

# CAPÍTULO 5

## Trigo: fertilización y rotaciones

*Silvina Inés Golik*

### Fertilización en trigo

La producción de biomasa, el rendimiento y la calidad del trigo dependerán de la disponibilidad de nutrientes y por ende del conocimiento de su dinámica de acumulación, de sus requerimientos y de sus funciones en la determinación del rendimiento y sus componentes (Maddonni *et al.*, 2004). Dichos requerimientos varían a lo largo del ciclo del trigo debido a cambios en el patrón de absorción de nutrientes, que depende de la tasa de crecimiento del cultivo. El manejo de los nutrientes dependerá en gran parte de su movilidad en el suelo. Cuando se manejan nutrientes que tienen mayor movilidad, como el N y el S, la cantidad de fertilizante a aplicar está directamente relacionado con el rendimiento objetivo, en cambio para los nutrientes de baja movilidad, como el P y K la estrategia estará centrada en aumentar el nivel del mismo en el suelo para sostener determinado nivel de producción (Salvagiotti, 2004).

En la Tabla 5.1 se presentan los **requerimientos** nutricionales del cultivo de trigo y la extracción en grano. Estos valores deben considerarse promedios, debido a que la concentración de nutrientes en planta y grano es variable según las condiciones de producción, el rendimiento objetivo y la disponibilidad del nutriente en el suelo (Castellarín, 2009; Divito *et al.*, 2017). El índice de cosecha (extraído/absorbido) de los macronutrientes nitrógeno (N) y fósforo (P) es elevado, respecto al de los otros nutrientes.

**Tabla 5.1. Requerimiento, índice de cosecha y extracción por tonelada de grano en trigo**

TRIGO	Necesidad Kg/ t de grano	Índice de cosecha	Extracción Kg/ t de grano
Nitrógeno (N)	30	0,66	19,8
Fosforo (P)	5	0,75	3,8
Azufre (S)	4,7	0,25	1,2
Potasio (K)	19	0,17	3,2
Calcio (Ca)	3	0,14	0,4
Magnesio (Mg)	3	0,5	1,5

*Adaptado de García F. & Berardo A. 2006.*

Además de los requerimientos totales, es necesario conocer la **dinámica de absorción** durante todo el ciclo del cultivo. En trigo, como en los demás cereales, una vez finalizadas las primeras etapas (donde la tasa de crecimiento es baja) de instalación del cultivo y la expansión de las primeras hojas, los ritmos de crecimiento (área foliar) y desarrollo se incrementan marcadamente. Con ello se incrementa también la acumulación de nutrientes y una gran proporción del requerimiento total es absorbido en un lapso relativamente breve del ciclo del cultivo, que se concentra en el período de prefloración. En trigo, igual que otros cultivos, existe un adelantamiento de la absorción de los nutrientes respecto a la acumulación de materia seca. Mientras que hasta antesis acumula cerca del 40-45% de la biomasa aérea total, la acumulación hasta dicho momento de N es de 70-80% (Fig. 5.1), de P un 75-85% y de S alrededor del 50-60%, del total acumulado de cada uno de ellos a madurez (Divito *et al.*, 2017). El cultivo puede tolerar deficiencias nutricionales tempranas sin que se afecte el rendimiento, siempre que éstas se reviertan antes del período crítico. Cada nutriente cumple funciones específicas en el metabolismo de las plantas, así N, P y S son constituyentes esenciales de moléculas orgánicas, el K es osmoregulador y al igual que el Mg, es activador enzimático. El Ca desarrolla funciones estructurales como estabilizador de membranas celulares y los micronutrientes son constituyentes esenciales de varias enzimas (Divito *et al.*, 2017).

