

10.6. AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN URUGUAY

Alvaro Roel (1) y Hugo Firpo (2)

1 Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuaria (INIA), Uruguay

aroel@tyt.inia.org.uy

2 Consultor Privado

El objetivo de este trabajo es presentar los principales avances de dos diferentes proyectos realizados en el sector arrocero uruguayo, uno de ellos enfocado desde la investigación y otro desde la producción. Consideramos que ha sido extremadamente beneficiosa la interacción entre ambas líneas de trabajo. Es de destacar que el hecho de haber podido realizar en forma paralela estos dos proyectos permitió, por un lado, ver qué aspectos de los que se están trabajando en la investigación pueden ser fácilmente aplicables en la producción y por otro lado, retroalimentar la investigación con problemas detectados a nivel de la producción.

El Programa Arroz de INIA Uruguay incorporó Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográficos (SIG) y monitores de rendimiento para investigar la variabilidad de rendimiento dentro de las chacras de arroz. Estas tecnologías abren nuevas posibilidades para la investigación que permitirán desarrollar capacidades tecnológicas en el país tendientes a consolidar una agricultura sustentable. El proyecto de Agricultura de Precisión de INIA se alinea con las crecientes exigencias de los mercados por obtener productos de alta calidad, producidos en forma amigable con el ambiente, trazables e inocuos.

En forma paralela, se comenzó a trabajar a nivel comercial en un proyecto financiado por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca del Uruguay que tenía por objetivo el mapeo y monitoreo con GPS de los recursos naturales y otros factores de producción, para la toma de decisiones y la gestión de la empresa arrocera durante tres zafras del cultivo. A través de este proyecto se monitorearon 785 hectáreas en 125 puntos de muestreos en la primera zafra, 715 hectáreas en 98 puntos de muestreos en la segunda zafra y 519 hectáreas en 101 puntos de muestreo en la última zafra.

El proyecto del INIA tiene como objetivo general la cuantificación de la variabilidad espacial del rendimiento en chacras y la determinación de los factores que la afectan. El proyecto en sí cumple una serie de objetivos a diferentes niveles. En un primer nivel, el objetivo es cuantificar la variabilidad espacial del rendimiento en las chacras de arroz en cada zafra en particular, dentro de dos intensidades de producción de un sistema que se lleva adelante en una Unidad Experimental del INIA en El Paso de La Laguna, Treinta y Tres conocido como la Unidad de Producción Arroz Ganadería (UPAG) y determinar los factores que la afectan. En un segundo nivel, el objetivo es cuantificar en forma espacial la evolución en el tiempo de las variables del suelo en las dos diferentes intensidades de uso del suelo planteadas dentro de la UPAG. En un tercer nivel, el objetivo es ir generando la información necesaria con el fin de evaluar el posible manejo sitio-específico de las variables de producción dentro de las chacras de la UPAG.

A modo de ejemplo de un esquema de trabajo a seguir se presentan los datos recabados en la zafra 2003-2004 en dos de las chacras estudiadas. Este esquema se viene continuando año a año en busca de poder implementar la agricultura de precisión en este sistema de producción. En esta zafra en particular se trabajó en dos potreros de la UPAG (**Figura 10.13**).

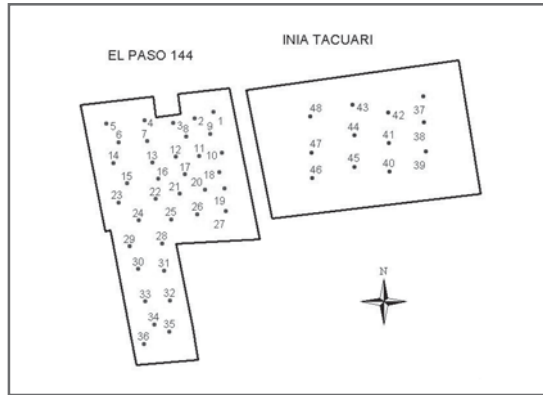


Figura 10.13: Puntos de muestreo en ambas chacras. Área aproximada: 12 ha.

