

Cosechando los beneficios de la agricultura de precisión en un cultivo de arroz en Uruguay

Bonilla Camila¹, Terra José A.², Gutiérrez Lucía³, Roel Álvaro²

¹ José Ellauri 757. Montevideo. Uruguay. Correo electrónico: camilabonillacedrez@gmail.com

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). Uruguay

³ Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Uruguay

Recibido: 14/5/14 Aceptado: 6/2/15

Resumen

El objetivo del trabajo fue desarrollar una metodología para el procesamiento de información de una chacra de arroz generada con monitores de rendimiento; y su posterior utilización como punto de partida a un manejo sitio-específico. Se cuantificó y caracterizó la variabilidad espacio-temporal de los datos relevados durante dos campañas en una chacra comercial de arroz de 100 ha. Se estudió el efecto de los factores de manejo agronómico y la distribución espacial de las propiedades del suelo como causas de la variabilidad espacial del rendimiento. Además se realizó un análisis económico a partir de mapas de ingreso neto. El análisis de conglomerado identificó dos grupos de rendimiento contrastantes. Asociados a ellos, se encontraron diferencias en el contenido de arena y fósforo del suelo y diferencias en la implantación, lámina de agua y control de malezas. El análisis económico reveló que la zona de bajo rendimiento presentó pérdidas promedio de 361 dólares americanos ha⁻¹ y la zona de alto rendimiento dio ganancias promedio de 280 dólares ha⁻¹. El estudio demostró que las tecnologías asociadas a la agricultura de precisión permiten el análisis de la variabilidad espacial del rendimiento en chacras cuyos cultivos parecen uniformes. Se identificaron dos grupos de rendimiento contrastantes, los cuales podrían verse beneficiados con un manejo sitio-específico. La simple transformación de los datos del monitor de rendimiento en un mapa de ingreso neto se constituyó en una herramienta muy útil a la hora de tomar las decisiones acerca de potenciales estrategias para el manejo sitio específico de esta chacra.

Palabras claves: monitores de rendimiento, análisis de conglomerados, manejo sitio-específico, análisis económico

Harvesting the Benefits of Precision Agriculture in an Uruguayan Rice Crop

Summary

The objective of this study was to develop a methodology for processing information from a rice field generated by yield monitors; and its subsequent use as a starting point to a site-specific management. The spatiotemporal variability of the yield monitor data relayed for two years in a commercial rice field of 100 ha was quantified and characterized. The effect of agronomy management factors and the spatial distribution of soil properties as the causes of the yield spatial variability were explored. Besides, an economic analysis with maps of net income was performed. The cluster analysis identified two zones of contrasting yield. Associated with them, differences in sand content, soil phosphorus, plant emergence, water depth, and weed control were found. The economic analysis showed that the low-yield zone presented average losses of 361 American dollars ha⁻¹ and the high yield zone had average earnings of 280 dollars ha⁻¹. Our study demonstrates that the technologies associated with precision agriculture allow the analysis of the yield spatial variability in fields that a first glance seem uniform. Two yield zones, which potentially could benefit from site-specific management, were identified. The simple data transformation of the yield data on a map of net income constitutes a very useful tool to make decisions about the potential strategies of site-specific management on this farm.

Keywords: yield monitors, cluster analysis, site-specific management, economic analysis

Introducción

La agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada a la producción agrícola con el propósito de mejorar el rendimiento de los cultivos y la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999). Por su parte, el manejo sitio-específico es el manejo de los cultivos agrícolas a escalas espaciales menores de la chacra. Para que este manejo sea justificado se deben cumplir tres principios básicos: debe existir suficiente variabilidad espacial en factores que afecten el rendimiento, la/s causa/s de esa variabilidad deben ser identificadas y medidas, y la información surgida de esas medidas debe poder ser usada para modificar el manejo de los cultivos, para incrementar las ganancias, o para disminuir el impacto ambiental (Plant, 2001). La alta variabilidad espacial de las condiciones ambientales puede afectar los rendimientos de los cultivos (Mulla y McBratney, 2002) por lo que su identificación brinda la posibilidad de dividir la chacra en regiones de baja, media y alta productividad potencial (Doerge, 1999). Para la estimación o cuantificación de la variabilidad espacial de los suelos y cultivos, existen métodos de medición discretos (por ejemplo muestreo de suelos y plantas), continuos (ejemplo: monitores de rendimiento) y remotos (ejemplo: imágenes satelitales). Los monitores de rendimiento son dispositivos que periódicamente miden el flujo del material cosechado y computan un valor georreferenciado de rendimiento del cultivo (Plant, 2001). A partir de estas estimaciones se construyen mapas de rendimiento, que son una importante herramienta para inferir las características ambientales y el potencial de productividad de los suelos (Stafford *et al.*, 1998). Con ellos los agricultores pueden identificar las áreas dentro del campo donde los rendimientos pueden ser mejorados, o áreas donde se necesitan ajustes en los insumos para optimizar la rentabilidad de las explotaciones y/o la calidad del medio ambiente (Pierce *et al.*, 1997). Debido a que los mapas de rendimiento son una herramienta básica para el manejo de insumo y la mejora de la rentabilidad a nivel predial, los mismos son esenciales para la implementación del manejo sitio-específico (Roel y Plant, 2004a).

El análisis de conglomerados puede proporcionar una cuantificación objetiva de la estructura espacial de los patrones de rendimiento, así como permitir una identificación de la consistencia de estos patrones año en año (Pérez-Quezada *et al.*, 2003). A partir de ellos se podrían definir diferentes zonas de rendimiento del cultivo con similares capacidades de respuesta a los insumos y reducir el impacto

ambiental (Bocchi y Castrignano, 2007). El reconocimiento automatizado de patrones, por medio de la agrupación multivariable, se propone como una herramienta para la interpretación de la variación temporal y espacial de rendimiento de los cultivos (Lark y Stafford, 1997).