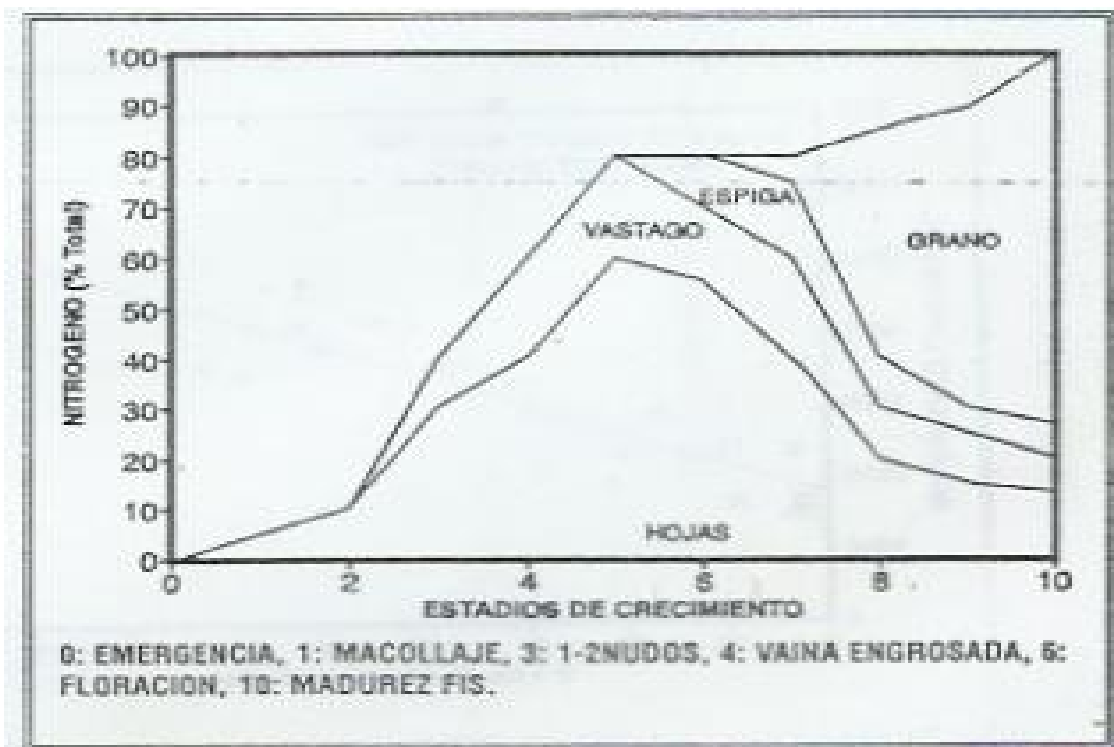


Fig.5.1. Acumulación de N durante el ciclo del trigo. Fuente de Waldren & Floerday (1979).

## Efectos sobre el crecimiento

La disponibilidad de nutrientes, especialmente de N y P provoca cambios tanto en la fuente de fotoasimilados (área foliar del cultivo, IAF), como en sus destinos (granos). La deficiencia de

estos nutrientes altera la dinámica de expansión del área foliar verde, afectando por lo tanto la fracción de radiación interceptada por el cultivo, disminuyendo por ende la eficiencia de interceptación y su duración (senescencia). En el trigo, una deficiencia de N y P afecta el IAF, modificando sus componentes: el número de hojas por planta a través de una modificación en la generación y supervivencia de macollos (el número de hojas por vástago está regulado por el genotipo, por lo tanto, no se ve modificado por una deficiencia). En otros cultivos como la soja, la deficiencia de dichos nutrientes modifica el número de ramificaciones. También puede afectar la expansión de las hojas individuales principalmente en cultivos que no macollan ni se ramifican, como son el maíz y el girasol. La disponibilidad de nutrientes, además de modificar el IAF, puede provocar cambios en el coeficiente de extinción lumínico (k), modificando el ángulo de inserción de las hojas y su reflectancia (Dreccer *et al.*, 2004). Respecto a la senescencia, que, en los cultivos anuales, ocurre generalmente luego de la floración, se ve incrementada por la deficiencia de N, puesto que en esta etapa la resíntesis de proteínas para mantener las hojas verdes compite con la removilización del N hacia los granos que se constituyen el principal destino. Además, en esta etapa del ciclo del cultivo muy frecuentemente la disponibilidad de N en el suelo se encuentra limitada en condiciones de campo. La menor disponibilidad de N y P también afecta la eficiencia de uso o de conversión de la radiación en fotoasimilados para la planta, a través de una menor tasa fotosintética (Fig. 5.2).

