

DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE CULTIVO USANDO AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Víctor M. Albornoz

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Industrias. Av. Santa María 6400. Santiago. Chile.
victor.albornoz@usm.cl

Nestor M. Cid-García

Postgrado en Ingeniería de Sistemas. Universidad Autónoma de Nueva León
San Nicolás de los Garza. Nueva León, México.
nxtr.cd@gmail.com

Rodrigo A. Ortega

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Industrias. Av. Santa María 6400. Santiago. Chile.
rodrigo.ortega@usm.cl

Yasmín A. Ríos-Solís

Postgrado en Ingeniería de Sistemas. Universidad Autónoma de Nueva León
San Nicolás de los Garza. Nueva León, México.
agueda.rioss@uanl.edu.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta una metodología que combina el uso de agricultura de precisión y optimización para la determinación de zonas de cultivo que resulten homogéneas a partir de las propiedades del suelo. En Chile, se ha demostrado que la administración de zonas homogéneas genera buenos resultados en cultivos tradicionales y viñedos a través de un manejo sitio-específico. Más precisamente, la metodología consiste en usar antecedentes de agricultura de precisión considerando diversas propiedades químicas del suelo (geo-referenciadas por medio de un GPS), a partir de los cuales se genera un conjunto dado de potenciales secciones del terreno, de entre los cuales se selecciona un subconjunto óptimo que minimiza la suma de las varianzas de las zonas seleccionadas, empleando un modelo de programación entera que garantiza una partición del terreno. Se muestra los resultados preliminares alcanzados con esta metodología, las conclusiones y posibles extensiones de esta investigación.

PALABRAS CLAVE. Zonas de Manejo, Programación Entera, Agricultura de Precisión.

ABSTRACT

A methodology that combines the use of precision agriculture and optimization for determining cultivation zones that are homogeneous in terms of soil properties is presented. In Chile it has been shown that the administration of homogeneous zones generates good results in traditional cultures and vineyards through site-specific management. More precisely, the method consists in using precision agricultural information considering various chemical properties of the soil (geo-referenced by means of a GPS), from which a given set of potential land sections is generated, and from them an optimum subset is selected that minimizes the total sum of the variance of the selected sections, using an integrated programming model that guarantees a partition of the land. The preliminary results achieved with this methodology, the conclusions, and possible extensions of this research are presented.

1. Introducción

La Agricultura de Precisión (AP) puede ser definida como el uso de las nuevas Tecnologías de la Información para mejorar el proceso de toma de decisiones en temas de producción agrícola. En contraste con un esquema de administración uniforme, la AP permite la aplicación sitio-específica de prácticas agrícolas tales como fertilización, control de malezas y control de pesticidas, entre otras, empleando para ello información recolectada de datos de campo. Dicha información es geo-referenciada con la ayuda de un sistema de posicionamiento global (GPS) y su administración realizada usualmente por medio de un software de sistemas de información geográfica (GIS). El uso de la AP contribuye a una mejor gestión de la producción agrícola pues las aplicaciones son comúnmente determinadas por estimaciones locales de productividad y/o calidad del cultivo, que son variables en espacio y tiempo y, por lo tanto, para ser administrativamente más eficientes las decisiones deben ser en tiempo y sitio-específica y no programadas rígidamente.

Precisamente, el uso más común de la AP ha tenido lugar en la administración de nutrientes sitio-específico, generalmente vía tecnología de tasa variable, seguido de intentos para definir la administración de zonas de manejo dentro del campo, por ejemplo en zonas uniformes. Este concepto de administración sitio-específico es intuitivamente atractivo (Pierce and Sadler, 1999), sin embargo su adopción ha sido más lenta de lo que se esperaba debido a que involucra cambios sociales, agronómicos, económicos y tecnológicos (Robert, 2002).

Cabe destacar que la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo, control de malezas, pesticidas y enfermedades han sido reconocidas como elementos que afectan la productividad y calidad del cultivo desde los inicios de la agricultura (Gotway Crawford et al., 1997). La variabilidad intrínseca está determinada por una combinación de varios factores que incluyen relieve, clima, especies y tiempo, en tanto que la variabilidad exógena del suelo es consecuencia de las administraciones previas del campo (Ortega et al., 1999).

