012/2013 (datos no mostrados). Otros factores que pueden explicar las diferencias encontradas son los mayores contenidos de materia orgánica y una mayor capacidad de retención hídrica. Para la campaña 2013/2014 se observaron diferencias de materia orgánica entre los ambientes delimitados. Para el lote 1 el ambiente de AP la concentración de materia orgánica fue de 3.5%, mientras que en BP fue de 2.9%. El lote 2 no presenta diferencias entre ambientes, siendo el porcentaje de 3.1%. También el lote 3 presentó diferencias entre ambientes, siendo del 3.3% para AP y 2.4% para BP.

En el sur de Santa Fe se evaluó la contribución del Nan al diagnóstico de N en maíz a escala intralote (Reussi Calvo et al., 2013). Para los ambientes de alta productividad los valores de Nan se encontraron en un rango de 41 a 82 mg kg⁻¹, mientras que para los de media productividad de 31 a 42 mg kg⁻¹ y para los de baja productividad el rango fue de 19 a 25 mg kg⁻¹. Los ambientes productivos presentaban diferencias importantes en el contenido de materia orgánica y proporción de arena, lo que explicó las diferencias encontradas entre los ambientes. Las diferencias en materia orgánica fueron del orden de 1,7% entre los ambientes de máxima diferencia en productividad (Reussi Calvo et al., 2013). En este caso la mayor diferencia en materia orgánica se presenta en el lote 3 de la campaña 2013/2014 siendo la misma de 0,9%. En publicaciones más recientes (Orcellet et al., 2017) se definieron valores de Nan de 30 y 29 mg kg⁻¹ para la zona en estudio.

Relación entre el N incubado en aerobiosis (N0) y el N incubado en anaerobiosis (Nan)

La asociación del N0 a partir del Nan de los datos (Figura 16) presentó un bajo grado de relación ($R^2=0.13$, $p=0.17$).

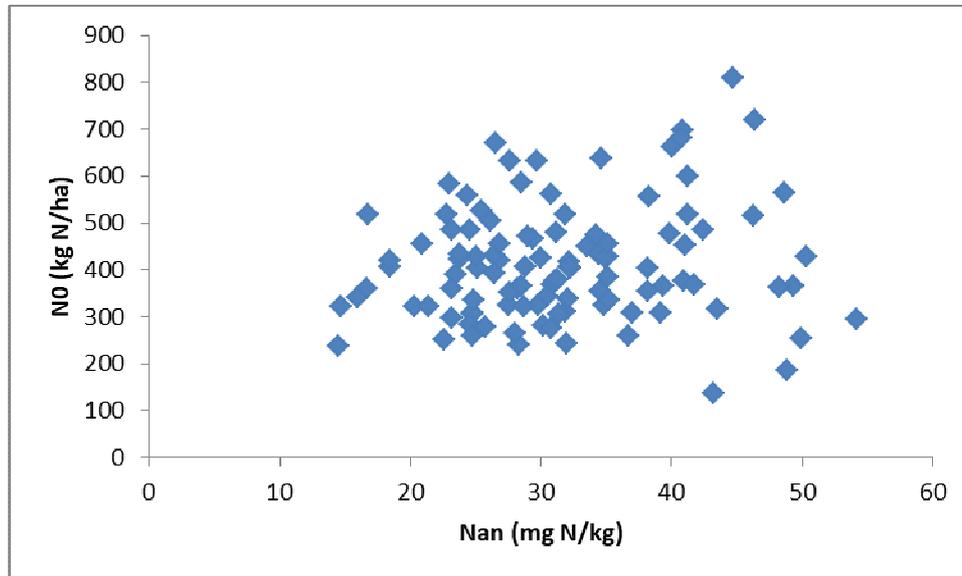


Figura 16-Relación entre N0 y Nan para la campaña 2012-2013

Se ajustaron modelos mixtos donde se modeló la estructura espacial de los errores y modelos mixtos asumiendo independencia de las observaciones con el fin de analizar si mejoraría la predicción del N0. Estos últimos fueron los que presentaron menor AIC y BIC y en este no se observó una relación entre ambas variables (valor $p = 0.17$).

Sin embargo, se encontraron entre ambas variables una relación consistente en ensayos previos (Redel, 2012). En este caso, las muestras provenían de ZM delimitadas a escala de lote, no de una grilla de muestreo sistemático.

Las correlaciones observadas en la bibliografía provienen de ensayos donde las situaciones fueron contrastantes (por ejemplo, muestreos puntuales en distintas ZM, manejos, años desde última pastura), pero no se ha analizado la continuidad de la relación en el espacio a corta distancia. Es posible que se necesite de un muestreo más intensivo para encontrar correlaciones entre las variables. Por esta razón, no pudo estimarse a una escala de mayor resolución los

niveles de N potencialmente mineralizable a través de interpolación por métodos geoestadísticos.

Objetivo 2

Efecto de la mineralización de N y las ZM sobre los índices espectrales. Campaña

2012/13.

Los IE discriminaron las distintas ZM para los dos estadios analizados, donde para el estadio más temprano las diferencias fueron mayores (Tabla 7). En el estadio V8 el índice que permitió diferenciar las tres ZM fue REIP, mientras que NDVI, GNDVI y OSAVI diferenciaron dos ZM y la relación TCARI/OSAVI no diferencio ninguna. Estos índices son sensibles a diferenciar distinto vigor en estadios tempranos del cultivo, teniendo la desventaja de saturarse en canopeos densos (Haboudane et al., 2004). Esta sensibilidad a detectar diferencias en estado nutricional del cultivo hace que, por ejemplo, el NDVI sea utilizado en la re fertilización de cultivos tales como maíz y trigo (Raun et al. 2005; Melchiori et al. 2006). El análisis de imágenes satelitales permitió la delimitación de ZM y la determinación de dosis optima económica de N por ZM (Melion, 2019). En el estadio R1 el IE REIP siguió diferenciando las ZM, debido a que este IE está ligado a los pigmentos de las hojas, el cual no se saturara a altos IAF (Kemerer et al. 2007).

Tabla 7-Comparaciones múltiples del factor ZM para los distintos IE. Letras diferentes indican diferencias significativas entre ZM dentro de un mismo índice. Se indica el valor-p de comparación de medias por el método LSD Fisher (Alfa=0.05).

	ZM	NDVI	GNDVI	OSAVI	REIP	TCARI/OSAVI
V8	AP	0,76 ab	0,64 a	0,87 ab	733 a	22,5 a
	MP	0,77 a	0,63 a	0,88 a	731 b	23,3 a
	BP	0,74 b	0,6 b	0,84 b	729 c	23,8 a
	Valor p	0,0101	0,0002	0,0111	< 0,0001	0,4485
R1	AP	0,84 a	0,72 a	0,96 a	743 a	18,29 b
	MP	0,81 a	0,70 a	0,93 a	738 b	19,73 b
	BP	0,80 a	0,68 a	0,91 a	735 c	21,71 a
	Valor p	0,3351	0,1557	0,3628	0,0007	0,0029

Relación entre los índices espectrales y la mineralización de N. Campaña 2012/13.

Los IE se relacionan diferencialmente con la variabilidad de los parámetros de la mineralización a escala de lote (Tabla 8). Los coeficientes de correlación entre los distintos estimadores de la mineralización (Nan, N0 y Nap) y los índices capturados mediante el radiómetro portátil en distintos estadios del cultivo de maíz presentaron resultados contrastantes. La mayoría de los IE mostraron relación significativa con el Nap en ambos estadios, en cambio N0 presentó mejores asociaciones en R1 y Nan en V8. La mayor correlación se alcanzó en estadios avanzados (R1) y con el parámetro Nap. El Nap fue el parámetro que más correlaciones presentó, siendo la correlación significativa con todos los índices en V8 y tres índices en R1. Éste está muy influenciado por la biomasa acumulada, ya que es uno de los términos utilizados en su cálculo, por lo cual era esperable encontrar altas correlaciones.

Tabla 8-Coeficientes de correlación de Pearson entre parámetros de mineralización e índices espectrales. Correlación significativa $p < 0.05$ *. Campaña 2012/13.

		N0	Nan	Nap
V8	NDVI	0,09	0,27*	0,30*
	GNDVI	0,14	0,20	0,34*
	OSAVI	0,05	0,27*	0,31*
	REIP	0,24*	0,11	0,33*
	TCARI/OSAVI	-0,26*	0,19	-0,12
R1	NDVI	0,36*	-0,01	0,13
	GNDVI	0,35*	0,08	0,27*
	OSAVI	0,37*	-0,01	0,14
	REIP	0,26*	0,19	0,37*
	TCARI/OSAVI	-0,24*	-0,15	-0,42*

Las relaciones entre los IE y los parámetros de mineralización son todas positivas excepto la relación observada con el cociente entre OSAVI y TCARI. Es decir que, a medida que la oferta de N estimada es mayor, los valores de IE son mayores (Figura 17, 18, 19, 20, 21 y 22). Los estimadores N0 y Nan no necesariamente reflejan una mayor disponibilidad de N en la campaña en particular, ya que el proceso por el cual el nutriente queda disponible para la planta está influenciado por la temperatura y la humedad del suelo de dicha campaña. A nivel

zonal no es comparable el valor de Nan obtenido en la region sur de santa fe con los valores obtenidos en el sudeste bonaerense. Los modelos de aporte de N a partir de Nan deben ser ajustados regionalmente.

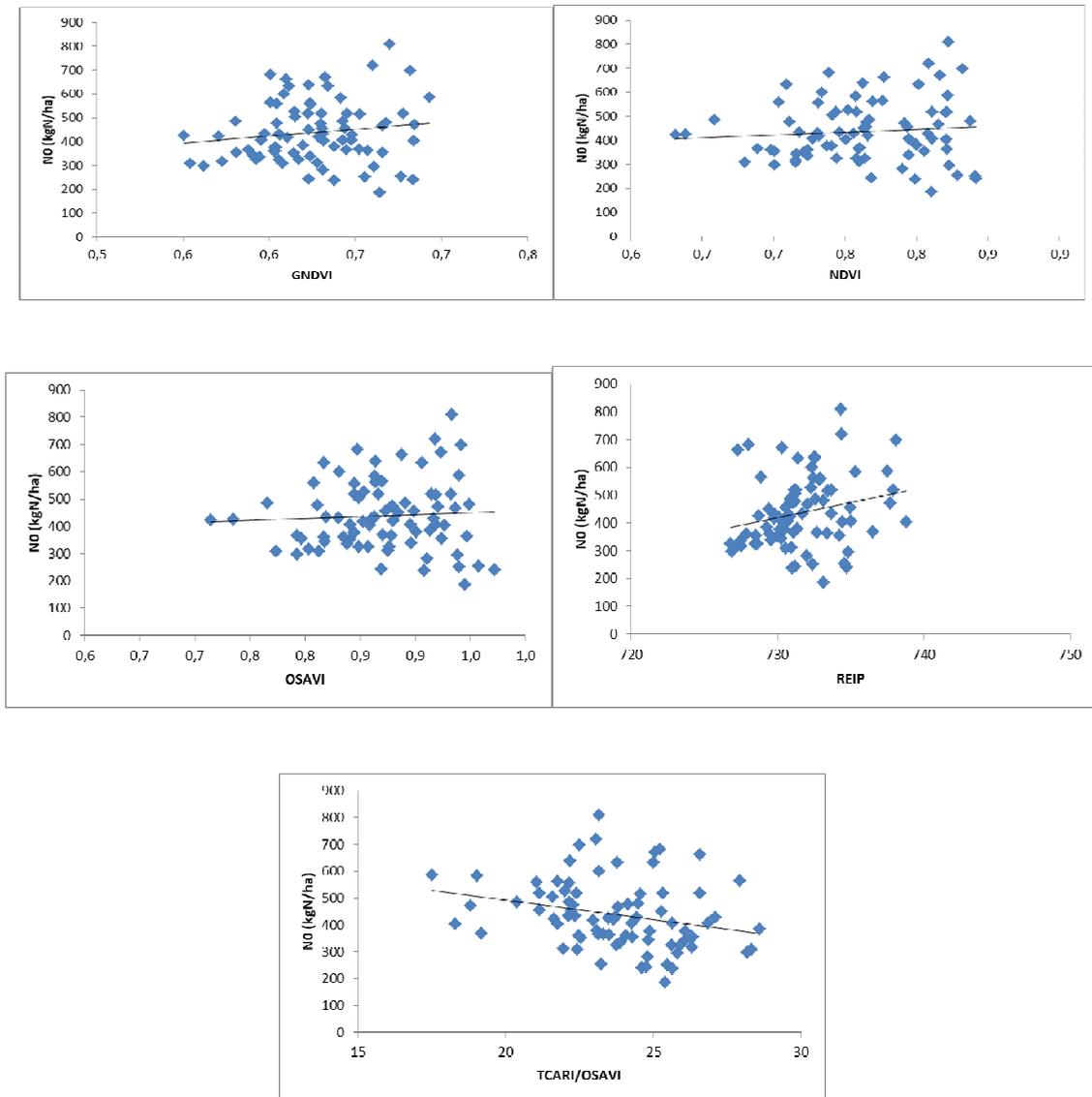


Figura 17-Relación entre los distintos IE capturados en V8 y N0.

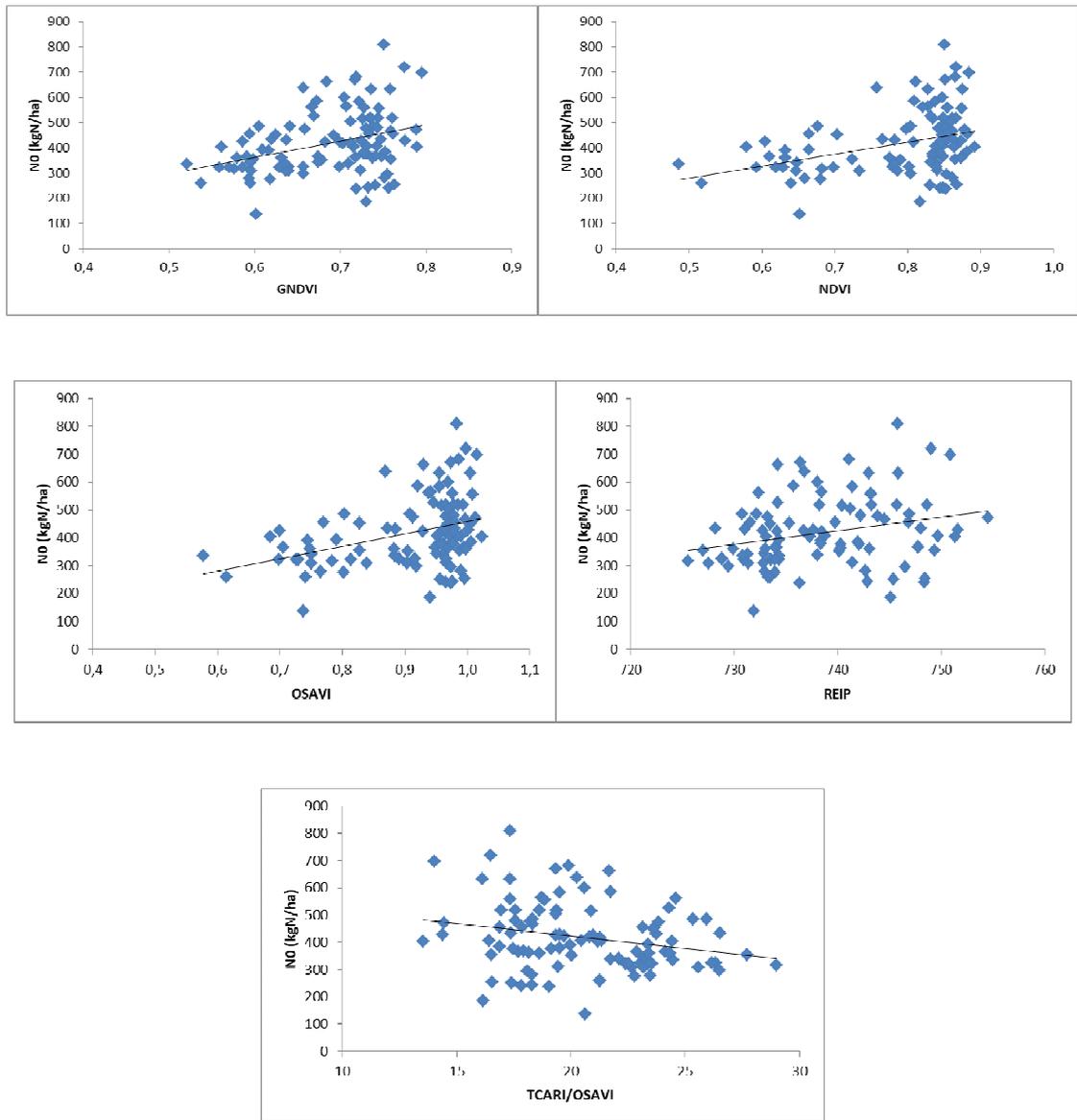


Figura 18-Relación entre los distintos IE capturados en V10 y N0.

