



## Resultados y Lecciones en **Agricultura de Precisión en Fertilización de Cultivo de Trigo**

Proyecto de Innovación en  
**Regiones del Biobío,  
de La Araucanía y de Los Lagos**





**Fundación para la Innovación Agraria**  
MINISTERIO DE AGRICULTURA



# **Resultados y Lecciones en Agricultura de Precisión Aplicada a la Fertilización Nitrogenada en Cultivo de Trigo**



**Proyecto de Innovación en  
Regiones del Biobío,  
de La Araucanía y de Los Lagos**

Valorización a agosto de 2010



---

SERIE **EXPERIENCIAS DE INNOVACIÓN PARA EL EMPRENDIMIENTO AGRARIO**

---

## **Agradecimientos**

En la realización de este trabajo agradecemos sinceramente la colaboración de los productores, técnicos y profesionales vinculados al proyecto, en especial a Lorenzo León, ingeniero agrónomo investigador de INIA Quilamapu y a Loreto Burgos, profesional FIA encargada del proyecto precursor.

### **Resultados y Lecciones en Agricultura de Precisión Aplicada a la Fertilización Nitrogenada en el Cultivo de Trigo**

Proyecto de Innovación en las Regiones del Biobío, de La Araucanía y de Los Lagos

### **Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario FUNDACIÓN PARA LA INNOVACIÓN AGRARIA**

Registro de Propiedad Intelectual N° 219.458

ISBN N° 978-956-328-141-5

#### **ELABORACIÓN TÉCNICA DEL DOCUMENTO**

Rodrigo Cruzat G. y Esteban Barrios A. - AQUAVITA Consultores

#### **REVISIÓN DEL DOCUMENTO Y APORTES TÉCNICOS**

M. Margarita Casadio P. y M. Francisca Fresno R. - Fundación para la Innovación Agraria (FIA)

#### **EDICIÓN DE TEXTOS**

Gisela González Enei

#### **DISEÑO GRÁFICO**

Guillermo Feuerhake

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

# Contenidos

---

<b>Sección 1. Resultados y lecciones aprendidas</b> .....	5
1. Antecedentes .....	5
2. Objetivo del documento.....	6
3. Base conceptual y tecnológica de la herramienta .....	6
3.1 Etapas en el desarrollo de la agricultura de precisión.....	6
3.2 Tecnologías asociadas a la agricultura de precisión en el cultivo de trigo .....	7
4. Mercado .....	10
5. El valor de la herramienta .....	15
6. Alcance de la innovación.....	16
7. La innovación tecnológica.....	16
7.1 Valorización de la herramienta .....	16
7.2 Situación actual del negocio .....	17
7.3 Conveniencia económica del uso de la herramienta.....	17
8. Claves de viabilidad.....	20
8.1 Aspectos relacionados con la herramienta .....	20
8.2 Aspectos relacionados con los usuarios .....	21
9. Asuntos por resolver .....	21
<b>Sección 2. El proyecto precursor</b> .....	23
1. El entorno económico y social.....	23
2. El proyecto.....	25
2.1 Aspectos metodológicos .....	26
2.2 Resultados .....	30
2.3 Conclusiones .....	33
3. Los productores e investigadores del proyecto hoy .....	34
<b>Sección 3. El valor del proyecto</b> .....	35
<b>ANEXOS</b>	
1. Calidades de trigo, proceso y unidades de medición .....	38
2. Estudio de mercado y valoración económica .....	40
3. Literatura consultada .....	43
4. Documentación disponible y contactos .....	44

---



Cuillermo FEUERHAKE

## SECCIÓN 1

# Resultados y lecciones aprendidas

El presente libro tiene el propósito de compartir con los actores del sector los resultados, experiencias y lecciones aprendidas sobre la optimización de diversos parámetros en la producción de trigo, mediante la utilización de la agricultura de precisión, a partir de un proyecto financiado por la Fundación para la Innovación Agraria FIA.

Se espera que esta información, que se ha sistematizado en la forma de una “innovación aprendida”,<sup>1</sup> aporte a los interesados una nueva herramienta tecnológica<sup>2</sup> que les permita mejorar la rentabilidad del cultivo de trigo.

## ► 1. Antecedentes

---

La herramienta tecnológica presentada en este documento ha sido desarrollada a partir de los resultados, experiencias y lecciones aprendidas en la ejecución de un proyecto financiado por FIA (proyecto precursor<sup>3</sup>), denominado “Optimización del rendimiento, calidad y rentabilidad en la producción de trigo a través del uso más eficiente de fertilizantes, mediante la metodología de agricultura de precisión”. Fue ejecutado entre octubre de 2006 y agosto de 2009, con una duración total de 34 meses, por el Centro Regional de Investigación de Quilamapu del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), y los agentes asociados Empresa Lobert S.A. (Temuco), Empresa Agromaster S.A. (Valdivia) y el Agricultor José Gabriel Muñoz Muñoz (Yungay), en las regiones del Biobío, de La Araucanía y de Los Lagos.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> “**Innovación aprendida**”: análisis de los resultados de proyectos orientados a generar un nuevo servicio o herramienta tecnológica. Este análisis incorpora la información validada del proyecto precursor, las lecciones aprendidas durante su desarrollo, los aspectos que quedan por resolver y una evaluación de los beneficios económicos de su utilización en el sector.

<sup>2</sup> “**Herramientas y servicios tecnológicos**”: desarrollo o introducción y validación de nuevos servicios, instrumentos, materiales o equipos que permitan mejorar o hacer más eficientes los procesos productivos y de gestión.

<sup>3</sup> “**Proyecto precursor**”: proyecto de innovación a escala piloto financiado e impulsado por FIA, cuyos resultados fueron evaluados a través de la metodología de valorización de resultados desarrollada por la Fundación, análisis que permite configurar la innovación aprendida que se da a conocer en el presente documento. Los antecedentes del proyecto precursor se detallan en la Sección 2 de este documento.

<sup>4</sup> Denominación anterior a la subdivisión de la Región de Los Lagos en regiones de Los Ríos y de Los Lagos, en 2007.

El objetivo principal de esta iniciativa fue optimizar el rendimiento, calidad y rentabilidad de la producción de trigo, a través del uso más eficiente de fertilizantes mediante la metodología de agricultura de precisión, evaluar su viabilidad técnico-económica, difundir la tecnología a los productores y evaluar su impacto sobre las aguas subterráneas.

Los objetivos específicos se describen en la “Sección 2. El proyecto precursor” (pág. 25), de este documento.

## ► 2. Objetivo del documento

---

Los resultados del proyecto precursor generaron una experiencia valiosa en las líneas de investigación propuestas, como se analiza en el presente documento, y validaron los aspectos metodológicos para el cultivo de trigo.

Este documento se propone extraer y sistematizar, a partir de las experiencias y lecciones aprendidas en el proyecto, los elementos claves y los asuntos que aún deben resolverse para implementar y poner en marcha masivamente la agricultura de precisión en el cultivo del trigo.

## ► 3. Base conceptual y tecnológica de la herramienta

---

La herramienta “agricultura de precisión” (AP) considera la variabilidad natural de los factores y condiciones de producción de un área determinada, y engloba un grupo de tecnologías que permiten la aplicación de insumos productivos en forma variable dentro de un potrero, en función del potencial de rendimiento y/o calidad del cultivo.

La AP incluye diversas actividades, como la recolección y el manejo de información, las cuales permiten tomar decisiones técnicas, económicas y ambientales apropiadas para la producción de cultivos, ya que asume la variabilidad espacial y temporal de las propiedades de variables como suelo, malezas, plagas, enfermedades y rendimientos, entre otras. Por otro lado, la agricultura tradicional no internaliza dichas diferencias y aplica un manejo homogéneo de los factores de producción como fertilización, riego, cantidad de semillas y agroquímicos, entre otros.

En este contexto, la agricultura de precisión postula que: para realizar un manejo eficiente del cultivo, es necesario aplicar sólo los nutrientes que cada zona del predio requiere, lo que repercute en un uso más eficiente de los insumos (con una posible disminución de los costos) y además en una producción pareja y óptima en rendimiento y calidad, y en un menor impacto sobre el ambiente dada la reducción de las cargas de fertilizantes y agroquímicos.

### 3.1 Etapas en el desarrollo de la agricultura de precisión

---

Se identifican cuatro etapas:

- **Diagnóstico y recolección de la información.** Recolección espacial de datos en terreno (muestreo de suelos, monitoreo de rendimientos e identificación de malezas, plagas y enfermedades, entre otros), con la ayuda de sistemas de posicionamiento global (GPS) y su ingreso a un sistema de información geográfica (SIG) para georeferenciarlos y conocer en profundidad lo que ocurre a micro escala.

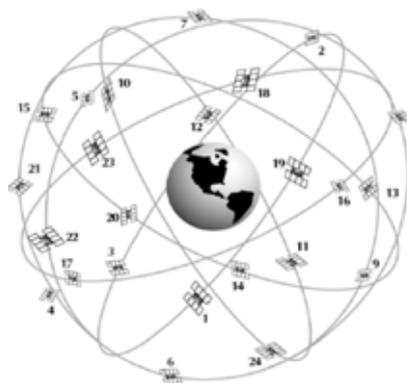
- **Análisis de la información.** Con las variables designadas y los datos recolectados se comienza el análisis, proceso e interpretación de la información, la cual se asocia con los mapas digitales que muestran la variabilidad de los factores y su dependencia espacial.
- **Aplicación de los manejos diferenciales.** Sobre la base de los mapas de evaluación y prescripción elaborados en la etapa anterior, se define un ciclo de prácticas agrícolas orientado a sustituir la recomendación habitual de insumos de la agricultura tradicional (basada en valores promedio), por una más precisa, con manejo localizado, considerando las variaciones del rendimiento en toda el área, lo cual lleva a realizar una aplicación localizada y variable de fertilizantes, plaguicidas, semillas y otros insumos.
- **Seguimiento.** Incluye la evaluación y seguimiento de los tratamientos aplicados mediante la recolección espacial de datos de terreno, en forma similar a la etapa de diagnóstico. En esta etapa se evalúa el comportamiento temporal de los tratamientos aplicados, lo cual permite mejorar continuamente el nivel de precisión.

### 3.2 Tecnologías asociadas a la agricultura de precisión en el cultivo de trigo

#### Sistema de posicionamiento global – GPS

El Sistema de Posicionamiento Global, conocido por sus siglas en inglés GPS (Global Positioning System), es un sistema de radionavegación satelital operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. El uso del sistema es gratuito, sólo es necesario contar con un receptor GPS.

Este Sistema está diseñado para que un observador pueda determinar cuál es su posición en la Tierra y presenta una cobertura sobre todo el planeta, en todo momento y bajo cualquier condición climática. El Sistema GPS se basa en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) que comenzó su operación en 1978.

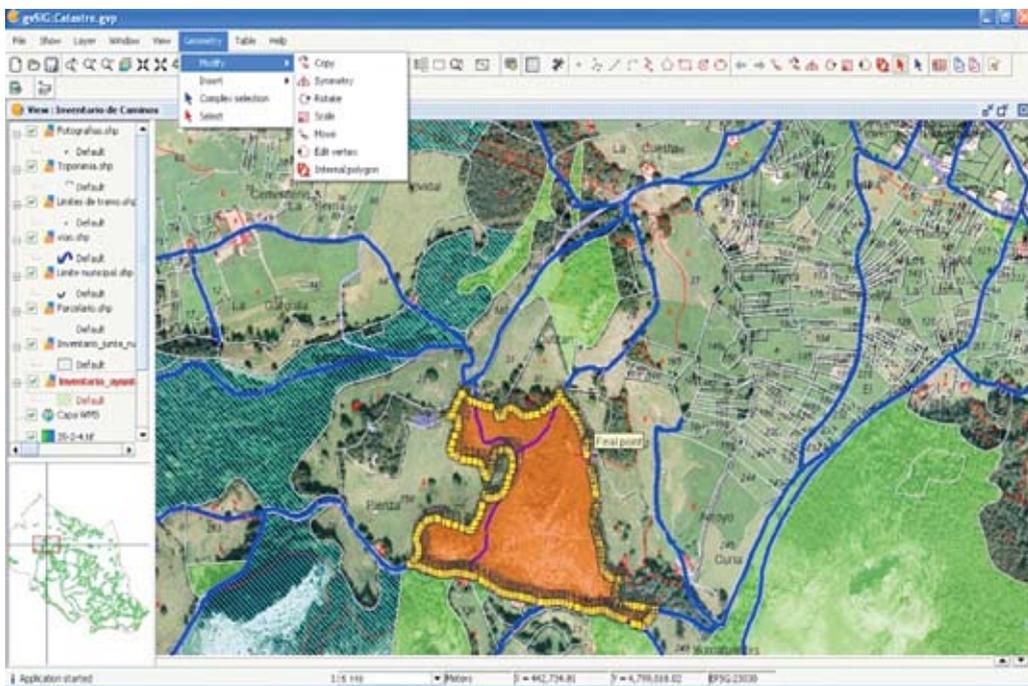


Existen 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, que tienen una inclinación de 55° con respecto al Ecuador. Los satélites se encuentran a una distancia aproximada de 20.200 km de la Tierra y describen una órbita elíptica, casi circular, de doce horas de duración (FIA, 2009). Los receptores comerciales de GPS alcanzan una exactitud cercana a los 10 m como máximo, lo cual no es suficiente para la práctica de la AP, por lo que deben usarse equipos GPS con corrección diferencial en tiempo real (DGPS). Además de las señales de los satélites GPS, estos receptores reciben una señal de corrección, alcanzando exactitudes menores a 1 m, en tiempo real.

#### Sistema de Información Geográfica, SIG

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son herramientas desarrolladas para manejar información que asocia un conjunto de datos gráficos, en forma de planos o mapas, a bases de datos digitales.

