

UCES.

TEXTO ORIENTATIVO N° 1

INTRODUCCIÓN A LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.

RAUL FIORENTINO / 12 DE JUNIO DE 2018.

Los textos orientativos en formato borrador se destinan a proporcionar información complementaria para los alumnos de la carrera de agronomía (UCES/Cañuelas) que contribuya a promover su acercamiento a temas de gran relevancia en la producción agropecuaria y agroindustrial argentina en las últimas décadas.

1. Antecedentes de la agricultura de precisión.

La introducción de las tecnologías asociadas a la Agricultura de Precisión, orientadas principalmente a optimizar el uso de los insumos y equipamientos, así como a contribuir al desarrollo de una agricultura ambientalmente sustentable, puede identificarse, según señala acertadamente Sotelo, como otro hito entre los saltos evolutivos de productividad agrícola argentina, de la misma forma que lo fueron a su tiempo la introducción del tractor o de las semillas híbridas (F. Sotelo, “Ganadería de Precisión, aplicación para la situación Argentina”; UCASAL, 2013).

En su historia se describen dos líneas de antecedentes y evolución: (a) la *Línea Agronómica* que aporta a la mejor medición de la variabilidad de comportamientos en suelos y plantas y a la utilización de los nuevos conocimientos en el diseño de estrategias productivas y (b) la línea de la *Ingeniería Agrícola*, aportando a la evolución en el uso de la maquinaria agrícola a través de la utilización de sensores y sistemas de posicionamiento global que resultan útiles para el mapeo detallado de suelos, la aplicación de insumos en dosis variadas, la mejor racionalización de las labores.

Los primeros desarrollos tienen lugar a partir de mediados de la década de 1970, cuando los trabajos de investigación dirigen su atención hacia la variabilidad observada en los suelos y cultivos, consecuencia del surgimiento de mejores metodologías de medición “de campo”, como el mapeo y muestreo selectivo de suelos y cultivos. El objetivo fue, en estos desarrollos iniciales de la AP, mejorar y ampliar el uso de la información sobre las condiciones del suelo y del cultivo con vistas a generar nuevas pautas de manejo agrícola y a incrementar la rentabilidad de la producción.

Una década más tarde, la aparición de micro-computadores permite el desarrollo de aplicaciones esenciales para la evolución de la AP. Así es como, en 1984 el Departamento de Defensa de los EEUU posibilita, para uso civil, el acceso a la señal de satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés).

La masificación de esta tecnología y el acceso a receptores de relativo bajo costo permitió determinar con precisión las coordenadas geográficas de cualquier objeto en cualquier lugar del planeta. La generalización del uso de microprocesadores hizo posible el desarrollo de equipos para la maquinaria agrícola donde se integran tecnologías de información y posicionamiento geográfico junto a sensores de control sobre suelo y cultivo que conforman el corazón de las herramientas empleadas en AP.

En 1996 tiene lugar el inicio del proceso de perfeccionamiento y adopción de técnicas vinculadas con la AP en Argentina. En la EEA INTA Manfredi se puso en funcionamiento el primer sensor o monitor de rendimientos, constituyendo el primer equipo de registro de información agrícola geo-referenciada y la primera sembradora inteligente (capaz de alterar instantáneamente la densidad de siembra en función de órdenes adecuadamente suministradas).

En los últimos 20 años se observa una mejora constante en la adopción del “manejo por zonas” al interior de un lote o parcela. Entre las adopciones más importantes se

observan: (1) las sembradoras equipadas con “controladores de siembra”, que permiten un monitoreo instantáneo sobre la dosificación de semilla y fertilizante, desarrollando técnicas de “aplicación variable de insumos”, utilizada en Argentina desde 1997; (2) la adopción de “banderilleros satelitales” (equipamientos “de pantalla” que permiten guiar a la máquina agrícola por senderos claramente establecidos), incorporados desde hace algunos años a la práctica de pulverización de cultivos, entre otras labores; (3) los Monitores de Rendimiento con mapeo; (4) la Guía Automática o Piloto Automático, que sitúa el “recorrido” de la maquinaria sobre una trayectoria de trabajo predeterminada.

2. Medición de la variabilidad, determinación de sus fuentes y diseño de nuevos procedimientos de manejo de cultivos, con énfasis en la aplicación de insumos.