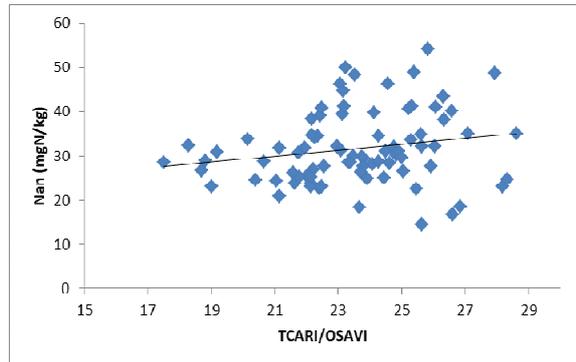
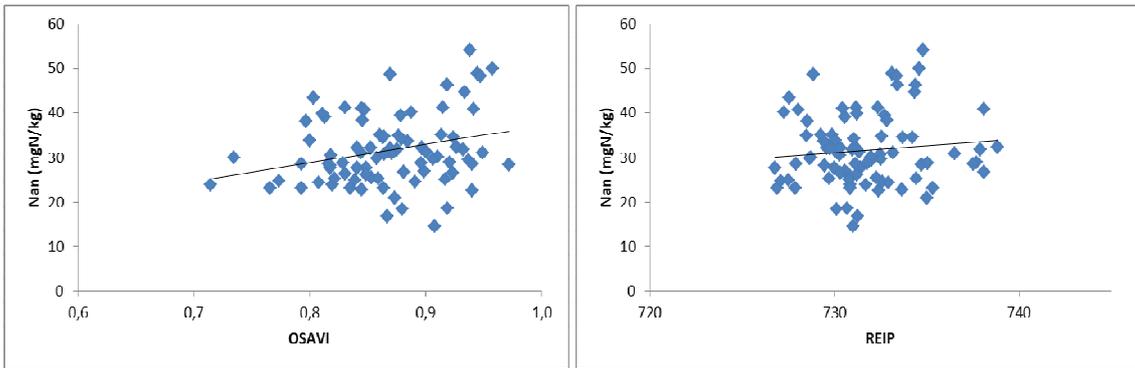
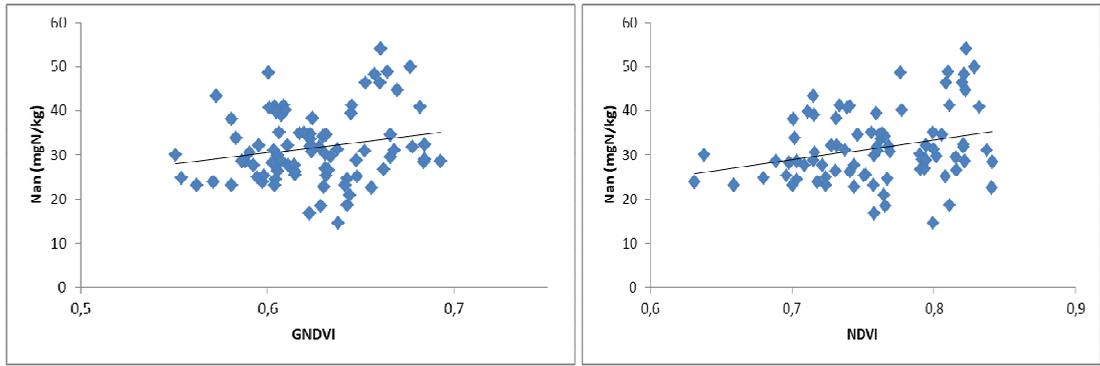


Figura 19-Relación entre los distintos IE capturados en V8 y Nan.

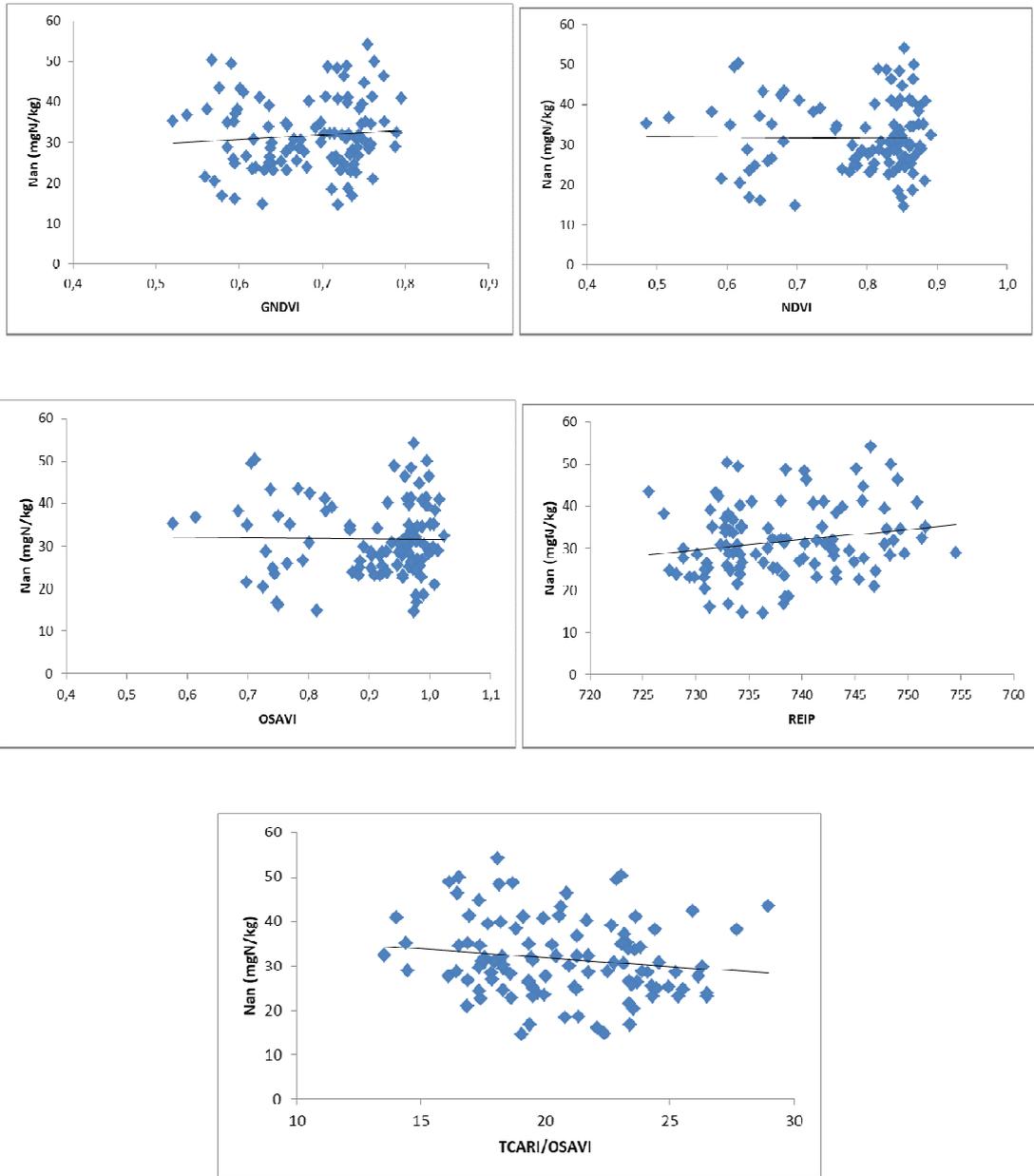


Figura 20-Relación entre los distintos IE capturados en V10 y Nan.

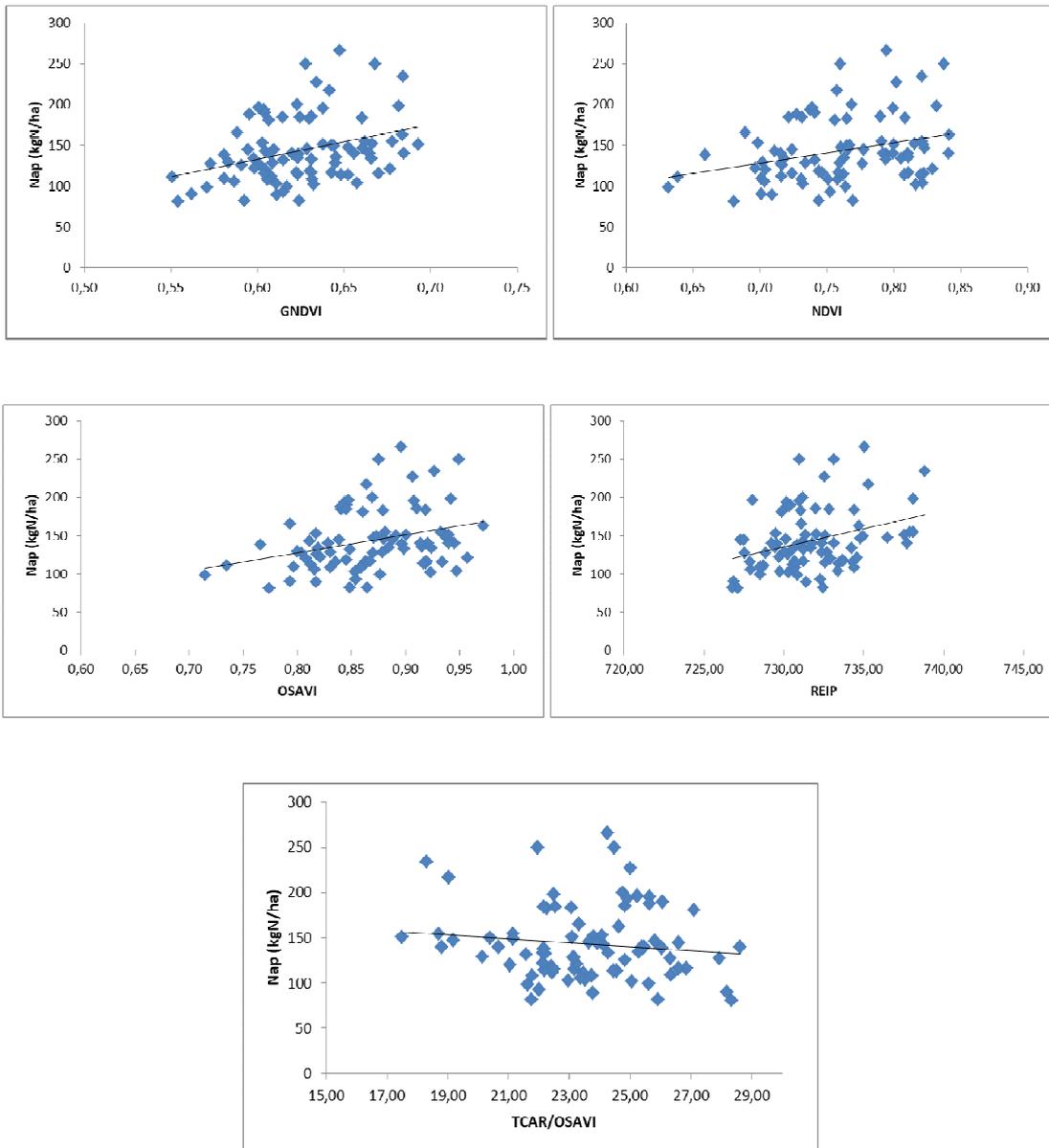


Figura 21-Relación entre los distintos IE capturados en V8 y Nap.

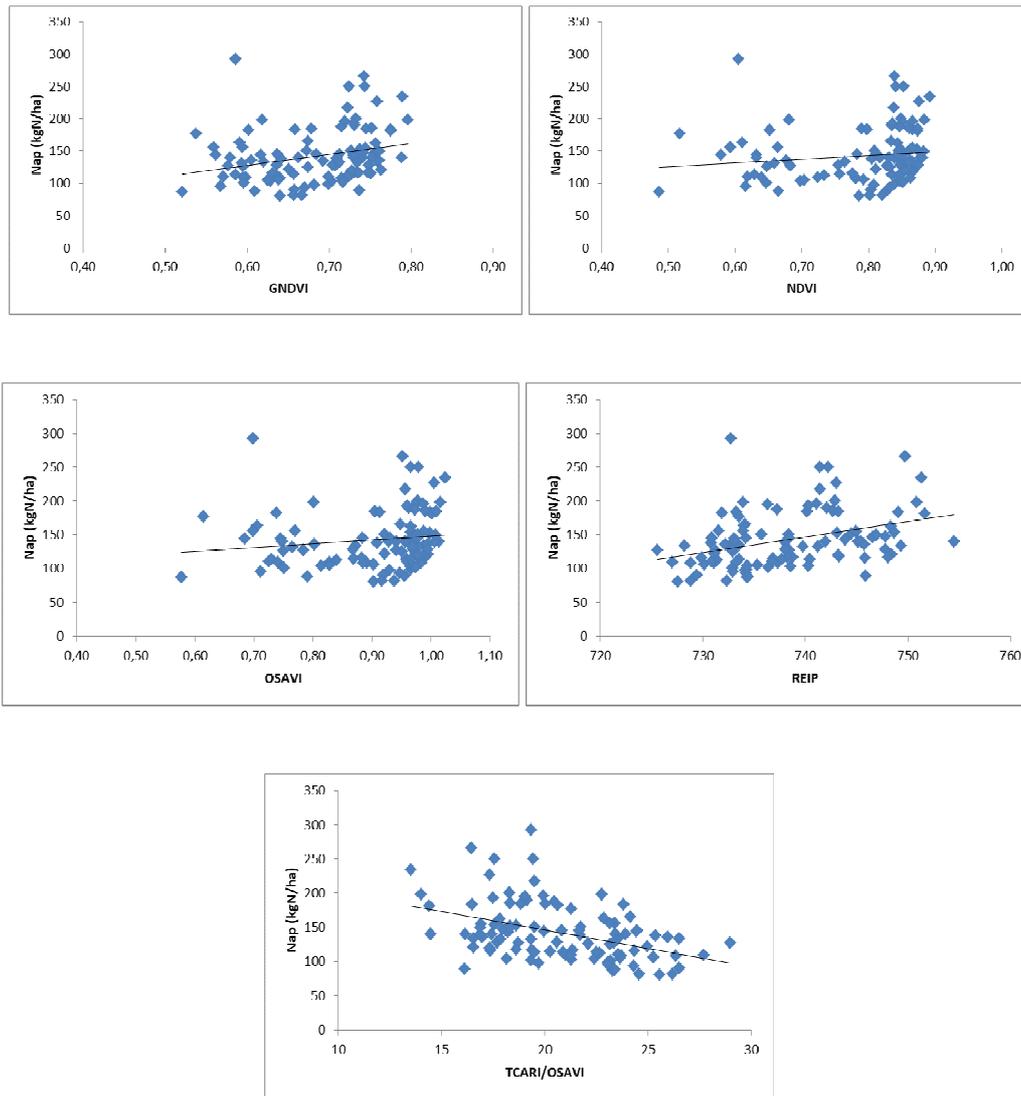


Figura 22-Relación entre los distintos IE capturados en V10 y Nap.

En la misma región en estudio, se observaron relación entre índices (NDVI, REIP y TCARI) y N potencialmente mineralizable (N0) y Nap, siendo la relación más consistente en estadios más avanzados para ambos índices (Zubillaga et al., 2012). En la actualidad se emplea el índice NDVI para la refertilización en el cultivo de maíz haciendo uso de una franja de suficiencia de N en el lote a diagnosticar. Esta franja permitió el cálculo de un índice de respuesta, para luego calcular la dosis a utilizar (Raun et al. 2002; Melchiori et al.2006; Martin et al, 2007).

Se compararon modelos de la mineralización a partir de IE con y sin estructura espacial de los errores, seleccionándose los modelos por aquel que presentara menor AIC y BIC (Tabla 9). En el estadio V8, los modelos que fueron significativos (valor $p < 0.05$) fueron: N0 en función de

REIP (valor $p=0.036$), Nan en función de NDVI (valor $p=0.02$) y NAP en función de GNDVI, OSAVI y REIP (valor $p = 0.004, 0.001$ y 0.002 respectivamente). Para el estadio R1 los modelos significativos fueron: N0 en función de NDVI, GNDVI, OSAVI, REIP y TCARI/OSAVI (valor $p= 0.0002, 0.0004, 0.0002, 0.003$ y 0.006 respectivamente) y Nap en función de GNDVI, REIP y TCARI/OSAVI (valor $p= 0.05, 0.002$ y 0.005 , respectivamente).

Tabla 9-Medidas de ajuste de los modelos de parámetros de mineralización e índices espectrales según se ajuste con estructura (E) o sin estructura (SE).

			Modelos con estructura		Modelos sin estructura	
			AIC	BIC	AIC	BIC
V8	N0 (kgN/ha)	REIP	982	991	980	987
		TCARI/OSAVI	979	998	965	972
	Nan (mgN/ha)	NDVI	1105	1126	1139	1154
		OSAVI	1114	1135	1151	1166
	Nap (kgN/ha)	NDVI	842	854	841	848
		GNDVI	837	849	838	845
		OSAVI	838	850	841	848
		REIP	850	859	848	855
R1	N0 (kgN/ha)	NDVI	1228	1241	1224	1232
		GNDVI	1226	1237	1224	1232
		OSAVI	1228	1241	1224	1232
		REIP	1232	1246	1223	1231
		TCARI/OSAVI	1229	1238	1223	1231
	Nap (kgN/ha)	GNDVI	1070	1080	1073	1081
		REIP	1065	1072	1082	1096
		TCARI/OSAVI	1067	1076	1087	1092

Efecto de la mineralización de N y las ZM sobre los índices espectrales. Campaña 2013/14.

Para la campaña 13/14 los índices espectrales diferenciaron ZM solo en V8 y para los índices NDVI, GNDVI y OSAVI (Tabla 10). Los IE no diferenciaron las ZM en el estadio reproductivo

posiblemente debido a que no hubo déficit hídrico a lo largo de la campaña y a que varios índices se saturaron a los IAF alcanzados en ese estadio.

Tabla 10-Comparaciones múltiples del factor Ambiente para los distintos IE en V8 y R1 de maíz. Letras diferentes indican diferencias significativas por el método LSD Fisher (Alfa=0.05). Campaña 13/14

	ZM	NDVI	GNDVI	OSAVI	REIP	TCARI/OSAVI
V8	AP	0,79 a	0,69 a	0,62 b	743 a	35,0 a
	MP	0,76 a	0,66 ab	0,68 a	743 a	34,4 a
	BP	0,72 b	0,65 b	0,75 a	740 a	34,7 a
	Valor <i>p</i>	0,002	0,0412	0,0007	0,0907	0,9141
R1	AP	0,71 a	0,77 a	0,93 a	765 a	11,6 a
	MP	0,72 a	0,77 a	0,95 a	762 a	12,5 a
	BP	0,72 a	0,79 a	0,96 a	761 a	12,1 a
	Valor <i>p</i>	0,8538	0,7013	0,7294	0,792	0,8271

Relación entre los índices espectrales y la mineralización de N. Campaña 2013/14.

Al realizar la correlación (*r* de Pearson) entre los distintos estimadores de la mineralización (Nan y Nap) y los índices capturados mediante el radiómetro proximal en distintos estadios del cultivo de maíz se observaron resultados contrastantes (Tabla 11).