En ambas chacras se midieron, en cada uno de los puntos de muestreos que fueron georeferenciados con un GPS, una serie de variables del suelo y cultivo que se detallan en el **Cuadro 10.4**. En este Cuadro se presentan los valores promedios, máximos, mínimos y el coeficiente de variación registrado para cada variable. Básicamente se registraron parámetros en ambos potreros:

- Del suelo previo a la siembra: textura, niveles de N, P y K y pH, medidas de niveles de esclerocios de *Sclerotium* y *Rhizoctonia* en el suelo;
- A la emergencia: stand de plantas emergidas, control de capin luego de aplicado los herbicidas y a la cosecha;
- Al primordio: niveles de N, P, K y materia seca; y
- A la cosecha: niveles de N, P K y materia seca, índice de grado de severidad de ataque de mancha agregada y podredumbre del tallo y componentes de rendimiento.

En la chacra sembrada con la variedad El Paso 144 (12 hectáreas) se decidió implementar un muestreo intenso de las diferentes variables medidas, se tomaron un total de 36 muestras/variables lo que determina una intensidad de muestreo de 3 puntos de muestreo por hectárea. Evidentemente que ésta es una intensidad de muestreo imposible de pensar realizar a escala comercial; pero a los efectos de este proyecto la intención es poder conocer de forma detallada la variabilidad espacial presente en estas chacras.

La información que se presenta en el **Cuadro 10.4** ilustra la dimensión de la variabilidad que puede existir dentro de un sistema de producción. En este Cuadro podemos apreciar que la variabilidad espacial de los posibles factores abióticos y bióticos afectando rendimiento se comportan de forma muy diferente. Tenemos por un lado, dentro de los factores abióticos, variables vinculadas a la química del suelo que presentan una considerable variabilidad, como es el caso de los niveles de fósforo y otros mucho menos variables, como el pH. Por otro lado, en general, los factores vinculados a la textura del suelo son relativamente menos variables que los factores relacionadas con los aspectos químicos. A su vez, se puede observar que en general los factores bióticos, como son la presencia de malezas y enfermedades, son mucho más variables dentro de esta chacra.

Los datos presentados en este Cuadro sólo nos permiten tener conocimiento de la variabilidad espacial en forma poblacional de cada factor sin tener una idea de cómo está estructurada esta

Cuadro 10.4: Chacra El Paso 144.