Los SIG constituyen una herramienta computacional que permite el manejo de datos con una referencia espacial denominada "georeferencia". Estos sistemas operan mediante modelos que permiten relacionar diferentes variables espaciales y representarlas geográficamente. Una de las aplicaciones más importantes que tienen los SIG corresponde a la creación de grandes bases de



datos georeferenciadas, las cuales permiten, entre otras funciones, identificar geográficamente un atributo temático en particular de alguna focalización específica.

Existe una variada gama de trabajos de gestión y planificación predial que se pueden hacer con los SIG; entre ellos destaca la confección de cartas temáticas prediales como, por ejemplo: capacidad de uso del suelo, problemas de drenaje, asociaciones vegetales, mapeo de rendimiento por cultivo y por potrero, mapas de vigor, construcción de bases de datos asociadas a labores prediales, planificar y cuantificar la aplicación de fertilizantes, pesticidas y agroquímicos en general, de una manera racional y económica, evitando pérdidas de dinero y reduciendo los niveles de contaminación, entre otros.

**Monitor y mapas de rendimientos**

Son equipos diseñados para registrar los resultados de cosecha obtenidos con un cultivo en distintos sectores, es decir, se obtiene un registro de la variabilidad espacial de los rendimientos, que se despliega en forma de mapas georeferenciados mediante DGPS (en tiempo real). Esto permite una rápida interpretación de los resultados de cosecha y también la integración de distintos años, lo cual facilita los análisis temporales útiles para la gestión y toma de decisiones.

La variabilidad espacial de los rendimientos puede ser natural o inducida. En el primer caso depende de variables como clima, suelo (génesis y propiedades físicas y químicas), o relieve, entre otras; la variabilidad inducida se refiere al manejo realizado, como la aplicación de insumos y prácticas culturales, entre otros.

## Monitor de calidad de granos

Corresponde a un sensor instalado sobre una cosechadora, que es capaz de medir el contenido de proteínas, de aceite y de humedad del grano, entre otros; al estar conectado a un DGPS puede construir mapas de distribución espacial del porcentaje de proteínas del cultivo.

## Determinación del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)

La correlación existente entre la actividad foliar de las plantas y la refracción espectral de la vegetación en el rojo e infrarrojo cercano (obtenidos por imágenes multiespectrales y sensores activos como el Crop Circle o el Green Seeker), se expresa en índices vegetacionales.

El más utilizado es el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, siglas en inglés) el cual se asocia al vigor vegetal y permite obtener un índice que diferencia las expresiones de vigor, área foliar y sanidad vegetacional, entre otros factores que evidencian la variabilidad de vigor, donde se puede incluir cualquier factor que esté afectando y diferenciando el crecimiento vegetativo. Este modelo permite diferenciar las conductas espectrales entre la vegetación vigorosa, de bajo vigor, la vegetación muerta y el suelo desnudo.

Los índices vegetacionales se obtienen por medio de la división entre bandas espectrales; luego se procesan mediante un software de análisis espacial, se clasifican en distintos niveles de vigor y se elaboran mapas que representan el estado de desarrollo y de estrés de tipo nutricional, hídrico o por presencia de plagas o enfermedades; todas o una de estas variables pueden incidir en las diferentes zonas generadas.

## Información meteorológica

Ésta es necesaria para una buena evaluación del cultivo. Actualmente, desde estaciones meteorológicas automáticas se obtiene información altamente importante para determinar alertas tempranas de aparición de enfermedades y, muchas veces, las condiciones para la aparición de plagas. Esta información, asociada a la información espacial vegetativa, dan una segmentación sobre cuáles son las zonas más propensas para el desarrollo de estos problemas y son la base para la construcción de un buen monitoreo.

## Rastra eléctrica

Se evaluó la conductividad eléctrica (CE) del suelo mediante una “rastra eléctrica”. Este equipo es una nueva herramienta que se utiliza para la subdivisión de suelos en áreas de propiedades semejantes.

La CE de los suelos se define como su aptitud para transmitir la corriente eléctrica. Su variabilidad responde a múltiples factores presentes en los suelos, tales como los que afectan la conductividad del agua, la agregación (presencia de agentes cementantes como arcillas y materia orgánica, además de la estructura), electrolitos en la solución del agua (salinidad, iones, contenido de humedad y temperatura), y la conductividad de la fase mineral (tipo y cantidad de minerales).

Aunque las causas que producen la variabilidad de la CE son múltiples, ésta se ha relacionado con factores individuales que limitan el uso y productividad de los suelos, tales como salinidad, contenido de arcilla, profundidad y humedad, entre otros.

Con los datos de la CE se obtienen mapas que muestran cómo estos factores se distribuyen en un potrero, lo cual permite zonificar áreas homogéneas y focalizar los muestreos físicos y químicos propios de la metodología de AP.

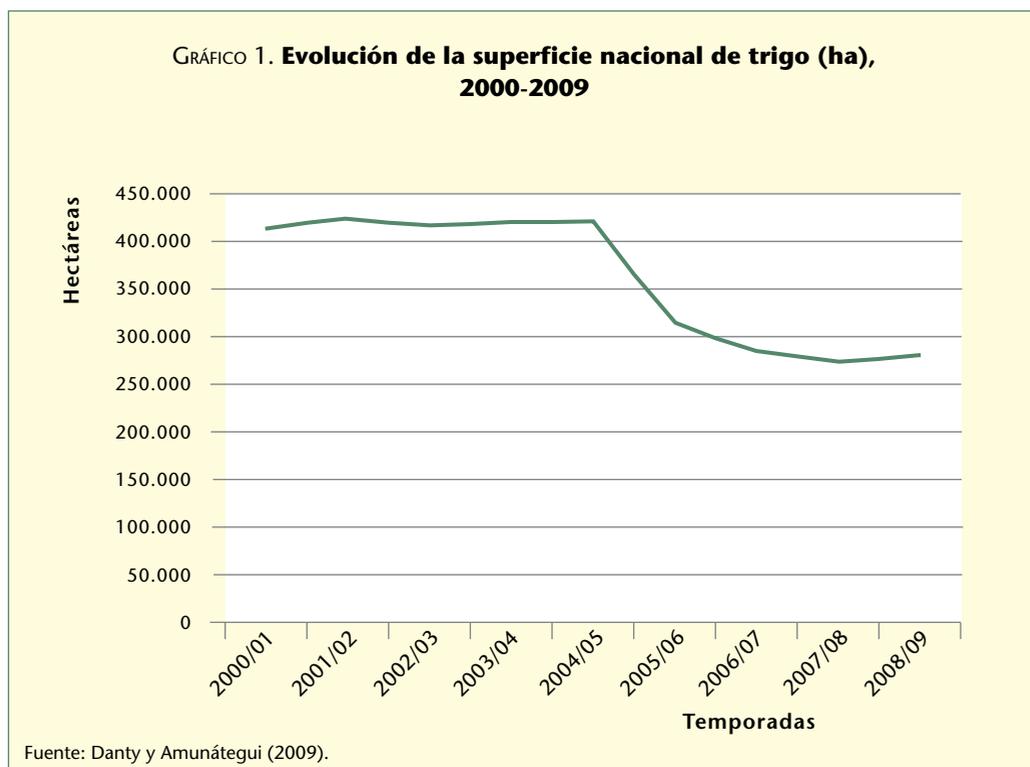
## ► 4. Mercado

En términos de los objetivos planteados en el proyecto precursor, el mercado de mayor interés para analizar corresponde a la situación nacional de la producción de trigo, por lo que esta sección describe la situación actual en la que se enmarca la herramienta analizada.

### Superficie nacional

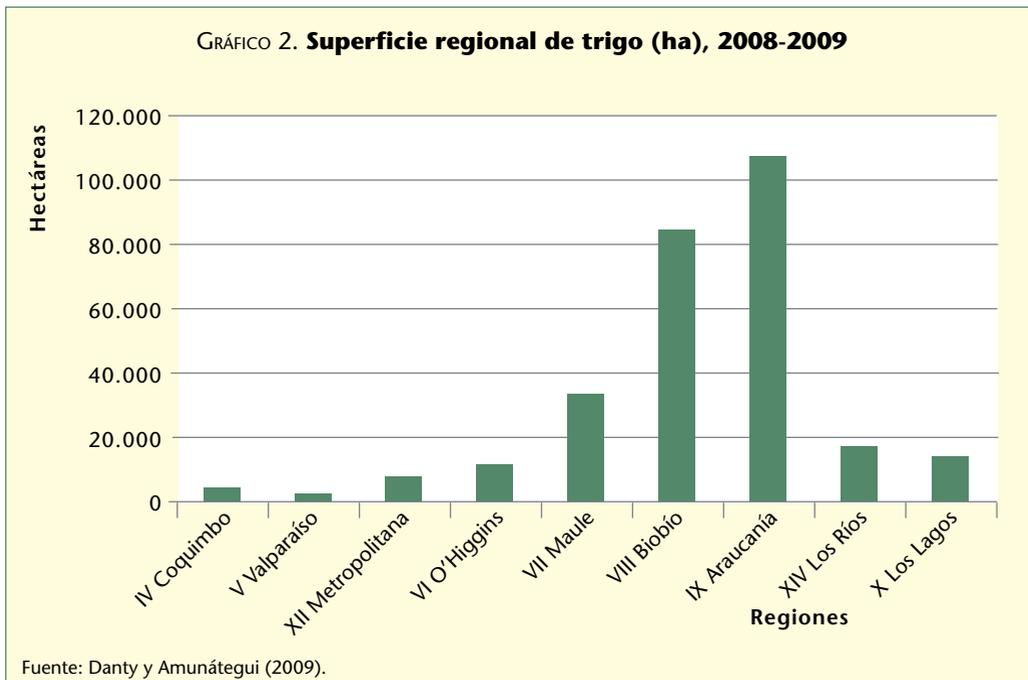
Según cifras de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) durante la temporada 2008/09 los cultivos anuales<sup>5</sup> nacionales abarcaron una superficie estimada de 671.050 hectáreas, cuyo 41% (280.598 ha) corresponde a trigo, de la cual, cerca del 72% corresponde a cultivos de trigo en secano y el 21% a cultivos bajo riego (Anexo 2).

En el Gráfico 1 se observa que la superficie nacional plantada con trigo ha disminuido en los últimos años, alcanzando el 32% si se compara la superficie de la temporada 2000/01 (413.000 ha) con la superficie de la temporada 2008/09 (280.598 ha). La tendencia observada es coincidente con la disminución en superficie que han experimentado los cultivos anuales (más del 19%), desde 829.344 ha en la temporada 2000/01 a 671.050 en 2008/09 (Anexo 2).



En el Gráfico 2 se observa que la mayor superficie de cultivo se concentra entre las regiones del Maule y la de Los Lagos, con más del 90% de la superficie nacional; entre éstas, la de mayor superficie cultivada es la Región de La Araucanía, con 107.431 ha (38,3% de la superficie nacional), seguida por la del Biobío, con 84.519 ha (30,1%) (Anexo 2).

<sup>5</sup> Cultivos anuales: trigo, avena, cebada, centeno, maíz, arroz, poroto, lenteja, garbanzo, arveja, chícharo, papa, maravilla, raps, remolacha, lupino, tabaco.

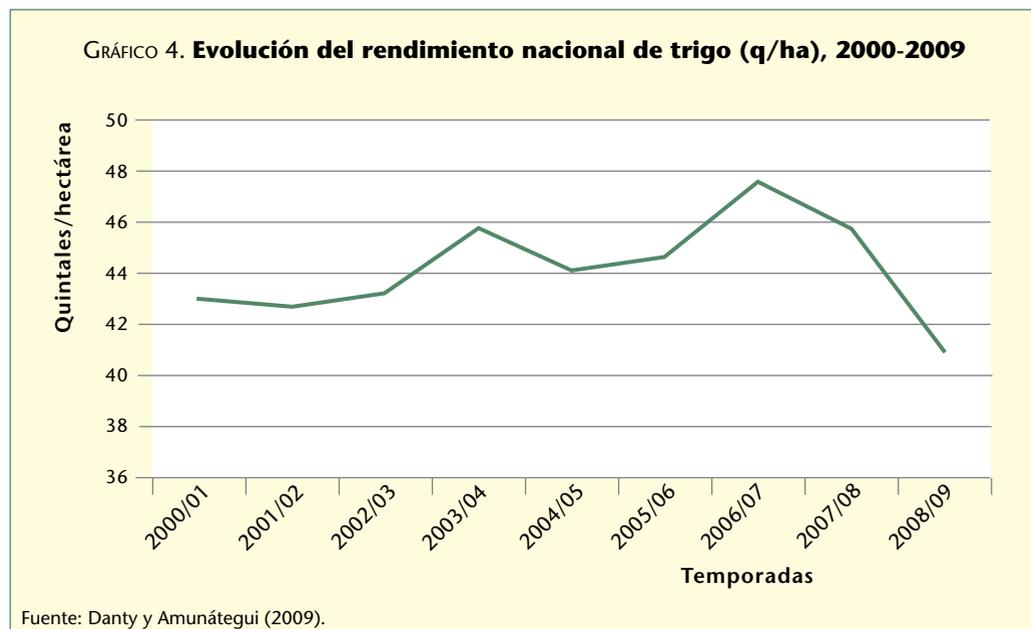


**Producción y rendimiento nacional**

Según estimaciones del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la producción nacional de trigo en la temporada 2008/09 fue de 1.145.172 toneladas, es decir, 7,5% menos que la de la temporada anterior (1.237.573 t). Ello concuerda con la tendencia productiva observada en el Gráfico 3, donde en los últimos 10 años la producción ha disminuido en más de 35%, desde 1.776.997 t cosechadas en la temporada 2000/01 (Anexo 2).