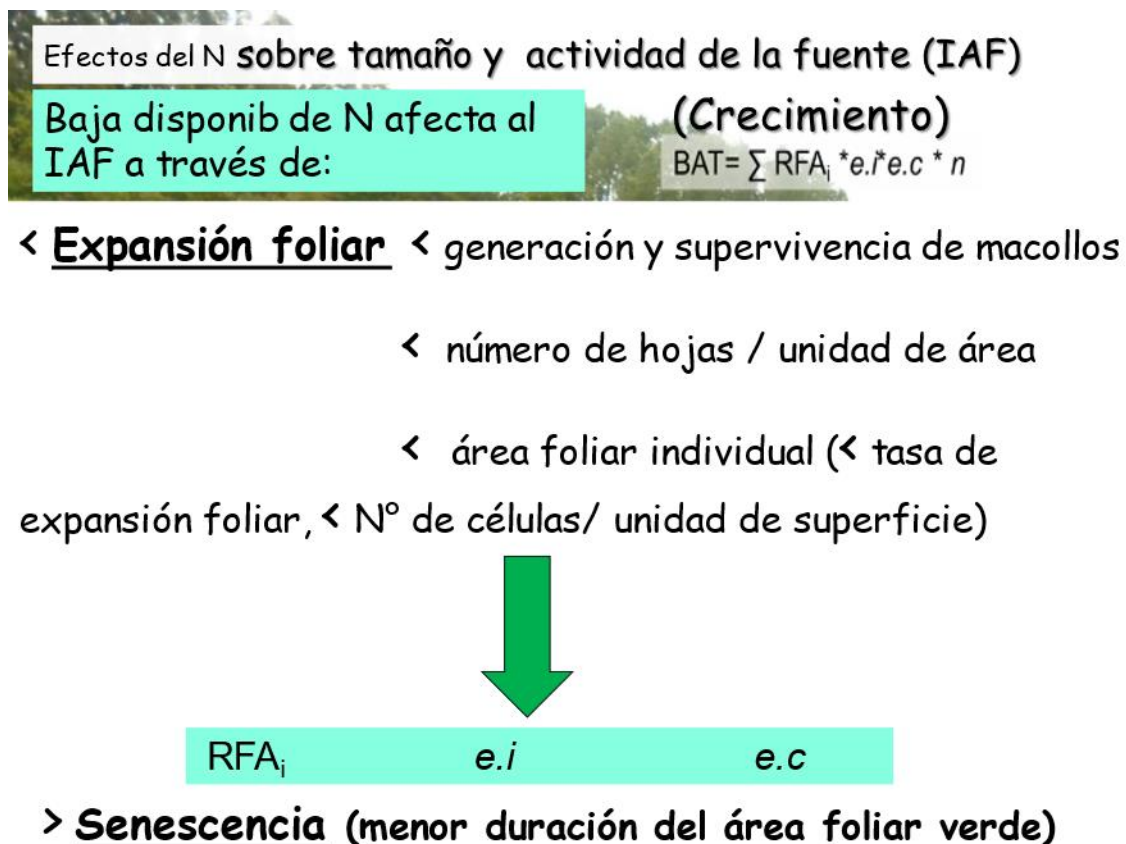


Fig.5.2. Efecto del déficit de N sobre el crecimiento del cultivo.

## Efectos sobre el rendimiento y sus componentes

La relación entre la disponibilidad de nutrientes y el rendimiento es de tipo pendiente-plateau, es decir que llega un momento en la cual la absorción de N no provoca aumentos del rendimiento. En general se considera que el número final de granos queda definido durante la etapa crítica del cultivo (un mes alrededor de floración). Durante esta etapa existe una competencia importante por los fotoasimilados entre los órganos cosechables y los órganos vegetativos (tallos). En este período no solo la tasa de crecimiento del cultivo es importante en la definición del número de granos sino también la disponibilidad de N lo es a través de su regulación en la tasa de crecimiento del cultivo, a través de los efectos que ya vimos sobre la interceptación y eficiencia de uso de la radiación. Un aumento en la disponibilidad de N y P favorece el macollaje y la fertilidad de los macollos y por ende del número de espigas.m<sup>-2</sup>. Dentro de cada espiga, el número potencial de flores y su fertilidad responden también a la disponibilidad de nutrientes. En el peso de los granos, aunque la disponibilidad de nutrientes presenta menor respuesta, su efecto se da a través de su influencia sobre la producción de fotoasimilados (tasa y duración), modificando el número de células endospermáticas y el número de gránulos de almidón (Andrade *et al.*, 1996).

## Efectos sobre la calidad

El porcentaje de proteínas del grano de trigo es el parámetro más utilizado comercialmente para definir su calidad panadera ya que determina el contenido de proteínas y gluten en la harina, componentes que le confieren las características viscoelásticas necesarias para su procesamiento. Normalmente entre un 70-80% del N disponible es absorbido antes de floración, por lo tanto, las proteínas de los granos se forman en su mayor parte utilizando N que se removiliza desde el tallo y las hojas hacia los granos como del proveniente de la absorción remanente (20% aproximadamente) (Fig. 5.3). La relación entre el rendimiento y el contenido de proteína en grano depende de la disponibilidad de N. En situaciones de baja disponibilidad de N, el rendimiento del cultivo se incrementa con el agregado de este nutriente, mientras que los niveles de proteína en grano no se modifican o disminuyen (Región 1 de la Fig. 5.3); en situaciones de disponibilidad media, el agregado de N genera aumentos tanto de los rendimientos como de los porcentajes de proteína (Región 2, de la Fig. 5.3); y frente a una alta disponibilidad de N la fertilización con este nutriente provoca solamente un efecto sobre la concentración de proteína en grano (Región 3, de la Fig. 5.3) (Stone & Savin, 1999).

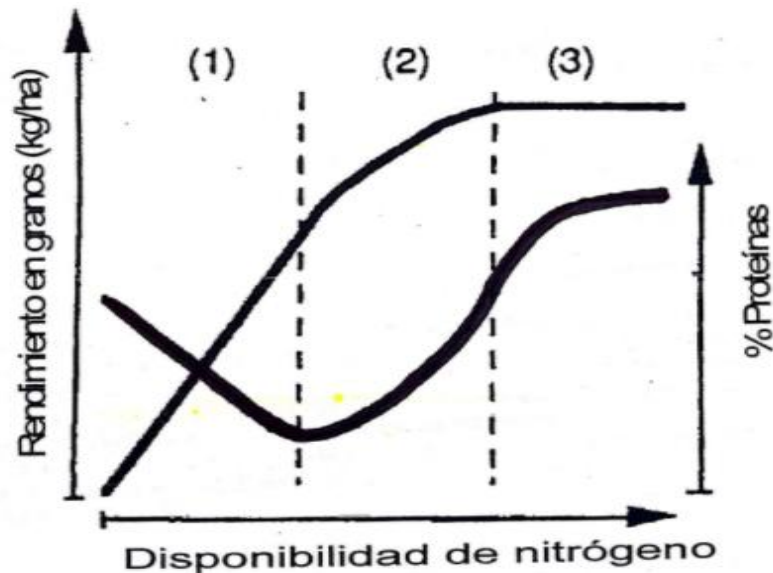


Fig.5.3. Relación entre la disponibilidad de N, el rendimiento y la concentración de proteína en grano. Adaptado de Stone & Savin (1999).

Es decir, bajo estas últimas condiciones de alta disponibilidad de N, pueden obtenerse rendimientos y porcentajes de proteínas altos. Esta situación se presenta cuando la fertilización se encuentra en dosis de los rangos del denominado consumo de lujo, que suele ser antieconómica para la relación insumo/producto en nuestro país. Fertilizaciones menores suelen aumentar el rendimiento a través de la generación de mayor cantidad de destinos de fotoasimilados (flores que se convertirán en granos) relacionados con incrementos en el número de macollos (espigas.m<sup>-2</sup>) y/o de flores por espiga, lo que suele generar efectos de dilución en el contenido de proteínas de los granos.