Los trabajos realizados en Uruguay han buscado identificar los principales factores que afectan la variación de los rendimientos dentro de las chacras principalmente en cultivos de secano y la posibilidad de delinear ambientes o zonas de manejo en base a diferentes capas de información (Terra *et al.*, 2006; Pravia, 2009). Sin embargo, a nivel nacional existe una brecha entre la posibilidad de acceso, por parte de los productores, a tecnologías vinculadas a la agricultura de precisión (GPS, monitores de rendimiento, muestreos dirigidos georreferenciados) y la utilización de esas tecnologías para la generación de información y conocimiento. En la cadena arrocerá existe un creciente interés por la aplicación de tecnologías de agricultura de precisión con fines productivos. Poder delimitar ambientes con diferente potencial productivo dentro de una chacra de arroz sería un buen comienzo para la implementación del manejo sitio-específico en este cultivo a nivel nacional.

El objetivo general de este trabajo fue desarrollar una metodología para el procesamiento de información relevada con monitores de rendimiento y su posterior utilización como punto de partida a un posible manejo sitio-específico en chacras comerciales de arroz. Como primer objetivo específico se planteó evaluar y cuantificar la variabilidad espacial del rendimiento de una chacra comercial de arroz. Como segundo objetivo específico se buscó, mediante herramientas de agrupamiento, delinear diferentes áreas de rendimiento. El tercer objetivo específico fue plantear un uso práctico de la información brindada por los mapas de rendimiento, a través de un análisis económico de las zonas de rendimiento delineadas.

Materiales y métodos

El estudio fue llevado a cabo durante las campañas de 2011-2012 y 2012-2013 en una chacra comercial de arroz de 100 ha ubicada en la localidad de Rincón, Uruguay (32°50'12.14" latitud sur- 53°48'22.91" longitud este). Los suelos pertenecen a la Unidad de Rincón de Ramírez y Río Branco (Altamirano, 1979). Son suelos arcillosos, de baja fertilidad y con drenaje imperfecto. La variedad cultivada fue El Paso 144 y se utilizaron medidas estándar de manejo del cultivo (guía de buenas prácticas en el cultivo de arroz en Uruguay).

Muestreo discreto

Dentro de la chacra se implementó una grilla de muestreo sistemática no alineada (Roel y Terra, 2006), compuesta por 53 puntos (~1 punto cada 2 ha) donde se realizaron mediciones en pre-siembra, durante el ciclo del cultivo y en cosecha. En pre-siembra se realizó un muestreo de suelo, donde cada muestra estuvo compuesta por seis sub-muestras en un radio de 2 m (0-15 cm de profundidad) y los análisis determinados fueron, para los dos años de estudio: fósforo Bray 1 (PB1: mg kg^{-1}), fósforo cítrico (PC mg kg^{-1}), potasio intercambiable (Kcmol kg^{-1} de suelo) y textura de suelo (porcentaje de arena, arcilla y limo). En la campaña 2012-2013 también se analizó el pH en agua. Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Análisis de Suelos de INIA La Estanzuela utilizando los métodos estándares. Para el PB1 y PC (extracción y colorimetría), K (acetato de amonio pH 7 y emisión atómica), pH en agua (potenciométrico) y textura (Bouyoucos). Si bien la metodología de PB1 es generalmente la más utilizada para determinar el nivel de fósforo (P) en suelo; Hernández y Berger (2003) reportaron un mejor comportamiento del método del PC para cuantificar P disponible en estos suelos. Los dos análisis se realizaron por esta razón. Para una visión global de la evolución del cultivo y la variabilidad del mismo dentro de la chacra, cada 15 días se evaluó, en cada uno de los puntos: implantación, altura del cultivo (cm) y altura de la lámina de agua (cm), y se describió visualmente el nivel de infección de malezas. A fin del ciclo del cultivo se realizó una cosecha manual y se obtuvo un valor de rendimiento estimado (kg ha^{-1}) para cada punto. El área cosechada fue de $2,04 \text{ m}^2$ y las muestras fueron trilladas, pesadas y a su vez se midió el porcentaje de humedad (%).

Monitor de rendimiento

El arroz fue cosechado con una cosechadora equipada con monitor de rendimiento Ag Leader con sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS). Antes de la cosecha el monitor de rendimiento fue calibrado según las instrucciones de fabricación y, durante la misma, la cosechadora siguió un patrón concéntrico de cosecha. El rango de velocidad fue entre 1 a 2 m s^{-1} , el ancho de cosecha fue de $5,5 \text{ m}$, y el flujo medido en kg s^{-1} fue medido cada dos segundos.

Los archivos obtenidos con los datos de rendimiento (coordenadas geográficas, velocidad, flujo, humedad, rendimiento) fueron importados al sistema de información geográfico QGIS 1.8. (Open Source Geospatial Foundation, OSGeo) como un archivo de puntos (cada punto represen-

taba un valor de rendimiento). Cada valor de rendimiento fue llevado a un rendimiento con 13 % de humedad. El conjunto de datos posee entre 50000 y 90000 valores de rendimiento. Con el objetivo de quitar el mayor «ruido» posible en los datos recolectados por el monitor, los mismos fueron analizados siguiendo la metodología propuesta por Ping y Dobermann (2005). Los puntos que se encontraban cercanos a los bordes y estaban asociados a arranques y paradas de la cosechadora fueron borrados para eliminar el efecto borde. Datos de rendimientos extremos ($<1000 \text{ kg ha}^{-1}$ $>15000 \text{ kg ha}^{-1}$) fueron omitidos. Los datos de rendimiento resultantes fueron analizados con un análisis de dispersión de Moran utilizando el paquete de R *spdep* (Software estadístico R, versión 2.10.1).

Análisis geoestadístico

Se utilizaron semivariogramas para analizar la variabilidad espacial de las propiedades de suelo del muestreo discreto en forma individual. La tendencia espacial de gran escala fue separada de los datos utilizando modelos de regresión (Cressie, 1991). Todos los variogramas y los modelos a ajustar fueron realizados con el Paquete de R *gstat* (Pebesma, 2004). Diferentes modelos de ajuste a los datos fueron testeados pero ningún modelo pudo ser ajustado. Por lo tanto, no se pudieron obtener mapas de variabilidad espacial para las propiedades del suelo a través de la interpolación. Por otro lado se realizaron Polígonos de Thiessen para tener una visualización de la distribución espacial de todas las variables muestreadas en el muestreo discreto (suelo, planta y prácticas de manejo). Este análisis fue realizado con QGIS 1.8.