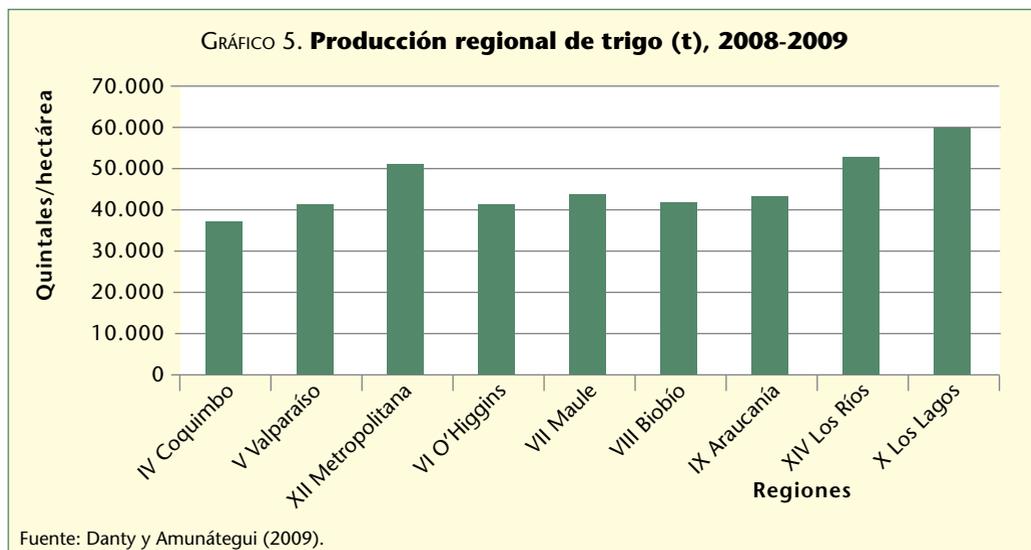


La disminución en la producción se explica principalmente por la disminución en los rendimientos, los que alcanzaron los 40,8 q/ha (nacional) en la temporada 2008/09, un 10,8% menor que la temporada anterior (45,7 q/ha) (Gráfico 4, Anexo 2).



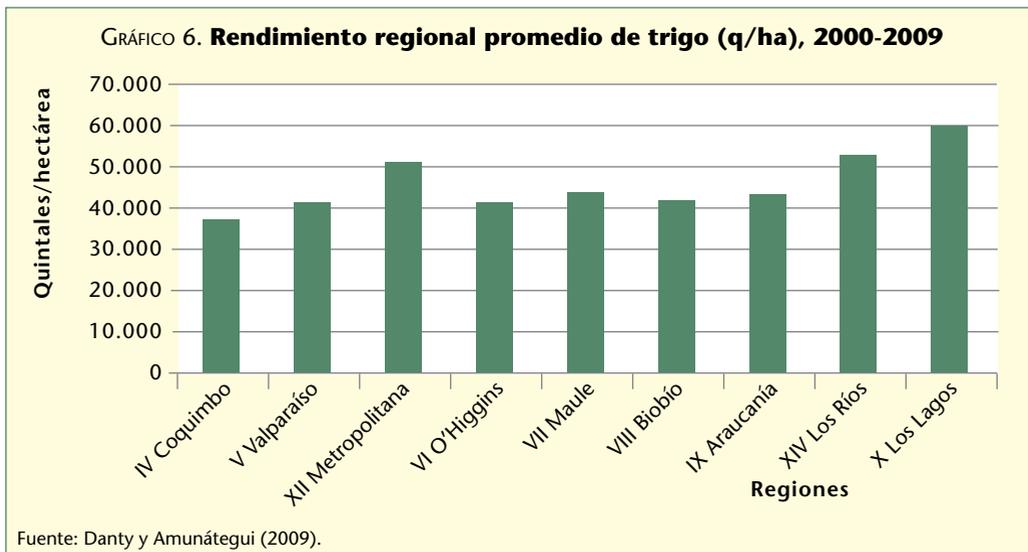
La evolución del rendimiento productivo nacional de trigo muestra una tendencia al alza para el período 2000-2009. Comparativamente con las temporadas 2000-2008 el aumento fue de 6,4%, sin embargo, en las últimas tres temporadas ha disminuido. El rendimiento nacional promedio para este período alcanzó los 44,2 q/ha (Anexo 2).

La producción de trigo se concentra entre las regiones del Maule y de Los Lagos, con más del 90% de la producción nacional;<sup>6</sup> la Región de La Araucanía concentra más del 37% con 431.873 t, en la temporada 2008/09, seguida de la región del Biobío con 309.340 toneladas (27%) (Gráfico 5, Anexo 2).



<sup>6</sup> Basada en la producción estimada para la temporada 2008/09 (ODEPA, INE).

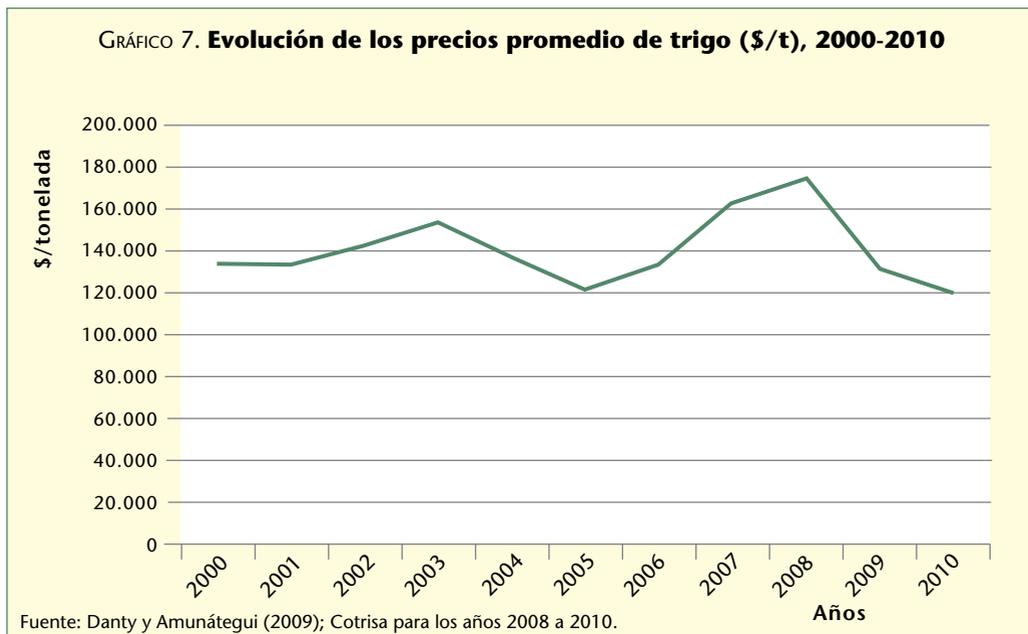
En el Gráfico 6 se observan los rendimientos regionales promedio de trigo (2000-2009); la Región de Los Lagos es la que presenta los mayores valores con un promedio de 60,1 q/ha, seguida de Los Ríos y Metropolitana: 52,3 y 50,8 q/ha, respectivamente.



Los rendimientos de la última temporada muestran una disminución nacional general y la región más afectada fue la del Biobío, que disminuyó desde 43,4 q/ha en 2007/08, a 36,6 en 2008/09 (Anexo 2).

**Precios nacionales**

En el Gráfico 7 se observa la evolución de los precios promedio de trigo para el período 2000-2009, los que aumentaron desde \$ 134.140/t (en 2000) a 164.323 (en 2007), lo cual corresponde a un 22,5% (Anexo 2).



El precio promedio estimado por ODEPA para las cinco regiones de mayor importancia para el cultivo de trigo (regiones del Maule a Los Lagos) fluctuó entre \$ 12.500/q y 14.500; entre julio y agosto de 2009 este valor se estimó en \$ 11.000/q, lo cual es congruente con lo informado por COTRISA para febrero de 2010.

### **Agricultura de precisión como herramienta para mejorar la rentabilidad del trigo**

Actualmente la rentabilidad de la producción de trigo nacional es un problema complejo, ya que depende de múltiples factores, entre otros, de mercado. Mejorar la rentabilidad del cultivo de trigo pasa, de manera importante, por el uso eficiente de los insumos a fin de disminuir costos, y también por la introducción de nueva tecnología que permita mejorar los rendimientos y la calidad del producto.

En la medida que se incorporen al cultivo de trigo herramientas capaces de mejorar aspectos claves de gestión y producción, aumentará la estabilidad de la empresa y mejorarán los precios para el productor (asociados al aumento en calidad del producto). La AP se presenta como una buena alternativa para producir este cambio.

La disminución de la producción nacional causada por los rendimientos decrecientes observados en las últimas temporadas, se debe, entre otras causas, a las dificultades climáticas y, principalmente, al aumento de precios de los fertilizantes, los cuales representan, como se verá más adelante, más del 53% de los costos en insumos y un 35% de los costos totales. Esto muestra la importancia de la aplicación variable de insumos productivos, especialmente fertilizantes, ya que si se realiza de acuerdo a la potencialidad productiva de los suelos, resultaría en un aumento de los rendimientos totales de trigo y en una disminución de los costos y, por lo tanto, se produciría un aumento en la rentabilidad del cultivo.

Otra de las variables que afecta fuertemente la rentabilidad del cultivo corresponde a los precios de mercado, que se ven afectados notablemente por los eslabones de la cadena trigo-harina-pan, que cada año presenta condiciones específicas que constituyen la razón por la que históricamente han existido diferencias en el precio ofrecido al productor de trigo, por parte de la industria molinera.

La oferta de trigo en la zona sur de Chile se ha caracterizado por una alta existencia de trigos suaves, con bajos contenidos de gluten, lo cual ha contrastado con la posición de compras de la industria, que las restringió a trigos con contenidos de gluten inferiores al 25%, o bien, que ha establecido precios sobrecastigados con relación a los precios de compra de los trigos con mayores contenido de gluten (Danty y Amunátegui, 2009).

En este contexto, los trigos importados son más valorados por su calidad y el trigo nacional es castigado en su precio por esta razón. Indudablemente el precio interno debe estar relacionado con el precio de las importaciones, y para ello es necesario conocer cuáles son las características de los trigos importados y de los nacionales, de manera de compararlas y eliminar esta variable de la determinación del precio de transacción, con el objetivo de que los trigos nacionales obtengan precios equivalentes a los importados. Esta es otra de las ventajas de la AP ya que permitiría la producción de trigos de calidades diferenciadas según los potenciales productivos de los suelos, facilitando la clasificación de las calidades al momento de la cosecha con los monitores de rendimiento y calidad.



## ► 5. El valor de la herramienta

---

La tecnología de la agricultura de precisión es fundamentalmente una herramienta de apoyo a la gestión del manejo productivo de una explotación agrícola. Tiene como gran ventaja la posibilidad de monitorear las condiciones del predio y del cultivo, describir tales condiciones de manera objetiva y mapear (georreferenciar) un predio o un potrero en función de los factores productivos.

La AP permite generar un conjunto de información con un alto grado de precisión, que facilita la implementación de programas de manejo específicos, de acuerdo a las condiciones de la explotación y de los resultados que se espera obtener de ella. Todo esto redundará en beneficios tales como:

- Optimización de los recursos productivos (agua, suelo, insumos, mano de obra, maquinaria y otros), lo que determina un mejor manejo de los costos.
- Uso eficiente de los fertilizantes de acuerdo a los potenciales productivos de rendimiento y calidad, a fin de optimizar la producción y aumentar la productividad del cultivo.
- Determinación de zonas con comportamiento diferencial en el crecimiento del cultivo, lo que posibilita mejorar la calidad de los productos a cosechar, al existir un manejo de mayor precisión.
- Manejo general del cultivo más amigable con el medio ambiente o con menor impacto medioambiental, como consecuencia de evitar el uso excesivo de pesticidas o fertilizantes. Ello disminuye el impacto que en general producen estos agroquímicos sobre el ambiente y sobre los acuíferos subterráneos cuando se aplican en forma convencional.

## ► 6. Alcance de la innovación

---

La agricultura de precisión es ampliamente utilizada en otros países del mundo como Argentina, Estados Unidos y Canadá, entre otros, sin embargo, en Chile su aplicación es reciente.

Dada la alta variabilidad de los factores que determinan los rendimientos y calidad de los cultivos, sumada al elevado costo de los insumos, el futuro de la AP se estima auspicioso, ya que para ser competitivo se debe ser muy eficiente en el uso de los recursos. Es por esto que existe un creciente interés por implementar la AP en otros cultivos anuales, como la cebada y frutales tales como arándanos, olivos y viñas. Por otra parte, el impacto de las prácticas de la AP sobre la eficiencia productiva la hace indispensable en la tarea de aumentar la competitividad de la agricultura chilena.

El proyecto precursor que originó este documento logró avances importantes en la generación de información aplicada a las condiciones agroecológicas y de gestión de la producción nacional de trigo, principalmente respecto de la toma de decisiones relacionadas con los “sitios específicos” de manejo de la fertilización nitrogenada.

La AP se presenta como una buena alternativa para producir un cambio en la rentabilidad del trigo, ya que con esta nueva herramienta el productor puede tomar decisiones dirigidas a optimizar el uso de sus suelos, así como de los insumos productivos, considerando la variabilidad en su predio y modernizando su sistema de manejo.

La limitante de la agricultura de precisión corresponde a ciertos problemas de adopción comercial, en parte porque aún no existe información suficiente para apoyar las decisiones de tipo sitio-específicas y porque la información existente no se usa eficientemente; además, aún están pendientes otros aspectos como: la validación de la implementación de esta tecnología en superficies mayores del cultivo, y probar la aplicación variable de insumos como agua, pesticidas y otros fertilizantes no nitrogenados. Por lo tanto, a medida que haya más información disponible sobre cómo usar la tecnología de precisión en forma rentable, probablemente los productores comenzarán a implementar este nuevo método o sistema productivo.