Entre los principios conceptuales en los que se basa la AP se destaca la posibilidad de medir la existencia de *heterogeneidad* en los resultados observados durante la evolución y cosecha de los cultivos. Existen variaciones de productividad entre zonas al interior de una unidad “territorial de cultivo (“**parcela**” o “**lote**”), originadas por factores diversos como son el tipo de suelo (su textura, estructura, profundidad), el contenido de humedad y su composición química. Así también, existen variaciones de productividad dentro de un lote o parcela de cultivo debido a diferencias en cuanto a la presencia de malezas, enfermedades, insectos, temperatura y topografía.

Asimismo, factores asociados al transcurso del tiempo, como la historia de manejo que presente la parcela o lote o la evolución dentro de una misma campaña de cultivo, también influirán en los resultados productivos que se registren. El objetivo de la AP será entonces determinar cuáles de esos parámetros presentan mayor incidencia en el sistema productivo y cuáles pueden ser instrumentados para mejorar el desempeño de dicho sistema.

Existen dos fuentes principales de variabilidad en el terreno: la *variabilidad espacial* y la *variabilidad temporal*. La Variabilidad Espacial expresa las diferencias que se observan en un lote o potrero durante el mismo ciclo productivo, hasta la cosecha. La AP introduce la posibilidad de identificar, cuantificar y referenciar geográficamente esta variabilidad. Las manifestaciones gráficas son, entre otras, los “mapas de rendimientos de parcela”, en los cuales se delimita a través de diferentes colores la variación de rendimientos, expresados en toneladas/ha, observados en la superficie bajo estudio.

La Variabilidad Temporal, por su parte, expresa (i) las diferencias de productividad, evaluadas a través de la evolución de los rendimientos, observadas en la misma superficie entre sucesivos ciclos de cultivo; (ii) las diferencias entre indicadores productivos (por ejemplo, evolución del volumen de materia verde) observados durante una única o misma campaña. Esta variabilidad se evidencia también según los momentos en que se concreten las labores propias de cada cultivo. Aquí cobra importancia contar con información y registros tomados de diferentes campañas agrícolas almacenados en una base de datos. La forma habitual de registrar información son los “*mapas de rendimientos*” cuya variabilidad se observa a través de diferentes registros cromatográficos (ver para mayores detalles el trabajo de F. Sotelo previamente citado).

Se observa entonces que, a diferencia de las prácticas agrícolas habituales, las que define la AP ya no se aplicarán en función de dosis de insumos promedio y regulaciones estándar de los equipos sino idealmente atendiendo a las variabilidades particulares que presenta la superficie (parcela o lote) a cultivar. Complementariamente, se observa que la aplicación de insumos con elevado poder residual y condiciones de impacto ambiental negativo en suministros apenas necesarios para provocar impacto adecuado en cada uno de los puntos de aplicación (ahorro de insumos basado en la especificidad espacial de su aplicación) conduce a una mayor sustentabilidad ambiental.

3. Perspectiva general sobre procedimientos y técnicas en la AP.

Existe un sólido consenso en separar la aplicación de la AP en cuatro (4) etapas diferentes:

- (i) Recolección de datos.
- (ii) Procesamiento e interpretación de la información.
- (iii) Calibración de instrumentos.
- (iv) Aplicación diferencial de insumos.

3.1 Recolección de datos.

Determinada la parcela o lote a analizar, esta etapa tiene el objetivo de generar la información que se interpretará posteriormente a través del uso de instrumentos de software específicos y a través de la confección de mapas para la toma de decisiones. La información generada, recolectada y registrada conformará la “base de datos”, mayormente con registros de cosecha, suelo y clima de la parcela relevada, a partir de los cuales podrán identificarse la variabilidad espacial y temporal a través de los años.

Las herramientas tecnológicas asociadas a esta etapa son los receptores GPS, los Sistemas de Percepción Remota (SPR) para captación de información, los sistemas de información geográfica (SIG o GIS según lenguaje de base utilizado), herramientas topográficas, así como sensores de conductividad eléctrica remotos o directos.

3.2 Procesamiento e interpretación de información.

En esta etapa se obtienen a través el procesamiento de la información registros alfanuméricos y diferentes tipos de mapas de evaluación en los que quedará plasmada la variabilidad medida en terreno. Este trabajo se sustenta principalmente en la utilización de programas informáticos de interpretación geográfica de la información y validados estadísticamente, esto demanda la intervención de técnicos especializados con mayor relevancia que en las otras etapas del ciclo.