Monitor de rendimiento

La capa de puntos de rendimiento fue interpolada a una grilla fija de $30 \times 30 \text{ m}$ utilizando *kriging* del vecino más próximo. La tendencia de gran escala y pequeña escala fue removida utilizando modelos de regresión lineal (Cressie, 1991). Una tendencia lineal en x e y fue incluida en el modelo. Para la caracterización de la variación a pequeña escala, los variogramas experimentales fueron calculados utilizando los residuales de rendimiento obtenidos del modelo de regresión. Se asumió una distribución normal de los datos, la cual fue chequeada utilizando Q-Q plots y Test de Shapiro. Un variograma teórico fue ajustado a cada variograma experimental y diferentes modelos de ajuste fueron testeados. El modelo esférico isotrópico fue el de mejor ajuste en los dos casos. Todos los variogramas computados y los modelos de ajuste fueron realizados en el Paquete de R *gstat*.

Análisis de conglomerado

Con el objetivo de delinear zonas con diferente potencial productivo, se realizaron análisis de conglomerados de los datos de rendimiento del monitor resultantes de la interpolación. El método utilizado fue *k*-medias. En este algoritmo, *k* puntos son seleccionados como semillas de los grupos y luego cada grupo es formado asignando todos los demás puntos a la semilla más cercana. La media de cada aglomeramiento parcial es luego seleccionada como el nuevo set de *k* semillas. Se realizaron grupos para dos set de datos; uno que contenía los dos años evaluados y otro set compuesto por los datos de rendimiento para cada año por separado. Para comprobar que los patrones fueran espacio-temporalmente estables, los grupos fueron contruidos a partir de diferentes conjuntos de semillas iniciales y se hicieron 100 réplicas para cada *k*-grupos. A su vez, para chequear que los grupos estuvieran espacialmente organizados y no depender de la visualización, se utilizó el estadístico γ , que mide la consistencia interna de los grupos:

Suponiendo que existen *p* datos localizados, el set bajo consideración tiene *n* replicaciones y un indicador β_i , $i=1, \dots, n$ que se define para cada ubicación *i*, siendo $\beta_i=1$ si todos los miembros del set *i* pertenecen al mismo grupo o $\beta_i=0$ si al menos una locación del set *i* pertenece a un grupo diferente. El valor p/n^k es el valor esperado de celdas que pertenecen al mismo grupo por chance. Si todos los miembros del set son idénticos, entonces $\gamma=1$, por otro lado si todas las celdas de los miembros del set son asignados al azar, entonces $\gamma=0$. Los valores γ se computaron para cada grupo y luego se testeó la autocorrelación espacial con el coeficiente de Moran como un indicador de los patrones espaciales.

Con el set de datos compuesto por los rendimientos para cada año y para el conjunto de los dos años, se realizaron mapas de Polígonos de Thiessen para una mejor interpretación visual de los resultados.

Análisis económico

Se realizaron mapas de ingreso neto (dólares americanos U\$S ha⁻¹), donde los valores del monitor de rendimiento se multiplicaron por el precio de la bolsa de arroz (U\$S bolsa⁻¹) para los respectivos años, y a este valor se le restaron los costos de producción (U\$S ha⁻¹) (Cuadro 1). Este análisis se realizó para las dos campañas estudiadas. En segundo lugar, se realizó el mismo mapa resaltando los valores de ingresos positivos y negativos, utilizando para esto el rendimiento equilibrio en el cual los ingresos y egresos se hacen cero. Por último, se realizó un mapa econó-

mico representando el valor promedio de producción de los grupos de rendimientos identificados por el análisis de conglomerados. Se utilizaron Polígonos de Thiessen para representar los mapas realizados en QGis 1.8.

Resultados y discusión

Estadística descriptiva del rendimiento y las propiedades de suelo

La chacra exhibió un grado de variación de rendimiento alto (es decir el CV de la grilla 2011-2012 = 14 % y 15 % en

Cuadro 1. Costos de producción de arroz (U\$S ha⁻¹) y precio de la bolsa de arroz (U\$S bolsa⁻¹) para las zafras 2011-2012 y 2012-2013.

Rubro	2011-2012	2012-2013
	U\$S/ha	U\$S/ha
Glifosato en pre-siembra	25	28
Gasoiil preparación de tierras y siembra	162	167
Fertilizante basal	90	92
Semilla	82	86
Agrimensor	10	12
Herbicidas post-emergentes	66	78
Urea	60	56
Funguicida	32	34
Aplicaciones aéreas	83	89
Gasoiil cosecha	90	93
Fletes	145	145
Lubricantes	25	28
Personal	145	164
Reparaciones de maquinaria	98	107
Secado	115	122
Imeba-Inia-Mevir	14	15
Rentas (agua y tierra)	427	439
Administración	88	96
Interés de financiación	34	41
Imprevistos	59	68
Total gastos	1850	1960
Precio arroz 50 kg (U\$S bolsa ⁻¹)	12,93	13,3
Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	7643	7590
Rendimiento equilibrio (kg ha ⁻¹)	7170	7259