## ► 7. La innovación tecnológica

---

La innovación del proyecto precursor consistió en adaptar y evaluar, en condiciones locales, una herramienta cuyo uso es frecuente en países donde el concepto de agricultura de precisión está más difundido. A diferencia de otros desarrollos tecnológicos, cuya aplicabilidad es prácticamente inmediata y uniforme, las herramientas tecnológicas en la agricultura de precisión requieren un esfuerzo adicional para ser funcionales, ya que interactúan con el cultivo (elemento vivo) y su medio ambiente, por lo que su efectividad y diseño de aplicación deben ser corregidos y adaptados a cada situación específica.

### 7.1 Valorización de la herramienta

---

Para ejemplificar el valor económico que representa el uso de la herramienta de AP se describe la situación actual del negocio de cultivo de trigo; para ello se utilizan como supuestos de producción una estructura de costos y rendimientos arbitrarios y representativos del cultivo. No se considera riego ya que la mayor superficie de cultivo de trigo en Chile es principalmente de secano.



GUILLERMO FEUERHAKE

Posteriormente se realiza el mismo ejercicio considerando la implementación de la herramienta de AP y se establecen, a modo de sensibilización, diferentes dosis de nitrógeno (N) y rendimientos (q/ha).

Para efectos prácticos del ejercicio no se considera la compra del terreno y se incluyen los servicios de implementación de la AP.

## 7.2 Situación actual del negocio

En el Cuadro 1 se observan los costos para la producción de trigo (\$ 752.064/ha en total). En este ejercicio se consideró la fertilización con 200 unidades de nitrógeno correspondientes a 435 kg de urea (Anexo 2).

CUADRO 1. Costos de producción para el cultivo de trigo (\$/ha)		
Ítem	\$/ha	%
Labores	268.950	36
Insumos	483.114	64
Total	752.064	100

Fuente: ODEPA [en línea].

Se observa que de los costos totales, los insumos corresponden al 64% lo que indica su importancia relativa dentro de los costos de producción, por lo tanto, su manejo eficiente afectaría positivamente la productividad del cultivo.

Los siguientes son los supuestos utilizados para la obtención del margen bruto de 1 ha de cultivo de trigo:

- Rendimiento (q/ha): 80
- Precio de venta (\$/q): 9.500
- Dosis de N (unidades/ha): 200
- Jornada hombre (\$/JH): 9.000
- Ingresos (\$/ha): 760.000
- Total costos (\$/ha): 752.064
- Margen bruto (\$/ha): 7.936

## 7.3 Conveniencia económica del uso de la herramienta

A fin de visualizar la conveniencia económica de implementar la herramienta de agricultura de precisión en el cultivo de trigo, se comparan dos flujos anuales de producción: uno con AP y otro con manejo convencional.

## Cultivo de trigo sin agricultura de precisión

- Supuestos utilizados:
  - Horizonte productivo: 10 años
  - Superficie: 150 ha
  - Rendimiento productivo: 80 q/ha
  - Precio: \$ 9.500/q
  - Dosis N: 200 unidades/ha

CUADRO 2. Flujo de fondos del cultivo de trigo (\$), sin agricultura de precisión

Ítem	AÑO	
	0	1-10
<b>Ingresos</b>		114.000.000
Equipo variable y herramientas	7.800.000	
<b>Total inversiones</b>	7.800.000	
<b>Labores</b>		
Arado disco		6.750.000
Rastraje		3.750.000
Pulverizaciones		1.080.000
Desinfección semillas		337.500
Apoyo a la siembra		405.000
Siembra y fertilización		5.250.000
Aplicación nitrógeno (trompo)		6.000.000
Aplicación herbicidas		3.000.000
Aplicación pesticidas		3.000.000
Cosecha, trilla automotriz		10.500.000
Apoyo a la trilla		270.000
<b>SUBTOTAL LABORES</b>		40.342.500
<b>Insumos</b>		
Semilla		9.000.000
Urea		16.826.087
Flete insumo-producto		5.500.000
Fertiyeso		1.530.000
Sulfato de potasio		10.305.000
Muriato de potasio		7.350.000
Metasulfuron Metil (herbicida)		156.450
Superfosfato triple		8.010.000
Tebuconazole (fungicida desinfeccion semilla )		300.000
Heptametiltrisiloxano (humectante)		841.500
Lodosulfuron-metil-sodio		6.840.000
Ciproconazole/trifloxistrobin /(fungicida)		5.808.000
<b>SUBTOTAL insumos</b>		72.467.037
<b>TOTAL COSTOS</b>	7.800.000	112.809.537
<b>Flujo neto \$/ha</b>	-7.800.000	1.190.463

Los Indicadores financieros del proyecto sin AP, Valor Actualizado Neto y Tasa Interna de Retorno, son:

- VAN 12%: \$ -1.073.618
- TIR: 9%
- Margen bruto: \$ 1.190.463

## Cultivo de trigo con agricultura de precisión

- Supuestos utilizados
  - Horizonte productivo: 10 años
  - Superficie: 150 ha
  - Rendimiento productivo: 90 q/ha
  - Precio: \$ 9.500/q
  - Dosis N: 150 unidades/ha, en aplicación variable

CUADRO 3. Flujo de fondos del cultivo de trigo (\$), con agricultura de precisión

Ítem	AÑO	
	0	1-10
<b>Ingresos</b>		128.250.000
<b>Inversiones</b>		
Sembradora-fertilizadora (aplicación variable)	14.268.100	
Banderillero Satelital	2.320.500	
Equipo variable	3.900.000	
Equipo variable y herramientas	7.800.000	
<b>Total inversiones</b>	<b>28.288.600</b>	
<b>Labores</b>		
Arado disco		6.750.000
Rastraje		3.750.000
Pulverizaciones		1.080.000
Desinfección semillas		337.500
Apoyo a la siembra		405.000
Siembra y fertilización		5.250.000
Aplicación nitrógeno (trompo)		6.000.000
Aplicación herbicidas		3.000.000
Aplicación pesticidas		3.000.000
Cosecha, trilla automotriz		10.500.000
Apoyo a la trilla		270.000
<b>SUBTOTAL LABORES</b>		<b>40.342.500</b>
<b>Insumos</b>		
Semilla		9.000.000
Urea		12.619.565
Flete insumo-producto		5.500.000
Fertiyeso		1.530.000
Sulfato de potasio		10.305.000
Muriato de potasio		7.350.000
Metasulfuron Metil (herbicida)		156.450
Superfosfato triple		8.010.000
Tebuconazole (fungicida desinfeccion semilla )		300.000
Heptametiltrisiloxano (humectante)		841.500
Lodosulfuron-metil-sodio		6.840.000
Ciproconazole/trifloxistrobin /(fungicida)		5.808.000
<b>SUBTOTAL insumos</b>		<b>68.260.515</b>
<b>Implementación AP</b>		
Mapeo de suelos completo	7.140.000	
Análisis de suelo	5.355.000	
Viático alojamiento kilometraje	410.000	
Mano de obra apoyo implementación	4.500	
Seguimiento variabilidad y asesoría	1.200.000	1.200.000
<b>SUBTOTAL implementación AP</b>	<b>14.109.500</b>	<b>1.200.000</b>
<b>TOTAL COSTOS</b>	<b>42.398.100</b>	<b>109.803.015</b>
Flujo neto \$/ha	-70.686.700	18.446.985

Los Indicadores financieros del proyecto con AP, son:

- VAN 12%: \$ 33.542.878
- TIR: 23%
- Margen bruto: \$ 18.446.985

## ► 8. Claves de viabilidad

---

Tanto la experiencia internacional como la nacional muestran que el éxito de la aplicación de esta tecnología va acompañado de una serie de aspectos relacionados con la propia tecnología y su validación, así como con las capacidades de los usuarios, los cuales se detallan a continuación.

### 8.1 Aspectos relacionados con la herramienta

---

**Validación y puesta a punto de la tecnología.** Para que la agricultura de precisión pueda ser aplicada efectivamente a un cultivo determinado, es indispensable que se haya validado para las condiciones bajo las cuales será utilizada.

En el presente caso, la herramienta ha sido validada en una zona geográfica específica, para su aplicación en cultivos de trigo, y según el efecto en el rendimiento y calidad que muestra la aplicación variable de fertilizante nitrogenado.

**Competencias y capacidades técnicas en la industria de servicios.** La AP es una tecnología de alta especificidad técnica y dinamismo, ya que requiere información de un ambiente productivo en constante cambio; por lo tanto, deben generarse las competencias humanas necesarias en el manejo del instrumental y de los programas computacionales que el sistema exige, para que estén operativos y disponibles para el productor potencial que desee utilizar la herramienta en su cultivo de trigo.

Para que la herramienta esté disponible para los usuarios, es fundamental que en el país estén desarrolladas las capacidades técnicas que presten los servicios de manera rutinaria y abierta a la comunidad, como los equipos de medición y laboratorios de análisis, entre otros.

**Asesoría técnica.** La correcta implementación de esta tecnología requiere de conocimientos y capacidades que muchas veces los productores no poseen; por ello, la asesoría por parte de especialistas en agricultura de precisión es fundamental. En la actualidad varias empresas ofrecen sus servicios relacionados con su uso.

**Capacitación en el uso de la tecnología.** Para que la información generada durante la puesta en práctica de esta tecnología sea comprendida por los usuarios, es fundamental que exista capacitación en el conocimiento de la técnica y de su implementación; dicha información puede ser generada por las empresas prestadoras del servicio o por instituciones paralelas como universidades, centros de formación e institutos de investigación, entre otros.

Tal como ocurre con otras tecnologías de apoyo, como análisis foliar o de suelos, los profesionales del área deben comprender cuándo y cómo utilizar esta información, de manera que se fortalezcan capacidades propias.

**Actualización y perfeccionamiento tecnológico.** En este aspecto los prestadores del servicio juegan un papel fundamental, ya que deben conducir las mejoras de la herramienta tales como la

incorporación y ajuste rápido de tecnologías de apoyo que ayuden a hacer más precisa su gestión y disminuir los costos.

## 8.2 Aspectos relacionados con los usuarios

---

**Nivel tecnológico y de gestión avanzado.** El uso eficiente de la herramienta exige un cierto nivel de gestión por parte del agricultor, de manera que el análisis de la información, la implementación y su control alcancen su mayor potencial de beneficio.

**Capacitación en el entendimiento y uso de la tecnología.** Es importante que el agricultor se capacite él mismo y también a todo el personal que participa en la implementación de la herramienta.

**Oportunidad de la implementación.** Cuanto más temprano se tenga información cuantitativa y cualitativa de las variables asociadas a la explotación, mayor serán los beneficios producto de las buenas decisiones tomadas oportunamente.

**Asociatividad.** Es importante la inserción de los agricultores en asociaciones o programas de desarrollo comunitario, ya que le permite a los pequeños productores reducir los costos de implementación de la tecnología AP y alcanzar una mejor comprensión de ella, dado el alto nivel de asesoría, gestión y conocimiento tecnológico que requiere.

**Capacidad financiera.** El agricultor que utilice esta herramienta debe conocer el financiamiento requerido, considerando las inversiones y costos de la implementación de la herramienta, así como los costos de manejo que derivan de las decisiones de gestión tomadas con la información generada por la herramienta.

## ► 9. Asuntos por resolver

---

La herramienta de la agricultura de precisión se encuentra, mundialmente, en un nivel de desarrollo que permite su aplicación inmediata; no obstante, para su aplicación en las condiciones locales existen algunos asuntos que se deben resolver, como los siguientes.

**Puesta a punto de la tecnología.** Se debe adaptar a las condiciones locales en las que será utilizada: condición agroclimática y tipo de cultivo.

**Generación de información aplicada, medición de otras variables.** La limitante de la AP se relaciona con que presenta ciertos problemas de adopción comercial, ya sea porque no hay información suficiente como para apoyar las decisiones de tipo sitio-específicas o porque la información que hay no se usa eficientemente; por lo tanto, se debe generar información de la respuesta al manejo sitio-específico de otras variables productivas como fertilizantes (P, K), suelos, drenaje, medición de los factores climáticos y riego, entre otras, y cómo afectan estos factores al rendimiento y calidad del cultivo objetivo.

**Validación de la tecnología en superficies más amplias.** Este asunto se relaciona con el anterior, en el sentido que se debe validar la aplicabilidad de la tecnología en condiciones “reales”, ampliando dichas evaluaciones a superficies concordantes con la realidad del cultivo y de la zona productiva, ya que el proyecto que originó este documento fue un piloto y, por lo tanto, se aplicó en zonas muy acotadas por lo que queda validar el impacto en extensiones más amplias.

**Masificación del uso de esta tecnología y transferencia de la información.** LA AP ha demostrado ser una herramienta de ayuda en la gestión del manejo productivo, y ha permitido aumentar la rentabilidad de los cultivos. Por esta razón es necesario comunicar la información a la mayor cantidad posible de agricultores, para que adquieran las ventajas y oportunidades que representa esta herramienta en el manejo de sus cultivos.

**Ampliar la experiencia y adaptación en otros cultivos.** Se debe estudiar el efecto del uso de esta herramienta en la rentabilidad de otros cultivos. Se sabe del interés por el uso de la AP en cultivos como arándanos, olivos, viñas y cebada.

**Evaluación de maquinarias y equipos.** Enfocada a la aplicación de prescripciones variables y seguimiento de los factores productivos. Se requiere generar información sobre las especificaciones técnicas y el uso de esta maquinaria en la implementación de la AP.

## SECCIÓN 2

# El proyecto precursor

## ► 1. El entorno económico y social

La producción triguera nacional se concentra notablemente en las regiones del Biobío y de La Araucanía; ésta es de gran relevancia para la economía agrícola chilena, tanto por el tamaño relativo del mercado del trigo dentro de las actividades productivas agrícolas, como por el hecho que existe un número importante de agricultores de tamaño muy diverso, que desarrolla esta actividad, quienes no sólo presentan diferencias en las superficies de sus explotaciones trigueras, sino también muestran diferencias en el rendimiento y calidad del producto cosechado.