En la literatura aparecen varios enfoques para el desarrollo de la administración de zonas sitio-específico. El primero se basa en información sobre el suelo y/o del relieve, incluyendo mapas topográficos, muestras directas del suelo, muestras de suelo no-invasivas por equipo de conductividad eléctrica y materia orgánica del suelo o C- orgánica estimado por sensores remotos, ver por ejemplo Schepers et al. (2004). El segundo enfoque es uno basado en mapas de productividad, combinando datos de varias temporadas (Blackmore, 2000; Diker et al., 2004), mientras que el tercero es la integración de los dos enfoques anteriores. A lo anterior se suman enfoques prácticos que considera el conocimiento del productor para delinear el manejo zonas (Fleming et al., 2004).

Por otra parte, la Investigación de Operaciones se ha constituido en una metodología muy importantes para formular y resolver diversos problemas orientados a la toma de decisiones en el manejo de recursos naturales y muy particularmente en agricultura, ver por ejemplo Weintraub y Romero (2006), Ahumada y Villalobos (2009) y Bjørndal et al. (2012). Este uso se explica por varias razones, una de estas es que actualmente en agricultura existe una creciente competencia en mercados globales que obliga a mejorar la eficiencia y eficacia de las decisiones adoptadas a nivel estratégico, táctico y operacional. Además, muchos de estos problemas son cada vez complejos, por ejemplo al buscar incorporar gran cantidad de datos disponibles, tomar en cuenta todos los aspectos de una cadena de suministro y/o al incorporar diferentes periodos de tiempo del horizonte de planificación, lo que usualmente involucra una gran cantidad de variables interdependientes que conduce de manera natural al empleo de modelos matemáticos como los modelos de optimización. Desde una perspectiva histórica, el trabajo de Heady (1954) es considerado seminal en el uso de la programación lineal como apoyo a la toma de decisiones en agricultura. Con posterioridad surgen numerosas aplicaciones de esta metodología, destacando el trabajo de Rae (1994) que incorpora aspectos como la intertemporalidad de las decisiones. Cabe notar igualmente que en numerosos problemas de esta área las decisiones no siempre son continuas, por ejemplo hay situaciones donde las unidades están restringidas a números enteros en un rango muy acotado como podría ser el caso de variables asociadas al número de animales en cada semana para todos los estados de un ciclo reproductivo dado en una granja productora de

animales (Rodríguez et al., 2012), o bien decisiones que requieren el uso de variables 0-1 para modelar aspectos como decidir si se siembra o no un determinado cultivo en un periodo dado de acuerdo a opciones que resulten permisibles por razones ecológicas como en dos Santos et al. (2010).

En este trabajo en particular se desarrolla una metodología que basada en agricultura de precisión y el empleo de un modelo de programación entera permita definir zonas de manejo en un campo que sean homogéneas usando diversas propiedades químicas del suelo como pH, materia orgánica y fósforo. Para ello se construye un conjunto de potenciales zonas, esencialmente rectangulares para que faciliten el trabajo y el manejo de la maquinaria de sitio-específica, de entre las cuales el modelo selecciona un subconjunto de zonas que configuran una partición del terreno que hace mínima la varianza relativa total de la partición propuesta. El modelo ha sido aplicado de manera preliminar en una instancia con datos de un campo de cultivo en Chile, país donde el uso de zonas de manejo ha demostrado buen potencial en cultivos tradicionales y viñedos (Ortega y Santibañez, 2007; Ortega y Esser, 2003).

En lo que sigue, la sección 2 resume la metodología empleada para abordar esta problemática relacionada con la obtención de zonas homogéneas de cultivo. En la sección 3, se muestra los resultados alcanzados en la utilización de la metodología adoptada en su aplicación a un problema de naturaleza real. Por último, en la sección 4 se enumera las principales conclusiones y posibles extensiones de este trabajo.

2. Metodología

Este trabajo comprende la obtención de un conjunto de zonas de manejo lo más homogénea posible en relación con las características del suelo para el terreno analizado. La metodología empleada consiste de tres etapas. La primera tiene relación con la obtención de los datos con las características del suelo y la generación de un subconjunto de potenciales zonas con sus respectivas propiedades. La segunda consiste en el empleo de un modelo lineal de programación entera para seleccionar el mejor subconjunto de zonas de manejo que provea una partición del terreno, de acuerdo a la minimización de la suma de las varianzas a que da origen cada partición. Por último, la tercera etapa considera la visualización de los resultados obtenidos para su análisis.