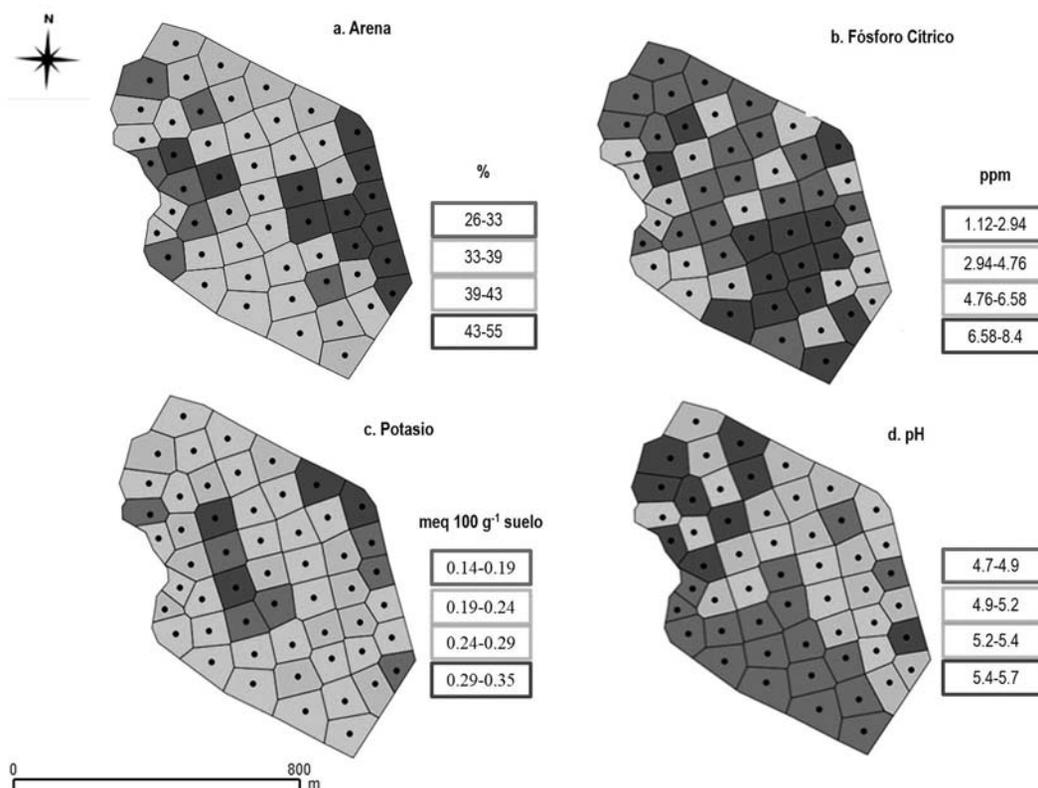
Cuadro 2. Estadística descriptiva de rendimiento (kg ha^{-1}) para 2011-2012 y 2012-2013.

Año	Rendimiento en kg ha^{-1}				
	Mínimo	1er Cuartil	Media	3er Cuartil	Máximo
2011-2012	963	5511	7643	9771	13500
2012-2013	1160	6400	7370	8510	13090

2012-2013) y un promedio cercano a la media nacional (8500 kg ha^{-1} , DIEA) (Cuadro 2). Simmonds *et al.* (2013) reportaron un rango de CV de 7,09 % a 10,48 % en la variación del rendimiento de un cultivo de arroz irrigado. Otros investigadores, en una chacra de menor tamaño, reportaron un CV de 39 % (Dobermann *et al.*, 2003), CV de 5,89 % (Yanai *et al.*, 2001).

En cuanto a las propiedades del suelo, PB1 y PC fueron las más variables (CV 48,97, 76,37 %, respectivamente). En los ensayos de respuesta de arroz a la aplicación de P

conducidos a nivel nacional, no se han encontrado respuestas por encima del rango de $4\text{-}7 \text{ mg kg}^{-1}$ según el método Bray 1 (Deambrosi *et al.*, 2000, 2001). Para el caso del PC, los niveles críticos se han ubicado en el entorno de $6\text{-}7 \text{ ppm}$ para el promedio de los dos métodos (Hernández y Berger, 2003). El incremento en la disponibilidad de P como consecuencia de la inundación ha sido reportado en varias oportunidades y es por ello que muchas veces el arroz no responde a la aplicación de P, mientras que sí lo hacen otros cultivos de secano (Deambrosi y Méndez, 1996). Potasio (K), arena, limo y arcilla exhibieron una variación moderada (CV 12,56-20,02 %). Para el caso del K, en general la respuesta del arroz a la aplicación de este nutriente no es tan marcada. No se han encontrado respuestas a la fertilización potásica cuando los valores en suelo son mayores a $0,20 \text{ cmol kg}^{-1}$ (Deambrosi *et al.*, 2000, 2001). El pH fue el menos variable (CV 5,96 %). El valor de pH bajo es propio de estos suelos los cuales presentan valores de 4,8 a 5,5 (Altamirano, 1979). Sin embargo, el pH del suelo tiende a la neutralidad cuando el cultivo

**Figura 2:** Polígonos de Thiessen de: **a.** Contenido de arena del suelo (%). **b.** Fósforo cítrico (ppm) en suelo. **c.** Potasio en suelo (meq 100 g^{-1} de suelo). **d.** pH del suelo.

es regado, incrementándose en suelos ácidos y disminuyendo en suelos alcalinos. Esto es debido a que se produce un incremento de concentración de iones en la solución y desciende el potencial redox, ocurriendo cambios importantes en el sistema de oxidación-reducción (Patrick *et al.*, 1985). Los mapas resaltan una zona de alto porcentaje de arena y alto PC y otra zona con bajos valores de pH (Figura 1).

Análisis de conglomerados: delimitación de zonas de rendimiento

El análisis de conglomerados, presentó estabilidad al aleatorizar las semillas iniciales de cada cluster y los patrones permanecieron constantes, luego de realizar 100 réplicas. A su vez, los conglomerados presentaron correlación espacial significativa, evaluada a través del Índice de Moran (Cuadro 3). Los mismos podrían entonces ser analizados como zonas de diferente rendimiento.

Cuadro 3. Número de *k*-medias y Coeficiente de Moran y *p*-valor de significancia.

K-medias	Coeficiente de Moran
2	0,464 (0,001)
3	0,412 (0,001)
4	0,366 (0,001)

Los mapas de Polígonos de Thiessen que representan los grupos para cada año resaltan la relación y contigüidad espacial entre sus miembros (Figura 2). El óptimo valor de *k*-medias para cada año y para los dos años evaluados a la vez fue *k*=2. El grupo 1 estuvo compuesto por zonas de bajo rendimiento promedio (5890 kg ha⁻¹) y los integrantes del grupo 2 fueron zonas de alto rendimiento promedio (8332 kg ha⁻¹) en los dos años.