La situación nacional de la producción de trigo involucra una serie de variables de mercado que redundan en una rentabilidad cada vez menor, que no se puede mejorar sólo con el hecho de fijar nuevas bandas de precio, sino mediante una sumatoria de factores que permitan mejorar la producción y la calidad del grano, disminuir los costos e innovar en el manejo del cultivo, permitiendo nuevas alternativas y oportunidades de mercado. En este sentido, las variables mencionadas, asociadas a la inestabilidad de los precios internacionales de este cereal, repercuten directamente en la competitividad del trigo nacional. Es por esto que la producción nacional de trigo necesita una renovación tecnológica mediante el uso de nuevas herramientas en su manejo, que permitan





mejorar problemas como: rendimiento y calidad heterogénea, ausencia de trazabilidad e impacto negativo sobre el ambiente por uso ineficiente de fertilizantes.

El rendimiento nacional de trigo en la temporada 2003-2004 representó el valor más alto alcanzado en el país hasta entonces. De acuerdo a esto, en general las variedades de trigo disponibles en el mercado presentaban un gran potencial de rendimiento. El aporte de las variedades mejoradas es responsable de, aproximadamente, el 50% del rendimiento y calidad final, el otro 50% está asociado al clima y a las prácticas de manejo que el agricultor debe realizar para tener éxito en su siembra.

Los productores nacionales de trigo en secano y riego de distintas zonas geográficas y, por lo tanto, con distintas condiciones climáticas, se enfrentan a un problema común: el manejo tradicional del cultivo que no considera la variabilidad de cada sitio de producción, lo que redundaría en una fertilización uniforme acorde a estándares preestablecidos, lo cual origina regularmente una fertilización excesiva en algunos sitios e insuficiente en otros. Por otra parte, otros agricultores fertilizan sobre la base del análisis de muestras de suelo, lo que deriva en una fertilización final promedio que también produce excesos o insuficiencia en los sitios de cultivo, ocasionando una producción heterogénea en rendimientos y en calidad y, consecuentemente, una disminución en la rentabilidad del cultivo.

De acuerdo a lo anterior, se ha propuesto la metodología de agricultura de precisión (AP) para enfrentar las problemáticas señaladas; esta tecnología es aplicada con éxito en países como Estados Unidos, Canadá y Argentina, y aborda el manejo de los cultivos bajo una perspectiva diferencial y específica, según las necesidades de los distintos ambientes en que se desarrolla, optimizando los rendimientos y la calidad del trigo, en este caso.

## ► 2. El proyecto

---

Este documento nace de la ejecución del proyecto “Optimización del rendimiento, calidad y rentabilidad en la producción de trigo a través del uso más eficiente de fertilizantes, mediante la metodología de agricultura de precisión”, financiado por FIA y ejecutado por el Centro Regional de Investigación Quilmapu, del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), y los agentes asociados: Empresa Lobert S.A. (Temuco), Empresa Agromaster S.A. (Valdivia) y el Agricultor Sr. José Gabriel Muñoz Muñoz (Yungay). Se desarrolló en las regiones del Biobío, de La Araucanía y de Los Lagos, entre octubre de 2006 y agosto de 2009.

El objetivo general del proyecto fue incorporar la tecnología de agricultura de precisión al cultivo del trigo mediante una labor conducente a optimizar el rendimiento, calidad y rentabilidad de la producción de este cultivo a través del uso más eficiente de fertilizantes nitrogenados, además de evaluar su viabilidad técnico-económica, difundir esta tecnología a los productores y evaluar su impacto sobre las aguas subterráneas.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

1. Introducir y adaptar a las condiciones del manejo del cultivo los equipos y principios de la agricultura de precisión para un manejo diferencial de la fertilización, identificando zonas de alto y bajo potencial productivo, que derive en una metodología replicable, para optimizar el rendimiento del trigo harinero.
2. Analizar parámetros de calidad del grano en el cultivo del trigo harinero, con el fin determinar su heterogeneidad en la producción actual y evaluar la mejor forma de homogenizar estos parámetros utilizando la tecnología de AP aplicada a la fertilización.
3. Evaluar el impacto ambiental de la innovación *versus* el manejo tradicional de la fertilización, mediante el análisis de la concentración de nitratos en las aguas subterráneas.
4. Difundir la nueva metodología introducida al sector triguero mediante seminarios, boletines, días de campo, e-learning y sitio Web; capacitar a productores en el uso de los principios y equipos de la AP.

El proyecto abarcó los aspectos más relevantes del cultivo del trigo (características morfo-fisiológicas, potencial productivo, adaptación y calidad del trigo harinero), así como también el estudio de las variables del suelo y del manejo cultural que influyen en el cultivo, las cuales afectan las calidades del grano. Cada variable se estudió considerando su rango y variabilidad espacial, y luego se correlacionó espacialmente con los resultados productivos y de calidad de grano para, finalmente, implementar un manejo diferenciado en cada subunidad de producción.

En síntesis, el proyecto precursor logró importantes avances en la generación de información aplicada para la toma de decisiones “sitios específicos” de manejo de la fertilización nitrogenada en la producción de trigo, y permitió establecer la potencialidad que tiene el uso de la AP como una buena alternativa para producir un cambio en la rentabilidad del trigo, ya que con esta herramienta el productor puede modernizar su sistema de manejo y tomar decisiones dirigidas a optimizar el uso de los insumos productivos considerando la variabilidad en su predio.

Una de las limitantes que actualmente enfrenta la implementación de esta herramienta se refiere a la escasez de información necesaria que apoye las decisiones de tipo sitio-específicas y también porque la información que existe no se usa eficientemente. Aún están pendientes aspectos como:

la validación de la implementación de esta tecnología en superficies mayores de cultivo de trigo y probar la aplicación variable de insumos como agua, pesticidas y fertilizantes no nitrogenados, y sus diferentes interacciones; por lo tanto, a medida que haya más información disponible sobre cómo usar esta tecnología de precisión en forma rentable, los productores podrían comenzar a implementarla.

A continuación se describen las metodologías y los principales resultados del proyecto precursor según sus objetivos, con énfasis en aquellos que resultan más relevantes para la elaboración de este documento.

## 2.1 Aspectos metodológicos

---

### El planteamiento inicial

El proyecto requirió que la metodología utilizada permitiera identificar la variabilidad espacial de los principales factores productivos y su asociación con los cambios en rendimiento y calidad de la cosecha de trigo. Para ello se muestreó en forma intensiva tanto el suelo como las plantas durante los tres años de ejecución del proyecto.

El análisis de los datos permitió determinar las variables de rendimiento y calidad que presentaron mayor correlación con la respuesta a la fertilización nitrogenada; de éstas se obtuvieron mapas de variabilidad espacial y temporal, con los cuales se confeccionaron mapas de tendencia, estabilidad temporal y clases de manejo. Cada clase de manejo correspondió a una unidad de manejo que presenta una superficie y forma espacial particular, en la cual se aplicó una estrategia de manejo *ad hoc* para las condiciones específicas existentes en su interior, relacionadas con la preparación del suelo, la fertilización o el manejo del cultivo. Posteriormente se definieron las variables que con mayor frecuencia controlan la calidad del grano de trigo al interior de los cuarteles.

### Unidad experimental

Las áreas de estudio se localizaron en las regiones del Biobío, de La Araucanía y de Los Lagos. El agricultor de la Región del Biobío produce trigo bajo riego con pivote central, el cual cubre una superficie de 70 ha, área que se usó en el estudio. En las otras regiones, las empresas participantes producen trigo esencialmente de invierno en condiciones de secano; se utilizaron 50 ha físicas en el estudio.

### Implementación de SIG en las áreas de estudio

La tecnología a utilizar requirió incorporar los predios de las áreas de estudio a un sistema digital; se usó el software SIG ArcView, de amplio uso mundial, para ingresar datos como: límites y divisiones internas del predio, información de suelos y manejo histórico del cultivo.

Se estableció para el SIG de cada predio una escala de trabajo estimada en 1:20.000. Se digitalizó el material cartográfico recopilado y se ingresó directamente el de formato digital (fotos aéreas, ortofotos e imágenes satelitales).

### Evaluaciones de suelo

**Conductividad eléctrica (CE).** La CE del suelo se evaluó mediante una “rastra eléctrica” o “EM38”. Esta es una nueva herramienta que actualmente se utiliza para la subdivisión de suelos en áreas de propiedades semejantes.

Aunque las causas que producen la variabilidad de la CE son múltiples, las mediciones de ésta se han relacionado con factores individuales que limitan el uso y productividad de los suelos, tales como salinidad, contenido de arcilla, profundidad y humedad del suelo, entre otras.

Los datos de la CE fueron procesados estadísticamente e interpolados con el módulo de análisis espacial de ArcView y se obtuvieron mapas que muestran cómo estos factores se distribuyen en un potrero; éstos permitieron zonificar áreas homogéneas dentro del potrero y focalizar los muestreos físicos y químicos propios de la metodología de AP.

**Análisis químico.** Para la metodología de la AP en el SIG se seleccionaron zonas homogéneas de suelo, se introdujeron las coordenadas de cada una a un GPS diferencial montado en una moto de cuatro ruedas, y se extrajeron muestras de suelo en los puntos seleccionados, a fin de realizarles un análisis de fertilidad completo (macro y micronutrientes).

**Construcción de calicatas, descripción y análisis físico.** En las áreas de estudio se seleccionaron zonas con un índice vegetacional (NDVI) homogéneo; en función de ellas se realizaron calicatas de 1x1x1m y se describió la profundidad y límites de los horizontes, y el color con una tabla Munsell.

La presencia de concreciones, piedras y raíces en el perfil se determinó mediante una malla en acetato de 20 x 20 cm, reticulada cada 1 cm.

## Evaluaciones de plantas

**Muestreos para el balance de nutrientes.** Para realizar un adecuado balance de nutrientes, que permitiese evaluar la eficiencia del uso del nitrógeno en el sistema tradicional *versus* la AP, se realizaron (además de los análisis de fertilidad de suelos) otros análisis de extracción de nutrientes, para lo cual se tomaron plantas de trigo completas para determinar el contenido de nutrientes totales. Las plantas se lavaron y secaron en horno con flujo forzado, y posteriormente se molieron y analizaron. Los análisis comprendieron los macronutrientes esenciales nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), más el micronutriente azufre (S).

**Muestreos para obtener índices y mapas de área foliar.** El índice de área foliar (IAF) es una expresión del estado general de la planta, dado que se relaciona con muchos procesos vitales de la planta como fotosíntesis, respiración y mantenimiento del equilibrio térmico (transpiración).

Por otro lado, se ha definido la alta correlación que presenta el IAF con la refracción espectral de la vegetación en el rojo e infrarrojo cercano, así, los muestreos para IAF se correlacionaron con las fotos multi espectrales que se tomaron.

**Evaluación de plagas y enfermedades.** Se observó el desarrollo fenológico y la presencia de plagas o enfermedades en el cultivo, datos de campo valiosos para el análisis general del manejo, tanto tradicional como con la metodología de AP.

**Desarrollo vegetativo diferencial del cultivo.** Se probaron dos métodos para zonificar:

- imágenes multiespectrales (plataforma aérea)
- uso de crop circle (proximal sensing, plataforma terrestre)

Ambas metodologías utilizan el mismo principio de respuesta de la vegetación a la radiación solar, y registran la refracción de la luz solar incidente sobre las plantas en el rojo e infrarrojo cercano. Los resultados de clases de vigor del cultivo se correlacionaron con rendimiento y calidad del trigo obtenido.

## Ensayos y evaluaciones

Se evaluaron cultivos de trigo en condiciones de riego y de secano.

**Trigo en condiciones de riego:** las condiciones del área de estudio (Región del Biobío) son de riego bajo pivote central. El agricultor manejó el equipo el primer año en forma habitual, sin interferencia de los investigadores.

La información meteorológica se obtuvo desde una estación Campbell CR10X, perteneciente al programa de meteorología del INIA, la cual se instaló en el predio del agricultor. De esta estación se obtuvo información de: temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar.

**Trigo en condiciones de secano:** las áreas de estudio se ubicaron en predios de las regiones de La Araucanía y de Los Lagos, donde se desarrollaron las siguientes evaluaciones.

- **Monitoreo de la humedad del suelo e información meteorológica:** la humedad del suelo se monitoreó durante todo el desarrollo del cultivo, con sondas TDR y FDR.

En las dos áreas de secano las condiciones meteorológicas cumplen un rol fundamental, ya que la eficiencia del uso de los fertilizantes, por el cultivo, depende en forma crítica de las condiciones de humedad del suelo. No tener control sobre el agua hace aún más necesario un control riguroso de las condiciones climáticas, por lo que se adquirió información meteorológica histórica y de cada temporada.

Se instalaron cuatro estaciones de monitoreo meteorológico en cada región, modelo Campbell CR10 X, que midieron precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento, lo que permitió determinar perfiles de años (lluviosos, secos) y la mejor época de aplicación de los fertilizantes con el fin de obtener su máxima eficiencia.

- **Ensayo de lixiviación de nitrógeno:** una de las principales vías de pérdida de nitrógeno en sistemas de producción agrícola es su lixiviación hacia aguas subterráneas. En el proyecto se evaluó el impacto de la fertilización nitrogenada en forma tradicional *versus* su manejo con AP.

Se evaluaron dos condiciones de fertilidad de suelo: baja y alta. En ambos casos se aplicaron tres tratamientos (control, fertilización convencional, fertilización con AP) y se realizaron tres repeticiones ordenadas en un diseño de bloques completo al azar en parcelas de 3x3 m.

La fertilización base para todos los tratamientos en ambos sectores incluyó 196 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> y 105 kg  $K_2O$  ha<sup>-1</sup>, aplicados al momento de la siembra como una mezcla de fertilizantes (4-28-15), en ambas temporadas. El tratamiento control no recibió fertilización nitrogenada, mientras que los sectores de fertilización convencional y precisión recibieron 28 kg/ha<sup>-1</sup> al momento de la siembra, y una fertilización nitrogenada total que varió según el tratamiento, distribuida durante el período inicial de desarrollo del cultivo, según sector de fertilidad.