2.1 Generación de cada instancia

En esta etapa se genera la instancia a resolver por el modelo. A partir del uso de un software especializado como MapInfo se crea un mapa del terreno que resume y muestra en distintos formatos las principales características del mismo en distintos puntos del terreno muestreados previamente. Esto incluye por ejemplo su posición geográfica, el nivel de pH, el índice de materia orgánica, la cantidad de fósforo y la suma de bases. A modo de ilustración la Figura 1 presenta dos mapas del mismo terreno con los índices de Materia Orgánica (MO) y otro con el de Fósforo (P). Para ambos mapas las zonas en verde indican los sectores que cuentan con la cantidad normal del respectivo índice. En el caso correspondiente a MO, las zonas en rojo y amarillo representan zonas con valores de MO por sobre el normal en un 34.80% y 3.97 %, respectivamente y, las regiones en celeste y en azul fuerte simbolizan zonas con un valor bajo el normal de un 6.06% y 30.68 %, respectivamente. En el mapa del fósforo, las zonas en rojo y en amarillo se encuentran a un 279.31% y 10.34 % por sobre el nivel normal, respectivamente y las regiones en celeste y azul fuerte están bajo el nivel normal en un 13.79% y 48.27 %, correspondientemente. El mapa permite apreciar igualmente lo considerable que puede llegar a ser la variabilidad existente en algunos de estos índices y, por lo tanto, lo importante de subdividir el terreno en secciones uniformes para aplicar variablemente la cantidad de insumos necesarios, según sus propiedades, por medio de labranza sitio-específica, concepto clave de la Agricultura de Precisión.

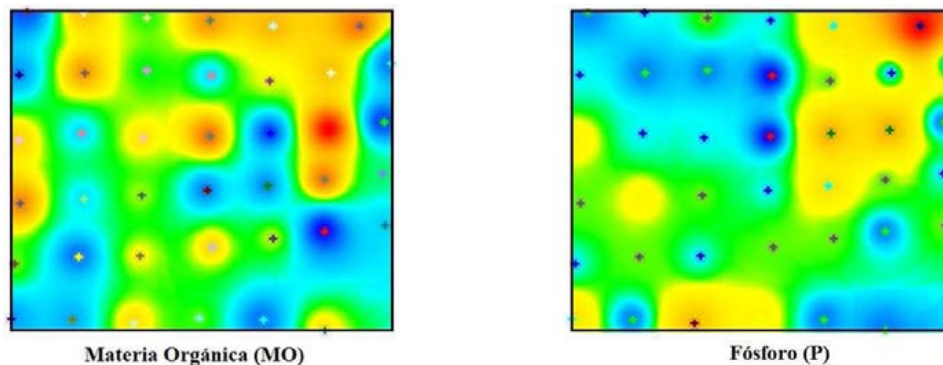


Figura 1: Mapa de Materia Orgánica y Fósforo.

Seleccionado un índice determinado como el más relevante para el problema, se genera un conjunto I de potenciales zonas de manejo rectangulares (comúnmente llamadas cuarteles), a partir de un algoritmo exhaustivo que toma en cuenta la cantidad total de puntos de muestra de dicho índice en el terreno tanto a su ancho (*WidthLot*) como a su largo (*LengthLot*) y genera todas las zonas rectangulares posibles que incluyen un mínimo de puntos de muestra a lo ancho (*MinWidthParcel*) y su largo (*MinLengthParcel*). A partir de la generación de estas zonas potenciales se crea una matriz de incidencia $C=(c_{ij})$, donde $c_{ij}=1$ indica que la potencial zona i incluye el punto de muestra j y $c_{ij}=0$ en caso contrario, para $i \in I$. y $j \in J$. este último el conjunto los puntos de la muestra. Además, se calcula la varianza de dicho índice σ_i^2 para cada potencial zona $i \in I$. Ambos antecedentes son empleados en el modelo de optimización que describimos a continuación.

2.2 Modelo de Optimización

El modelo propuesto tiene por propósito determinar un subconjunto óptimo de las potenciales zonas generadas que provean una partición del terreno que hace mínima la suma de las varianzas de las zonas seleccionadas, al tiempo que impone una condición adicional relacionada con el concepto de varianza relativa que se agrega a la partición propuesta. El modelo considera la variable de decisión x_i que toma el valor 1 si la potencial zona i es seleccionada y 0 en caso contrario para cada $i \in I$, y cuya descripción corresponde más precisamente a:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i \in I} \sigma_i^2 x_i \\
 & \text{subject to } \sum_{i \in I} c_{ij} x_i = 1 \quad \forall j \in J \\
 & \sum_{i \in I} x_i \leq LS \\
 & \sum_{i \in I} x_i \geq LI \\
 & \left(1 - \frac{\sum_{i \in I} (n_i - k) \sigma_i^2 x_i}{\sigma_T^2 [N - \sum_{i \in I} x_i]} \right) \geq \alpha \\
 & x_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I
 \end{aligned}$$