| Variable | N | Media | Máximo | Mínimo | C.V. |
|---|----|----------|----------|----------|-------|
| pH 0 - 10 cm | 36 | 5.27 | 5.81 | 5.10 | 2.63 |
| pH 10 - 20 cm | 36 | 5.60 | 6.34 | 5.05 | 4.55 |
| C. Org (%) 0 - 10 cm | 36 | 1.66 | 2.42 | 1.17 | 15.5 |
| C. Org (%) 10 - 20 cm | 36 | 1.20 | 1.62 | 0.90 | 14.9 |
| P Bray (ppm) 0 - 10 cm | 36 | 4.67 | 8.98 | 1.85 | 32.7 |
| P Bray (ppm) 10 - 20 cm | 36 | 2.19 | 4.07 | 0.98 | 36.6 |
| P Cítrico (ppm) 0 - 10 cm | 36 | 8.55 | 12.69 | 4.10 | 23.3 |
| P Cítrico (ppm) 10 - 20 cm | 36 | 5.02 | 8.59 | 2.43 | 35.7 |
| % Arena 0 - 10 cm | 36 | 26.26 | 48.37 | 18.97 | 26.2 |
| % Arena 10 - 20 cm | 36 | 24.82 | 49.70 | 12.72 | 32.7 |
| % Limo 0 - 10 cm | 36 | 44.33 | 50.47 | 31.89 | 8.4 |
| % Limo 10 - 20 cm | 36 | 45.43 | 52.42 | 32.73 | 10.1 |
| % Arcilla 0 - 10 cm | 36 | 29.37 | 38.40 | 19.72 | 14.4 |
| % Arcilla 10 - 20 cm | 36 | 29.73 | 37.75 | 17.56 | 14.6 |
| K (mEg/100g) 0 - 10 cm | 36 | 0.24 | 0.33 | 0.13 | 19.7 |
| K (mEg/100g) 10 - 20 cm | 36 | 0.17 | 0.28 | 0.09 | 18.9 |
| Plantas/m ² 11 Nov 2003 | 36 | 232.19 | 364 | 91 | 28.4 |
| Control de Capin 23 Dic 2003 | 36 | 4.18 | 5 | 2.82 | 15.8 |
| Control de Capin 24 Mar 2003 | 36 | 4.47 | 5 | 2.47 | 14.4 |
| Materia Seca Primordio (kg/ha) | 36 | 2427.25 | 3506.25 | 1393.75 | 23.4 |
| % P Primordio | 36 | 0.23 | 0.17 | 0.15 | 11.0 |
| % N Primordio | 36 | 1.73 | 2.29 | 1.26 | 13.9 |
| % K Primordio | 36 | 1.61 | 2.32 | 1.24 | 15.9 |
| Kg P/ha Primordio | 36 | 5.56 | 9.33 | 2.89 | 20.9 |
| Kg N/ha Primordio | 36 | 41.27 | 62.31 | 29.10 | 19.7 |
| Kg K/ha Primordio | 36 | 39.99 | 81.34 | 19.01 | 36.3 |
| Materia seca total a cosecha (Kg/ha) | 36 | 26583.40 | 37186.67 | 16468.89 | 18.7 |
| Materia seca Panojas (Kg/ha) | 36 | 11998.09 | 19213.33 | 6673.33 | 21.4 |
| Materia seca tallo y hojas (Kg/ha) | 36 | 14585.31 | 23531.11 | 8153.33 | 25.8 |
| % P grano | 36 | 0.22 | 0.28 | 0.19 | 8.4 |
| % N grano | 36 | 1.11 | 1.29 | 0.98 | 7.7 |
| % K grano | 36 | 0.33 | 0.53 | 0.26 | 15.6 |
| Kg P/ha en grano | 36 | 25.91 | 40.27 | 15.09 | 21.3 |
| Kg N/ha en grano | 36 | 133.43 | 207.38 | 84.03 | 20.2 |
| Kg K/ha en grano | 36 | 39.88 | 59.17 | 20.51 | 23.4 |
| % P en Tallo y Hojas (cosecha) | 36 | 0.15 | 0.22 | 0.10 | 18.4 |
| % N en Tallo y Hojas (cosecha) | 36 | 0.80 | 1.35 | 0.66 | 15.7 |
| % K en Tallo y Hojas (cosecha) | 36 | 0.90 | 1.16 | 0.63 | 16.5 |
| Kg P en Tallo y Hojas (cosecha) | 36 | 21.96 | 50.15 | 10.11 | 42.7 |
| Kg N en Tallo y Hojas (cosecha) | 36 | 119.55 | 310.62 | 55.73 | 40.7 |
| Kg K en Tallo y Hojas (cosecha) | 36 | 130.00 | 215.25 | 75.38 | 26.4 |
| Kg P/ha Total | 36 | 47.87 | 82.14 | 28.17 | 25.0 |
| Kg N/ha Total | 36 | 252.98 | 394.65 | 153.90 | 22.7 |
| Kg K/ha Total | 36 | 169.88 | 251.62 | 106.34 | 22.9 |
| N. Esclerocios de Sclerotium oryzae / gr. Suelo | 36 | 6.90 | 12.40 | 0.56 | 36.5 |
| IGS Podredumbre de tallo Pre Fungicida | 36 | 1.60 | 6.25 | 0.00 | 109.8 |
| N. Esclerocios de Rhizoctonia o.s. / gr. Suelo | 36 | 0.19 | 0.38 | 0.02 | 48.1 |
| IGS Mancha de vainas Pre Fungicida | 36 | 0.07 | 0.50 | 0.00 | 145.9 |
| Lectura Final OGS Mancha de vainas sin Fung. | 36 | 32.70 | 70.00 | 5.70 | 52.6 |
| Panojas / m ² | 36 | 526.96 | 813.00 | 221.00 | 15.5 |
| Granos llenos / Panoja | 36 | 91.69 | 126.6 | 69.7 | 12.8 |
| % Esterilidad | 36 | 22.11 | 33.77 | 11.58 | 25.3 |
| Peso mil granos (gr) | 36 | 25.71 | 27.04 | 23.59 | 3.5 |
| Rendimiento (Kg/ha) | 36 | 8660.51 | 11732.73 | 5869.38 | 15.3 |