Varias técnicas de aglomeramiento han sido utilizadas con el fin de reducir la complejidad espacial del fenómeno. Lark y Stafford (1997) utilizaron fuzzy-cluster para organizar datos de mapas de rendimiento de diferentes cultivos. Empleando el algoritmo de *k*-medias se han podido identificar zonas de rendimiento contrastantes con similar comportamiento espacio-temporal (Jayne *et al.*, 2003; Pérez-Quezada *et al.*, 2003). A través de un análisis de contigüidad espacial se ha observado la variabilidad espacio-temporal del rendimiento (Roel y Plant, 2004a). Córdoba *et al.* (2012) identificaron diferentes zonas de manejo a través de la combinación de propiedades del suelo y análisis multivariado. Guastaferró *et al.* (2010) compararon varias técnicas

de clasificación para delinear zonas de manejo. En este estudio, el algoritmo *k*-medias pudo identificar dos zonas contrastantes y consistentes de rendimiento para los dos años. Basado en los resultados del análisis de conglomerados, la chacra exhibió un patrón de rendimiento estable y espacialmente correlacionado. La consistencia encontrada indica que los patrones de rendimiento del cultivo están influenciados principalmente por factores persistentes endógenos de la chacra (tipo y textura de suelo, nutrientes). Las zonas de alto rendimiento estuvieron asociadas con las zonas de mayor contenido de PC y arena (Figura 1). A su vez los suelos de esta zona pertenecen a la Unidad de suelo de Rincón de Ramírez, mientras que las zonas de bajo rendimiento pertenecen a la Unidad Río Branco. En esta chacra, las zonas de suelo arenoso permitieron una mayor y más temprana implantación del cultivo en los dos años. En sistemas de arroz irrigados, el agua no es un limitante por lo que la disponibilidad de nutrientes como el P es uno de los factores más importantes para la concreción de altos rendimientos (Dobermann y Cassman, 2002; Simmonds *et al.*, 2013). Por otro lado, las inconsistencias tiempo-espaciales asociadas a los grupos con *k*=3 y 4, indican que en algunos puntos de la chacra, los patrones de rendimiento también estuvieron influenciados por factores exógenos transitorios como malezas y láminas de riego inestables. No solo la altura de la lámina de agua es un factor clave para concretar altos rendimientos, sino que también el movimiento del agua en la chacra y el microclima que se genera en los cuadros de riego. La zona de bajo rendimiento se encuentra en el lado opuesto al canal principal de riego, por lo que el agua llegaba a esta zona de la chacra en última instancia. Roel *et al.* (2007) reportaron que en chacras de arroz, los factores de manejo tienen un efecto significativo en la variación espacial del rendimiento. Basso *et al.* (2007) reportaron que los patrones constantes de rendimiento están influenciados por factores endógenos de la chacra (es decir propiedades del suelo) mientras que los patrones espaciales de rendimiento transitorios están controlados por factores exógenos a la chacra (por ejemplo clima).

Uso práctico de las herramientas de agricultura de precisión

El resultado de los mapas de rendimiento y su posterior aglomeración en zonas de rendimientos contrastantes para los dos años remarcó tres ideas importantes. La primera es que una chacra comercial de arroz que parece uniforme a simple vista, puede tener una variabilidad de rendimiento importante a lo largo de la misma. El evento ha sido

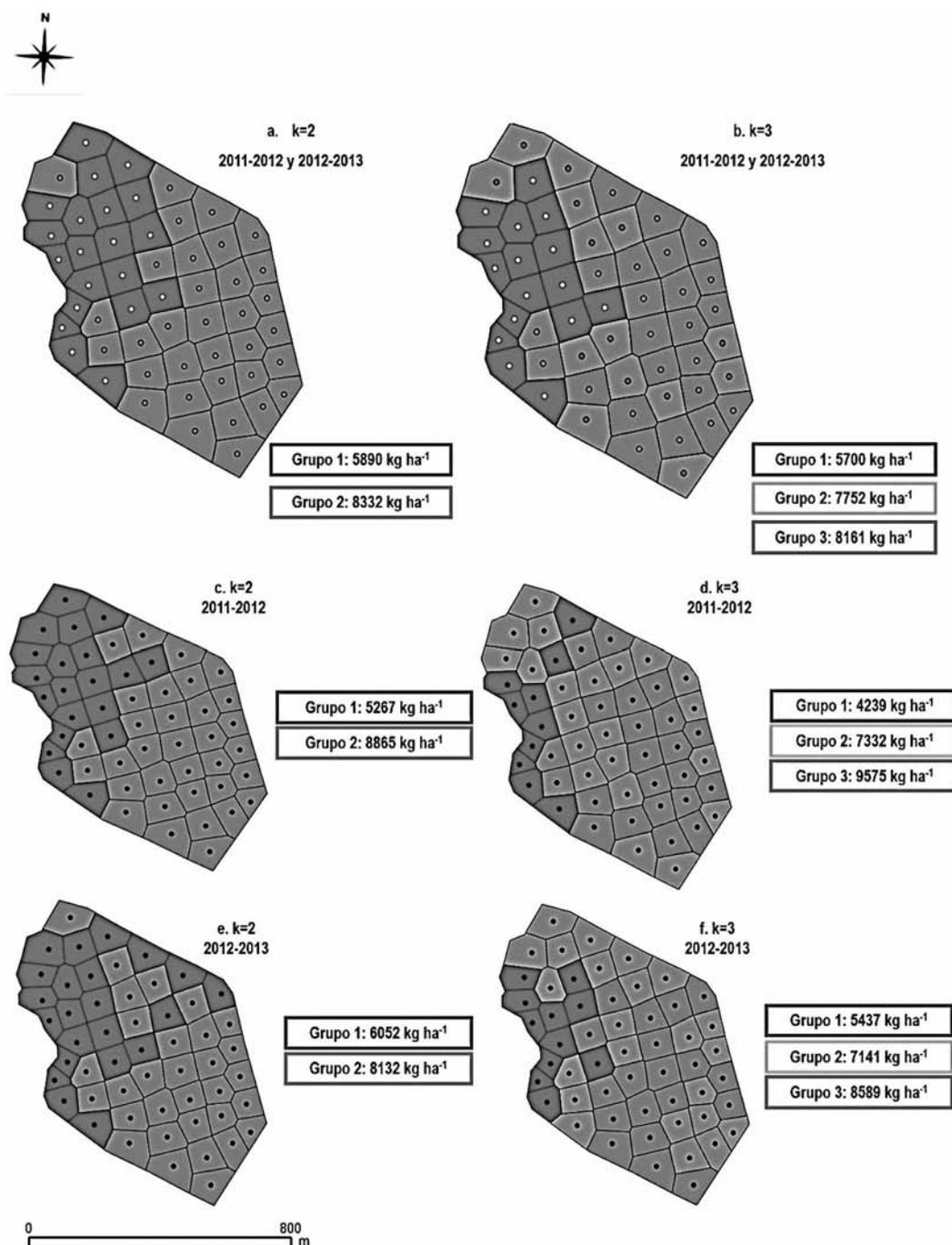


Figura 2. Conglomerados obtenidos para los datos de rendimiento interpolados representados con Polígonos de Thiessen para: **a.** k=2 para 2011-2012 y 2012-2013. **b.** k=3 para 2011-2012 y 2012-2013. **c.** k=2 para 2011-2012. **d.** k=3 para 2011-2012. **e.** k=2 para 2012-2013. **f.** k=3 para 2012-2013.