La lixiviación de N fue evaluada con cápsulas cerámicas. En cada parcela se instalaron tres cápsulas, con nueve cápsulas porosas por tratamiento (n=54), distribuidas aleatoriamente. Las cápsulas fueron instaladas previas a la siembra del cultivo en ambas temporadas en los sectores de alta y baja fertilidad, respectivamente, con un ángulo de 30° con respecto al eje vertical y a 100 cm de profundidad.

Los muestreos de las cápsulas se realizaron una vez iniciado el drenaje a 100 cm de profundidad (fecha estimada de acuerdo a la información obtenida desde las estaciones meteorológicas), cada  $\pm 100$  mm de drenaje y hasta que no hubo más lixiviado. En cada muestreo a las cápsulas se les aplicó un vacío de 0,7 bar con una bomba de vacío manual, dejándola herméticamente cerrada por un período mínimo de tres horas. Posteriormente la muestra de lixiviado fue colectada y congelada a  $-10$  °C hasta la determinación de N, previo a lo cual se descongeló a temperatura ambiente.

La cantidad total de  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{N-NH}_4^+$  lixiviados se calculó de acuerdo a la regla trapezoidal propuesta por Lord y Shepherd (1993). El volumen total drenado en el período de drenaje se calculó sumando los parciales de cada fecha de muestreo. La concentración media de  $\text{N-NO}_3^-$  y  $\text{N-NH}_4^+$  en el agua lixiviada durante el período de drenaje se obtuvo dividiendo la pérdida total de éstos por el volumen total de agua drenada.

$\text{NO}_3^-$ ?

Para el año 2008 se utilizaron datos de precipitación colectados en la Estación Meteorológica de Valdivia. Para evaporación se utilizó información de evaporación de bandeja de INIA-Remehue, Osorno, ya que no se pudo obtener información diaria del área de Valdivia; estudios realizados por CNR/CIREN han mostrado similitud en los valores de evaporación mensuales y anuales de Valdivia y Osorno.

Para determinar la evapotranspiración potencial se utilizó el coeficiente de cultivo (Penman, 1948); se calculó el drenaje como la diferencia entre la precipitación y precipitación potencial.

Los análisis de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{N-NH}_4^+$  se realizaron en el laboratorio central de INIA utilizando un autoanalizador (Skalar SA1050) de acuerdo a metodologías estándar establecidas por Kamphake *et al.* (1967), Ananth y Moraghan (1987) y Searle (1984).

- **Otras evaluaciones.** Durante ambas temporadas se evaluaron los siguientes parámetros: número de plantas por metro lineal, número de macollos por planta, rendimiento (grano, paja y capotillo), peso de 1.000 granos, concentración de N en el cultivo (grano, capotillo más paja), aporte de N del suelo (estimado como la extracción de N del cultivo en las parcelas control) y balances de N de suelo.

Para determinar el balance de N del suelo se consideraron varios aspectos: un aporte de N en lluvia de  $5 \text{ kg/ha}^{-1}$ , más el ingreso en fertilizante y mineralización de N del suelo (estimado a través de la extracción del cultivo) y las salidas como: extracción de N del cultivo en grano y en paja más capotillo, y pérdidas por lixiviación

- **Análisis estadístico.** La comparación entre tratamientos para cada parámetro indicado se realizó a través de un ANDEVA y análisis de diferencia de medias. Se utilizó Genstat 7.0 como software estadístico.

## Rendimiento

Para evaluar los rendimientos de cada cultivo, en las tres áreas de estudio se instalaron monitores de rendimiento conectados a GPS en la maquinaria de cosecha de los agricultores. Esto permitió obtener la distribución espacial de los rendimientos en cada zona homogénea, tanto bajo el manejo tradicional realizado por el agricultor (año 1), como con AP (durante todo el desarrollo del proyecto).

Los mapas obtenidos en cada cosecha de la distribución espacial de los rendimientos por zonas, permitieron realizar un análisis temporal para determinar zonas de rendimientos altos, medios y bajos en las áreas de estudio.

## Calidad de grano

La calidad panadera del trigo depende, en mayor medida, de la composición y cantidad de las proteínas del endosperma, que es el primer parámetro determinado genéticamente y que puede ser fácilmente seleccionado por mecanismos de mejoramiento genético; el segundo parámetro está altamente influido por el ambiente, y puede ser modificado por prácticas de manejo, especialmente en lo referente a la fertilización nitrogenada.

A continuación se describen los parámetros de calidad analizados en el proyecto.

- **Determinación del contenido de proteína y del valor de dureza del grano.** El análisis de calidad utilizado corresponde al valor de dureza del grano NIR (Near Infrared) y del contenido de proteína NIR (%). Este análisis se realiza mediante el equipo NIR, como método de determinación indirecta de los parámetros de calidad.
- **Determinación del contenido de gluten index, gluten húmedo y gluten seco.** Estas pruebas se basaron en la metodología señalada por la American Association of Cereal Chemists AACC 38-12, mediante la cual se obtienen los contenidos de gluten básicamente por eliminación del almidón.
- **Determinación del peso hectolítrico (kg/hl).** Es una medida de densidad, que se define como el peso por unidad de volumen bajo condiciones estándares de llenado.
- **Alveógrafo.** Permite obtener información relativa a las propiedades mecánicas de la masa mediante los índices: altura máxima de la curva o resistencia al estiramiento (P), longitud de la curva o extensibilidad de la masa (L) y área debajo de la curva (W).

## 2.2 Resultados

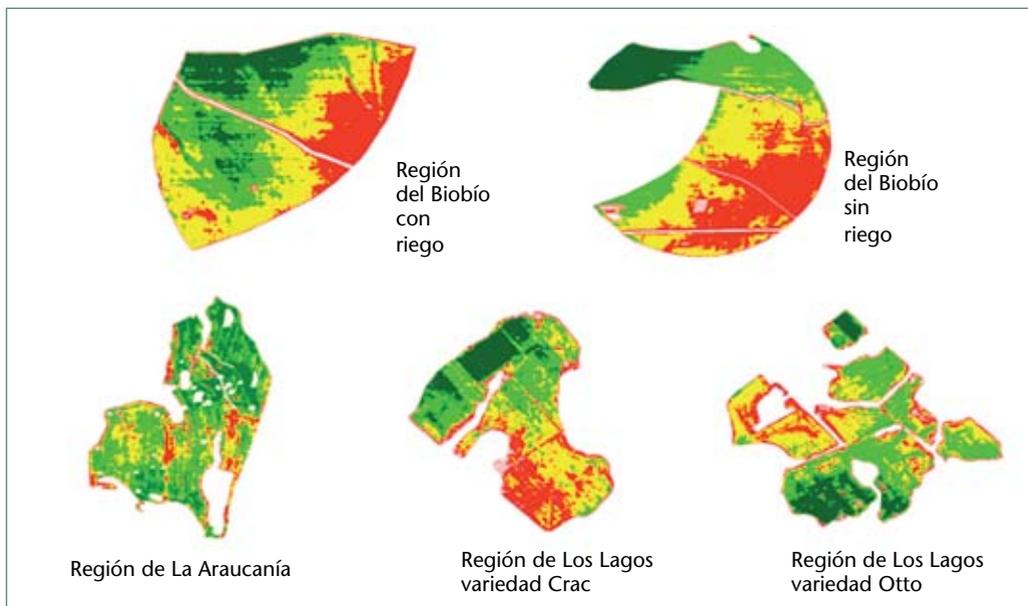
---

A continuación se indican los resultados más relevantes obtenidos en el proyecto, según los objetivos planteados.

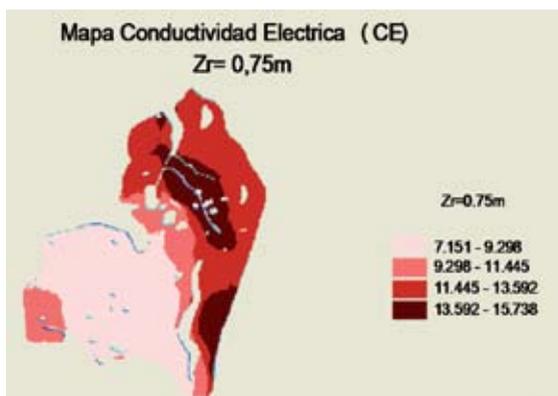
**Objetivo 1:** Introducir y adaptar a las condiciones del manejo del cultivo los equipos y principios de la agricultura de precisión para un manejo diferencial de la fertilización, identificando zonas de alto y bajo potencial productivo, que derive en una metodología replicable, para optimizar el rendimiento del trigo harinero.

- **Índice de vigor vegetativo (NDVI).** Mostró una importante variabilidad producto de la variación del estado de crecimiento del cultivo en los distintos sectores de cada potrero. Con ello se desarrolló la base metodológica para los muestreos de suelo, planta, rendimiento y calidad.

El vigor vegetativo de las zonas se representan en cuatro categorías, en orden ascendente (de menor a mayor vigor), por los colores rojo, amarillo, verde claro y verde oscuro. En función de estos planos se realizó la zonificación para el muestreo del cultivo y suelos.



- **Humedad del suelo en el cultivo.** La medición de humedad se realizó mediante el método gravimétrico; los resultados mostraron una concordancia con el tipo de suelo y su capacidad de retención de humedad.
- **Conductividad electromagnética (CE) de suelos.** Según la escala de colores se observó una importante variabilidad espacial de la CE en los suelos analizados.



**Objetivo 2:** Analizar parámetros de calidad del grano en el cultivo del trigo harinero, con el fin de determinar su heterogeneidad en la producción actual y evaluar la mejor forma de homogenizar estos parámetros utilizando la tecnología de AP aplicada a la fertilización.

- **Rendimiento.** Para el mismo potrero de cultivo se mostraron grandes diferencias de rendimiento, lo cual implica rentabilidades distintas entre sectores que fueron manejados con costos similares. En este contexto, a fin de obtener un aumento de retorno a productor, se requiere optimizar el manejo del cultivo, ya sea aumentando los rendimientos en zonas que no hayan alcanzado su potencial y/o estableciendo fertilizaciones diferenciales, mediante la aplicación de la tecnología de AP.
- **Desarrollo del cultivo.** No existió interacción entre los tratamientos de fertilización y sector de fertilidad, ni de la fertilidad de los sectores sobre el desarrollo del trigo ( $P > 0,05$ ), lo que indica que para el estado vegetativo del cultivo, la diferenciación de la fertilización nitrogenada entre sectores de baja y alta fertilidad no tuvo un efecto significativo en el desarrollo del trigo.
- **Producción de paja y capotillo del cultivo.** La producción de paja más capotillo no varió significativamente entre los tratamientos de agricultura convencional y de precisión durante ambas temporadas de estudio.

- **Extracción de nitrógeno por el cultivo.** Ésta correspondió directamente al rendimiento de grano y de paja, dado que las concentraciones de este nutriente no variaron sustancialmente entre tratamientos.
- **Balances de suelo de nitrógeno.** Los balances de suelo fueron negativos sólo en el tratamiento control, debido a que en este no se aplicó N. El balance negativo indica que en estos sectores, aún considerando el aporte de N del suelo, el cultivo de trigo no es viable en el tiempo.

No se observó un efecto del tratamiento de AP sobre el balance de N del suelo, a excepción del sector de baja fertilidad durante el año 2008/09, lo que sugiere que en estos sectores la fertilidad debiera ajustarse con mayor exactitud respecto del potencial productivo del cultivo. Los resultados obtenidos en ambas temporadas sugieren que la adición de N fue excesiva en todos los casos.

- **Calidad.** Se analizó la calidad del grano para cada localidad, considerando la variedad de cada zona y el rendimiento obtenido; se observó el comportamiento del cultivo en términos generales para cada variable asociada a calidad, y se confirmó la aptitud molinera y panadera de las variedades en estudio. En el Anexo 1 se describen los procesos de medición de calidad y sus unidades y en el Cuadro 4 se resumen los resultados por variedad y localidad.
  - **Pandora-INIA:** trigo panadero, clasificado de acuerdo a la Norma Chilena 1237 de 2000<sup>7</sup> como un trigo fuerte y de panificación directa, sin necesidad de adicionar mezclas para mejorar su extensibilidad y elasticidad, tal como lo muestran los resultados de gluten húmedo y alveograma (más de 32,2% de gluten húmedo, sobre 200 valor de W) y con excelente peso del hectolitro (85,65 kg/hl).
  - **Kumpa-INIA:** trigo de alto nivel productivo, buen peso del hectolitro (83,4 kg) y un nivel de gluten húmedo superior a 25%, clasificándolo como trigo casi intermedio con valores W del alveógrafo que oscilaron entre 92 y 193, con una media de 149,2. En este trigo se observan amplias variaciones en el contenido de gluten húmedo, proteína y valor W, situación que podría indicar heterogeneidad del suelo en cuanto a fertilidad, humedad y profundidad. La curva del alveógrafo lo muestra como trigo de masa tenaz y poco extensible (P/L =2,88).
  - **Otto-BAER:** es el trigo que más se siembra en la Región de Los Lagos, más por su adaptación a suelos ácidos que por su nivel productivo. Es de muy buena adaptación en general, presenta un peso/hl relativamente bajo (78,15 kg); su calidad se asemeja a un trigo de tipo intermedio, con gluten húmedo fluctuante (24,2 a 36,9) y muestra una fuerte variación del valor W (172 a 259), lo que incide en su real clasificación, entre un trigo fuerte y uno intermedio. Las razones pueden relacionarse con el suelo y condición de drenaje.
  - **Crac-BAER:** es un trigo galletero según los resultados de calidad: el peso del hectolitro es aceptable (80,37), su nivel de gluten húmedo lo ubica en un rango de trigo suave (24,9) y presenta un valor W muy variable, aunque no supera los 143.