Para la región 1 del gráfico, es interesante destacar que al incrementarse más que proporcionalmente la acumulación de almidón en los granos con respecto a la de proteína, los valores relativos de proteína (%) bajan en respuesta a mayores disponibilidades de nitrógeno. En ese sentido, una disminución del porcentaje de proteína suele provocar cambios desfavorables en algunas propiedades reológicas de las masas (por ejemplo, fuerza de la masa, W de alveograma). Es interesante destacar que las acumulaciones de proteínas en los granos por la aplicación de fertilizantes nitrogenados están más vinculadas con la formación de gliadinas que de gluteninas. Por lo tanto, en la Región 2 de la Fig.5.3, si bien dosis altas de nitrógeno o fertilizaciones tardías suelen generar aumentos en los porcentajes de proteína, en esos casos se generarían mayores relaciones gliadinas/gluteninas, y por lo tanto menores relaciones P/L del alveograma (masas más extensibles), de toda manera, estos cambios no suelen ser negativos, debido a que conllevan a aumentos en la fuerza de las masas (W). Las aplicaciones tardías de nitrógeno son consideradas una herramienta para incrementar el porcentaje de proteínas en los granos. Normalmente las fertilizaciones en estados avanzados del ciclo de cultivo, luego de la determinación del número de destinos (flores que se convertirán en granos) no poseen efectos en los rendimientos, y son utilizadas únicamente para incrementar parámetros de calidad. Apli-

caciones tardías, en antesis, de fertilizante nitrogenado en forma de urea foliar poseen efectos positivos en los porcentajes de proteína y la fuerza de las masas.

## Nitrógeno

Las deficiencias de N se presentan con un amarillamiento y clorosis de las hojas. Se reduce el crecimiento y la elongación celular y la síntesis de proteínas. Cuando la deficiencia es severa se observa marchitamiento de las hojas inferiores y clorosis en toda la planta.

## Respuesta de los cultivos a la fertilización

La decisión de implementar una práctica agronómica tendiente a incrementar el rendimiento implica la necesidad de conocer si el adicional de rendimiento logrado supera en términos económicos lo invertido en dicha práctica. La respuesta de un cultivo a la aplicación de un nutriente mediante la fertilización involucra tanto la absorción como su utilización para la producción de materia seca. La falta de respuesta a la fertilización puede estar relacionada a problemas en la absorción del nutriente como por ejemplo fallas en la aplicación por el sitio, momento o forma, o en que luego de ser absorbido, no fue utilizado eficientemente por el cultivo en la producción de materia seca (por ejemplo, por deficiencias de otro recurso, ya sea agua u otro nutriente).

La **eficiencia agronómica** o de respuesta del cultivo a la fertilización, es decir el incremento de rendimiento o biomasa por unidad de nutriente agregado surge de multiplicar la eficiencia de **conversión o fisiológica** por la eficiencia de **absorción o recuperación** (Fig. 5.4). Representa para cada dosis la relación entre el incremento en la biomasa producida respecto al testigo y la dosis de nutriente aplicado y responde a la ley de los rendimientos decrecientes, lo que implica que la respuesta del cultivo disminuye a medida que el nutriente va dejando de ser limitante. La **eficiencia de conversión o fisiológica** surge de la relación entre el rendimiento y la absorción y es de tipo pendiente plateau, lo que implica que durante la pendiente existe respuesta a la absorción del nutriente. A medida que el elemento deja de ser limitante para la producción, la relación se aleja de la linealidad y finalmente, la relación se hace inexistente, alcanzado un plateau, que indica la ausencia de limitación por parte de dicho nutriente para la producción del cultivo. En este caso, sin otro factor nutricional o hídrico limitante, el cultivo habría alcanzado su rendimiento potencial para la región considerada. En trigo son frecuentes valores para esta relación de 30 a 35 kg grano. Kg N absorbido<sup>-1</sup>. Esta relación es en general independiente del tipo de fertilizante y del método de aplicación. Dependiendo de la disponibilidad de N y de la variedad. La inversa de esta relación se denomina coeficiente b y es utilizado en la ecuación de balance de N, para conocer la demanda del nutriente para el rendimiento esperado (Maddoni *et al.*, 2004).

La eficiencia de **absorción o recuperación** surge de la relación entre la absorción del nutriente y las dosis de fertilizante, resulta lineal para el rango en que dicho elemento es limitante para el crecimiento. El ajuste entre ambas variables a una función lineal permite obtener dos parámetros: la abscisa al origen y su pendiente. La abscisa indica la fertilidad intrínseca del lugar, puesto que representa la absorción del cultivo en ausencia de dosis aplicada. Este parámetro es dependiente del tipo de suelo y de todas las variables bióticas y abióticas que afectan en la dinámica del N como ser: mineralización, desnitrificación, volatilización, lixiviación, fijación biológica, bajas temperaturas, etc. El segundo parámetro, la pendiente, se define como eficiencia de absorción o de recuperación y está influenciada por los mismos parámetros que afectan a la disponibilidad del sitio. También se encuentra afectada por el tipo de fertilizante empleado y la forma de aplicación (Maddonni *et al.*, 2004).