reportado en otras investigaciones (Doberman, 1994; Yanai *et al.*, 2001; Roel y Plant, 2004b; Terra *et al.*, 2006, 2008; Simmonds *et al.*, 2013). La segunda es que mapear la variabilidad puede ayudar a analizar e interpretar los facto-

res bióticos o abióticos que subyacen en la variabilidad del rendimiento. Terra *et al.* (2006), para cultivos de secano, encontraron que los factores asociados a la variabilidad del rendimiento fueron atributos topográficos relacionados con

la dinámica y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. La tercera es que esta información puede ser utilizada para delinear zonas que se beneficiarían con un manejo sitio-específico: sería una fuente de información para delinear muestreos dirigidos y/o realizar un análisis económico como una herramienta más en la toma de decisiones.

Una de las mejores maneras de analizar los datos que proporcionan los monitores de rendimiento es a través de los sistemas de información geográficos, que pueden ser utilizados no solo para una interpretación visual de los mapas, sino también estadística. A pesar que el rendimiento promedio de la chacra se aproxima al promedio nacional, existe una zona dentro de la misma, constante para los dos años, con bajos rendimientos y representa aproximadamente el 50 % del área total de producción (Figura 2). Asociada a esta zona de bajo rendimiento se encontraron suelos con mayor contenido de arcilla y menor P_c disponible. Durante las dos campañas esta zona de la chacra presentó una implantación despereja y tardía, repercutiendo luego en el desarrollo del cultivo durante todo el ciclo. Esta área pre-

sentó un mayor nivel de infección de malezas, lámina inestable de agua y planta con desarrollo excesivo sin concreción en el rendimiento final. Por lo tanto, si analizamos las causas asociadas a la variabilidad del rendimiento, concluimos que el principal factor asociado es un factor permanente y endógeno de la chacra, como la textura del suelo que repercute luego en los factores transitorios mencionados. Las dos zonas con variabilidad de rendimiento, en conjunto con los factores asociados a esa variabilidad, podrían ser candidatas a un manejo sitio-específico diferencial. Uno de problemas identificados en el área de bajo rendimiento fue la mala y tardía implantación del cultivo para los dos años, producto de una siembra sobre suelo arcilloso muy húmedo. Se podría pensar, para esta zona la utilización de variedades de ciclo más corto (INIA Tacuarí) que permitan mayor flexibilidad en la fecha de siembra. También podría evaluarse un manejo diferencial de nutrientes, sobre todo de P, debido a que se describieron zonas con niveles de P diferenciales y que a su vez coincidieron con las zonas de rendimiento diferenciadas.

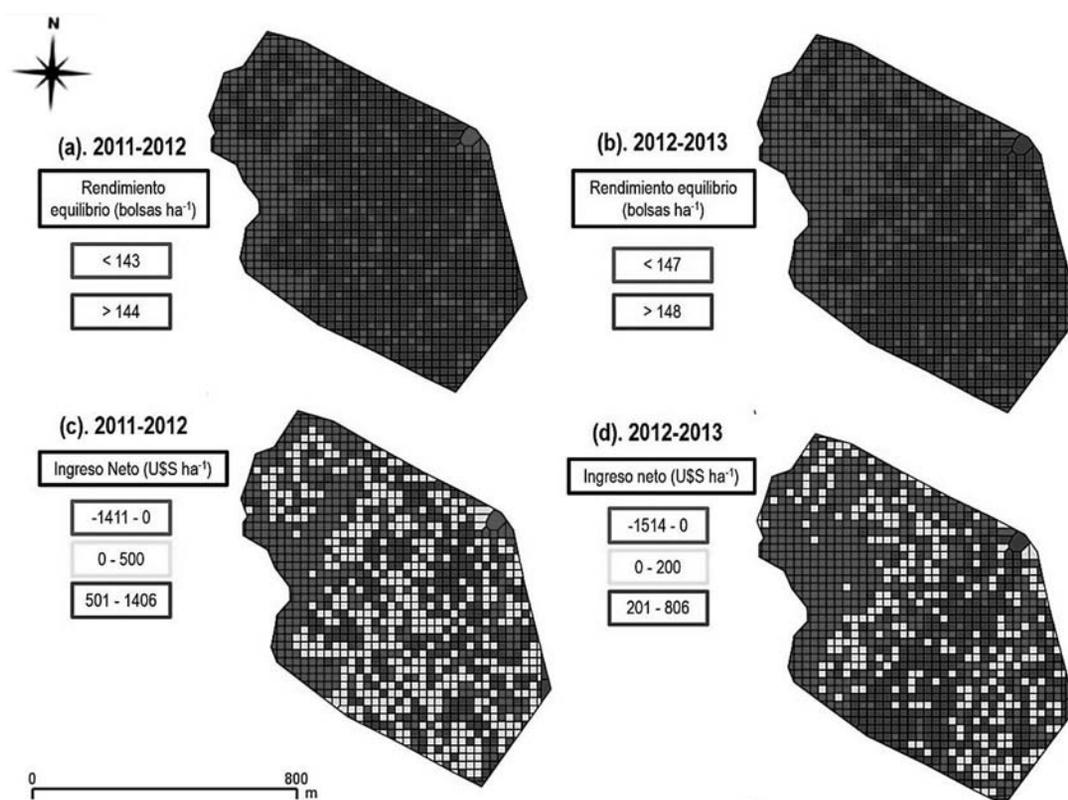


Figura 3. Polígonos de Thiessen para: **a.** Rendimiento equilibrio (bolsas ha^{-1}) 2011-2012. **b.** Rendimiento equilibrio (bolsas ha^{-1}) 2012-2013. **c.** Ingreso Neto (US\$ ha^{-1}) para 2011-2012. **d.** Ingreso Neto (US\$ ha^{-1}) para 2012-2013.