variabilidad. El hecho de haber recabado la posición dentro de la chacra en la que cada una de estas variables fueron medidas nos permite, como ya fue presentado en el Capítulo 8 de este libro, la construcción de los variogramas de cada uno de estos factores. Esto es de extrema importancia, ya que la construcción de los variogramas de cada una de las variables nos permitiría estimar para cada uno de estos factores la distancia y por ende, el número de muestras que sería necesario extraer para representar con cierta certidumbre la variabilidad espacial dentro de esta chacra. Esto es uno de los aspectos claves y prioritarios a llevar a cabo en cualquier esquema de agricultura de precisión que se pretenda en última instancia llegar a un manejo sitio específico del campo.

La alta densidad de muestreo elegida en el Potrero 3 nos permitirá realizar estudios de cómo puede variar la representación de la variabilidad espacial según la intensidad del muestro para cada una de las variables medidas. A modo de ejemplo, en la **Figura 10.14** se presenta el variograma del contenido de Carbono Orgánico en esta chacra. Como se puede observar, este factor presenta un comportamiento espacial bien estructurado, lo que determinaría que en caso de necesitar caracterizar su variabilidad sería suficiente con extraer muestras separadas por una distancia aproximada a los 150 m.

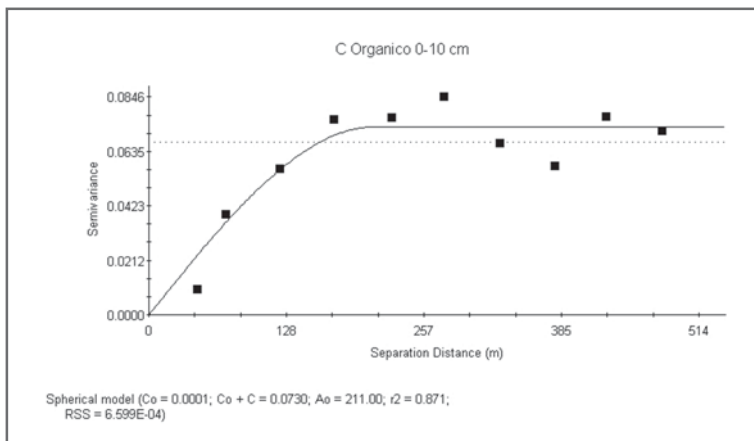


Figura 10.14: Variograma del Carbono Orgánico.

Por último, en la **Figura 10.15** se presenta la variabilidad espacial del rendimiento observada en una de las chacras. Como se puede apreciar, existe una diferencia de rendimiento muy marcada entre diferentes zonas de la chacra, habiendo lugares con niveles productivos altos (11.000 kg/ha) y otros con productividades mucho menores (5.000 kg/ha). El desafío de este proyecto está en poder entender las razones de esta variabilidad, así como también proponer las medidas de manejo que permitan uniformizar el rendimiento de esta chacra. Con el transcurso del tiempo se podrá ir evaluando la estabilidad de estos patrones de rendimiento (variabilidad espacial) en el tiempo (variabilidad temporal) dentro de cada una de las chacras. Esto es uno de los pasos necesarios y prioritarios para realmente comprender si todas las zafras son afectadas por los mismos factores o si éstos son múltiples y diferentes entre zafras. Consideramos que es siempre extremadamente importante llevar adelante primero un estudio de las características espacio-temporales del rendimiento de una chacra antes de comenzar a pensar en cualquier manejo sitio-específico de la misma (Roel y Plant 2004a).