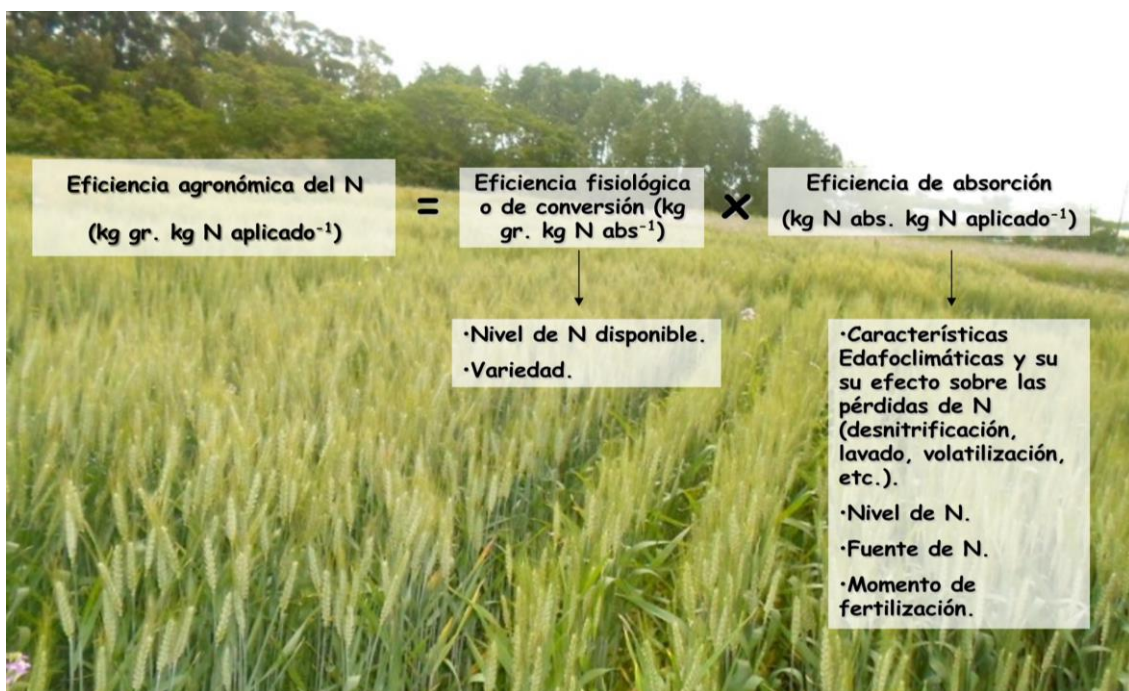


Fig.5.4. Eficiencia agronómica y sus componentes.

## Diagnóstico de la fertilización nitrogenada (indicadores)

Las diferentes alternativas para diagnosticar las deficiencias nutricionales en trigo hacen uso de indicadores que deben reflejar el estado nutricional lo más preciso posible, ser fáciles de realizar, repetibles, fáciles de manipular, rápidos y lo menos costosos posible. Existen dos tipos de indicadores. El primero utiliza resultados de experimentos individuales para determinar una dosis de N económicamente óptima (Fig. 5.5a) y el segundo emplea experimentos diseñados para cuantificar la respuesta del cultivo, varios experimentos se reúnen luego de la conversión de los valores absolutos en valores relativos con el máximo obtenido y esto da como resultado

un valor crítico del indicador que provee un umbral por debajo del cual resulta efectivo el agregado de fertilizante (Fig.5.5b).

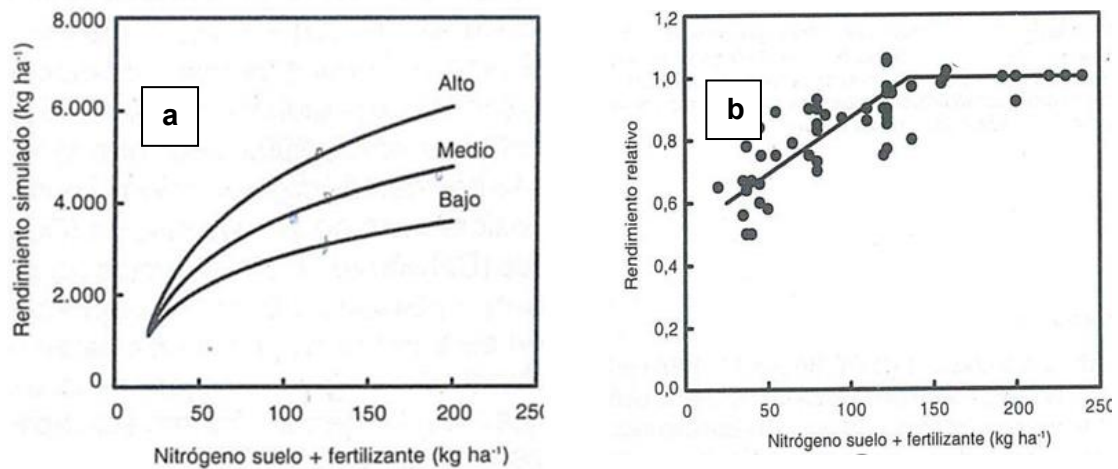


Fig.5.5. Curvas de respuesta (a) y Modelos de rendimiento relativo (b).  
Adaptado de Maddonni *et al.* (2004)