Tabla 11-Coeficientes de correlación de Pearson entre parámetros de mineralización e índices espectrales. Correlación significativa $p < 0.05$ *.

		Nan	Nap
V8	NDVI	0,23*	0,10
	GNDVI	0,27*	0,10
	OSAVI	0,37*	-0,05
	REIP	0,32*	0,03
	TCARI/OSAVI	0,4*	-0,06
R1	NDVI	0,13	0,16*
	GNDVI	-0,18*	0,24*
	OSAVI	-0,13	0,16*
	REIP	0,27*	0,22*
	TCARI/OSAVI	0,21*	-0,24*

El parámetro Nan correlaciona muy bien en el estadio más temprano, mientras que Nap solo en el estadio reproductivo. Es esperable que la relación entre el Nap y los IE sea más fuerte debido a la forma de cálculo del Nap. Esta variable tiene en cuenta la biomasa generada en la campaña en cuestión, por lo que la relación con el IE es directa. En cambio, el Nan proviene su determinación de muestras de suelo, por lo que es independiente respecto al IE. En la actualidad el IE NDVI (determinado a partir de imágenes satelitales Sentinel) permiten determinar la dosis de N en estadios avanzados del cultivo de maíz (cuatro a seis hojas totalmente expandidas) (Redel et al. 2018).

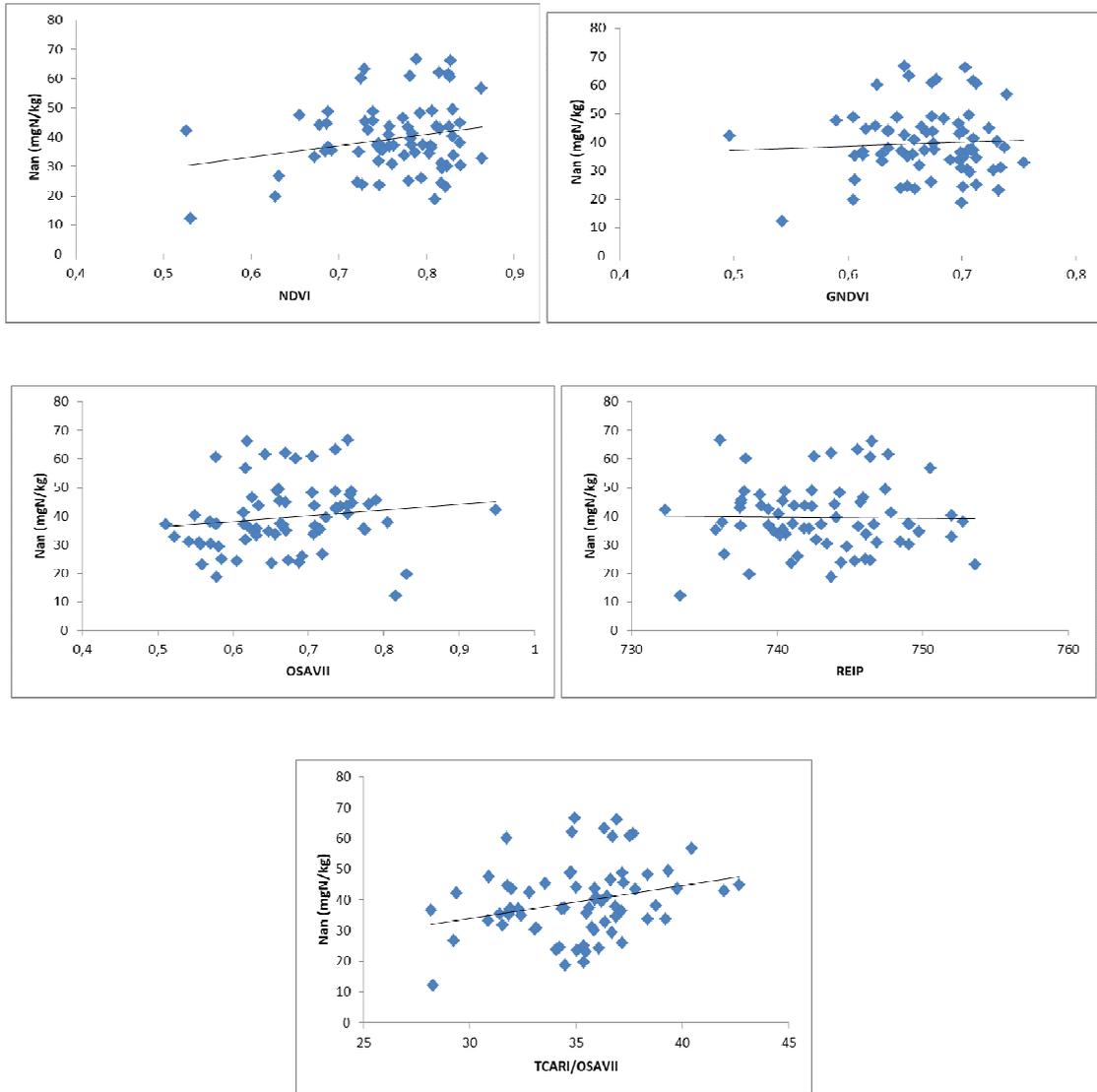


Figura 23-Relación entre los distintos IE capturados en V8 y Nan

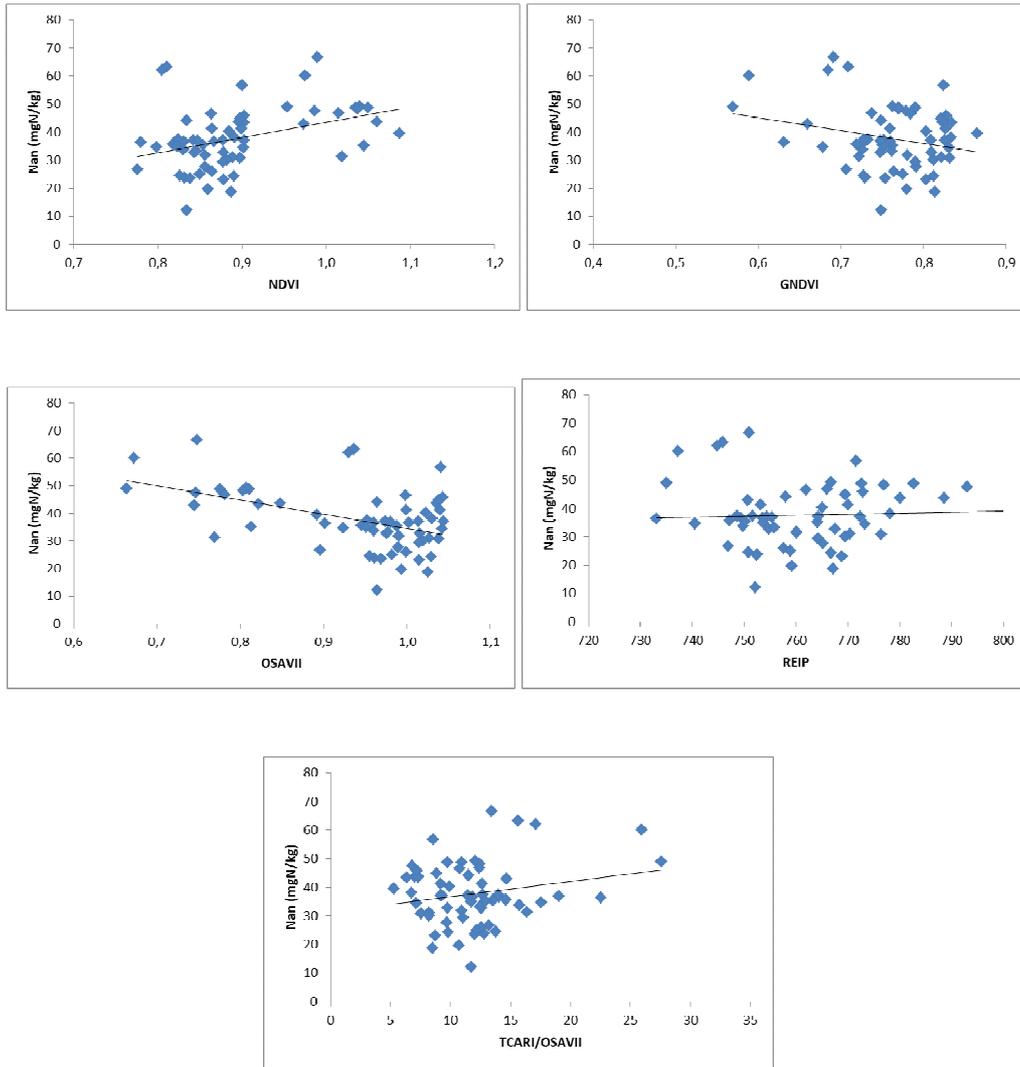


Figura 24-Relación entre los distintos IE capturados en V10 y Nan

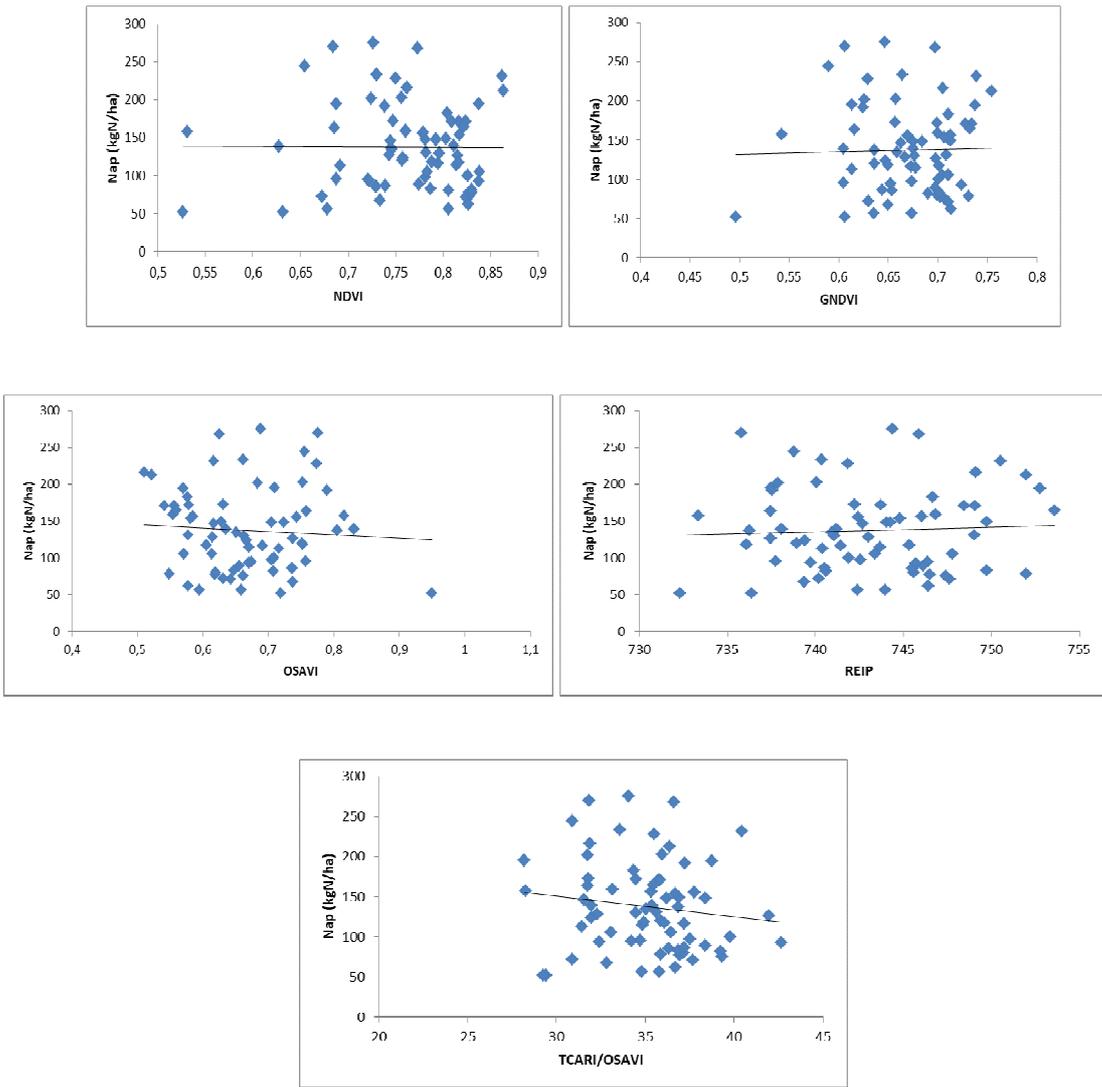


Figura 25-Relación entre los distintos IE capturados en V8 y Nap

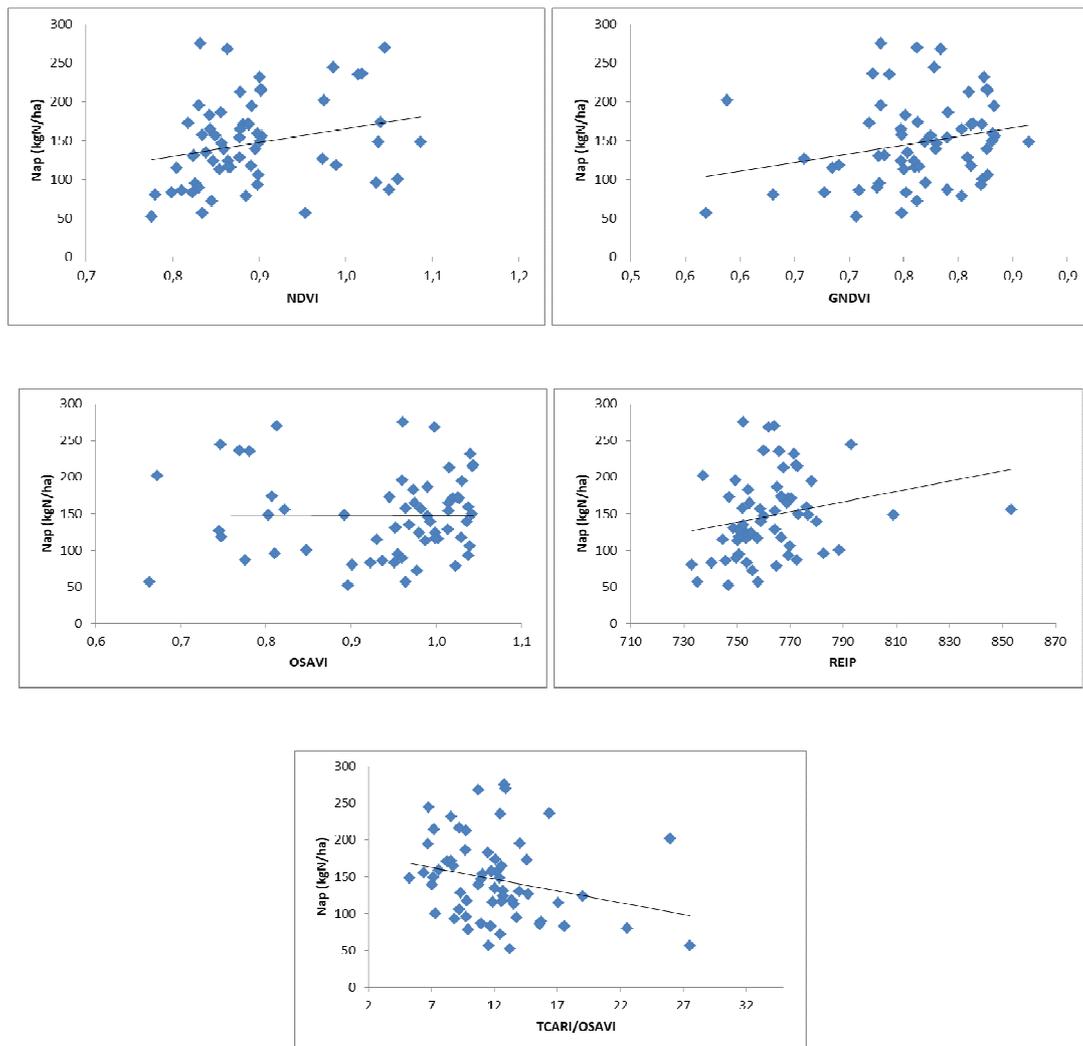


Figura 26-Relación entre los distintos IE capturados en V8 y Nap

Al analizar los modelos mixtos de los parámetros en función de los IE de aquellos casos en que la correlación de Pearson fue significativa, se compararon modelos que contemplan la estructura espacial de los errores y los modelos sin estructura, siendo el mejor el que presentó menor AIC y BIC (Tabla 12). Para el parámetro Nan los índices significativos fueron GNDVI y REIP, ambos en V8 (valor p 0.027 y 0.05 respectivamente), mientras que para Nap los índices significativos fueron NDVI, GNDVI y OSAVI, los tres casos en R1 (valor p 0.009, 0.022 y 0.016 respectivamente). No es esperable encontrar los mismos resultados en los dos análisis propuestos, ya que el coeficiente de correlación de Pearson se utilizó para analizar el grado de asociación entre variables con distancias Gaussiana y asume observaciones independientes, mientras que el modelo mixto empleado asumió que las observaciones no son independientes.