CUADRO 4. **Calidad de las variedades por localidad**

Localidad	Variedad	Peso hectolitro (kg/hl)	Gluten húmedo (%)	Gluten seco (%)	Gluten index (%)	Proteínas (%) (N x 5,7)	Dureza	W x 10,4 julios	P (n/m)	L (n/m)	P/L
Yungay	Pandora-INIA	85,65	32,26	11,07	86,3	9,5	16,94	200,32	80,99	104,02	0,82
Vilcún	Kumpa-INIA	83,44	25,17	8,26	84,58	8,63	18,22	149,17	96,26	38,4	2,88
Valdivia	Crac-BAER	80,37	24,92	8,67	85,96	10,24	0	142,99	48,98	116,95	0,42
Máfil	Otto-BAER	78,15	32,6	11	76,98	10,58	16,61	202,29	75,99	110,87	0,76

<sup>7</sup> INN. 2000. Trigo harinero- Requisitos. 16 p. NCh 1237. Of 2000. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

En general, todos los trigos presentaron bajos valores de dureza, lo que significa que son de textura dura; los contenidos de proteína son acordes a los observados para la zona sur y sus niveles productivos.

- **Variabilidad y calidad del grano.** Junto con las diferencias del estado de crecimiento de las plantas y el estatus del N del cultivo, derivadas de la variabilidad de las características edafoclimáticas de los campos de estudio, se observaron diferencias en los rendimientos y parámetros de calidad del grano. En todos los casos se establecieron diferencias en las variables asociadas a la calidad panadera del grano: proteína, gluten húmedo y volumen de sedimentación.

**Objetivo 3:** Evaluar el impacto ambiental de la innovación *versus* el manejo tradicional de la fertilización, mediante el análisis de la concentración de nitratos en las aguas subterráneas.

- **Resultados del ensayo de lixiviación, Máfil.** No se observaron diferencias significativas en las pérdidas de nitratos por lixiviación entre los tratamientos de los sectores de alto y bajo vigor ( $P > 0,05$ ). Las pérdidas de amonio estuvieron por debajo del límite de detección del equipo.

Las pérdidas de N acumuladas en el año 2008 fueron bajas en todos los tratamientos; variaron entre 23,1 y 27,7, y 39,0 y 49,1 kg N ha<sup>-1</sup> para la condición de bajo y alto vigor.

Las pérdidas promedio de nitrato no superaron los 6 mg/l<sup>-1</sup>, por debajo del límite máximo permitido para el agua de consumo humano (10 mg/l<sup>-1</sup>), de acuerdo a la norma chilena.

**Objetivo 4:** Difundir la nueva metodología introducida al sector triguero mediante seminarios, boletines, días de campo, e-learning y sitio Web; capacitar a productores en el uso de los principios y equipos de la AP.

- **Difusión.** Mediante el proyecto se generaron distintas instancias de extensión de la tecnología de AP aplicada, como días de campo, charlas a los agricultores y creación del sitio Web “Agricultura de Precisión en Trigo” (<<http://progapiniatrigo.jimdo.com>>), entre otras, las cuales suscitaron el interés del medio y se cumplió con la meta de realizar extensión de la tecnología en términos de sus aplicaciones y potencialidades.

## 2.3 Conclusiones

Con la información recopilada y analizada se determinó que, aunque los factores que influyen en las variables rendimiento y calidad del cultivo de trigo son diversos, se pueden definir y manejar mediante la incorporación de tecnologías asociadas a la agricultura de precisión.

Por otra parte, se evaluó y aplicó la AP con relación a la optimización del rendimiento y la calidad del trigo, en particular referido a la comprobación de la variabilidad espacial de estas variables, cuya estructura espacial (diferenciación de zonas) determina la posibilidad de hacer un manejo diferenciado. En términos productivos, se determinaron zonas con comportamiento diferencial en el crecimiento del cultivo, condiciones propicias para un manejo diferenciado mediante el uso de maquinarias.

Los tratamientos de agricultura convencional y de precisión lograron rendimientos similares de trigo y paja más capotillo. Las diferencias estadísticas se lograron solamente en comparación a los tratamientos control.

La extracción de N en grano siguió el mismo patrón observado para los rendimientos, dado que la concentración de N en el grano no varió sustancialmente entre los tratamientos de fertilización.

No se observaron diferencias significativas en las pérdidas de nitratos por lixiviación entre los tratamientos de los sectores de alto y bajo vigor ( $P > 0,05$ ). Las pérdidas de amonio estuvieron por debajo del límite de detección del equipo.

Las pérdidas de N acumuladas en el año 2008 fueron bajas en todos los tratamientos; variaron entre 23,1 y 27,7, y 39,0 y 49,1 kg N ha<sup>-1</sup> para la condición de bajo y alto vigor.

Las pérdidas promedio de nitrato no superaron los 6 mg/l<sup>-1</sup>, por debajo del límite máximo permitido para el agua de consumo humano (10 mg/l<sup>-1</sup>), de acuerdo a la norma chilena.

En períodos de primavera seca, como la observada durante los dos años de estudio, las pérdidas de N por lixiviación fueron bajas.

No se observó un efecto significativo del tratamiento AP sobre el balance de N en el suelo.

En síntesis,

- el uso de AP en el cultivo de trigo en suelo trumao no produjo un incremento productivo, ni un aumento de la eficiencia del uso del N;
- el alto aporte de N del suelo, vía mineralización de la materia orgánica, pudo haber enmascarado el efecto de la fertilización nitrogenada aplicada artificialmente. Este aporte además influyó en la obtención de balances de suelo de N muy positivos en los tratamientos con aplicación de N;
- los resultados sugieren que la fertilización de N en este cultivo podría reducirse substancialmente.

### ► 3. Los productores e investigadores del proyecto hoy

---

Actualmente existe un gran interés por la agricultura de precisión por parte de los productores de trigo de la zona y también por productores de otros cultivos anuales, como cebada, y de frutales como olivos, viñas y arándanos.

De los agentes asociados al proyecto precursor, el productor, Sr. Gabriel Muñoz de Yungay, cuenta con maquinaria de fertilización diferenciada y la empresa Lobert S.A., Temuco, comercializa maquinaria especializada para la implementación de la AP.

Estos antecedentes dan cuenta del interés generado por la ejecución del proyecto precursor y también de que la AP está siendo incorporada en el cultivo de trigo como una herramienta de gestión productiva, destinada a optimizar la rentabilidad del cultivo y a disminuir los efectos contaminantes de la fertilización nitrogenada, entre otros efectos.

## SECCIÓN 3

# El valor del proyecto

Con la ejecución del proyecto precursor fue posible evaluar con éxito la aplicación de la AP respecto de la optimización del rendimiento y de la calidad del trigo y se comprobó su variabilidad espacial, donde la estructura y su correspondiente diferenciación por zonas determina la posibilidad de hacer un manejo diferenciado.

En términos productivos, se determinaron zonas con comportamiento diferencial en el crecimiento del cultivo, condiciones propicias para un manejo diferenciado mediante el uso de maquinaria. Los parámetros asociados a la calidad de grano en términos espaciales (zonificación según categorías de proteínas) se mostraron altamente variables, lo cual justifica la intervención del cultivo mediante AP, a fin de optimizar las cantidades de proteínas.

Se ha comprobado que el uso eficiente de los fertilizantes, mediante AP, conduce a una importante reducción de su carga sin comprometer el rendimiento y la calidad en el cultivo, lo cual disminuye el impacto de la fertilización nitrogenada convencional sobre los acuíferos.

El estudio realizado no tiene precedentes en Chile, por lo que la multiplicidad de temas abordados contribuye notablemente a sentar las bases para nuevas metodologías de trabajo, además del



acercamiento y entendimiento de los productores respecto la tecnología de AP y la aplicación técnica por parte de compañías de servicio del ámbito de la maquinaria y fertilización, entre otras. Los protocolos de medición resultan ser replicables en el uso de equipamientos que pueden ser arrendados a empresas de servicios, como es el caso de la fotografía multiespectral, rastra electromagnética, crop circle, fotografía satelital, monitores de rendimiento y calidad de grano, entre otros.

A través del proyecto se generaron distintas instancias de extensión de AP aplicada, de las tecnologías, sus aplicaciones y potencialidades, mediante la difusión en días de campo, charlas a los agricultores y sitio Web, entre otras. Todas suscitaron el interés del medio, con lo cual se logró incorporar el concepto y la técnica entre los productores de trigo de la zona.

# Anexos

---

Anexo 1. Calidades de trigo, proceso y unidades de medición

---

Anexo 2. Estudio de mercado y valoración económica

---

Anexo 3. Literatura consultada

---

Anexo 4. Documentación disponible y contactos

---

## ANEXO 1. **Calidades de trigo, procesos y unidades de medición**

---

**Humedad de grano:** previa molienda se seca el grano a 130 °C durante una hora, en estufa con circulación forzada de aire. Es importante su determinación porque el grano con más de 13,5 a 14,0% de humedad no puede ser almacenado en buenas condiciones, y además porque algunos análisis son expresados sobre una base de humedad constante para hacer comparables los resultados (por ejemplo: % de cenizas en base seca, % de proteína en base 13,5% de humedad).

**Peso hectolítrico:** es el parámetro que mejor conoce el productor agropecuario. Se define como el peso en kilogramos de un volumen de grano de 100 litros. Es muy útil porque resume en un solo valor qué tan sano es el grano; cuanto más sano sea (menor cantidad de impurezas, granos dañados o quebrados, picados, fusariosos o con presencia de cualquier enfermedad), mayor será la proporción de almidón en el grano y mejor será la separación del endospermo del resto del grano. Por lo tanto, cuanto más sano, mayor extracción de harina. A su vez, es una medida de la homogeneidad de la partida de trigo, factor clave en el proceso industrial. Por consiguiente, el peso hectolítrico es una buena estimación tanto de la calidad física del grano, como de la calidad molinera.

**Proteína de grano:** las proteínas son compuestos nitrogenados que, en contacto con agua, forman el gluten. Por ello, el contenido de proteína es una forma indirecta de estimar el contenido de gluten del grano, aunque no da indicación alguna sobre la calidad o comportamiento de ese gluten durante la panificación. En general, trigos de menos de 11% de proteína no son aconsejables para producir pan. La proteína se determina mediante diversos métodos, tanto de análisis húmedo (nitrógeno Kjeldhal x 5,70), como de espectrometría en infrarrojo (NIRS), y normalmente se expresa en %, base 13,5% de humedad.

**Gluten:** es el segundo parámetro en importancia en la compra de mercadería y aparece en muchos de los pedidos de calidad especial. Los rangos más habituales del porcentaje de gluten oscilan entre 24 y 28%, aunque existen extremos entre 20 y 30%; se determina mediante el equipo Glutomatic. El gluten aporta especialmente coherencia y aglutina las células de almidón; en la panificación retiene los gases que se desprenden durante la fermentación que produce la levadura. Es una sustancia gomosa de color blanco amarillento que se obtiene lavando la masa mediante una corriente de agua, donde quedan sólo las proteínas insolubles (gliadinas y gluteninas) para formar el gluten. El resultado se expresa en %. Se mide gluten húmedo (de 20 a 35 %) y el gluten seco (de 6 a 12 %) como valores más corrientes.

**Cenizas en harina:** se estima mediante la incineración de la muestra a 900 °C, hasta que toda la materia orgánica se quema y queda un remanente formado por los componentes minerales. Se calcula en % sobre grano base seca, y es un buen estimador de la eficacia del proceso de molienda. Un mayor % de cenizas, 220 indica una mayor contaminación de la harina con salvado, dado que el contenido en éste es mayor que el de la harina blanca.

**Índice de caída (falling number, FN):** estima la cantidad de enzima alfa amilasa activa contenida en la harina, la cual determina la capacidad de la masa para fermentar con el agregado de levadura. La actividad enzimática está influida por el porcentaje de granos brotados. El FN se informa en segundos de duración del test, y disminuye a medida que aumenta la proporción de granos brotados; un valor "normal" sería de 300 segundos. Harinas con excesiva actividad amilásica (FN inferiores a 200") no son deseables porque producen masas blandas, pegajosas y difíciles de trabajar. En el otro extremo, valores superiores a 400" indican una actividad excesivamente baja.

**Farinograma:** el farinógrafo mide las propiedades dinámicas de la masa a través de su resistencia al amasado mecánico en condiciones controladas. Del farinograma se extrae la siguiente información:

- % de absorción de agua: de la harina hasta alcanzar una determinada consistencia; depende de la cantidad y calidad de gluten y de la dureza de endospermo; se relaciona con la cantidad de pan a obtener/kg de harina;
- tiempo de desarrollo de la masa: minutos necesarios para alcanzar la máxima consistencia;
- tiempo de estabilidad o tolerancia al amasado: minutos durante los cuales la masa mantiene la máxima consistencia.

**Alveograma:** el alveógrafo es un instrumento que simula el comportamiento de la masa y su retención de gases durante la fermentación y da información sobre sus propiedades mecánicas; genera un gráfico, conocido como alveograma, el cual corresponde a un trazado curvilíneo. La superficie por debajo de la curva representa la “fuerza panadera” de la masa (W), la cual mide la extensibilidad/tenacidad de la masa y expresa el trabajo de deformación. Representa la cantidad y calidad del gluten presente. Es uno de los parámetros más importantes ya que permite clasificar a los trigos en duros, semiduros y blandos, de acuerdo a su aptitud de uso industrial. A mayor superficie por debajo de la curva, mayor será el W, y viceversa. Los trigos de gran fuerza (valores superiores a 280) son aptos para producir harinas especiales, adecuadas para panificados que soportan una gran carga de ingredientes. Por ejemplo: un pan dulce que pueda sostener una gran cantidad de frutas secas, almendras, pasas y otras. Los valores más corrientes de W oscilan entre 130 y 450. Las unidades de medición son unidades de fuerza (Joules  $\times 10^{-4}$ ).