## Indicadores de suelo

### Disponibilidad de N en el suelo en presiembra

Esta metodología es utilizada frecuentemente para caracterizar cada sitio y realizar recomendaciones de fertilización (Calviño *et al.*, 2002; Maddonni *et al.*, 2004; Salvagiotti *et al.*, 2004) (Fig. 5.6). Teniendo en cuenta la producción esperada para cada región en particular, la metodología consiste en complementar el contenido de N en el suelo en presiembra hasta los 60 cm con fertilizante para satisfacer ese rendimiento. La cantidad de N a aplicar para alcanzar la máxima producción de granos que el sitio admite se expresa de la siguiente manera:  $UC = N_{\text{inic}} + N_{\text{fert}}$ , siendo UC el umbral crítico de N disponible a la siembra ( $N - NO_3$  a la siembra +  $N_{\text{fert}}$  que permite maximizar el rendimiento),  $N_{\text{inic}}$  es la cantidad de N determinado en el suelo a 60 cm de profundidad y  $N_{\text{fert}}$  es la cantidad de fertilizante a aplicar. Los umbrales críticos de disponibilidad de N a la siembra dependen de la zona y del nivel de rendimiento esperado o posible. Es así que actualmente dichos UC varían entre 70 – 175 kg N.ha<sup>-1</sup> según las condiciones edafoclimáticas, el rendimiento objetivo y el sistema de manejo.

Entre las limitaciones que presenta este indicador se pueden citar: condiciones climáticas que afecten la mineralización y nitrificación del N de la materia orgánica o del fertilizante, suelos mal estructurados con alto riesgo de lixiviación, desnitrificación o inmovilización pueden afectar la disponibilidad de nitratos del suelo (Maddonni *et al.*, 2004; Castellarín, 2009). Se ha encontrado que la relación del N mineral (N del suelo + N fertilizante) y el rendimiento de trigo resulta significativa pero variable según condición hídrica (Álvarez *et al.*, 2006). Los trabajos de experimentación realizados establecen que la disponibilidad de N a la siembra debe ser de 175 kg.ha<sup>-1</sup> para lograr rendimientos de 6000 kg.ha<sup>-1</sup> en el sudeste de Buenos Aires (García, 2007), de 100-120 kg.ha<sup>-1</sup> para lograr rendimientos de 3500 – 4000 kg.ha<sup>-1</sup> en el sur de Santa Fe (Gar-



cía *et al.*, 2006), de 100 – 140 kg. ha<sup>-1</sup> en el norte de Buenos Aires (Satorre, 2005), de 70 kg. ha<sup>-1</sup> en el centro- sur de Santa Fe, de 90 kg. ha<sup>-1</sup> en el oeste de Buenos Aires.

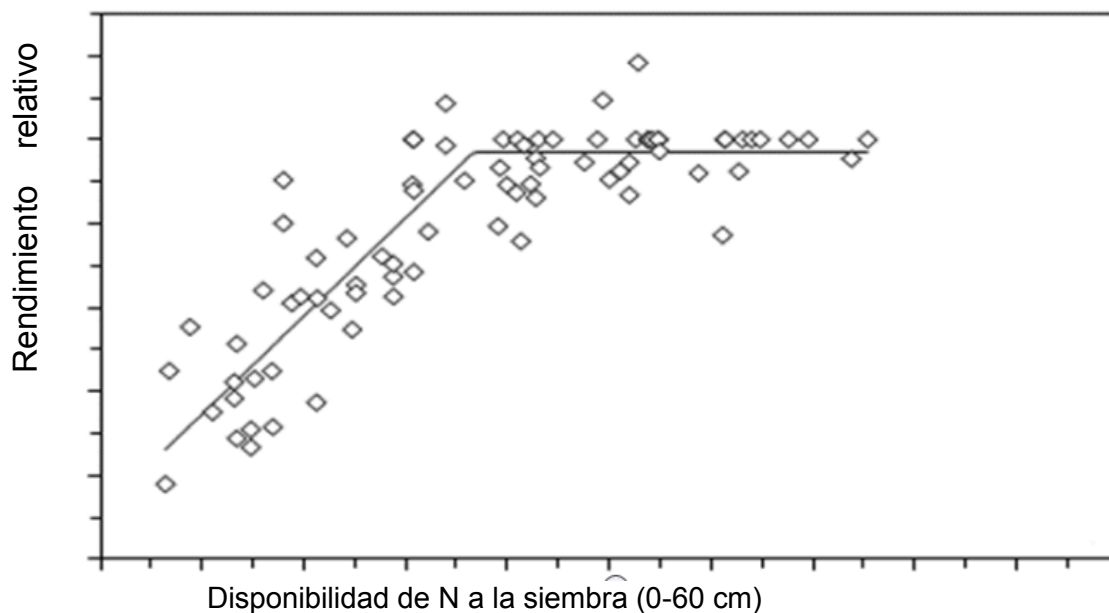


Fig. 5.6. Relación entre el nitrógeno disponible a la siembra en los primeros 60 cm (N-NO<sub>3</sub> + N fertilizante) y el rendimiento relativo en trigo.

Adaptado e Maddonni *et al.* (2004)

### Indicadores de planta o cultivo

Los análisis de planta entera o de órganos de la planta también son utilizados como indicadores del estado nutricional del cultivo e integra los efectos de suelo y de los factores ambientales sobre la nutrición nitrogenada.