3.3 Calibración de instrumentos.

La calibración tiene como objetivo el mejoramiento de parámetros de funcionamiento de los equipos y como propósito general contribuir al ahorro de uso de equipos, dado por ejemplo por el empleo de los mismos con mayor velocidad. Deben ser

calibrados los monitores de rendimiento, que requieren ajustes antes de las labores de cosecha (calibraciones por distancia y altura del cabezal según el cultivo implantado). Deben también ser calibrados los sensores de monitoreo, de acuerdo con la humedad y el peso del grano. La calibración permite reducir los márgenes de error. Los requerimientos y procedimientos de calibración frecuentemente están provistos por los fabricantes de los equipos.

3.4 Aplicación del nuevo manejo.

La Aplicación de las decisiones de manejo está basada en la medición y los valores de las variabilidades prediales, habiendo previamente determinado la viabilidad agronómica y económica de su implementación. La inclusión de la guía o piloto automático en maquinaria autopropulsada muestra en esta etapa su mayor utilidad. Los receptores GPS son básicos también en esta etapa, como también el software específico involucrado en las tecnologías de dosis variable (TDVs).

Las TDVs podrán implementarse en las tareas de siembra, fertilización y protección de los cultivos donde el grado de variabilidad amerite un manejo diferencial de sitio específico (MSE). Aquí herramientas como los banderilleros satelitales, instalados tanto en aviones como en pulverizadoras cumplen una función muy importante.

Los procesos que involucra la etapa de Aplicación serán principalmente los de siembra diferencial de variedades y densidades específicas, como los relacionados con la protección del cultivo. Herramientas como los controladores de siembra, sensores de aplicación variable de nutrientes y plaguicidas como los de Nitrógeno en tiempo real o los sensores de conductividad eléctrica instalados en la maquinaria aportarán la precisión buscada en la tarea.

Para mejor ilustración, esta información se registra también en el Cuadro 1, a continuación:

Cuadro 1. Resumen en etapas de los procesos y prácticas de la AP.

Proceso	Prácticas	Herramientas
Recolección de datos de interés.	Conformación de base de datos con los registros de interés. Confección de mapas topográficos. Geo-referenciación de imágenes satelitales. Cosecha de cultivos monitoreada.	Receptores GPS. Software de registro (GIS). Imágenes satelitales. Instrumentos de medición topográfica. Sensores de conductividad eléctrica
Procesamiento de la información	Confección de mapas de evaluación espacial y temporal. .	Software de interpretación geográfica y estadística
Interpretación de la información	Confección de mapas de evaluación espacial y temporal y además de prescripción de aplicaciones.	Software de interpretación geográfica y estadística
Calibración de instrumentos	Ajuste de instrumentos utilizados para medir variables y para aplicar insumos en forma diferenciada, en función de decisiones que surgen de la interpretación de información.	Maquinaria agrícola equipada con tecnología mecánica y electro-informática específica.
Aplicación de insumos	Siembra, fertilización y protección de cultivos que implican TDV y MSE	Receptores GPS. Maquinaria agrícola equipada con tecnología mecánica y electro- informática específica.

Cada uno de estos procesos (utilización de técnicas) se describe a continuación, considerando ordenadamente: (a) equipamiento (b) descripción de actividad humana en el proceso, (c) resultados del proceso.

4. Relevamiento y registro de Información Histórica (primer proceso).

Este proceso guarda similitud con los métodos tradicionales de planificación del manejo de cultivos. Se incluye el relevamiento de mapas de suelos y variables climáticas provistos por entidades públicas y privadas especializadas (INTA, SMN, AACREA, MAGYP, SENASA, IGM, Gobiernos Provinciales y Municipales, Universidades), que si bien son usados en métodos antecesores de la AP, pueden ser incorporados con provecho en el proceso de aplicación de la AP, pues proveen información de base sumamente útil

para mejor interpretar los datos geo-referenciados, a los que alude este trabajo.

5. Determinación de la posición de la parcela y sus accidentes (Segundo proceso).

El Sistema Técnico de Posicionamiento Global (GPS) está compuesto por tres segmentos: El primero es el *Espacial* compuesto por 24 satélites NAVSTAR ubicados aproximadamente a 20.000 km de distancia de la tierra, en seis planos orbitales distintos de 12 hs de duración. Esto asegura la presencia en el horizonte de al menos cuatro satélites, necesarios para determinar la posición del receptor GPS en cualquier lugar de la tierra por triangulación de sus señales de radio.

El segundo segmento es el de *Control* compuesto por cinco bases (EEUU, Atlántico Sur, Pacífico Oriental, Pacífico Occidental y Océano Indico) que monitorean en forma continua la trayectoria y funcionamiento de los 24 satélites NAVSTAR.