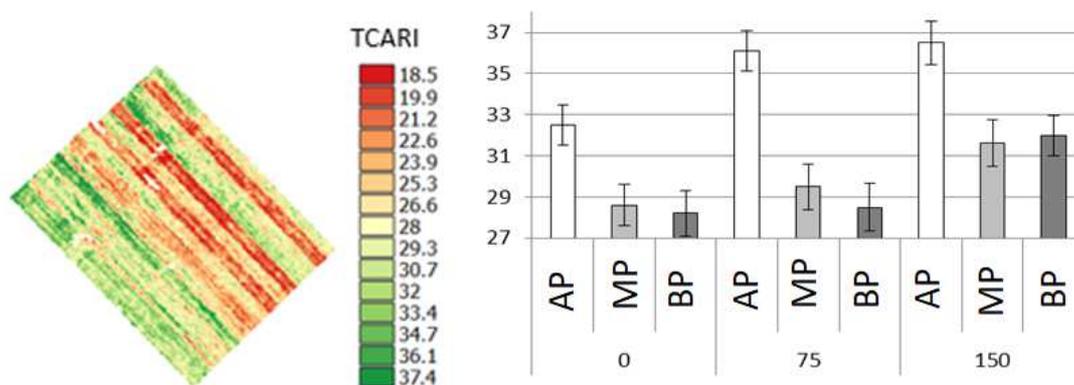
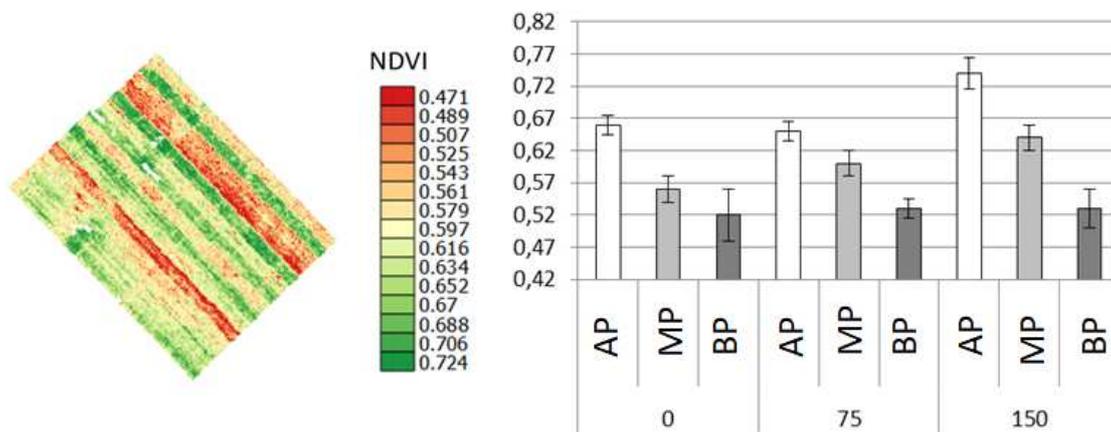
Tabla 12-Medidas de ajuste de los modelos de parámetros de mineralización e índices espectrales según se ajuste con estructura (E) o sin estructura (SE)

			Modelos con estructura		Modelos sin estructura	
			AIC	BIC	AIC	BIC
V8	Nan (mgN/kg)	NDVI	506	517	535	541
		GNDVI	507	518	537	544
		OSAVI	516	527	543	550
		REIP	546	553	517	528
		TCARI/OSAVI	519	531	541	560
R1	Nan (mgN/kg)	GNDVI	449	460	466	472
		REIP	461	472	478	485
		TCARI/OSAVI	459	469	474	481
	Nap (kgN/ha)	NDVI	658	669	655	661
		GNDVI	659	670	656	662
		OSAVI	658	669	655	661
		REIP	673	683	669	676
		TCARI/OSAVI	670	681	667	673

Relación de los rendimientos de maíz, dosis de N y ambientes con índices obtenidos desde sensores remotos

Al analizar las imágenes obtenidas mediante sensores remotos se observó que para la campaña 2012-2013 los IE presentaron diferencias según dosis de N y ambiente productivo (Figura 27). Todos los índices permitieron diferenciar los ambientes y las dosis de N. El NDVI presentó mayor variación al comparar las ZM dentro de cada dosis de N. Entre ambientes extremos el IE se diferencia en un 22, 19 y 29% para las dosis 0, 75 y 150 kg N ha⁻¹ respectivamente. Resultados similares se observan para el IE TCARI, con porcentajes de 14, 22 y 12% para las dosis 0, 75 y 150 kg N ha⁻¹ respectivamente. El IE OSAVI presentó mayor diferencia dentro de cada ambiente, siendo la diferencia del porcentaje entre dosis extremas de 16, 31 y 35% para las ZM de BP, MP y AP respectivamente. La combinación de los IE TCARI y OSAVI presentó baja diferencia en su valor absoluto para la ZM BP indistintamente la dosis de N aplicada. Asimismo, para la dosis 0 kg N ha⁻¹ no se observaron diferencias por ZM. Se observaron diferencias entre los grupos mencionados anteriormente y la combinación de AP, MP y dosis 75

y 150 kg N ha⁻¹. No se pudieron analizar todos los índices analizados anteriormente ya que este sensor cuenta con menor cantidad de longitudes de onda capturados, es así que se analizaron con mayor profundidad índices como TCARI y su relación con OSAVI.



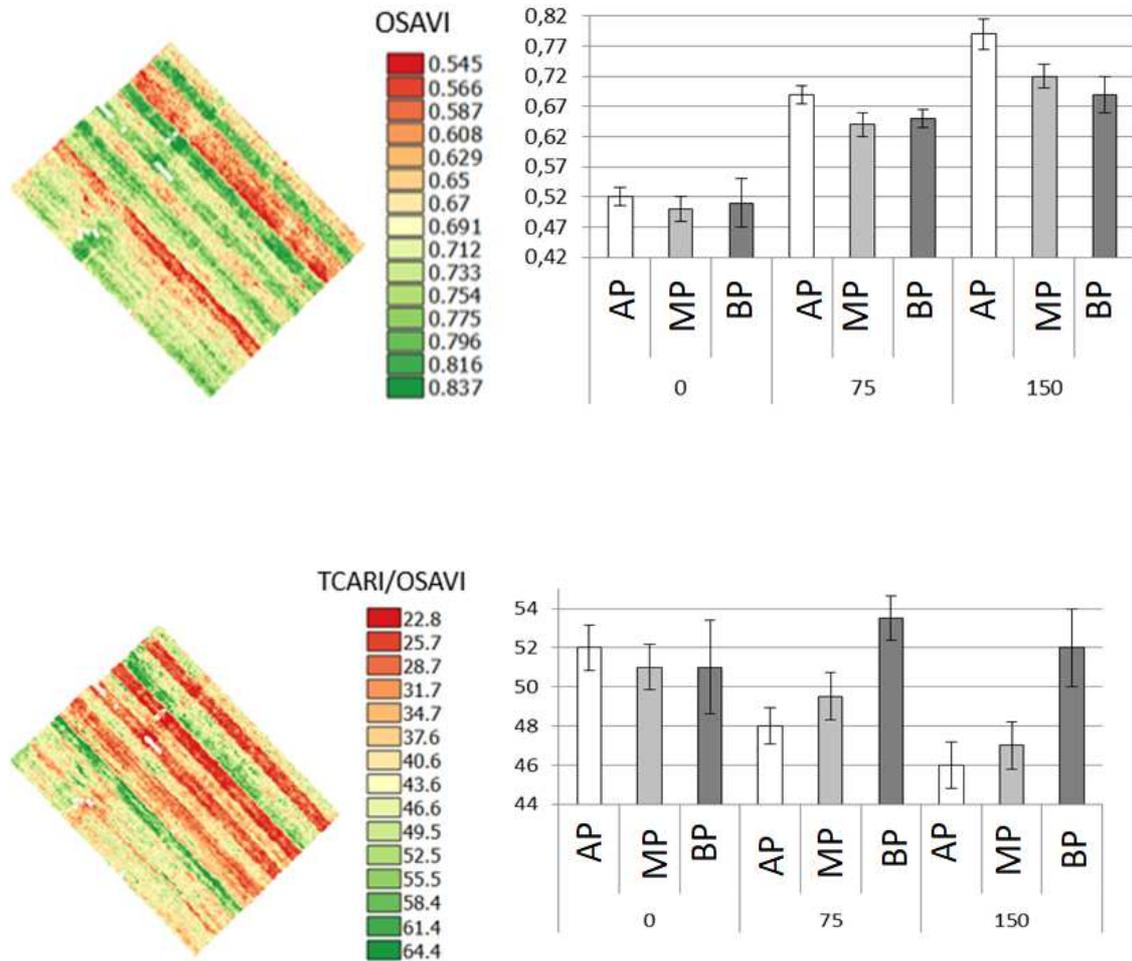


Figura 27-Mapas de índices espectrales (capturado en V6) por ZM y dosis de N. Barras gris oscuro ZM BP, barras gris claro ZM MP y barras blancas ZM AP. Las barras sobre las columnas indican el error estándar de cada variable.

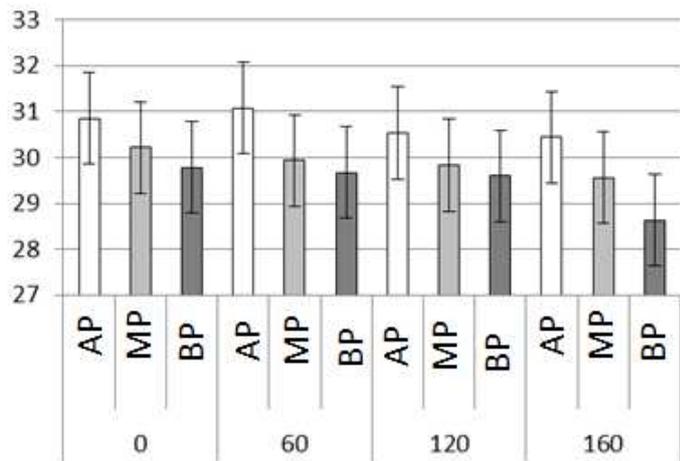
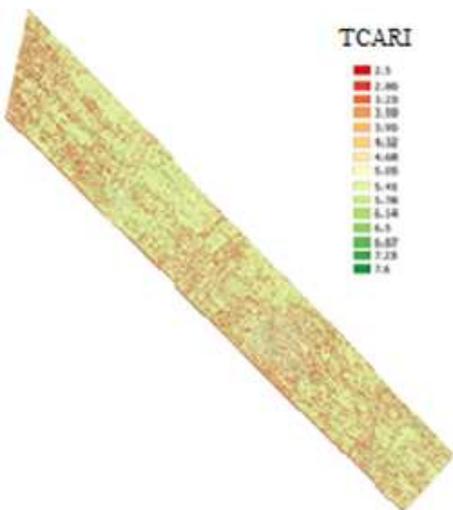
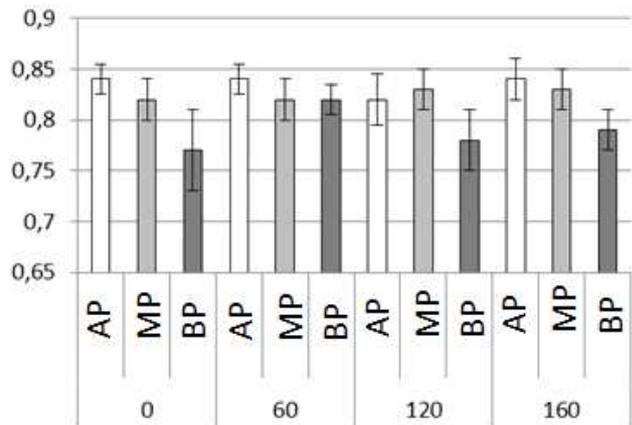
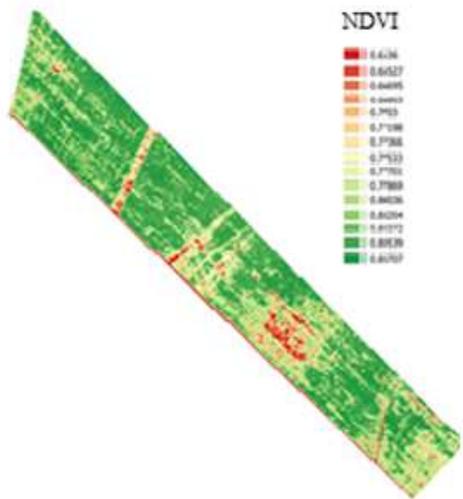
Los IE capturados mediante el sensor remoto en etapas tempranas del cultivo de maíz presentaron relaciones significativas con los rendimientos obtenidos por el monitor (Tabla 13). Otros autores concluyen de la misma manera, pero sobre muestreos en fases avanzadas del cultivo (Isla & López-Lozano, 2005). En este sentido, el índice de mayor correlación fue TCARI, seguido por la relación TCARI/OSAVI y los de menor correlación NDVI y OSAVI.

Tabla 13-Correlación del rendimiento de maíz con los diferentes IE para la campaña 2012-13

	NDVI	OSAVI	TCARI	TCARI/OSAVI
Rendimiento	0.32	0.32	-0.43	-0.42
Valor p	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05

Al igual que en la campaña precedente, en la 2013-2014 los IE del Lote 1 y 2 pudieron diferenciar los tratamientos analizados (ZM y dosis de N) (Figura 28 y 29). En el lote 1, el NDVI presentó la mayor diferencia dentro de BP entre el tratamiento testigo y la dosis de 60 kg N ha⁻¹, siendo la diferencia de un 7%. Al analizar las ZM dentro de cada dosis se observa una diferencia del 8% entre ZM AP y BP para la dosis 0, 120 y 160 kg N ha⁻¹. TCARI no diferencia dosis ni ZM. Para el IE OSAVI y su relación con TCARI se observa la misma tendencia que para el NDVI.

El lote 2, los IE NDVI y OSAVI diferencia ZM por dosis de N, siendo las diferencias de 3, 6, 10 y 6% para las ZM AP vs BP y dosis 0, 60, 120 y 160 kg N ha⁻¹ respectivamente. TCARI presenta una diferencia del 5% en cada ZM entre las dosis extremos. La relación TCARI/OSAVI presentó una diferencia del 12% entre las ZM de AP vs BP en las dosis 60, 120 y 160 kg N ha⁻¹. La sensibilidad para distinguir entre los tratamientos para el índice NDVI se debe a que el momento de captura fue anterior a altos índices de área foliar (IAF) (datos no mostrados). Este tipo de índices suele saturarse con canopeos densos por lo que en estadios avanzados se buscan índices que respondan mejor a altos IAF (Huete et al. 1999). Asimismo, un muy bajo IAF puede representar que una gran proporción de la lectura de reflectancia proceda del suelo y no del cultivo. En estos casos se utilizan índices que permiten discriminar la reflectancia del suelo, como el IE OSAVI.



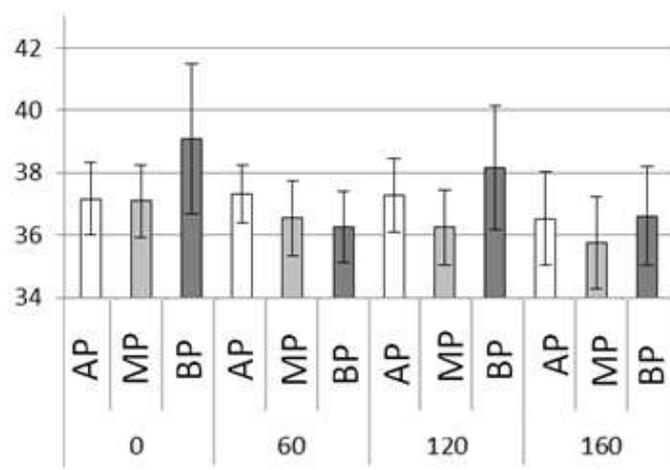
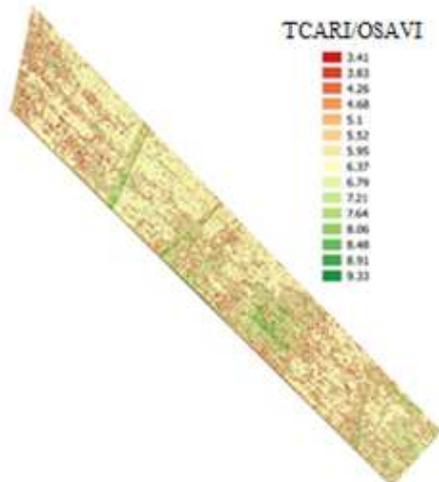
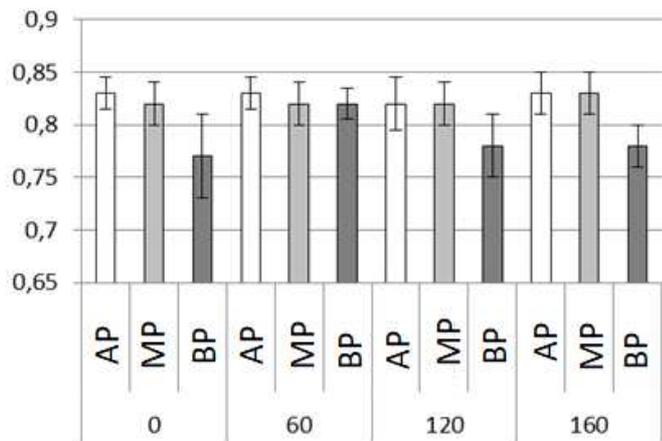
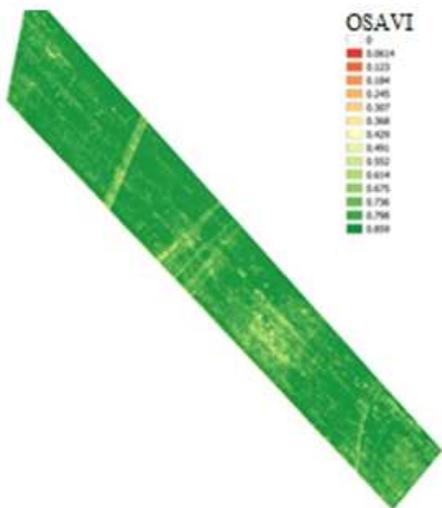
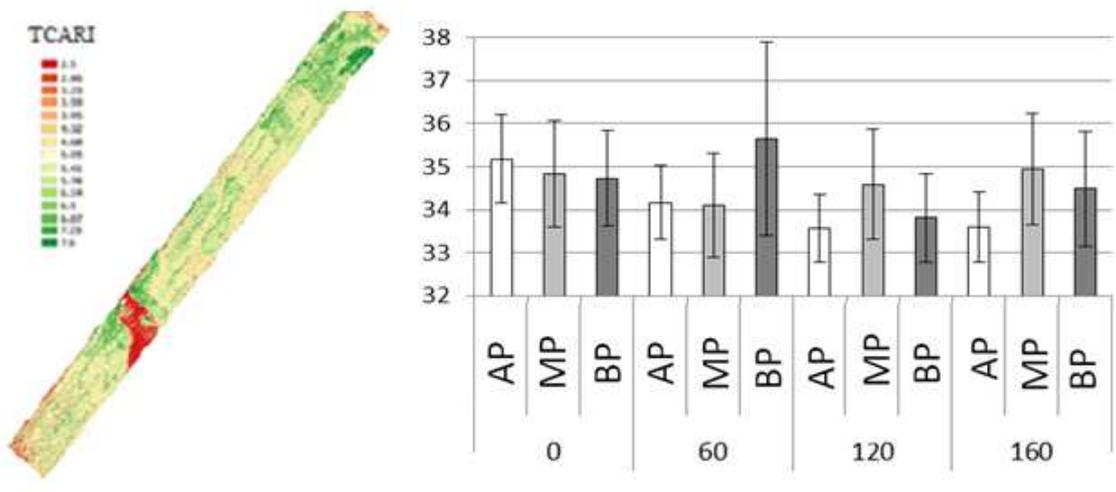
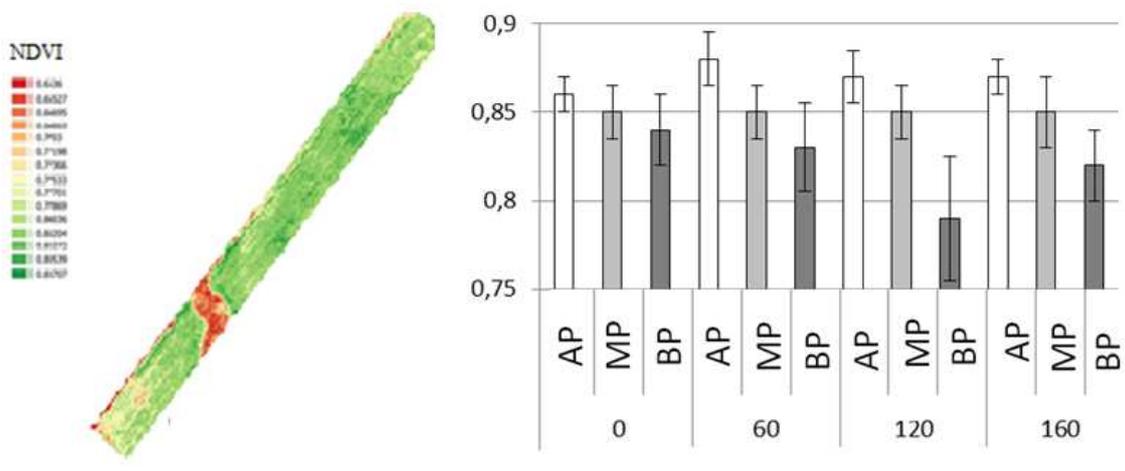