La función objetivo del modelo minimiza la suma de las varianzas de todas las potenciales zonas seleccionadas. La primera restricción indica que cada punto muestral $j \in J$ debe estar incluido únicamente en una de las potenciales zonas, de entre todas aquellas que contienen dicho punto, lo cual permite el cubrimiento buscado. La segunda y tercera restricción imponen un

número máximo y mínimo de potenciales zonas a ser seleccionadas. La cuarta restricción impone una condición que hace uso del concepto de Varianza Relativa empleado en Ortega y Santibáñez (2007), que establece un criterio muy empleado para medir la efectividad de las zonas de manejo propuestas y que se establece sea mayor o igual a un valor dado α , que debe ser al menos 0.5 para validar la hipótesis de un test ANOVA, asumiendo k grados de libertad, con un valor n_i que representa la cantidad de puntos que incluye la potencial zona i , para $i \in I$, N el total de puntos de muestra del terreno que se busca zonificar y σ_T^2 la varianza total del terreno. Notar que esta última restricción es no-lineal pero admite de manera equivalente la siguiente representación lineal de la misma que es finalmente la empleada en el modelo:

$$(1 - \alpha) \sigma_T^2 \left[N - \sum_{i \in I} x_i \right] \geq \sum_{i \in I} (n_i - k) \sigma_i^2 x_i$$

2.3 Visualización de los resultados

Por último, se desarrolla una interfaz gráfica que permite la presentación de la solución óptima arrojada por el modelo, a través del mapa del terreno que mostrará las zonas seleccionadas que dan origen a la partición óptima propuesta, conjuntamente con las características de las zonas de manejo seleccionadas. La Figura 2 muestra los mapas de terreno generados por esta herramienta a partir de zonas rectangulares óptimas para las instancias resueltas.

3. Resultados

En esta sección se presenta algunos resultados preliminares obtenidos en la aplicación de esta metodología, desarrollada para la creación y posterior selección de un conjunto de zonas de manejo (rectangulares) en el terreno agrícola Quilaco, ubicado en las cercanías de Santiago de Chile, cuya dimensión es de 256m de ancho y 305.6 m de largo. El terreno posee 40 puntos muestrales ubicados aproximadamente a unos 50m de distancia entre si, en cada uno de los cuales se conoce su nivel de pH, el índice de materia orgánica (MO), la cantidad de fósforo (P) y la suma de bases (SB). Lo anterior permitió resolver 4 instancias del problema considerando separadamente estos 4 índices y atendiendo el hecho que es posible asumir como tamaño mínimo de las potenciales zonas generadas aquellas que incluyen solo un punto muestral, por cuanto dicha situación da origen a un modelo abordable mediante el uso de un software comercial de programación entera. La Tabla 1 resume las características del terreno en estos 40 puntos muestrales.

Tabla 1: Propiedades del terreno estudiado.