El tercero se trata del segmento de *Usuarios* compuesto por los instrumentos y software aplicado, utilizado para la determinación de la posición geográfica de la parcela y de sus accidentes o detalles (fisonómicos, topográficos, etc).

Para la definición de las coordenadas geográficas de cualquier posición terrestre los tres segmentos mencionados se vinculan por medio de cinco etapas. Estas son: (i) la medición de distancia a los satélites, (ii) la triangulación de los mismos, (iii) el control del tiempo, (iv) la determinación de la posición de los satélites y; (v) corrección de errores, conocida como Corrección Diferencial de GPS (DGPS), frecuentemente realizada en contraste con una base receptora fija, posteriormente al almacenamiento de datos en el GPS.

6. Captación de información a través de Sistemas de percepción remota (tercer proceso).

El principio de la Percepción Remota está basado en la energía solar que llega a la tierra en la forma de radiación electromagnética (REM). En la superficie esta energía interactúa con la vegetación, el suelo y el agua absorbiéndose una fracción, transmitiéndose otra y siendo reflejada una tercera fracción de la misma. Esta tecnología se basa en la recolección y análisis de la fracción de energía reflejada.

Se denominan *radiómetros* a los equipos que permiten cuantificar esta radiación electromagnética y se los clasifica en fotográficos y no-fotográficos según su forma de recolectar y registrar dicha radiación. En el campo de la percepción remota, el término *sensor* sustituye habitualmente al término radiómetro: un sensor es un dispositivo capaz de detectar y registrar la radiación en determinada banda del espectro electromagnético, así como de generar información que sea posteriormente transformada, para interpretarse en forma de imagen, gráfico u otro producto.

De acuerdo con el nivel de recolección de la radiación, los sistemas sensores se clasifican en tres tipos: de nivel *terrestre* o de suelo, de nivel *suborbital* comúnmente a bordo

de aeronaves y de nivel *orbital*, montados en satélites.

La tecnología desarrollada en el marco de la percepción remota aporta precisión en la obtención de datos y medición indirecta de la heterogeneidad o variabilidad de los diversos factores (planta, suelo y microclima) que interactúan en el terreno de cultivo. En general, los datos obtenidos pueden expresarse a través de diferentes conceptos. Como ejemplo, los indicadores de estrés hídrico, de contenido de materia orgánica, grado de desarrollo de los cultivos (densidad, tamaño de las plantas, etc).

7. Procesamiento de la Información recolectada a través del Sistema de Información Geográfica /SIG (Cuarto proceso).

Este Sistema incluye a todas las herramientas que permitirán procesar y sistematizar los registros, utilizando un modelo de base de datos con registros alfanuméricos geo-referenciados y asociados a información cartográfica.

Conceptualmente, estas herramientas ganan importancia para la AP al generar la capacidad de comprender y manejar la complejidad, mediante el análisis de patrones, relaciones, correlaciones y tendencias en la información, para la toma de decisiones en el momento y lugar adecuado.

Un SIG se compone por cinco elementos básicos: hardware, software, información, personal especializado y método de utilización. Hay varios software disponibles que generan información conceptual y gráfica, tales como Farm Works Software, ArcGIS, MapInfo Corporation, CorView

El diseño de un SIG apunta a la gestión de información geográfica, cumpliendo básicamente tres grupos de funciones: (i) Captación, registro y almacenamiento de datos; (ii) Procesamiento, análisis y gestión de los mismos; (iii) Creación de salidas, como impresión de planos o reportes en diversos formatos.

8. Análisis de datos geo-referenciados (quinto proceso).

La cuarta tecnología enumerada que evolucionó, potenciando la aplicación de la AP, es la que se relaciona con nuevas metodologías de Análisis de Datos. La AP fundamenta sus procesos en la administración de una numerosa cantidad de datos que guardarían asociaciones de tipo espacial y temporal, y que además están vinculados con comportamientos productivos de los cultivos. Entre los elementos de análisis empleados se encuentran los de representación gráfica (mapas) y numérica (histogramas de frecuencia).

La representación gráfica de los datos permitirá establecer las posibles asociaciones entre determinadas variables determinadas. En el mismo sentido, una vez analizada la información numérica a través de índices de asociación entre las variables y su correlación espacial, la representación gráfica posterior completa el análisis. Se determina que existe *correlación espacial* entre las variables explicativas cuando puede establecerse su asociación con una o varias respuestas del cultivo en relación a sus rendimientos u otros aspectos. La correlación se establece objetivamente a través del empleo de índices cuantitativos de

correlación espacial.