Figura 28-Lote 1. Mapas de índices espectrales del maíz en V8 según ZM y dosis de N para la campaña 2013/14. Barras gris oscuro ZM BP, barras gris claro ZM MP y barras blancas ZM AP. Las barras sobre las columnas indican el error estándar de cada variable



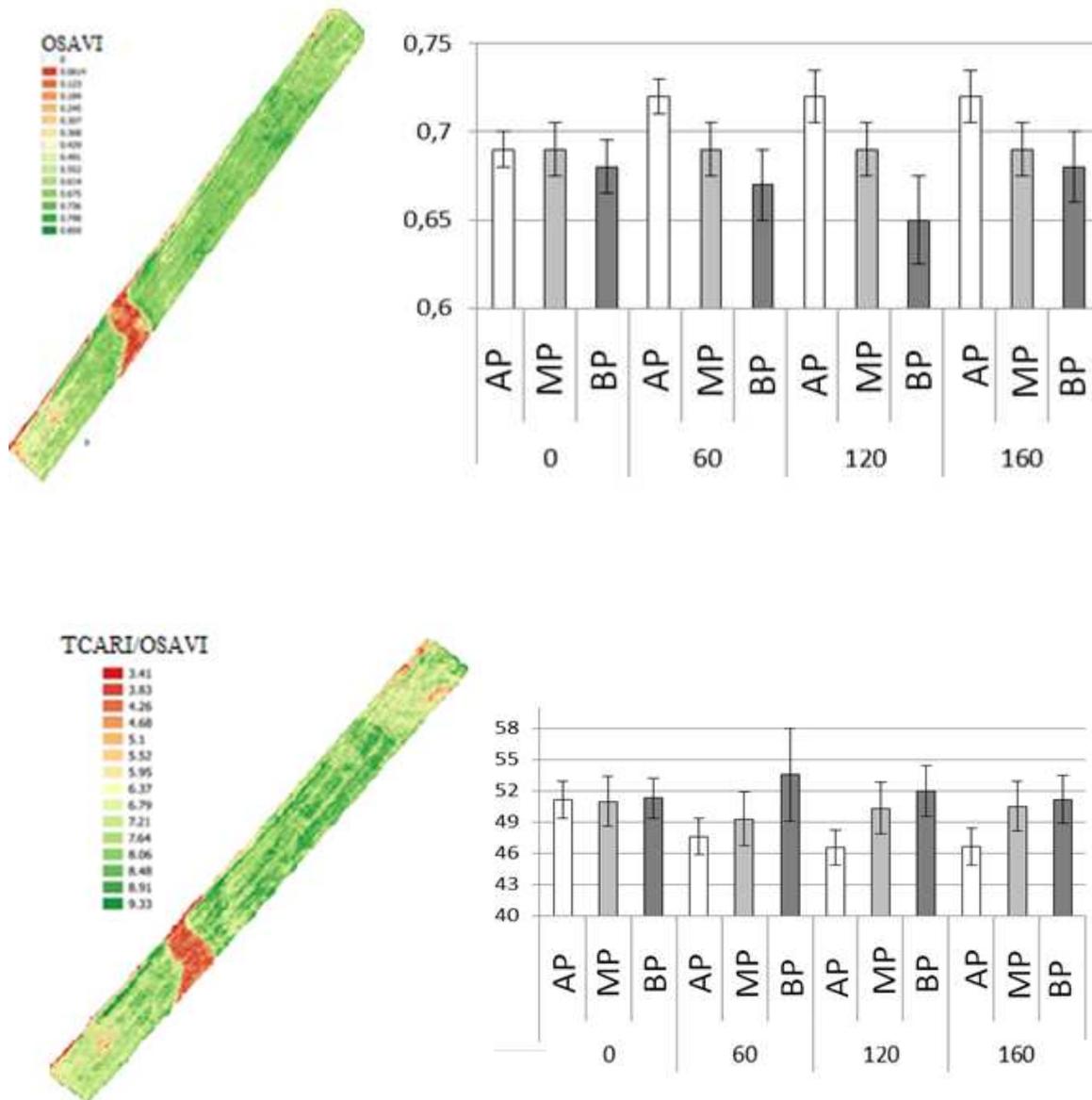


Figura 29-Lote 2. Mapas de índices espectrales del maíz en V8 según ZM y dosis de N para la campaña 2013/14. Barras gris oscuro ZM BP, barras gris claro ZM MP y barras blancas ZM AP. Las barras sobre las columnas indican el error estándar de cada variable

Se observan para ambas campañas que el análisis de los IE proveniente de imágenes capturadas con cámara multiespectral montada sobre un avión presentan mayores diferencias que los muestreos puntuales provenientes del radiómetro proximal, esto debido al número de datos provenientes con cada técnica en particular.

Al analizar la correlación de los datos obtenidos por el monitor de rendimiento y los IE surgidos de las imágenes se observan valores bajos de correlación, pero siendo estas significativas. Estos datos son marcadamente más bajos que los encontrados en la primera campaña, a excepción del NDVI en el lote 1 (valor de correlación de 0.62) (Tabla 14).

Tabla 14-Correlación del rendimiento de maíz con los diferentes índices espectrales capturados por vuelo aéreo para la campaña 2013-14

Lote		NDVI	OSAVI	TCARI	TCARI/OSAVI
1	Rendimiento	0,622	0,0627	-0,0001	-0,0432
	<i>Valor P</i>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
2	Rendimiento	0,0016	0,0506	-0,0377	-0,0662
	<i>Valor P</i>	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Objetivo 3

Efecto de la mineralización de N en las funciones de producción de maíz.

Se ajustaron modelos de regresión múltiple para explicar el rendimiento de maíz en función de variables: nitratos a la siembra más fertilizante (N_{s+f}), N mineralizado aparente, N anaeróbico y zonas de manejo (como variable *dummy*, Tabla 15).

Tabla 15-Funciones de rendimiento de maíz (kg ha^{-1}) a escala de lote. * y **, diferencias significativas al 5 y 1% de probabilidad.

Variables	Funciones de rendimiento	R ²	Sig.
Nitratos (N_{s+f})	$R_{to}=6712,2+44,7* N_{s+f}$	0.17	**
N_{s+f} +Nan	$R_{to}=5973,5+44,9* N_{s+f} +5,8*N_{an}$	0.18	**
N_{s+f} +Nap	$R_{to}=3778,6+52,7* N_{s+f} +18,3*N_{ap}$	0.32	**
N_{s+f} +ZM	$R_{to}=9833,1+7,68* N_{s+f} -2557,4*BP-1276,1*MP$	0.39	**
N_{s+f} +Nan+ZM	$R_{to}=9982,3+7,3* N_{s+f} -0,8*N_{an}-2582,8*BP-1296,9*MP$	0.39	**
N_{s+f} +Nap+ZM	$R_{to}=7561,2+19,6* N_{s+f} +10,4*N_{ap}-2022,8*BP-1097,2*MP$	0.42	**

Bajo independencia de observaciones (sin estructura) es esperable que la dispersión de los valores de los residuales obtenidos por los modelos sea aleatorio. Del análisis de los gráficos de burbujas de los residuales de los modelos (Figura 30), se evidenció que todos los modelos propuestos presentaron estructura espacial (dependencia de los residuales).

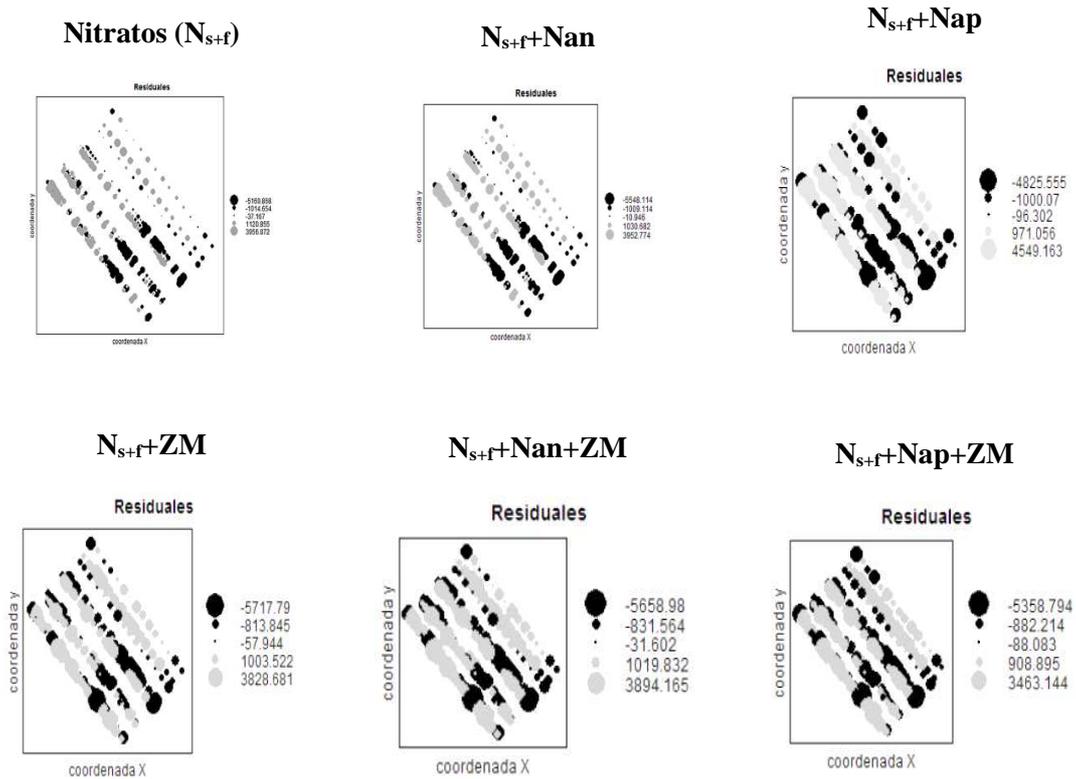


Figura 30-Distribución de los residuales para los modelos de rendimiento de maíz para la campaña 2012-13

Asimismo, para determinar la presencia de dependencia espacial se analizaron los semivariogramas de los residuales de los modelos y se utilizaron los criterios AIC y BIC para la elección de los mejores modelos (Tabla 16) (Zuur *et al.*, 2009). Los modelos seleccionados fueron aquellos que incorporaron la estructura espacial de los residuos. Si bien los valores de AIC y BIC son menores, la predicción de los modelos no mejora sustancialmente.

Tabla 16-Criterios para la selección de los modelos de rendimiento de maíz según se ajuste con estructura (E) o sin estructura (SE).

Variables explicativas	Función ajustada	Modelos con estructura		Modelos sin estructura	
		AIC	BIC	AIC	BIC
N_{s+f}	Rationalquadratic	4911	4929	5063	5074
$N_{s+f} + \text{Nan}$	Cuadrática	4908	4930	5056	5071
$N_{s+f} + \text{Nap}$	Cuadrática	4908	4930	5004	5019
$N_{s+f} + \text{ZM}$	Gaussiana	4880	4906	4952	4969
$N_{s+f} + \text{Nan} + \text{ZM}$	Gaussiana	4878	4907	4949	4972
$N_{s+f} + \text{Nap} + \text{ZM}$	Gaussiana	4878	4907	4932	4953

Las estructuras espaciales que mejor explicaron dicha estructura fueron la cuadrática y gaussiana. Ensayos previos de fertilización nitrogenada también en la Pampa Arenosa, observaron las mismas estructuras espaciales sobre tres lotes con cultivo de maíz (Zubillaga et al., 2014).

Para estas funciones de rendimiento, las estructuras que mejoraron el modelo siguiendo el criterio AIC y BIC, fueron la gaussiana bajo la combinación $N_{s+f} + \text{Nan} + \text{ZM}$ y $N_{s+f} + \text{Nap} + \text{ZM}$. La heterogeneidad de las ZM identificadas en el lote en cuanto al nivel de materia orgánica humificada e indirectamente en la disponibilidad de nitratos a la siembra, sumado a los diferentes potenciales de mineralización, reflejarían su efecto sobre el rendimiento en condiciones comparables de manejo. De esta manera, se puede evidenciar el aporte principal de las fracciones lábiles a la disponibilidad de $N\text{-NO}_3$ y su rol fundamental en la nutrición de cultivos estivales como el maíz, incidiendo también en la fertilidad edáfica de los suelos (Gregoret et al., 2006).

Las funciones de respuesta a la fertilización nitrogenada se analizaron con el mismo procedimiento que las funciones de rendimiento. Los modelos presentaron un menor ajuste que el observado previamente (Tabla 17).

Tabla 17-Modelos estimados de respuesta al agregado de fertilizante según combinación de distintas variables. * y **, diferencias significativas al 5 y 1% de probabilidad

Variables Explicativas	Funciones de respuesta	R ²	Sig.
N _{s+f}	Rta=0,04+0,01* N _{s+f}	0.01	*
N _{s+f} +Nan	Rta=-0,99*0,01* N _{s+f} +0,01*Nan	0.06	**
N _{s+f} +Nap	Rta=-0,62+0,01* N _{s+f} +0,01*Nap	0.03	*
N _{s+f} +ZM	Rta=0,66+0,01* N _{s+f} -0,54*BP-0,21*MP	0.28	*
N _{s+f} +Nan+ZM	Rta=-0,58+0,01* N _{s+f} +0,01*Nan-0,32*BP-0,03*MP	0.06	**
N _{s+f} +Nap+ZM	Rta=0,14+0,01* N _{s+f} +0,00*Nap-0,41*BP-0,17*MP	0.03	*

Los residuales de los modelos presentaron estructura espacial (datos no mostrados) por lo que se evaluaron los mismos a través de los criterios AIC y BIC. En este caso, las estructuras espaciales que mejor explicaron la estructura también fueron la cuadrática y gaussiana (Tabla 18).

Tabla 18-Criterios para la selección de los modelos según modelos con estructura (E) o sin estructura (SE) de la respuesta a la fertilización nitrogenada

Variables explicativas	Función ajustada	Modelos con estructura		Modelos sin estructura	
		AIC	BIC	AIC	BIC
N _{s+f}	Gaussian	936	954	961	972
N _{s+f} +Nan	Gaussian	944	966	959	974
N _{s+f} +Nap	Gaussian	946	968	969	984
N _{s+f} +ZM	Rationalquadratic	941	966	962	979
N _{s+f} +Nan+ZM	Rationalquadratic	949	979	963	985
N _{s+f} +Nap+ZM	Gaussian	950	979	973	995

Los parámetros de los modelos de rendimiento de maíz y respuesta a la fertilización fueron reestimados por presentar estructura espacial, permitiendo corregir la falta de independencia de

los residuos de los modelos ajustados. En cuanto a la inclusión de la variable que contemplan las zonas de manejo, estas se introdujeron en los modelos como variables *dummy* (AP, MP y BP). Las funciones de rendimiento y respuesta a la fertilización nitrogenada estimadas mediante modelos generales lineales mixtos, para todos los puntos relevados del lote (incluyendo testigos y fertilizados), se presentan en la Tabla 19 y 20 respectivamente, al igual que su coeficiente de determinación del modelo (R^2) y el nivel de significancia, contemplando el modelo completo, a partir de la prueba de F del valor p .