### Concentración de nitratos en la base del tallo

Este análisis de nitratos en pseudo tallos de trigo, resulta útil en trigo durante el periodo de macollaje y se puede realizar sobre base seca (BS) en muestras secas y molidas o bien determinar el contenido de nitratos en el jugo de la base de los tallos (JBT) obtenido por prensado del material fresco (Castellarín, 2009), mediante un instrumental denominado Nitracheck (Fig.5.7), por colorimetría. La concentración de nitratos se reduce a medida que avanza el ciclo del cultivo, independientemente de la disponibilidad de N. Los órganos de la planta también difieren en la concentración de nitratos, siendo mayor en los tallos que en las hojas. Se determinó que con esta metodología era posible predecir las necesidades de N y diferenciar efectos de barbechos y rotaciones sobre el cultivo de trigo (Vigliezzi *et al.*, 1996). Si bien se ha determinado que en macollaje se obtienen los valores más representativos en trigo, al ser un estadio amplio, presenta variaciones. Así, Strada *et al.* (2000) y Vigliezzi *et al.* (1996), citan valores cerca del ápice de 4,47, 1,88 y 1,25 N- NO<sub>3</sub> kg<sup>-1</sup> para obtener un rendimiento superior al 94% del rinde máximo, para los estadios de doble lomo, primordio de gluma visible y espiguilla terminal, respectivamente. Por otro lado, el JBT no refleja el flujo instantáneo de absorción de nitrato, sino la integración del flujo de absorción de nitrato de las raíces

a la parte aérea durante los días previos a la medición. Esta determinación resulta afectada por el estado hídrico del cultivo, por lo cual se debe cumplir con un cierto protocolo para su determinación. Presenta la desventaja de ser un método destructivo y la ventaja que, al poder utilizarse en estadios tempranos del cultivo, permite en caso de ser necesario, mejorar el estado nutricional del mismo con el agregado N.



Fig.5.7. Nitrachek, instrumental utilizado para medir nitratos en pseudo tallos de trigo.

Fuente propia

### Índices de verdor (Medidor de clorofila)

La concentración del nitrógeno de las hojas de las gramíneas se relaciona con su contenido de clorofila y ésta a su vez con la intensidad de color verde de las hojas o índice de verdor (IV) que puede ser determinada con medidores de clorofila como el Minolta SPAD 502<sup>®</sup> (Fig. 5.8) (Castellarín, 2009). Esta metodología presenta mayor exactitud en estados avanzados del cultivo, por lo que constituye una herramienta útil si se quiere mejorar el contenido de N para calidad (Andrián *et al.*, 2001; Bergh *et al.*, 2004) o bien para considerar la situación para la próxima campaña. Es adimensional, es un método rápido, no destructivo y fácil de utilizar, pero el IV resulta afectado por numerosos factores como ser: estado de crecimiento del cultivo, presencia de plagas y enfermedades, condiciones climáticas y el cultivar. Para relativizar algunas de estas limitantes se estima un índice de suficiencia de N (ISN):

$$\text{ISN} = (\text{SPAD del lote a caracterizar} / \text{SPAD parcela sin deficiencias de N}) \times 100$$

Valores relativos de SPAD entre 0,92 – 0,95 con relación a las parcelas sin deficiencia es indicativo de suficiencia de N (Falótico *et al.*, 1999). Con este indicador no se puede predecir correctamente el exceso de N, ya que no todo el N es convertido en clorofila cuando la disponibilidad de este nutriente es elevada (Maddoni *et al.*, 2004; Castellarín, 2009). Se han realizado mediciones del IV en cultivos de trigo con diferentes sistemas de labranzas (siembra directa y convencional) y diferentes dosis de N. El ISN reveló las deficiencias más severas en las parcelas testigo sin aplicación de N, siendo más pronunciadas bajo siembra directa. La corrección se logró con 60 kg de N.ha<sup>-1</sup> en la labranza convencional y con 120 kg de N.ha<sup>-1</sup> en siembra directa para alcanzar valores de ISN de 0,90.



Fig.5.8. Medidor de clorofila Minolta SPAD 502.

Fuente propia.

Se observó que la diferencia para las distintas dosis de fertilización nutricionales se hizo más evidente en la medida que avanzaba el ciclo, principalmente en siembra directa (Falótico *et al.*, 1999).

### Curvas de dilución de N

Se denomina concentración crítica, a la concentración de N en la planta que permite alcanzar la tasa máxima de crecimiento del cultivo (TCC) (Fig. 5.9). Esta concentración tiende a disminuir a medida que la planta crece (mayor biomasa) debido a un fenómeno de dilución. Cuando estas concentraciones son menores a las críticas producen algún grado de estrés y por lo tanto TCC son inferiores a las máximas. Pero, a su vez, el efecto del estrés de N sobre el rendimiento no sólo depende de su intensidad sino también del momento en que éste ocurra (Uhart & Echeverría, 2002). Suele determinarse un índice de estrés, que resulta del cociente entre la concentración real y la crítica. Las curvas de dilución pueden llegar a ser específicas para una especie y/o grupo de especies y tener validez para diferentes ambientes.