El alveógrafo además, mide otros parámetros:

- P: tenacidad de la masa, indica la resistencia a ser estirada o deformada;
- L: extensibilidad de la masa, indica capacidad para permitir estiramiento;
- P/L: relación de equilibrio tenacidad/extensibilidad;

## ANEXO 2. Estudio de mercado y valoración económica

**CUADRO 1. Evolución de la superficie nacional y regional de trigo y cultivos anuales, 2000- 2009**

Superficie regional (ha)	TEMPORADA									% Superf. regional 2008/09
	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	
Coquimbo	1.970	2.570	3.830	3.500	3.560	2.460	2.300	2.400	3.763	1,34
Valparaíso	7.060	8.200	9.790	10.000	7.230	5.600	4.800	3.400	1.822	0,65
Metropolitana	7.850	7.930	7.920	8.000	7.700	6.090	5.200	4.500	7.526	2,68
O'Higgins	26.870	34.010	32.900	32.100	28.760	20.210	16.100	9.200	11.628	4,14
Maule	60.830	60.690	61.860	62.200	62.450	43.610	40.800	28.600	33.119	11,80
Biobío	111.600	113.330	108.250	114.100	115.200	90.070	83.500	83.100	84.519	30,12
La Araucanía	166.970	168.660	161.000	158.900	160.910	122.000	107.800	109.700	107.431	38,29
Los Ríos	-	-	-	-	-	-	-	16.540	16.741	5,97
Los Lagos	29.850	29.710	30.600	30.600	32.850	23.680	20.900	13.060	14.049	5,01
Total	413.000	425.100	416.150	419.400	418.660	313.720	281.400	270.500	280.598	100
Cultivos anuales	829.344	814.406	816.624	851.104	834.270	754.580	610.232	669.776	671.050	
% trigo en cultivos anuales	49,92	52,32	50,90	49,39	50,30	41,71	37,98	40,40	41,82	

Fuente: ODEPA [en línea].

**CUADRO 2. Evolución de la producción nacional y regional de trigo y cultivos anuales, 2000- 2009**

Producción regional (t)	TEMPORADA									% Prod. regional 2008/09
	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	
Coquimbo	7.960	7.848	16.141	14.000	15.059	7.774	7.360	9.144	14.299	1,25
Valparaíso	26.336	31.821	45.177	47.000	31.017	20.272	20.880	12.274	7.470	0,65
Metropolitana	38.041	45.039	43.000	43.040	42.581	25.091	21.840	23.940	39.060	3,41
O'Higgins	123.356	167.482	136.656	128.400	126.544	63.864	65.044	36.432	45.582	3,98
Maule	264.274	261.400	253.150	266.838	260.417	184.470	181.560	141.570	143.737	12,55
Biobío	471.001	431.516	436.297	505.463	475.776	391.805	388.275	360.654	309.340	27,01
La Araucanía	668.217	698.162	693.628	726.173	699.959	551.440	495.880	482.680	431.873	37,71
Los Ríos	177.813	173.960	169.875	187.578	197.429	155.814	138.358	94.609	79.352	6,93
Los Lagos	-	-	-	-	-	-	-	76.270	74.460	6,50
Total	1.776.997	1.817.227	1.793.925	1.918.492	1.848.780	1.400.529	1.319.197	1.237.573	1.145.172	100
Cultivos anuales	7.393.471	7.968.153	6.866.062	7.519.198	7.815.506	7.294.281	5.597.603	5.514.518	5.140.182	
% trigo en cultivos anuales	24,03	22,81	26,13	25,51	23,66	19,20	23,57	22,44	22,28	

Fuente: ODEPA [en línea].

**CUADRO 3. Evolución de los rendimientos regionales de trigo, 2000-2009**

Rendimiento regional (q/ha)	TEMPORADA									Promedio
	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	
Coquimbo	40,4	30,5	42,1	40,0	42,3	31,6	32,0	38,1	38,0	37,2
Valparaíso	37,3	38,8	46,1	47,0	42,9	36,2	43,5	36,1	41,0	41,0
Metropolitana	48,5	56,8	54,3	53,8	55,3	41,2	42,0	53,2	51,9	50,8
O'Higgins	45,9	49,2	41,5	40,0	44,0	31,6	40,4	39,6	39,2	41,3
Maule	43,4	43,1	40,9	42,9	41,7	42,3	44,5	49,5	43,4	43,5
Biobío	42,2	38,1	40,3	44,3	41,3	43,5	46,5	43,4	36,6	41,8
La Araucanía	40,0	41,4	43,1	45,7	43,5	45,2	46,0	44,0	40,2	43,2
Los Ríos	-	-	-	-	-	-	-	57,2	47,4	52,3
Los Lagos	59,6	58,6	58,4	61,3	60,1	65,8	66,2	58,4	53,0	60,1
Total	43	43	43	46	44	45	48	46	41	44,2

Fuente: ODEPA [en línea].

**CUADRO 4. Evolución de los precios de trigo (\$/t), 2000-2007**

Año	Promedio anual (\$/t)
2000	134.140
2001	133.375
2002	142.754
2003	154.517
2004	136.404
2005	121.535
2006	133.439
2007	164.323

Fuente: ODEPA [en línea].

**CUADRO 5. Costos de producción para el cultivo de trigo, sin agricultura de precisión (\$/ha)**

Labores	Unidad	Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)
Arado disco	ha	1	45.000	45.000
Rastraje	ha	1	25.000	25.000
Pulverizaciones	JH	0,8	9.000	7.200
Desinfección semillas	JH	0,25	9.000	2.250
Apoyo a la siembra	JH	0,3	9.000	2.700
Siembra y fertilización	ha	1	35.000	35.000
Aplicación nitrógeno (trompo)	ha	2	20.000	40.000
Aplicación herbicidas	ha	1	20.000	20.000
Aplicación pesticidas	ha	1	20.000	20.000
Cosecha, trilla automotriz	ha	1	70.000	70.000
Apoyo a la trilla	JH	0,2	9.000	1.800
Subtotal labores				268.950
<b>Insumos</b>				
Semilla	kg	200	300	60.000
Fertiyeso	kg	200	51	10.200
Sulfato de potasio	kg	100	687	68.700
Muriato de potasio	kg	100	490	49.000
Metasulfuron Metil (herbicida)	sobre	1	1043	1.043
Superfosfato triple	kg	200	267	53.400
Tebuconazole (fungicida desinfeccion semilla)	kg	0,1	20.000	2.000
Heptametiltrisiloxano (humectante)	kg	0,3	18.700	5.610
Lodosulfuron-metil-sodio	kg	0,3	152.000	45.600
Ciproconazole/trifloxistrobin /(fungicida)	l	0,8	48.400	38.720
Subtotal insumos				334.273
<b>TOTAL</b>				603.223

Fuente: ODEPA [en línea].

**CUADRO 6. Costos de producción para el cultivo de trigo, con agricultura de precisión (\$/ha)**

Labores	Unidad	Cantidad	Precio (\$)	Total (\$)
Arado disco	ha	1	45.000	45.000
Rastraje	ha	1	25.000	25.000
Pulverizaciones	JH	0,8	9.000	7.200
Desinfección semillas	JH	0,25	9.000	2.250
Apoyo a la siembra	JH	0,3	9.000	2.700
Siembra y fertilización	ha	1	35.000	35.000
Aplicación nitrógeno (trompo)	ha	2	20.000	40.000
Aplicación herbicidas	ha	1	20.000	20.000
Aplicación pesticidas	ha	1	20.000	20.000
Cosecha, trilla automotriz	ha	1	70.000	70.000
Apoyo a la trilla	JH	0,2	9.000	1.800
<b>Subtotal labores</b>				<b>268.950</b>
<b>Insumos</b>				
Semilla	kg	200	300	60.000
Fertiyeso	kg	200	51	10.200
Sulfato de potasio	kg	100	687	68.700
Muriato de potasio	kg	100	490	49.000
Metasulfuron Metil (herbicida)	sobre	1	1043	1.043
Superfosfato triple	kg	200	267	53.400
Tebuconazole (fungicida desinfeccion semilla )	kg	0,1	20.000	2.000
Heptametiltrisiloxano (humectante)	kg	0,3	18.700	5.610
Lodosulfuron-metil-sodio	kg	0,3	152.000	45.600
Ciproconazole/trifloxistrobin /(fungicida)	l	0,8	48.400	38.720
<b>Subtotal insumos</b>				<b>334.273</b>
<b>TOTAL</b>				<b>603.223</b>
<b>Implementación AP</b>				
Mapeo de suelos completo				0
Análisis de suelo				5.355.000
Viático alojamiento kilometraje				410.000
Mano de obra apoyo implementación				4.500
Seguimiento variabilidad y asesoría				1.200.000
<b>Subtotal implementación AP</b>				<b>6.969.500</b>

Fuente: elaborado con información de ODEPA [en línea] y cotizaciones de agricultura de precisión.

## ANEXO 3. **Literatura consultada**

- Ananth, S. & Moraghan, J.T. 1987. The effect of calcium and magnesium on soil nitrate determination by automated segmented-flow methods. *Soil Science Society of America Journal* 51: 664-667.
- Bongiovanni R. 2004. Rentabilidad de la Agricultura de Precisión. [En línea]. INTA, Agricultura de Precisión. Argentina. <<http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm>> [Consulta: agosto, 2010]
- COTRISA. 2010a. Informe comportamiento del mercado nacional e internacional de trigo, maíz y arroz. 12 pp. [En línea]. Comercializadora de Trigo S.A., COTRISA. Febrero. <[http://www.cotrisa.cl/mercado/informe/2010/informe\\_mer0210.pdf](http://www.cotrisa.cl/mercado/informe/2010/informe_mer0210.pdf)> [Consulta: agosto, 2010]
- COTRISA. 2010b. Informe comportamiento del mercado nacional e internacional de trigo, maíz y arroz. 16 pp. [En línea]. Comercializadora de Trigo S.A., COTRISA. Marzo. <[http://www.cotrisa.cl/mercado/informe/2010/informe\\_mer0310.pdf](http://www.cotrisa.cl/mercado/informe/2010/informe_mer0310.pdf)> [Consulta: agosto, 2010]
- Danty J. y Amunátegui, R. 2009. Mercado del trigo: buscando nuevos equilibrios. 15 pp. [En línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA. <<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/2195.pdf>> [Consulta: agosto, 2010]
- FIA. 2009. Tecnologías Aplicables en Agricultura de Precisión. Uso de precisión en evaluación, diagnóstico y solución de problemas productivos. Fundación para la Innovación Agraria, FIA. Serie FIA. Plataforma Silvoagropecuaria. Servicio de Información para la Innovación.
- FIA. 2008. Resultados y Lecciones en Agricultura de Precisión en Viñedos. 32 pp. [En línea]. Fundación para la Innovación Agraria, FIA. Serie Experiencias de Innovación para el Emprendimiento Agrario N° 6. <[http://aplicaciones.fia.cl/valorizacion/docs/13\\_6\\_Libro\\_AgriculturaPrecisión.pdf](http://aplicaciones.fia.cl/valorizacion/docs/13_6_Libro_AgriculturaPrecisión.pdf)> [Consulta: agosto, 2010]
- Kamphake, L.J., Hannah, S.A. & Cohen, J.M. 1967. Automated analysis for nitrate by hydrazine reduction. *Water Research Laboratory* 1967: 205-216.
- Lord, E.I. & Shepherd, M.A. 1993. Development in the use of porous ceramic cups for measuring nitrate leaching. *J. Soil Sc.* 44: 435-449.
- ODEPA. 2010. Costos de Trigo, temporada 2009-2010. Ficha técnica-económica. [En línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, ODEPA. <[http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/agrodatos/Fichas\\_Trigo\\_2009-2010.pdf](http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/agrodatos/Fichas_Trigo_2009-2010.pdf)> [Consulta: agosto, 2010]
- ODEPA. [En línea]. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). <<http://www.odepa.gob.cl>> [Consulta: agosto, 2010]
- Ortega R. 2001. Agricultura de Precisión. Usos y Potencialidades en Chile. [En línea]. Facultades de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Agronomía y Forestal UC 13:15-21. <[http://www-dev.puc.cl/agronomia/c\\_extension/Revista/Ediciones/13/tecnologia.pdf](http://www-dev.puc.cl/agronomia/c_extension/Revista/Ediciones/13/tecnologia.pdf)> [Consulta: agosto, 2010]
- Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. London. Proc. Ser. A.* 193: 120-146.
- Proietti, F. 2003. Evaluación económica financiera sobre la implementación de técnicas de agricultura de precisión. 70 pp. [En línea]. <<http://es.scribd.com/doc/53087314/Agricultura-Precision-Evaluacion-Economica>> [Consulta: agosto, 2010]
- Proietti F., Bragachini, M., Méndez, M., Scaramuzza, F. y Damen, D. 2007. Análisis de proyecto de evaluación de compra de una sembradora con sistema de dosificación variable y cálculo de punto de equilibrio. [En línea] <<http://www.engormix.com/MA-agricultura/articulos/analisis-proyecto-evaluacion-compra-t1496/p0.htm>> [Consulta: agosto, 2010]
- Searle, P.L. 1984. The Berthelot or Indophenol reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. *Analyst* 109: 549-568.

Además se utilizó información de los siguientes sitios Web [consulta: agosto, 2010]:

- <[www.ODEPA.gob.cl](http://www.ODEPA.gob.cl)>
- <<http://www.rlc.fao.org/>>
- <[www.aduana.cl](http://www.aduana.cl)>

## ANEXO 4. **Documentación disponible y contactos**

---

El presente libro y su ficha correspondiente se encuentran disponibles como PDF, a texto completo, en el sitio Web de FIA ([www.fia.gob.cl](http://www.fia.gob.cl)), accediendo a “Información para la innovación” y luego a “Experiencias de Innovación” o a “Biblioteca Digital”, donde existe un buscador de publicaciones.

Contacto: [fia@fia.cl](mailto:fia@fia.cl)