Tabla 19-Análisis estadístico de las funciones de rendimiento de maíz según la combinación de variables explicativas. *y, diferencias significativas al 5 y 1% de probabilidad respectivamente**

Variables Explicativas	Funciones de rendimiento	R^2	Sig.
N_{s+f}	$R_{to}=8566.69+3.06* N_{s+f}$	0.17	**
$N_{s+f} +Nan$	$R_{to}=8258.86+4.92* N_{s+f}+1.83*Nan$	0.18	**
$N_{s+f} +Nap$	$R_{to}=8196.52+5.29* N_{s+f} +1.916*Nap$	0.32	**
$N_{s+f} +ZM$	$R_{to}=9568.34+3.80* N_{s+f} -1645.56*BP-795.18*MP$	0.39	**
$N_{s+f} +Nan+ZM$	$R_{to}=9242.51+5.473* N_{s+f} +1.62*Nan-1565.32*BP-744.65*MP$	0.39	**
$N_{s+f} +Nap+ZM$	$R_{to}=9057.78+6.48* N_{s+f} +2.44*Nap-1582.14*BP-752.77*MP$	0.42	**

La función que contiene la variable nitratos a la siembra más fertilizante fue la de menor correlación con un 17 %. Otras fuentes de variación deben considerarse a la hora de querer explicar el rendimiento del cultivo de maíz. Los modelos que utilizan únicamente a los nitratos a la siembra explican entre el 17 y 83% la variabilidad de los rendimientos (Salvagiotti et al., 2002; Ruiz et al., 2004; García et al., 2005; Sanchez & Ascheri, 2005; Pagani et al., 2008; García, 2009; García et al., 2010; Alvarez, 2013). Estudios realizados por Álvarez y Grigera (2005) en la Pampa Ondulada evidenciaron que el efecto del N-nitratos del suelo sobre los rendimientos de maíz fue menor en relación al N del fertilizante. Sin embargo, los modelos de recomendación de N en maíz utilizan como variable predictora a los nitratos (0-60 cm) y el N proveniente del fertilizante porque se asume que la eficiencia de uso del N es similar para ambas fuentes (Álvarez et al., 2013). La explicación de la variabilidad en los rendimientos de maíz por

nitratos (0-90 cm) coincide con los de otros estudios realizado en la Pampa Arenosa y Pampa Ondulada (Barraco et al., 2006; Álvarez et al., 2013).

Las combinaciones $N_{s+f} + Nan$ y $N_{s+f} + Nap$ presentaron ajustes de 18 % y 32 %, respectivamente. El aporte de N por mineralización resulta un factor importante para explicar la variabilidad en los rendimientos del maíz a escala de lote bajo las condiciones experimentales estudiadas. Domínguez et al., 2006 explicó la variabilidad en los rendimientos del maíz a escala de lote a través del N disponible, la tasa de mineralización y la oferta hídrica. Gallagher & Bartholomew, 1964, encontraron que las predicciones de disponibilidad de N y rendimiento eran más precisas cuando se combinaban con las propiedades edáficas. La combinación de nitratos a la siembra y Nan permitió mejorar la predicción del rendimiento de trigo en la región sudeste bonaerense (Reussi Calvo et al. 2013).

Al incorporar las ZM como variable *dummy*, se observaron mejoras en la capacidad predictiva de los modelos. Las combinaciones $N_{s+f} + ZM$ y $N_{s+f} + Nan + ZM$ explicaron en un 39 % la variabilidad en los rendimientos, mientras que la combinación que mejor explicó la variabilidad fue $N_{s+f} + Nap + ZM$, pudiendo el modelo explicar el 42% de la misma y siendo los modelos significativos al 1%. Las diferencias de los rendimientos entre las ZM pueden atribuirse a las diferencias en la capacidad de agua disponible (CAD) de los distintos tipos de suelo. En este sentido, las zonas más productivas tuvieron mayor capacidad de almacenamiento de agua y más actividad biológica, la cual aportará mayor cantidad de nutrientes al cultivo.

Dados los buenos ajustes observados entre el parámetro Nan y los distintos IE desarrollados en el objetivo dos (tabla 11) se podrían ajustar modelos, en etapas tempranas de cultivo, para ajustar dosis de N sin necesidad de realizar un muestreo intensivo de suelo. La alta correlación entre los IE y el Nap se da en estadios avanzados (R1) por lo que no es factible para aplicaciones sobre el cultivo.

En el caso de las funciones de respuesta a la fertilización nitrogenada presentadas en la Tabla 20 se observaron menores ajustes respecto a las funciones de rendimiento. Estos bajos ajustes

pueden deberse a la forma de cálculo de la respuesta. Si bien se utilizaron los valores de rendimiento fertilizados más cercanos, no deja de haber una variabilidad de las variables ambientales entre dichos puntos.

Tabla 20-Funciones de respuesta a la fertilización N según parámetros reestimados de los modelos con estructura. *y, diferencias significativas al 5 y 1% de probabilidad**

Variables	Funciones de respuesta	R ²	Sig.
N _{s+f}	Rta=0.234+0.007* N _{s+f}	0.01	*
N _{s+f} +Nan	Rta=-0.572+0.010* N _{s+f} +0.005*Nan	0.06	**
N _{s+f} +Nap	Rta=-0.413+0.010* N _{s+f} +0.004*Nap	0.03	*
N _{s+f} +ZM	Rta=0.589+0.004* N _{s+f} -0.413*BP-0.058*MP	0.28	**
N _{s+f} +Nan+ZM	Rta=-0.2491+0.007* N _{s+f} +0.005*Nan-0.253*BP-0.043*MP	0.06	**
N _{s+f} +Nap+ZM	Rta=-0.106+0.008* N _{s+f} +0.002*Nap-0.254*BP-0.019*MP	0.03	*

El ajuste más bajo es el correspondiente a la variable N_{s+f}. Brouder & Mengel (2003) demostraron que los nitratos a la siembra fallaron en predecir la respuesta a la fertilización nitrogenada en maíz en 39% de los casos analizados. Coincidente con las funciones de rendimiento, la incorporación de las ZM mejoró las explicaciones. El modelo que presenta conjuntamente las variables N_{s+f} +ZM explicó, en un 28%, la variabilidad en la respuesta. La predicción del aporte de N mediante el proceso de mineralización no pudo ser estimada empleando solamente el Nan como variable predictora, sino también hizo falta de variables ambientales tales como temperatura y precipitaciones (Reussi Calvo et al. 2018). Es esperable encontrar diferencias en las variables temperatura y humedad de suelo entre las distintas ZM debido a diferencias en textura, cantidad de rastrojo, MO, etc.

Para ambas variables rendimiento en grano y respuesta a la fertilización nitrogenada, el haber introducido la variable ZM mejoró la explicación de la variabilidad de las variables bajo estudio.

Integración Final

En un contexto mundial de creciente interés en mejorar el cuidado del medio ambiente y la eficiencia del uso de los insumos, se ha profundizado sobre la experimentación de la fertilización nitrogenada a escala de intralote en la Pampa Arenosa. La implementación de la fertilización variable de N requiere un aumento en la resolución y análisis de los procesos que afectan la disponibilidad de N para los cultivos. En este sentido, el uso de fertilizantes nitrogenados debe adecuarse al principal proceso por el cual este nutriente se encuentra disponible para los cultivos, la mineralización del nitrógeno orgánico de los suelos. En esta tesis se propuso integrar información sobre análisis del suelo, topográfica y el uso de índices espectrales para mejorar la predicción de la oferta de N por mineralización y la demanda de N para el cultivo de maíz y a su vez la recomendación de fertilización variable a escala intralote.

Para las condiciones del presente trabajo, se recopilaron evidencias suficientes para aceptar la hipótesis 1.1 que planteaba que la delimitación de ZM basadas en la elevación del terreno permiten evidenciar la variabilidad del N potencialmente mineralizable y el N mineralizado aparente. En la primera campaña, la ZM ubicadas a menor cota relativa presentaron en promedio 20% más de N mineralización aparente de N y N_{an} , mientras que el N_0 presentó un 20% más la ZM de MP respecto al de AP y BP. Sin embargo, en la campaña siguiente, si bien se observaron tendencias de mayor mineralización en las partes más bajas del lote, no se encontraron diferencias significativas (Tabla 6). En esta última campaña (2013/14) se utilizaron a los lotes como repeticiones. Cada uno de los mismos presentaron diferente historia agrícola.

La hipótesis 1.2 planteaba que la mineralización de N evidencia una estructura espacial definida a escala de lote. La misma es aceptada para N_{ap} ya que se encontró una fuerte autocorrelación espacial (Fig 13). En cambio, para el N potencialmente mineralizable, la

hipótesis no fue aceptada, ya que la distribución espacial a escala de lote fue no definida. Si bien se observa cierto grado de ajuste en los respectivos semivariogramas, estos no presentan consistencia (Fig 13). Asimismo, se realizaron las interpolaciones de cada parámetro y se validaron las mismas, observándose un bajo ajuste en las mismas.

La hipótesis 1.3 sugería que la determinación del N potencialmente mineralizable puede acortarse en el tiempo a partir de técnicas de incubación anaeróbicas. No hubo una asociación entre las determinaciones de N₀ y el N_{an} en muestreos intensivos a escala intralote (Figura 16), por lo tanto, esta hipótesis no fue aceptada. A diferencia del ensayo planteado en esta tesis, se ha observado relación entre los parámetros mencionados cuando las muestras de suelo provienen de sectores contrastantes del lote. Posiblemente la falta de relación a la escala evaluada se deba a una baja sensibilidad de los parámetros al querer discriminar pequeñas diferencias.

La hipótesis 2.1 proponía que la variabilidad de la mineralización de N y las ZM delimitadas a escala de lote se relacionan con los índices espectrales capturados en etapas vegetativas y reproductivas del cultivo de maíz. Para ambos estimadores de la mineralización de N, N_{ap} y N potencialmente mineralizable, se encontraron evidencias suficientes para aceptar la hipótesis planteada. Se observaron relaciones significativas entre los IE y los parámetros de mineralización en dos momentos fenológicos del cultivo de maíz (Tabla 8 y 11). El N_{ap} presentó en la primera campaña (2012/13) y en ambos momentos fenológicos y para todos los IE una buena asociación excepto para la relación entre TCARI/OSAVI en V8 los IE OSAVI y REIP en el estadio R1. En la campaña 2013/14 solo se observan asociación entre los IE y N_{ap} en el estadio R1. En lo que respecta al N₀, todos los IE se comportaron mejor en la etapa reproductiva, encontrándose asociación solo con REIP y TECARI/OSAVI en el estado vegetativo. Para el parámetro N_{an}, campaña 2012/13 solo presento asociación significativa para NDVI y OSAVI en V8, pero ninguna en el estadio reproductivo. Para la siguiente campaña se observó relación significativa para todos los IE en V8, mientras que en R1 solo lo fue con los IE GNDVI, REIP y TCARI/OSAVI. Al analizar la diferencia de IE entre ZM, esta fue evidente en

la primera campaña y ambos estadios fenológicos. Esta relación no se mantuvo en la campaña 2013/14, donde en el estadio R1 no se observaron diferencias, debido a que en dicha campaña no presento déficits hídricos, los IE no mostraron diferencias entre ZM (Tabla 7 y 10).

La hipótesis 2.2 sugería que existía una estrecha relación entre la productividad de maíz y la disponibilidad de N ($N_s + N_{fertilizante}$), la ZM y los índices espectrales capturados por sensores remotos. Existe suficiente evidencia para aceptar la hipótesis planteada. Para ambas campañas, el IE que mayores diferencias presentó, tanto entre ZM como en dosis de N fue el NDVI. Las diferencias observadas entre tratamientos fueron de hasta un 29%.

Por último, la hipótesis 3 que planteaba que el diagnóstico de la respuesta a la fertilización nitrogenada es más precisa cuando se incluye la variabilidad espacial del proceso de mineralización a la disponibilidad inicial de N en los sistemas de recomendación de fertilización. Esta hipótesis fue aceptada ya que los modelos de diagnóstico de la fertilización nitrogenada presentaron un mejor ajuste al agregar en los modelos la ZM y los parámetros de mineralización (Tabla 19 y 20).

La información generada en esta tesis se considera de utilidad para entender que la integración de información sobre análisis del suelo, topográfica y el uso de índices espectrales permiten capturar la variabilidad de la oferta y demanda de N del cultivo de maíz a escala de lote en la región Pampa Arenosa. Se puntualiza la importancia de delimitar ZM para mejorar el diagnóstico de la respuesta a la fertilización nitrogenada. Estos resultados se deben a que la ZM poseen diferencias en la oferta de N (dada por los distintos parámetros de mineralización) y en la demanda (rendimiento potencial de cada ZM). Se destaca el uso promisorio de los IE para estimar la oferta y demanda de N, teniendo en cuenta la mejora en la resolución y accesibilidad de fuentes de estos índices de vegetación a través de imágenes capturadas por sensores remotos. Para generar modelos más confiables y aplicables es necesario replicar este tipo de ensayos a nivel regional.

Un punto que podría mejorarse en futuras investigaciones es que la delimitación de las ZM se podría generar a partir de más capas de información (mapas de conductividad eléctrica, mapa de suelos, imágenes satelitales de campañas anteriores, etc.).

La agricultura de los próximos años va a intensificar el uso de tecnologías como el uso de índices de vegetación obtenidos a gran resolución. Para afrontar esta demanda del sector, será necesario profundizar en el conocimiento de estas herramientas. Actualmente se está empleando el índice de vegetación NDVI en la refertilización del cultivo de maíz y trigo. Sin embargo, no es una práctica frecuente, debido a las complicaciones en logística al momento de decidir la fertilización (procesamiento de imágenes, confección de mapas, lectura del mapa por la controladora de la maquina fertilizadora, etc) y al escaso conocimiento por parte de asesores en estas tecnologías. Por lo tanto, es necesario generar información a nivel regional sobre el manejo sitio específico de N para contribuir a la adopción de estas tecnologías en el sistema productivo.

Bibliografía

- Alesso, C. A., Pilatti, M. A., Imhoff, S. & Grilli, M. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la pampa llana Santafecina. *Ciencia del suelo*. 30(1): 85-93.
- Álvarez, R. & Steinbach, H. S. 2012. Ciclado de nitrógeno en agrosistemas. En: Álvarez, R; G Rubio; CR Álvarez & RS Lavado (Eds.). *Fertilidad de suelos*. Pp 259-300.
- Alvarez, R. 2013. Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Ed. Facultad de Agronomía UBA, 174 pp.
- Álvarez, R. & Grigera, S. 2005. Analysis of soil fertility and fertilizer effects on wheat and corn yield in the Rolling Pampa of Argentina. *J. Agron. Crop. Sci.* 191: 321-329.
- Álvarez, R., Álvarez C. R., Steinbach H. S., Salas J. M. & Grigera S. 2002. Materia orgánica y fertilidad de los suelos de la Pampa Ondulada. Publicado en *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. N° 14.
- Alvarez, R. 1999. Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. EUDEBA. 58.
- Alvarez, R. A., Steinbach, H. E & De Paepe, J. 2015. Fertilidad de suelos y fertilización en la region pampeana. Ed. Facultad de Agronomía UBA. 4: 115-117.
- Alvarez, R., Steinbach, H., Alvarez, C. & Grigera, S. 2003. Recomendaciones para la fertilización nitrogenada de trigo y maíz en la Pampa Ondulada. *Informaciones Agronómicas*. 18: 14-19.
- Asli, M. & Marcotte, D. 1995. Comparison of approaches to spatial estimation in bivariate context. *Math. Geol.* 27: 641-658.
- Balboa, G., Cerliani, C., Balboa, R. & Espósito, G. 2014. Ajuste del modelo econométrico mixto espacial para La dosificación variable de nitrógeno en maíz. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca.
- Barbagelata, P. & Mallarino, A. 2006. Integrando geoestadística y SIG para estudiar variabilidad espacial y mapear fertilidad de suelos. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pp.311.
- Barbieri, P. A., Echeverría, H. E. & Sainz Rozas, H. R. 2009. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 27: 115-125.
- Baret, F. & Guyot, G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sens. Environ.* 35: 161-173.
- Barraco, M., Díaz-Zorita, M. & Álvarez, C. 2006. Aplicaciones incorporadas y en superficie de fósforo en cultivos de maíz. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y Reunión de Suelos de la Región Andina. Salta, Argentina, septiembre de 2006.
- Bazzi, C. L., Souza, E. G., Khosla, R., Urribopazo, M. A. & Schenatto, K. 2015. Profit maps for precision agriculture. *Cie. Inv. Agr.* 42(3): 385-396.
- Benintende, M. C., Benintende, S. M., Sterren, M. A., Musante, C., Saluzzio, M. & De Battista, J. J. 2007. Modelo para estimar la capacidad de aporte de nitrógeno del suelo. *Agroscientia*. XXIV (2): 97-101.
- Bianchini, A., Begnis, A. S., Peruzzi, D., Magnelli, M. E., Lorenzatti, S., Rabasa, J. & García, F. 2007. Redes de ensayo de nutrición de cultivos de AAPRESID. Simposio Fertilidad 2007. 28-34.