Paralelamente con el proyecto de investigación, se lleva adelante el proyecto comercial en varias empresas arroceras, en donde se siguió el siguiente procedimiento en una proporción mayoritaria de sus chacras.

Se comenzó con la captura de datos para ser incorporados al sistema de información geográfica. Con este sistema se logró disponer de datos de las empresas arroceras digitalizados, con lo que se obtuvo un plano base con diferenciación de caminos, canales y sistemas de riego, cursos de agua, áreas improductivas y áreas de cultivo.

Una vez logrado esto, que como se explicó en los objetivos, consiste en conocer las coordenadas geográficas del predio o características del mismo, la utilización del GPS permitió dirigirse a los puntos de interés dentro de cada empresa (Figura 10.16). Éstos eran definidos como puntos de monitoreo, en ellos se relevaba toda la información relacionada con el suelo y manejo del cultivo.

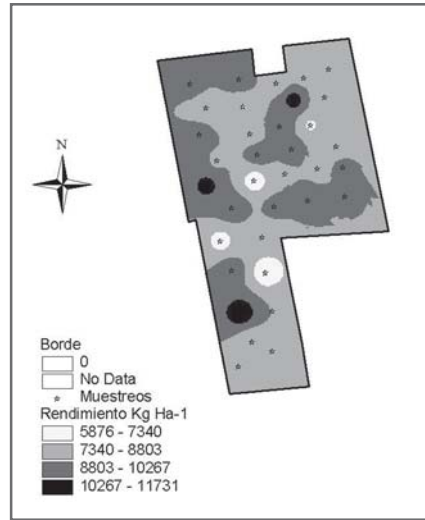


Figura 10.15: Mapa de rendimiento. Variedad El Paso 144.

Por ejemplo, para esta parcela se analizaron en cada punto acidez (pH), materia orgánica (contenido orgánico en %), Fósforo (ppm), Potasio (mEq.) y textura (% arena, % limo, % arcilla) y se construyeron sus respectivos mapas (Figura 10.17).

Durante el desarrollo del cultivo se vuelve a ir a estos mismos puntos (guiados por el GPS) y se realiza el seguimiento del cultivo, registrándose las características de nuestro interés en dichos puntos. Dependiendo de la etapa de crecimiento en que se encuentre el arroz se relevan diferentes



Figura 10.16: Puntos de monitoreo.

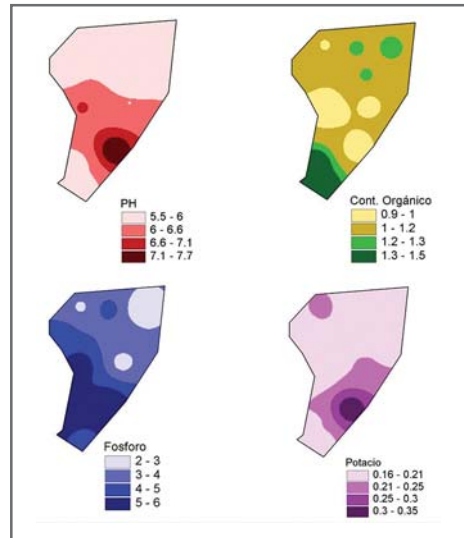


Figura 10.17: Variación de pH, C orgánico, fósforo y potasio.

características. Esto permite, por un lado, recabar datos del cultivo en cada punto y por otro, proyectar espacialmente para toda la parcela el estado general del mismo, o la distribución espacial del rendimiento, de la emergencia, del riego o cualquier otra característica que se haya monitoreado (Figura 10.18).