Muestra	Coordenada (x, y)	Propiedad del suelo				Muestra	Coordenada (x, y)	Propiedad del suelo			
		pH	MO	P	SB			pH	MO	P	SB
1	0.00, 9.14	5.2	11.8	8.0	5.89	21	297.68, 166.36	5.6	10.4	4.0	8.26
2	48.97, 8.46	5.5	12.8	4.0	7.97	22	253.87, 160.20	5.4	18.7	11.0	8.88
3	97.52, 5.57	5.2	14.9	10.0	7.63	23	206.99, 157.26	5.6	10.5	11.0	6.03
4	150.52, 9.42	5.4	14.0	7.0	11.44	24	158.29, 155.16	5.5	16.8	3.0	9.48
5	201.07, 8.25	5.5	11.2	4.0	6.36	25	105.27, 153.53	5.4	14.8	5.0	7.85
6	250.24, 0.00	5.4	14.7	4.0	9.31	26	56.47, 156.87	5.5	12.6	5.0	5.38
7	298.57, 84.00	5.6	12.5	6.0	10.03	27	6.15, 151.48	5.4	15.1	7.0	6.50
8	249.94, 78.89	5.6	9.6	4.0	7.99	28	6.33, 204.03	5.4	11.7	5.0	5.88
9	208.71, 73.33	5.5	14.3	6.0	8.20	29	58.83, 205.57	5.5	16.0	4.0	8.09
10	160.73, 66.20	5.5	15.0	6.0	9.23	30	108.59, 207.64	5.4	13.8	4.0	8.18
11	102.69, 59.51	5.4	14.5	5.0	6.64	31	159.65, 203.22	5.6	12.6	3.0	7.95
12	53.66, 58.30	5.4	11.1	6.0	6.00	32	206.04, 199.18	5.4	14.4	6.0	7.50
13	2.81, 52.71	5.3	14.1	5.0	5.67	33	255.23, 205.16	5.4	15.4	5.0	8.23
14	6.93, 101.13	5.3	16.3	6.0	5.51	34	303.14, 212.73	5.7	11.2	5.0	9.51
15	58.25, 105.04	5.4	12.7	7.0	6.36	35	278.06, 242.75	5.2	16.6	22.0	7.30
16	104.05, 107.24	5.4	14.2	6.0	7.80	36	208.60, 243.31	5.5	15.6	8.0	9.21
17	156.53, 111.44	5.5	11.4	5.0	6.72	37	158.68, 247.47	5.5	16.1	5.0	9.51
18	204.49, 114.91	5.5	11.5	8.0	6.11	38	108.00, 249.65	5.4	13.9	6.0	6.90
19	250.37, 119.77	5.4	16.7	6.0	8.75	39	58.16, 253.69	5.5	15.4	5.0	9.69
20	296.17, 124.74	5.5	13.5	5.0	7.81	40	12.72, 254.37	5.4	10.7	4.0	7.71

En la generación de cada instancia se construye inicialmente el conjunto de todas las

potenciales zonas rectangulares que es posible generar en el terreno incluyendo al menos un punto muestral del mismo (representadas a su vez por medio de la matriz de incidencia zona - punto muestral) y la respectiva varianza de cada zona. El Algoritmo Exhaustivo para la generación de las mismas fue implementado en Visual Basic y ejecutado en un PC Intel Core Duo de 2.0 GHz y 4 GB de RAM y no requirió más de 42 minutos en la generación de cada instancia. Enseguida, con la información de ahí obtenida se resuelve el modelo propuesto imponiendo la búsqueda de una partición con un varianza relativa mayor o igual a $\alpha=0.5$, empleando para ello el software de modelado algebraico GAMS con CPLEX 11.2 como solver de programación entera. En ello se empleó un terminal Sun Ray conectado a un computador Sun Fire V440 server equipado con 4 procesadores Ultra SPARC III de 1602 GHz y 8 GB de RAM, en el cual cada instancia no tomó mas de un segundo en ser resuelta. Por último, con la herramienta de visualización es posible apreciar en la siguiente figura la solución óptima arrojada en cada una de las cuatro instancias resueltas, asociadas a los índices mencionados previamente.

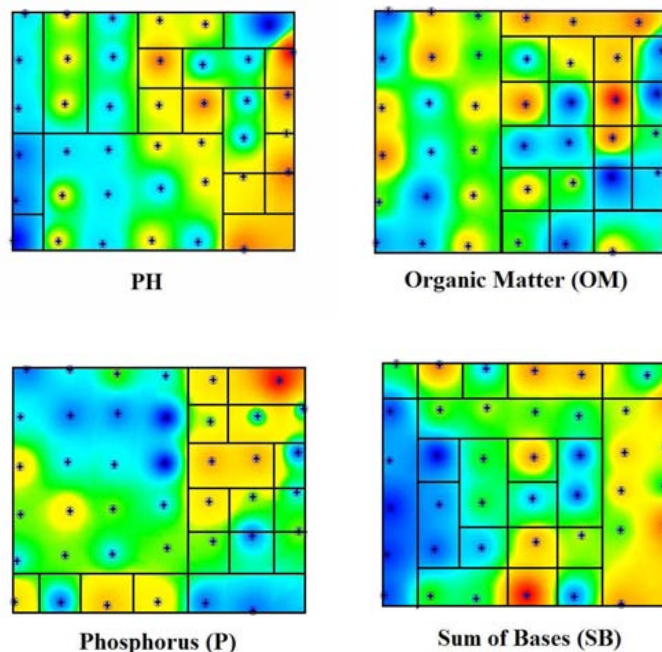


Figura 2: Visualización de los mapas de zonas de manejo que definen particiones óptimas.

La función objetivo, que considera la suma de las varianzas de las zonas de manejo resultantes, arroja un valor óptimo de 0.002727 para el índice pH, 3.12031 para el índice de materia orgánica (MO), 1.252632 para la cantidad de fósforo (P) y 0.938084 para la suma de bases (SB).