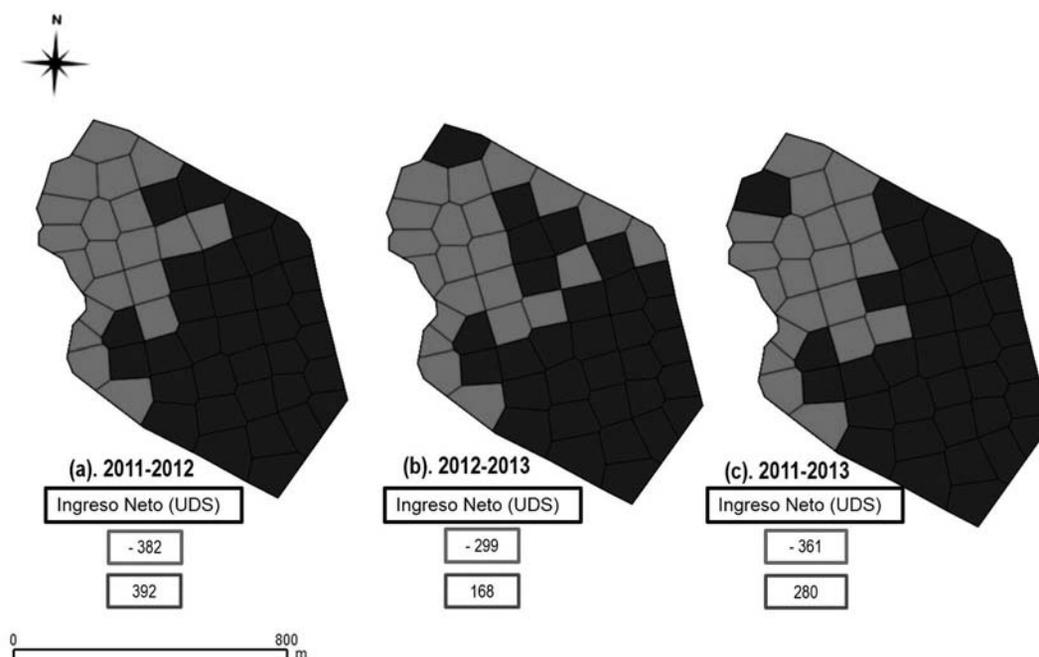


Figura 4. Polígonos de Thiessen para grupos de rendimiento **a.** Ingreso Neto (U\$S ha⁻¹) 2011-2012. **b.** Ingreso Neto (U\$S ha⁻¹) 2012-2013. **c.** Ingreso Neto (U\$S ha⁻¹) 2011-2012 y 2012-2013.

Por otro lado, el factor por el cual finalmente un productor toma las decisiones es la ganancia monetaria que le deja la actividad. Analizando los datos de los monitores de rendimiento se observa que en los dos años de estudio la mayor concentración de puntos con rendimientos que determinaron márgenes negativos se encuentra en la zona de bajos rendimientos identificada por el análisis de conglomerados (Figura 3). Estos puntos expresan valores de pérdidas de hasta 1500 U\$S ha⁻¹.

Al resumir la información a las zonas identificadas por el análisis de conglomerado, se observó que la zona de bajo rendimiento tuvo pérdidas de 382 y 299 U\$S ha⁻¹ contra ganancias de 392 y 168 U\$S ha⁻¹ para 2011-2012 y 2012-2013, respectivamente. Si tomamos en cuenta los dos años en conjunto, la zona de bajo rendimiento representó pérdidas de 361 U\$S ha⁻¹ contra ganancias de 280 U\$S ha⁻¹ encontradas en las zona de alto rendimiento (Figura 4).

Conclusión

Las tecnologías asociadas a la agricultura de precisión permiten el estudio de la variabilidad espacial del rendimiento en una chacra de arroz que a simple vista parecen uniformes.

La agrupación espacial de zonas de diferente rendimiento dentro de una chacra es un desafío a la hora de implementar un manejo sitio específico, ya que la misma no puede ser arbitraria. Mediante el análisis de la variabilidad espacial y su agrupamiento se pueden identificar zonas de diferentes rendimientos dentro de la chacra, las cuales se verían potencialmente beneficiadas con un posible manejo sitio-específico. Estas zonas pueden ser a su vez asociadas con factores bióticos y abióticos del ambiente y del manejo agronómico que causan esa variabilidad.

Un análisis económico sencillo, con mapas de ingreso neto por zonas, permitió poner en práctica el uso de la información que brindan los monitores de rendimiento como una herramienta más para la toma de decisiones a nivel predial.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con un proyecto innovagro INIA-ANII: «Manejo sitio-específico en cultivos agrícolas» y una beca ANII de Maestría. Al productor y al responsable de la chacra Ing. Agr. Hugo Firpo, por dejarnos realizar nuestro trabajo en su campo durante dos años. A la Ing. Agr. Cristina Capurro y al personal del Laboratorio de Física de Suelo y Riego de INIA Treinta y Tres por su disposición y

colaboración en el trabajo de campo. A la Ing. Agr. Mónica Cadenazzi y al profesor Richard Plant (UC Davis, California) por sus valiosos aportes. A Ana García y al Ing. Agr. Raúl Úraga por proporcionarnos información referente al rubro.