En este caso que usamos como ejemplo, se puede apreciar que el control de malezas estaría explicando parte del rendimiento final de la parcela, ya que los puntos de mayor rendimiento (zonas verdes más oscuras), están relacionadas con los puntos (zonas celeste claro) donde el control de malezas fue más eficiente.

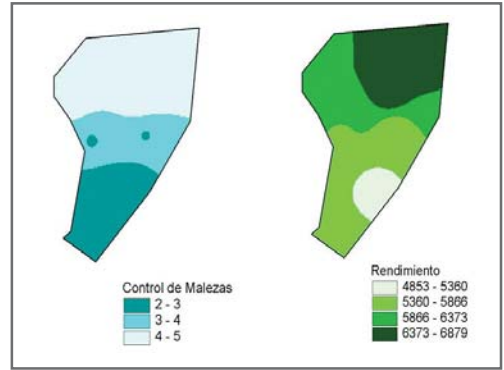


Figura 10.18: Variabilidad espacial del control de las malezas y el rendimiento.

Por último, toda la información recabada fue analizada utilizando el procedimiento CART (Classification and regression tree, Breiman et al 1984) seguido por Roel y Plant (2004b) para detectar factores asociados a la variabilidad de rendimiento. La metodología CART consiste en generar árboles de clasificación y regresión entre las variables asociadas con el rendimiento. Esta metodología permite agrupar, de acuerdo a las variables estudiadas, conjuntos de localidades dentro de la chacra que tengan diferencias importantes de rendimiento (Figura 10.19). Tiene la ventaja adicional de ser un método no-paramétrico, por lo cual es mucho menos estricto en los requerimientos de supuestos.

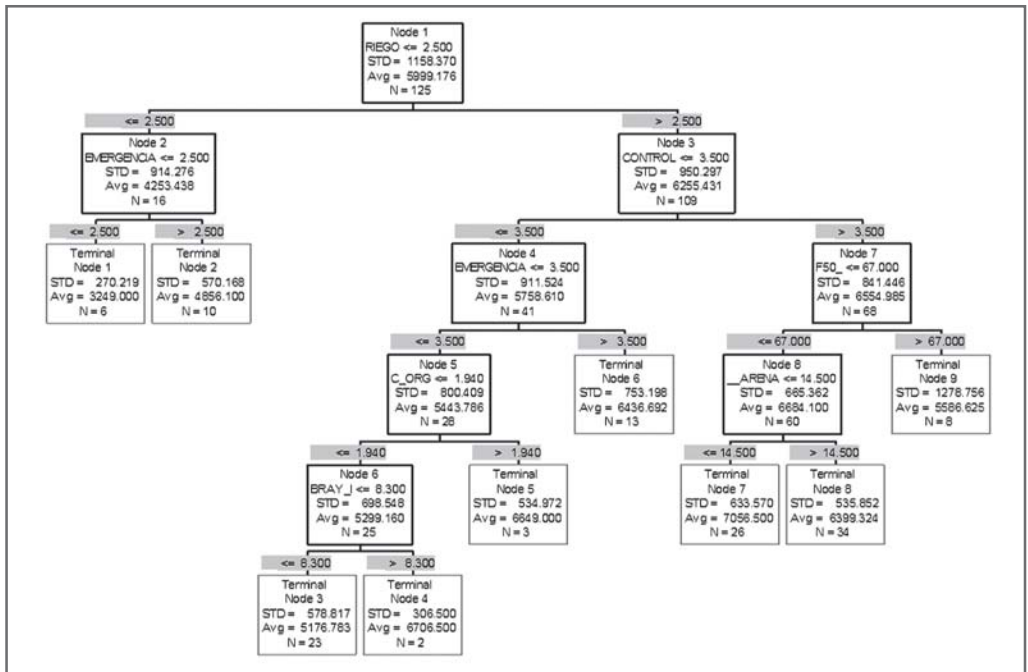


Figura 10.19: Árbol de clasificación y regresión (CART)