9. Diseño y aplicación de Tecnologías de suministros variables (sexto proceso).

Las Tecnologías de Dosis Variable (TDV) también contribuyen a la evolución de los procesos en AP. Basándose en el conocimiento y cuantificación de la variabilidad de respuesta de un lote de cultivo, esta tecnología busca sustituir la aplicación de insumos en dosis uniformes que responde al supuesto de rendimientos homogéneos, por otra de dosis variables de insumos (semillas, fertilizantes y riego) que maximicen la respuesta agronómica y económica de cada sitio particular.

Las TDV se apoyan en la correlación entre el valor o nivel de la variable o las variables determinantes y las variables de decisión o comportamiento. Son ejemplos importantes de este tipo de correlaciones:

- (i) correlacionar el nivel –eventualmente bajo -- de clorofila, determinado por la intensidad de reflexión de la luz con la necesidad de incrementar suministro de nitrógeno;
- (ii) correlacionar el valor de la conductividad eléctrica del fluido en el suelo con la necesidad de incrementar a través de la fertilización la disponibilidad de nutrientes;
- (iii) correlacionar el bajo contenido de materia orgánica, determinado por refractometría, con la necesidad de alterar el sistema de manejo de la fertilidad;
- (iv) correlacionar la densidad de difusión de malezas, obtenido por reflectometría, con la frecuencia e intensidad de las correspondientes labores de control.

En el Cuadro 2 se resumen las principales herramientas vinculadas con la aplicación de la AP y los resultados esperados para su uso..

I	Receptor GPS.	Determina la posición de cualquier evento en la parcela cultivada, incluyendo la maquinaria (de cultivo, cosecha, etc).	Permite la confección de mapas de rendimientos geo-referenciados.
II	Receptor de Información o sensor.	Permite almacenar información sobre textura del suelo, contenido de humedad, materia orgánica, nutrientes, nivel de clorofila, variables climáticas.	Aporta a la Base de datos para la aplicación del SIG
III	Banderillero Satelital.	Permite determinar la ruta a recorrer por un equipo (tractor, pulverizadora, cosechadora a los efectos de recopilar información geo-referenciada.	Asiste en el suministro de dosis de insumos en forma diferenciada.
IV	Software para el desarrollo del SIG.	Permite interpretar la información captada por los diferentes receptores/sensores.	Asiste en la elaboración de información sobre relaciones entre variables.
V	Software para la toma de decisiones y modulación de la variabilidad en tiempo real.	Permite la modificación “en continuo” y en tiempo real de las dosificaciones o medidas a aplicar en cada punto geo-referenciado.	Asiste en el suministro de dosis de insumos en forma diferenciada.
IV	Guía o piloto automático en equipamiento auto /	Permite que el equipamiento auto-propulsado siga sin intervención del hombre	Asiste en el suministro automatizado de dosis de

	propulsado.	una ruta previamente definida.	insumos en forma diferenciada.
--	-------------	--------------------------------	--------------------------------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAÑOS, Ariel. GOENAGA, Tomás. 2003. Metodología para la Evaluación económica de un Proyecto de Agricultura de Precisión. Documentos de Investigación. Buenos Aires: Instituto Universitario IDEA.

BARRERA, Arturo. 2011. Nuevas realidades, nuevos paradigmas: la nueva revolución agrícola. COMUNIICA - Año 7. Edición N° 1: p. 10-21. [En línea]. Consultada el: 23 de mayo de 2012. Disponible en: <http://www.iica.int>

BONGIOVANNI, MONTOVANI, BEST y ROEL. 2006. Agricultura de Precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo: PROCISUR/IICA

BRAGACHINI, MÉNDEZ, SCARAMUZZA, GREGORET y PROIETTI. 2006. Proyecto Agricultura de Precisión. www.agriculturadeprecision.org. Córdoba, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

BRAGACHINI, MÉNDEZ y VÉLEZ. 2011. Argentina, un referente mundial en tecnología de Agricultura de Precisión. www.agriculturadeprecision.org Córdoba, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA EEA Manfredi).

CHARTUNI, CARVALHO, MARGAL y RUZ. 2007. Agricultura de Precisión. Revista ComuniICA: Tecnología e Innovación. Edición N° 1, II Etapa.

SOTELO, F. “Ganadería de precisión, factibilidad de su adopción en sistemas productivos de Argentina. Tesis de Maestría, Escuela de Negocios, Universidad Católica de Salta. Salta, Noviembre de 2013.