- Bono, A. & Alvarez, R. 2013. Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 59: 259-272.
- Broge, N.H. & Leblanc, E., 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. Environ.* 76, 156–172.
- Bongiovanni, R. & Lowenberg-DeBoer, J. 2000. Nitrogen management in corn using site-specific crop response estimates from a spatial regression model. ASA-CSSA-SSSA, 677 South Segoe Road, Madison, WI 53711, USA. Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. 2000.
- Brouder, S.M., and D.B. Mengel. 2003 The presidedress soil nitrate test for improving N management in corn. AY-314-W. Purdue Univ. Coop. Ext. Serv., Purdue, IN.
- Bullock, D. S. & Bullock, D. G. 2010. From agronomic research to farm management guidelines: A primer on the economics of information and precision technology. *Precision agriculture*. 2: 71-101.
- Bundy, L. G. & Meisinger, J. J. (1994). Nitrogen availability indices. In *methods of soil analysis, Part 2*; Weaver, R. W., Angle, S., Bottomley, P., Bezdicek, D., Smith, S., Tabatabaia, A. & Wollum, (eds); SSSA: Madison, Wisc., 951-984.
- Burrough, P. A. 2001. GIS and geostatistics: Essentials Partners for spatial análisis. *Environ. Ecol. Stat.* 8: 361-377.
- Buschiazzo, D. E., Panebianco, J. E. & Colazo, J. C.. 2014. En “Suelos, producción agropecuaria y cambio climático. Avances en la Argentina”. ISBN 978-987-1873-25-8. 29:376-384.
- Buschiazzo, D.E., Aimar, S. & Zobeck, T. 1999. Wind erosion in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Soil Science* 164: 133-138.
- Bushong, J. T., Norman, R. J., Ross, W. J., Slaton, N. A., Wilson C. E Jr & Gbur Jr. E. E. 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 38:19-20, 2799-2813.
- Cabrera M. L. & Kissel, D.E. 1994. Potential nitrogen mineralization: laboratory and field evaluation. In *Soil Testing: prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Special Publication Number 40 ASA, Madison, Wi.
- Cabrera, M. L. & Kissel, D. E. 1988. Potentially mineralizable nitrogen in disturbed and undisturbed soil samples. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1010-1015.
- Cabrera, M. L. 1993. Modeling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 57: 63-66.
- Cabrera, M. L. 2007. Mineralización y nitrificación: Procesos claves en el ciclo del nitrógeno. Presentado en el simposio fertilidad 2007. IPNI Cono Sur/Fertilizar AC. Rosario. 10/11 Mayo 2007.
- Calviño, P. A. & Echeverría H. E, 2003. Incubación anaeróbica del suelo como diagnóstico de la respuesta a nitrógeno del maíz bajo siembra directa. *Ciencia del suelo*, 21(1): 24-29.
- Cambardella, C. A. & Karlen, D. L. 1999. Spatial analysis of fertility parameters. *Precis. Agric.* 1: 5-14.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman; J. M. Novak; T. B. Parkin; D. L. Karlen; R. F. Turco & Konopka, A. E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
- Cassman, K. G., Dobermann, A. & Walters, D. 2002. Agroecosystems, N use efficiency and N management. *Ambio*. 31:132-140.

- Cassman, K. G. 1999. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agricultural. *Proc.Nat. Acad. Sci.* 96: 5952-5959.
- Castrignanó, A. 2011. Introduction to spatial data processing. ISBN: 978-88-548-3978-6.
- Caviglia, O.P. & Melchiori, R. J. M. 2011. Contribution of contrasting plant hierarchies to the response to N fertilizer in maize. *Field Crops Research.* 122:131-139.
- Chilés, J. & Delfiner, P. 2012. *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*, second edition. John Wiley & Sons, New York.
- Cristiano, P. M., Posse, G., Di Bella, C. M. & Jaimes, F. R. 2010. Uncertainties in fpar estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture', *International Journal of Remote Sensing.* 31: 15, 4095 — 4109.
- CROPSCAN Inc. (2000). *Data Logger Controller, User's Guide and Technical Reference.* CROPSCAN Inc., Rochester, MN.
- Dahiya, I. S., Richter, J. & Malik R. S. 1984. Soil spatial variability: A review. *Intern. J. Trop. Agric.* 2(1): 1-102.
- Dampney, P.M.R. 2002. Optical and radar sensing of wheat crops to aid management decision. In: *Abstracts os SCI Conference, Aplications of Remote Sensing in Agriculture*, 15 january 2002, Belgrave, London.
- Dampney, P.M.R., Bryson, R., Clark, W., Strang, M. & Smith, A. 1998. The use of sensor technologies in agricultural cropping systems. A scientific review and recommendations for cost effective development. ADAS Contract Report, Review Report to MAFF, Project Code CE 0140.
- Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., de Colstoun, E.B. & McMurtreyiii, J.E., 2000, Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74: 229-239.
- Dawson, T. P. & Curran, P. J. 1998. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. *Int. J. Remote sensing.* 19: 2133-2139.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. & Robledo, C.W. 2011. *Infostat versión 2011.* Grupo infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [Urlhttp://www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar)
- Diggle, P. J. & Ribeiro, P. J. 2007. In "Spring Series in Statistics". *Model-based geostatistics.* 2: 27-45.
- Diker, K. & Bausch, W. C. 2003. Radiometric field measurements of maize for estimating soil and plant nitrogen. *Biosystems Engineering.* 86 (4): 411-420.
- Dillon, A., Hurtado, M., Giménez, J. & Castillo, R., 1985. Consideraciones Geomorfológicas y Estratigráficas como base del carteo de suelos de un sector de la Pampa Arenosa, Buenos Aires. *Actas Primeras Jornadas Geológicas Bonaerenses.* Tandil. Pp.737-749.
- Diovisalvi, N., Reussi Calvo N. I., Studdert G. A. & Domínguez G. F. 2010. Relación entre el nitrógeno incubado anaeróbico y fracciones de carbono orgánico en suelos con diferente textura. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. *Actas y CD* 2 pág. Rosario, Santa Fé, Argentina.
- Doerge, T. A. 1999. Management zone concepts. SSMG-2. En: *Information Agriculture Conference*, 9 al 11 de Agosto de 1999, Stewart Center, Purdue, IN.
- Domínguez, G. F., Studdert, A., Cozzolim, V. & Diovisalvi, V. 2006. Relación entre el nitrógeno potencialmente mineralizable y el rendimiento de maíz. *Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy*, 19 al 22 de septiembre de 2006. En CD.

- Echeverría, H. E.; Bergonzi, R. & Ferrari, J. L. 1994. Un modelo para estimación de la mineralización del nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 12: 56-62.
- Echeverría, H., San Martín, N. & Bergonzi, R. 2000. Métodos rápidos de estimación de nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos. *Ciencia del Suelo* 18, 9-15.
- Egelkraut, T. M., Kissel, D. E., Cabrera, M. L. & Adkins, W. 2003. Predicting N mineralized in a Georgia Coastal Plain field. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 66: 1-12.
- Egelkraut, T. M., Kissel, D. E., & Cabrera M. L., 2000. Effect of soil texture on nitrogen mineralized from cotton residues and compost. *J. Environ. Qual.* 29, 1518–1522.
- Espósito, G. 2013. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Escuela para graduados de la FCA-UNC.
- Fabrizzi, K.P., Morón, A. & García, F.O. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. Nondegraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1831-1841.
- FAO. 2004. Las buenas prácticas agrícolas. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. www.rlc.fao.org/es/agricultura/bpa/docfao/110.doc.
- Fernández, S., Vidal, D., Simón, E. & Solé-Sugrañes, L. 1994. Radiometric characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. Remote Sens.* 15: 1470-1549.
- Fitzgerald, G. J., Rodríguez D., Christensen L. K., Belford R. & Sadras V.O. 2006. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agricultural Journal* 7:233–248.
- Follett, R. F. & Delgado, J. A. 2002. Nitrogen fate and transport in agricultural systems. *Journal of soil and water conservation.* 57 (6): 402-408.
- Franzen, D.W. & Kitchen, N.R. 2000. Developing Management Zones to Target Nitrogen Applications. Potash Phosphate Institute, Site-Specific Management Guideline No. 5. Ref.# 99075/Item 10-1005.
- Fraisse, C. W., Sudduth, K. A. & Kitchen, N. R. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE* 44:155-166.
- Galantini, J.A., Senesi, N., Brunetti, G. & Rosell, R. 2004. Influence of texture on the nitrogen and sulphur status and organic matter quality and distribution in semiarid Pampean grassland soils. *Geoderma* 123: 143-152.
- Gallagher, P. A. & Bartholomew, W. V. 1964. Comparison of nitrate production and other procedures in determining nitrogen availability in southeastern coastal plain soils. *Agron. J.* 56(2): 179-184.
- Gallardo, A. 2006. Geostatística. *Ecosistemas*. 15(3): 48-58
- Gamon, J. A., Serrano, L., & Surfus, J. S. 1997. The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels, *Oecologia*, 112:492–501.
- García, F. 2009. Eficiencia de uso de nutrientes y mejores prácticas de manejo para la nutrición de cultivos de granos. *Actas Simposio Fertilidad 2009*, pág. 9-18.
- García, F. O., Boxler, M., Minteguiaga, J., Blanco, H., Houssay, R., Deza Marín, G. & Berardo, A. 2005. Efectos directos y residuales de la fertilización en maíz: resultados de la red de nutrición CREA Sur de Santa Fe. *Actas VIII Congreso Nacional de Maíz*. 154-157.

- García, F., Boxler, M., Minteguiaga, J., Pozzi, R., Firpo, L., Ciampitti, I., Correndo, A., Bauschen, F., Berardo, A. & Reussi Calvo, N. 2010. La red de nutrición de la región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros diez años 2009-2009, AACREA, 2da edición. 62.
- Gebbers, R. & Adamchuk, V. I. 2010. Precision agriculture and food security. *Science*. 327: 828-831.
- Genovese, F., Echeverría, H. E., Studdert, G. A., & Sainz Rozas, H. 2009. Nitrógeno de aminoazúcares en suelos: calibración y relación con el nitrógeno incubado anaeróbico. *Ciencia del Suelo* 27: 225-236.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M.N. 1998. Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research* 22:689-692.
- Goderya, F. S. 1998. Field scale variations in soil properties for spatially variable control: A Review. *Journal of Soil Contamination* 7: 243-264.
- Goovaerts, P. 1992. Factorial kriging analysis: a useful tool for exploring the structure of multivariate spatial information. *J Soil Sci.* 43: 597-619.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, New York, Estados Unidos.
- Goovaerts, P. 1998. Ordinary cokriging revisited. *Math. Geol.* 30: 21-42.
- Goovaerts, P. 1999. *Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives*. *Geoderma*. 89: 1-45.
- Gotway, C. A. & Hartford, A. H. 1996. Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the prediction of spatial variables. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics* 1: 17-39.
- Graeff, S. & Claupein, W. 2003. Quantifying nitrogen status of corn (*Zea Mays* L.) in the field by reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*. 19: 611-618.
- Gregoret, M. C., Dardanelli, J., Bongiovanni, R. & Díaz-Zorita, M. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Ciencia del Suelo*. 24: 147-159.
- Gregoret, M. C., Diaz Zorita, M., Dardanelli, J. & Bongiovanni, R. 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precision Agric.* 12: 831-849.
- GS+ 5.0. Gamma Design Software. 2004. *GS+*. Geostatistics for the environmental sciences. Plainwell, Michigan USA.
- Gyanesh, C., Markham, B. L. & Helder, D. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*. 113: 893-903.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J. & Dextraze, L. 2002. Integrates narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 81: 416-426.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L. & Nelson, W. L. 2005. *Soil fertility and fertilizers*. 7th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. P. 515.
- Hilker, T., Wulder, M. A., Coops, N. C., Linke, J., McDermid, G., Masek, J. G., Gao, F. & White, J. 2009. A new data fusion model for high spatial and temporal resolution mapping of forest disturbance based on Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment* 113: 1616-1627.

- Huete, A., Justice, C. & Van Leeuwen, W. 1999. MODIS vegetation index (mod 13) algorithm theoretical basis document. MODIS. 1999. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
- INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires, escala 1:500.000. 527pp, Bs. As. Argentina.
- INTA. 1995. Atlas de suelos de la Republica Argentina.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York.
- Isla, R., & López-Lozano, R. 2005. Comparación de distintos índices de vegetación para detectar deficiencias de nitrógeno en maíz. *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*, 24: 5-10
- Jaynes, D. B. & Colvin, T. S. 1997. Spatio temporal variability of corn and soybean yield. *Agron. J.* 89: 30-37.
- Journel, A. G. & Huijbregts, C. J. 1978. Mining geostatistics. Academic Press, New York, pag: 39.
- Ju, J. & Roy, D. P. 2008. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous United States and globally. *Remote Sensing of Environment*, 112: 1196-1211.
- Kassem, A. & Nannipieri, P. 1998. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. 3: 80-81.
- Keeney, D. R., & Nelson, D. W. 1982. Nitrogen-Inorganic Forms. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Agronomy Monograph 9, Part 2* (2nd ed., pp. 643-698). Madison, WI: ASA, SSSA.
- Kemerer, A., Di Bella, C., Melchiori, R., Benench, A. & Alvarez, R. 2007. Comparación de índices espectrales para la predicción del IAF en campos de maíz. Congreso de teledetección: hacia mejor entendimiento de la dinámica global y regional. Asociación Española Teledetección
- Kerry, R. & Oliver, M. A. 2007. Determining the effect of asymmetric data on the variogram. II. Outliers. *Comput. Geosci.* 33: 1233-1260.
- Koch, B., Khosla R., Frasier W. M., Westfall, D. G. & Inman, D. 2004 Economic Feasibility of Variable-Rate Nitrogen Application Utilizing Site-Specific Management Zones. [Http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/96/6/1572](http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/96/6/1572).
- Kravchenko, A. N. & Bullock, D. G. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92: 75- 83.
- Laakso, J., Setälä, H. & Palojärvi, A. 2000. Influence of decomposer food web structure and nitrogen availability on plant growth. *Plant and Soil* 225: 153-165. Li, F., Miao, Y., Zhang, R., Cui, Z., Li, R. & Chen, X., 2005. In season optical sensing improves N use efficiency for winter wheat. *Soil Sci. Soil A. J.* 73: 1566-1574.
- Li, H., Lascano, R., Barnes, E., Booker, J., Wilson, T., Bronson, K. & Segarra, E. 2001. Multispectral reflectance of cotton related to plant growth, soil water and texture, and site elevation. *Agron. J.* 93: 1327-1337.
- Li, M., Hoch, G. & Körner, C. 2001. Spatial variability of mobile carbohydrates within Pinus cembra trees at the alpine treeline. *Phyton - Annales Rei Botanicae* 41: 203-213.
- Lillesand, T. M. & Kiefer, R. W. 2000. Remote sensing and image interpretation. Jhon Wiley and Sons. New York.

- Linn, D. M. & Doran, J. W. 1984. Effect of water filled pore space on CO₂ and N₂O production in tilled and nontilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:1267-1272.
- Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W., Wolfinger, R. D. & Schabenberber, O. 2006. SAS system for mixed models. SAS Inst., Cary, NC.
- Lopez-Granados, F., Jurado-Exposito, M., Atenciano, S., Garcia-Ferrrer, A., de la Orden M.S. & Garcia-Torres, L. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in south Spain. *Plant and Soil.* 246: 97-105.
- Maddoni, A. G. 2011. Analysis of the climatic constrains to maize production in the current agricultural region of Argentina probabilistic approach. *Theor Appl Climatol.*
- Malagnino, E. 1991. Late Pleistocene to Late Holocene Evolution of the Paleodesert of the Central Region of Argentina and its Paleoclimatic Implication. International Conference On Desert Landscapes. International Geological Correlation Programme. Project 252. Perth Western Australia.
- Marbán, L. 2005. Métodos de extracción y determinación de nitratos en suelos. En: Marbán L y S Ratto. *Tecnologías en análisis de suelos.* Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. 215pp.
- Martin, K. L.; Raun W. R., Freeman K. W., Teal R. K., Desta K., Arnall D. B., Tubaña B., Solie J. B., & Stone M. L. 2007. Expression of spatial variability in corn (*Zea mays* L.) as influenced by growth stage using optical sensor measurements. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma. *Agron J.* 99:384- 389
- Matheron, G. 1973. The intrinsic random functions and their applications. *Adv. Appl. Probab.* 5: 239-465.
- Mahmoudjafari, M., Kluitenberg, G.J., Havlin, J.L., Schwab, A.P. and Sisson, J.B. 1997. Spatial Variability of Nitrogen Mineralization at the Field Scale. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 1214-1221. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100040029x
- Meisinger, J. J. & Delgado, J. A. 2002. Principles for managing nitrogen leaching. *Journal of soil and water conservation.* 57 (6): 485-498.
- Melchiori R. J. M., Caviglia. O. P., Faccendini, N., Bianchini, A. & Raun, W. R. 2006 Evaluación de refertilización nitrogenada basada en la utilización de un sensor óptico. INTA EEA Paraná. Actualización Técnica en maíz. Serie Extensión n° 41 p 33:36
- Melchiori, R., Barbagelata, P. A., Albarenque, S. M., Bianchini, A. A. & Raun, W. 2008. Spatial resolution for N management with active sensors in corn. 9th International Conference of Precision Agriculture. Denver, Colorado.
- Melchiori, R., Melchiori, A., Albarenque, S. & Kemerer, A. 2019. Generación de mapas de prescripción variable de nitrógeno utilizando imágenes de sensores remotos. *Actas del Simposio de Fertilidad 2019.*
- Méndez, A. & Melchiori, R. 2012. Proyecto agricultura de precisión. En Actualización Técnica N010. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Mendez, A., Scaramuzza, F., Velez, J. & Villarroel, D. 2014. Herramientas utilizadas para la delimitación de ambientes o zonas de manejo. Módulo de Tecnologías de Agricultura de Precisión, INTA EEA Manfredi.
- Méndez, M. J., Panebianco, J. E., de Oro, L., Colazo, J. C., & Buschiazzo, D. E. 2006. Organic carbon and nitrogen contents in size fractions in wind eroded soils of semiarid Argentina. *Journal of Soil and Water Conservation* 61: 230-235.
- Melion, D. 2019. Variabilidad topográfica y fertilización variable de nitrógeno en maíz. <https://inta.gob.ar/documentos/variabilidad-topografica-y-fertilizacion-variable-de-nitrogeno-en-maiz>

- Miao, Y., Mulla, D. J., Randall, G. W. & Vetsch, R. V. 2009. Combining chlorophyll meter readings and high spatial resolution remote sensing images for in-season site-specific nitrogen management of corn. *Precision Agriculture*. 10: 45-62.
- Moran, M. S. 2000. New Imaging sensor Technologies suitable for agricultural Management. In: *Remote Sensing in Agriculture* (Bryson, R.J., Howard, W., Riding, A.E., Simonds, L.P. & Steven, M.D. eds. *Aspects of Applied Biology*. 60: 1-10.
- Moran, P. A. P. 1950. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* 37 (1): 17-23.
- Mosso J. E. & Zubillaga, M. M. 2012. Comparación entre índices espectrales para predecir INN en condiciones contrastantes de ambientes de manejo y dosis de N en maíz. CD R XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
- Mueller, T. G., Pierce, F. J., Schabenberger, O. & Warncke, D. D. 2001. Map quality for site-specific fertility management. *Soil Sci. Soc. Of Am. J.* 65: 1547-1558.
- Mullen, R. W., Freeman, K. W., Raun, W.R. & Johnson, G.V. 2003. Identifying an In-Season Response Index and the Potential to Increase Wheat Yield with Nitrogen. *Agron. J.* 95:347-351.
- Mumby, P. J. & Alasdair, J. E. 2002. Mapping marine environments with IKONOS imagery: enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 82: 248-257.
- Muschietti Piana, M. P. & Zubillaga, M. M. 2014. Agricultura de precisión y GEI: efecto de la fertilización nitrogenada. En *Suelos, producción agropecuaria y cambio climático: Avances en Argentina*. Ed. Pascale Medina et al. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 20p ISBN 9789871873241
- Muschietti Piana, M. P., Cipriotti, P. A., Rimski-Korsakov, H., Niborski, M. & Urricariet, S. 2010. Fertilización con dosis variable. Optimizando la eficiencia de uso del agua y del nitrógeno del maíz. *Fertilizar* 16: 21-25.
- Muschietti Piana, M. P., Cipriotti, P. A., Urricariet, S., Peralta, N. R. & Niborski, M. 2018. Using site-specific nitrogen management in rainfed corn to reduce the risk of nitrate leaching. *Agricultural Water Management*. 199: 61-70.
- Navalgund, R. R., Jayaraman, V. & Roy, P. S. 2007. Remote sensing applications: an overview. *Current Science*. 93 (12): 1747-1766.
- Nelson, D.W. & Sommers, L.E. 1973. Determination of total nitrogen in plant material. *Agronomy Journal* 65, 109-112.
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B. & Sznaider, G. A. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113:138-148.
- Ohmar, Z., Landagan, E. B. & Barrios, B. 2007. An estimation procedure for spatial-temporal model. *Statistics & Probability Letters*. 77: 401-406.
- Oliver, M. A. & Webster, R. 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*. 113: 56-69.
- Ortega, R. & Flores L. 1999. Agricultura de precisión. P13-46. En R. Ortega y L. Flores (ed.) *Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio - específico*. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu-Chile.
- Pachepsky, Y. A., Timlin, D. J. & Rawls, W. J. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Pagani, A., Echeverría, H. E. & Sainz Rozas, H. 2009. Respuesta a nitrógeno y azufre en el cultivo de maíz en diferentes ambientes de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del suelo*. 27: 21-29.