Bibliografía

- Altamirano A.** 1979. Carta detallada de suelos. Campo experimental Paso de la Laguna. Montevideo : MAP. Dirección de Suelos y Fertilizantes. 1 mapa.
- Basso B, Bertocco M, Sartori L, Martin EC.** 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize-wheat-soybean rotation. *European Journal of Agronomy*, 26(2): 82 - 91.
- Bocchi S, Castrignano A.** 2007. Identification of different potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis. *Field Crops Research*, 102: 185 - 197.
- Cressie NSC.** 1991. Statistics for spatial data. Wiley : Nueva York. 928p.
- Córdoba M, Balzarini M, Bruno C, Costa JL.** 2012. Identificación de zonas de manejo sitio-específico a partir de la combinación de variables de suelo. *Revista Corpoica*, 13(1): 47 - 54.
- Deambrosi E, Méndez R, Avila S.** 2001. Fertilización : Respuestas a las aplicaciones de fósforo y potasio. En: Arroz : resultados experimentales 2000-01. Treinta y Tres : INIA. (Serie Actividades de Difusión ; 257). pp. 1 - 10.
- Deambrosi E, Méndez R, Ávila S.** 2000. Fertilización : Respuesta a las aplicaciones de fósforo y potasio. En: Arroz : resultados experimentales 1999-00. Treinta y Tres : INIA. (Serie Actividades de Difusión ; 224). pp. 14 - 22.
- Deambrosi E, Mendez R.** 1996. Fertilidad de suelos en el cultivo de arroz. En: Morón A, Martino D, Sawchik J. [Eds.]. Manejo y Fertilidad de Suelos. Montevideo : INIA. (Serie Técnica ; 76). pp. 51 - 56.
- Doerge TA.** 1999. Yield map interpretation. *Production Agriculture*, 12: 54 - 61.
- Dobermann A.** 1994. Factors causing field variation of direct-seeded flooded rice. *Geoderma*, 62(1-3): 125 - 150.
- Dobermann A, Cassman KG.** 2002. Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 247: 153 - 175.
- Dobermann A, Ping JL, Adamchuk VI, Simbahan GC, Ferguson RB.** 2003. Classification of crop yield variability in irrigated production fields. *Agronomy Journal*, 95: 1105 - 1120.
- Guastafarro F, Castrignano A, De Benedetto D, Sollito D, Troccoli A, Cafarelli B.** 2010. A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. *Precision Agriculture*, 11(6): 600 - 620.
- Hernandez J, Berger A.** 2003. Dinámica del fósforo en sistemas de Arroz-Pasturas: caracterización de parámetros de suelos para estimar la disponibilidad de fósforo. En: Investigaciones Agronómicas : Programa Nacional de Arroz. Treinta y Tres : INIA. (Reporte Técnico anual ; 01). pp. 34 - 40.
- Jayne DB, Kaspar TC, Colvin TS, James DE.** 2003. Cluster analysis of spatiotemporal corn yield patterns in an Iowa fields. *Agronomy Journal*, 95: 574 - 586.
- Lark RM, Stafford JV.** 1997. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Annals of Applied Biology*, 130(1): 111 - 121.
- Mulla DJ, McBratney AB.** 2002. Soil spatial variability. En: Warrick, A.W. [Eds.]. Soil physics companion. Boca Ratón : CRC Press. pp. 343 - 373.
- Patrick WH, Mikkelsen DS, Wells BR.** 1985. Plant nutrient behavior in flooded soils. En: Fertilizer Technology and use. 3a. ed.. Madison : Soil Science Society of America. pp. 197 - 228.
- Pebesma EJ.** 2004. Multivariate geostatistics in S : the gstat package. *Computers & Geosciences*. 30: 683 - 691.
- Pérez-Quezada JF, Pettygrove GS, Plant RE.** 2003. Spatial-temporal analysis of yield and the influence of soil factors in two four-crop-rotation fields in the Sacramento Valley, California. *Agronomy Journal*, 95(3): 676 - 687.
- Pierce FJ, Nowak P.** 1999. Aspects of precision agriculture. *Advances in agronomy*, 67: 1 - 85.
- Pierce FJ, Anderson NW, Colvin TS, Schuler JK, Humburg DS, McLaughlin NB.** 1997. Yield mapping. En: Pierce FJ, Sadler EJ. [Eds.]. The state of site-specific management for agriculture. Madison : ASA, CSSA, SSSA. pp. 211 - 244.
- Ping JL, Dobermann A.** 2005. Processing of yield map data. *Precision Agriculture*, 6: 193 - 212.
- Plant RE.** 2001. Site-specific management : the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 9 - 29.
- Pravia MV.** 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas : A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra : B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSAT v4 CERES-Rice [Tesis de Magister]. Montevideo : Facultad de Agronomía. Universidad de la República. 102 p.
- Roel A, Firpo H, Plant RE.** 2007. Why do some farmers get higher yields? Multivariate analysis of a group of Uruguayan rice farmers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58: 78 - 92.
- Roel A, Terra J.** 2006. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. En: Bongiovanni R, Chartuni E, Best S, Roel A. [Eds.]. Agricultura de precisión : integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo : PROCISUR. pp. 65 - 80.
- Roel A, Plant R E.** 2004a. Spatiotemporal analysis of rice yield variability in two California fields. *Agronomy Journal*, 96(1): 77 - 90.
- Roel A, Plant R E.** 2004b. Factors underlying yield variability in two California rice fields. *Agronomy Journal*, 96(5): 1481 - 1494.
- Simmonds MB, Plant RE, Peña-Barragán JM, van Kessel C, Hill J, Linquist BA.** 2013. Underlying causes of yield spatial variability and potential for precision management in rice systems. *Precision Agriculture*, 14: 512 - 540.
- Stafford JV, Murray LR, Bolam HC.** 1998. Using yield maps to regionalize fields into potential management units. En: Proceeding of the international conference on precision agriculture. St. Paul : ASA, CSSA, SSSA. pp. 225 - 237.
- Terra JA, Cantou G, Deambrosi E, Molina F, Roel A, Casales LA, Ferreria D, Ferreira D.** 2008. Efecto de dos alternativas de densidad de siembra y dosis de nitrógeno en el rendimiento de EP144 a escala de chacra. En: Arroz : Resultados Experimentales 2007-2008. Montevideo : INIA. (Actividades de Difusión ; 545). pp. 15 - 22.
- Terra JA, Shaw JN, Reeves DW, Raper RL, van Santen E, Schwab EB, Mask PL.** 2006. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 98 - 107.
- Yanai J, Lee CK, Kaho T, Lida M, Matsui T, Umeda M, Kosaki, T .** 2001. Geostatistical analysis of soil chemical properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis of yield-determining factors. *Soil Science and Plant Nutrition*, 47(2): 291-301.