4. Conclusiones

En este trabajo de investigación se resume el avance alcanzado en una nueva metodología que, a partir de diversas propiedades químicas del suelo, establece la elección óptima de un conjunto de zonas de manejo de cultivo en la óptica de la agricultura de precisión, apoyada en el uso de un modelo lineal de programación entera para la obtención de dicha partición óptima. La herramienta propuesta considera igualmente la generación automática de todas las zonas (rectangulares) que es posible generar a partir de un tamaño mínimo y provee igualmente una representación gráfica de la solución óptima alcanzada. A pesar de la etapa de desarrollo en que se encuentra el trabajo, el empleo de un modelo de optimización como el aquí

propuesto parece ser una herramienta muy útil y pertinente para el análisis y toma de decisiones en la explotación agrícola de un terreno dado. Ciertamente la complejidad del modelo obligará a la búsqueda de estrategias de resolución, asociadas por ejemplo a la *generación de particiones*, frente a instancias de mayor tamaño en la cantidad de puntos muestrales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de financiamiento otorgado por la Dirección General de Investigación y Postgrado (Proyecto USM 28.10.37) y el Centro de Investigación del Departamento de Industrias CIDIEN, ambos de la Universidad Técnica Federico Santa María. Igualmente se agradece el apoyo otorgado al Proyecto 101857 por CONACYT, México.

Referencias

- Ahumada, O., Villalobos, J.R.** (2009), Application of planning models in the agri-food supply chain: A review, *European Journal of Operational Research*, 195, 1–20.
- Blackmore, S.** (2000), The interpretation of trends from multiple yield maps, *Computers and Electronic in Agriculture*, 26, 37–51.
- Bjørndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C., Weintraub A.** (2012), Operations research in the natural resource industry, *International Transactions in Operational Research*, 19, 39–62.
- Diker, K., Heermann, D.F., Brodahl, M.K.** (2004), Frequency analysis of yield for delineating yield response zones, *Precision Agriculture*, 5, 435–444.
- dos Santos, L.M., Costa, A.M., Arenales, M.N., Santos, R.H.S., (2010), Sustainable vegetable crop supply problem, *European Journal of Operational Research*, 204, 639–647.
- Fleming, K.L., Heermann, D.F., Westfall, D.G.** (2004), Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation, *Agronomy Journal*, 96, 1581–1587.
- Heady, E. O.** (1954), Simplified presentation and logical aspects of linear programming technique. *Journal of Farm Economics*, 24(5), 1035–1048.
- Gotway Crawford, C., Bullock, D., Pierce, F., Stroup, W., Herget, G., Eskridge, K.**, Experimental design issues and statistical evaluation techniques for site-specific management. In: Pierce, F.J., Sadler, E.J. (Eds.), *The State of Site-specific Management*. ASA/CSSA/SSSA, 301–331, 1997.
- Ortega, R., Esser, A.**, Precision viticulture in Chile: experiences and potential impacts. In: **Ortega, R., Esser, A.** (Eds.), *International Symposium on Precision Viticulture*. Centro de Agricultura de Precisión de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 9–33, 2003.
- Ortega, R.A., Santibáñez, O.A.** (2007), Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility, *Computers and Electronics in Agriculture*, 58, 49–59.
- Ortega, R.A., Westfall, D.G., Gangloff, W.J., Peterson, G.A.**, Multivariate approach to N and P recommendations in variable rate fertilizer applications. In: Stafford, J.V. (Ed.), *Proceedings of the Second European Conference on Precision Agriculture*, 387–396, 1999.
- Pierce, F.J., Sadler, E.J.** (Eds.), *The State of Site-specific Management*. ASA/CSSA/SSSA, 1997.
- Rae, A. N.**, *Agricultural Management Economics*. CAB International, Wallingford, 1994.
- Robert, P.C.**, (2002), Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management, *Plant Soil*, 247, 143–149.
- Rodríguez, S.V., Plá, L.M. and Albornoz, V.M.** (2012), Modelling tactical planning decisions in breeding farms through a linear optimization model, *Livestock Science*, 143, 162–171.

- Schepers, A.R., Shanahan, J.F., Liebigh, M.A., Schepers, J.S., Johnson, S.H., Luchiari Jr., A.** (2004). Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal*, 96, 195–203.
- Weintraub A., Romero, C.** (2006), Operations Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comparison, *Interfaces*, 36(5), 446–457.