- Pagani A., H. E. Echeverría, H. Sainz Rozas, & Barbieri, P. A. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo* 26:183-193.
- Pagani, A. 2013. Manejo sitio específico de nutrientes para una mayor eficiencia productiva. En actas Simposio Fertilidad 2013. Rosario. Argentina.
- Page, A. L., Miller, R. H. & Keeney, D. R. 1982. *Methods of Soil Analysis*. Soil Sci. Soc. Amer. Madison, WI, USA. 1159pp.
- Paruelo, J. M. 2008. La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3): 4-22.
- Peralta, N., Castro Franco, M., Costa, J. L. & Calandroni, M. 2012. Delimitación de zonas de manejo mediante la relación entre conductividad eléctrica aparente del suelo y mapa de rendimiento. INTA. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-conductividad_electrica_y_mapas_de_rendimiento.pdf
- Piccolo, G., Galantini, J. A. & Rosell, R. A. 2004. Particulate organic carbon in sustainable agriculture of subtropical soils in Argentina. *Geoderma* 123: 333-341.
- Pierce, F. J & Nowak, P. 1999. Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1-85.
- Porter, P. M., Lauer, J. G., Huggins, D. R., Oplinger, E. S. & Crookston, R. K. 1998. Assessing spatial and temporal variability of corn and soybean yields. *J. Prod. Agric.* 11: 359-363.
- Price, J.C. 1997. Spectral band selection for visible-near infrared remote sensing: Spectral-spatial resolution tradeoffs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 35: 1277-1299.
- QGIS Development Team, 2014. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. [Http://qgis.osgeo.org](http://qgis.osgeo.org)
- Raun W.R., Solie J.B., Johnson G. V., Stone M. L., Mullen R. W., Freeman K. W., Thomason W. E. & Lukina E. V. 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. *Agron.J.* 94:815-820
- Raun, W. R., Solie, J. B., Stone, M. L., Martin, K. L., Freeman, K. W., Mullen, R. W., Zhang, H., Schepers, J. S. & Johnson, G. V. 2005. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2783–2792.
- Redel, H. M. 2012. Trabajo de intensificación para obtener el título de grado. Evaluación de la mineralización de nitrógeno para una agricultura por ambientes. Marzo, 2012. <http://ri.agro.uba.ar/files/intranet/intensificacion/2012redelhernanmatias.pdf>
- Redel, H. M., Michlig, A., Fernandez, L., de Villalobos, T. & Mossini, A. 2018. Manejo sitio específico de N en maíz a través del diagnóstico por sensores remotos. Actas del 17 Curso de Agricultura y Ganadería de precisión. INTA Manfredi.
- Reussi Calvo, N., Wyngaard, N., Orcellet, J., Echeverría, H. & Sainz Rozas, H. 2018. Predicting Field-Apparent Nitrogen Mineralization from Anaerobically Incubated Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*. ISSN: 0361-5995.
- Reussi Calvo, N.I., H.R. Sainz Rozas, H.E. Echeverría, & Berardo, A. 2013. Contribution of anaerobically incubated nitrogen to the diagnosis of nitrogen status in spring wheat. *Agron. J.* 105:321–328. doi:10.2134/agronj2012.0287
- Reussi Calvo, N., Calandroni, M., Studdert, G., Cabria, F., Diovisalvi, N. & Berardo, A. 2014. Nitrógeno incubado en anaerobiosis y materia orgánica en suelos agrícolas de Buenos Aires. Actas Del XXIV Congreso Argentino de La Ciencia del Suelo.

- Reyniers, M., Walvoort, D. J. J. & De Baardemaaker, J. 2006. A linear model to predict with a multi-spectral radiometer the amount of nitrogen in winter wheat. *International Journal of Remote Sensing*. 27:4159-4179
- Rice, C. W. & Havlin, J. L. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. *Soil Sci. Soc. Am. Special publication* 40.
- Rimski-Korsakov, H, Rubio, G. & Lavado, R. S. 2004. Potential losses of nitrate by leaching in soils of the Pampas Argentina. *Agricultural Water management* 65: 83-94.
- Ritchie, S. & Hanway, J. J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special. R N° 48.
- Roberts, P. C. 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil* 247: 143-149.
- Robertson, M., Isbister, B., Maling, I., Oliver, Y., Wong, M., Adams, M., Bowden, M. & Tozer, P. 2007. Opportunities and constraints for managing within-field spatial variation in western Australia grain production. *Field Crops Res.* 104: 60-67.
- Roel, A. & Plant, R. E. 2004. Spatiotemporal analysis of rice yield variability in two California fields. *Agron. J.* 96: 77-90.
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55: 95-107.
- Ros, G. H. Temminghoff, E. J. M. & Hoffland, E. 2011. Nitrogen mineralization: a review and meta-analysis of the predictive value of soil test. *European journal of Soil Science*. 62: 162-173.
- Rossi, R. E, Mulla, D. J, Journel, A. G. & Franz, E. H. 1992. Geostatistical tools for modelling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs* 62: 277-314.
- Rouse J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. & Deerin, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. N. SP-351. Ed Third ERTS Symposium.1, 309-317. Whashington.NASA.
- Ruffo, M. L., Bollero, G. A., Hoeft, R. G. & Bullock, D. G. 2005. Spatial variability of the illinois soil nitrogen test: implications for soil sampling. *Agronomy Journal*. 97: 1485-1492.
- Ruiz, R.A., Maddonni, G.A., Mercu, J.L. & Satorre, E.H. 2004. Bases para la fertilización de maíz en la región litoral sur de AACREA (Provincia de Entre Rios). XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, actas en CD.
- Rydberg, A. & Söderström M. 2000. Potential crop growth assessment from remotely sensed images compared to ordinary yield maps. In: Proc. 5th International Conference on Precision Agriculture. Precision Agriculture Center, ASA, CSSA and SSSA, Minnesota.
- Ortega B. & Mardonez O. 2005. Variabilidad Espacial de la Mineralización de Nitrógeno en un Suelo Volcánico de la Provincia de Ñuble, VIII Región, Chile. *Agricultura Técnica*, 65(2), 221-231. <https://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072005000200012>
- SAGYP-INTA. 1989. Mapas de suelos de la provincia de Buenos Aires.
- Sainz Rozas, H R., Echeverría, H. E. & Picone, L. I. 2001. Denitrification in maize under no-tillage: Effect of nitrogen rate and application time. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1314-1323.
- Salvagiotti, F., Pedrol, H., Castellarín, J., Capurro, J., Felizia, J. C., Gargicevich, A. Gentili, O., Méndez, J. & Trentino, N. 2002. Diagnostico de la fertilización nitrogenada en maíz. I. Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. *Para mejorar la producción* 20: 67-70.

- Salvagiotti, F., Pedrol, H. & Catellarín, J. 2002 a. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. II. Relación entre la respuesta en rendimiento y la concentración de N-NO₃ en el suelo en el estadio V5-V6. Para mejorar la producción 20: 71-74.
- Salvagiotti, F., Pedrol, H., Catellarín, J., Capurro, J., Felizia, J. C., Gargicevich, A., Gentili, O., Mendez, J. & Trentino, N. 2002 b. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz. I. Relación entre la respuesta en rendimiento y la disponibilidad de nitrógeno a la siembra. Para mejorar la producción 20: 67-70.
- Sanchez, M. A. & Ascheri, L. M. 2005. Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba. CREA Monte Buey-Inriville. Campañas 2003-04 y 2004-05. *Informaciones Agronomicas* 27: 18-20.
- Scharf, P. C., Kitchen, N. R., Sudduth, D. A., Davis, J. G., Hubbard, V. C. & Lory, J. A. 2005. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agron. J.* 97: 452-461.
- Schepers, J. S. & Meisinger, J. J. 1994. Field indicators of nitrogen mineralization. En: Havlin, J. & J Jacobsen. (Ed.). *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Spec. Pub. 40. SSSA-ASA. Madison, Estados Unidos.
- Schlöter, M., Bach, H. J., Metz, S., Sehy, U. & Munch, J. C. 2003. Influence of precision farming on the microbial community structure and functions in nitrogen turnover. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 98 (1-3): 295-304.
- Schomberg, H. H., Wietholter, S., Griffin, T. S., Reeves, D. W. & Cabrera, M. L. 2009. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1575-1586.
- Scotford, I. M. & Miller, P. C. H. 2005. Applications of spectral reflectance techniques in Northern European cereal production: A Review. *Biosystems Engineering* 90: 235-250
- Sellers, P. J., Berry, J. A., Collatz, G. J., Field, C. B. & Hall, F. G. 1992. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. III. A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. *Remote Sens. Environ.* 42: 187-216.
- Serna, M. D. & Pomares, F. 1992. Evaluation of chemical indices of soil organic nitrogen availability in calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 1486-1491.
- Serrano, L.; Filella, I. & Peñuelas J. 2000. Remote Sensing of Biomass and Yield of Winter Wheat under Different Nitrogen Supplies. *Crop Science*. 40:723-731.
- Shahandeh, H., Wright, A. L., Hons, F. M. & Lascano, R. J. 2005. Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 97: 772-782.
- Sharifi, M., Zebarth, B. J., Burton, D. L., Grant, C. A. & Cooper, J. M. 2007. Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71: 1233-1239.
- Sharifi, M; Zebarth B. J., Burton D. L., Grant C. A., Bittman S., Drury C. F., McConkey B. G. & Ziadi N. 2008. Response of potentially mineralizable soil nitrogen and indices of nitrogen availability to tillage system. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:1124-1131.
- Soon, Y. K., Haq, A., & Arshad, M. A. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38: 2029-2043.
- Stanford, G. & Smith, S. J. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 36: 465-472.
- Swinton, S. M. & Lowenberg-deboer, J. 2002. Global adoption of precision agriculture technologies: Electronic source: Online University Discussion Paper, Michigan State and Prude Universities.

- Teal, R. K., Tubana, B., Girma, K., Freeman, K. W., Arnall, D. B., Walsh, O & Raun, W. R. 2006. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agron. J.* 98:1488-1494.
- Thenkabail, P. S., Ward, A. D. & Lyon, J. G. 1994. Landsat-5 Thematic Mapper Models of Soybean and Corn Crop Characteristics. *International Journal of Remote Sensing* 15:49-61.
- Tilman, D. 1999. Global environmental impacts of agricultural expansion: The need for sustainable and efficient practices. *Proc. Nat. Acad. Sci USA* 96: 5995-6000.
- Urricariet, S., Niborski, M. & Kvolek, C. M. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo.* 29(1): 49-59.
- Urricariet, S. & Zubillaga, M. 2013. En: Fertilización de cultivos y pasturas (eds Facultad de Agronomía). 7: 443-470.
- Vázquez Amabile, G., Gonzalo, M., Pella, M., Cueto, G. & Galbusera, S. 2013. Nutrición y agricultura por ambientes: Avances en el sur de Buenos Aires. En: FO García & AA Correndo (Eds.). Simposio Fertilidad 2013: nutrición de cultivos para la intensificación productiva sustentable, 1a ed., pp. 104-111. International Plant Nutrition Institute [Buenos Aires, Argentina].
- Vogelmann, J. E., Rock, B. N. & Moss, D. M. 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing* 14(8): 1563-1575.
- Wackernagel, H. 1988. Geostatistical techniques for interpreting multivariate spatial information. In: Chung C. F., Fabbri, A.G., Sinding-Larsen R (eds) *Quantitative analysis of mineral and energy resources*. Reidel, Dordrecht, pp 393-409.
- Wackernagel, H. 2003. *Multivariate geostatistics*, third edition. Springer-Verlag, Berlin.
- Wang W. J., Smith, C. J. & Chen, D. 2004. Predicting soil mineralization dynamics with a modified double exponential model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1256-1265.
- Wang, Z., Wang, J., Liangyun, L., Huang, W. & Zhao, C. 2005. Estimation of nitrogen status in middle and bottom layers of winter wheat canopy by using ground-measured canopy reflectance. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36: 2289-2302.
- Wanjura, D. F. & Hatfield, J. L. 1987. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass. *Transaction of the ASAE* 30:810-816.
- Waring, S. A. & Bremner, J. M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged condition as an index of nitrogen availability. *Nature* 201: 251-252.
- Warrick, A. W., Myers, D. E. & Nielsen, D. R. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. In American society of agronomy-Soil science society of America, 667 South Segoe Road, Madison. WI 53711, USA. *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical-Agronomy Monograph no.9* (2 edition).
- Webster, R. & Lark, R. M. 2013. *Field sampling for environment science and management*. Routledge, London.
- Webster, R. & McBratney, A. B. 1989. On the akaike information criterion for choosing models for variograms of soil properties. *J. Soil Sci.* 40: 439-496.
- Webster, R. & Oliver, M. A. 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. Edit by Wiley. ISBN: 0471965537,9780471965534.
- Wilson, C. E. Jr, Norman, R. J. Wells, B. R. & Correll, M. D. 1994. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils, II: comparison to greenhouse availability indices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 25: 591-604.

- Zebarth, B. J., Drury, C. F., Tremblay, N. & Cambouris, A.N. 2009. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian J. Soil Sci.* 89: 113-132.
- Zhang, M., Hendley, P., Drost, D., O'Neill, M. & Ustin, S. 1998. Corn and Soybean Yield Indicators Using Remotely Sensed Vegetation Index. In: Proc. 4th International Conference on Precision Agriculture. St. Paul. MN.
- Zubillaga, M. M. & Urricariet, S. 2007. Caracterización de la variabilidad en la fertilidad de los suelos según la tecnología de fertilización. En *Tecnología de la Fertilización de Cultivos Extensivos en la Región Pampeana*. Editorial de la Facultad de Agronomía UBA. Pág.119-132. ISBN978-950-29-1012-3.
- Zubillaga, M. M. & Urricariet, S. 2005. Assessment of Nitrogen Status in Wheat Using Aerial Photography. *Communication in Soil Science Plant Analysis* 36: 1787-1798. Editorial: Marcel Dekker Inc. ISSN: 0010-3624.
- Zubillaga, M. M., Cabrera, M. L., Kissel, D. & Rema, J. 2007. Modelling field scale N mineralization in Coastal Plain soils. *Ecological Modelling* 207: 243-250.
- Zubillaga, M. M., Mosso, J. E. & Redel, H. M. 2012. Nitrogen mineralization variability at field using vegetation spectral indices. En *Proceedings ASA, CSSA, SSSA International Annual Meetings*. Ohio, Estados Unidos.
- Zubillaga, M. M. & Zubillaga, M. S. 2013. En *Fertilización de cultivos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana*. Ed: Alvarez, R., Prystupa, P., Rodriguez, M. & Alvarez, C. Editorial de la Facultad de Agronomía – UBA. 401-425.
- Zubillaga, M. M., Cabrera, M. L. & Vaio, N. 2009. Spatial variation of potentially mineralizable nitrogen within a field. *Proceedings of 16th Nitrogen Workshop*. Turin, Italy.
- Zubillaga, M. M.; Redel, H. M. & Solari, F. 2014. Mineralización de nitrógeno aparente en maíz a escala de lote. *XXIV Congreso Ciencia del Suelo 2014 Bahía Blanca*.
- Zuur, A. F., Ieno, E. N., Walker, N. J., Saveliev, A. A. & Smith, G. M. 2009. Violation of Independence. Part II. In: *Mixed effects models and extensions in ecology with R. Statistics for Biology and Health*. Ed. Springer Sci.
- Zuur, A., Ieno, E.N., Walker, N., Saveliev, A.A. & Smith, G.M. 2007. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. ISBN 978-0-387-87458-6. 7:161-191.
- Zwiggelaar, R. 1998. A review of spectral properties of plants and their potential use for crop/weed discrimination in row crops. *Crop Protection* 17: 189-206.