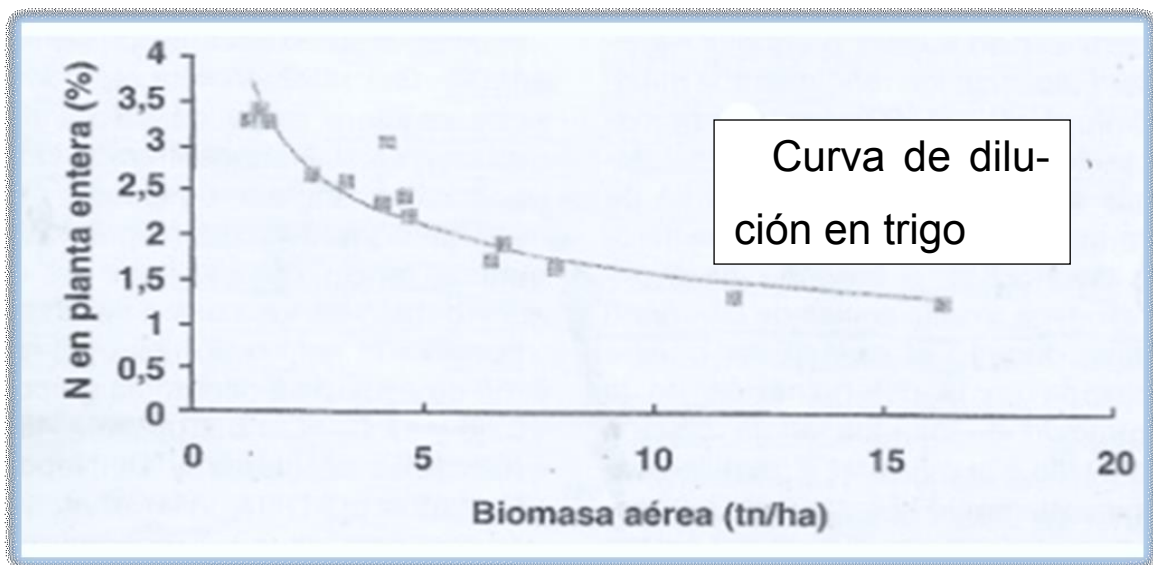


Fig.5.9. Modelo de Curva de dilución. Adaptada de Uhart & Andrade (1996).

### Sensores remotos

Los sensores remotos (Ejemplo en Fig.5.10), se utilizan para diferenciar áreas con deficiencias de N y permitir su aplicación de dosis variables y por lo tanto realizar un uso más eficiente de la fertilización. El principio en que se basa este indicador es que la luz roja es absorbida por la clorofila de las plantas y la luz del infra rojo cercano (NIR) es reflejada por las hojas. Una planta que crece bajo buenas condiciones nutricionales lo hace vigorosamente y presenta una baja reflectancia en la luz roja y una alta reflectancia en el infra rojo cercano, por lo tanto, muestra valores altos de NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada). Para el trigo se han encontrado buenas respuestas con este indicador cuando las mediciones se realizan a fin de macollaje, primer nudo, encontrándose relaciones significativas con el rendimiento. Con este indicador se realizan las mediciones de reflectancia del cultivo e indica dosis de aplicación variable de N en tiempo real. El manejo de sitios específicos de aplicación permite lograr mayores rendimientos que el manejo de dosis uniformes y, por lo tanto, a igual dosis de aplicación, mejora la eficiencia de uso del N aplicado. El NDVI, al igual que el IV, están afectados por varios factores como el cultivar, el estado de desarrollo, la incidencia de plagas, enfermedades etc. Por ello, es necesario establecer en el lote a monitorear áreas de referencia con suficiencia de N a fin de relativizar las mediciones según:

$$IR = \text{NDVI de la franja sin limitaciones} / \text{NDVI del lote a caracterizar}$$



Fig.5.10. Sensor GreenSeeker. Fuente propia

### Sistema Integrado de Recomendación y Diagnóstico (DRIS)

Con esta técnica se evalúa el estado nutricional foliar, confrontando la concentración de nutrientes de nuestro cultivo con aquellas obtenidas en cultivos de rendimiento máximo (Normas DRIS). Las relaciones de nutrientes se ordenan en expresiones llamadas Índices DRIS (Landriscini *et al.*, 2001). Los Índices DRIS negativos indican deficiencias, mientras que los positivos expresan excesos respecto al nutriente considerado. La principal ventaja de este método sobre otros métodos de análisis de planta es que permite realizar diagnósticos foliares independientemente de la edad, variedad y parte de la planta utilizada, aunque déficits hídricos pueden interferir significativamente sobre los resultados obtenidos (Summer, 2001).

## Recomendaciones de fertilización

### Curvas de eficiencia de respuesta al agregado de un nutriente

La concentración de un nutriente a una profundidad determinada (dependiendo del nutriente) a la siembra del cultivo, se utiliza como valor económico orientativo para predecir la eficiencia de respuesta a una dosis del fertilizante (Fig. 5.11). Por lo tanto, se considera que la fertilización sería económicamente factible siempre y cuando se obtenga una eficiencia de respuesta que supere la relación precio del cereal-precio del fertilizante. Para el caso del trigo se toma como base una relación histórica de 8:1, es decir 8 kg del cereal por kg de fertilizante aplicado (Maddoni *et al.*, 2004). Este tipo de curvas pueden verse modificadas por diversos factores, como ser el cultivo antecesor, puesto que la respuesta a la fertilización resulta diferente si el antecesor fue una leguminosa como la soja o una gramínea como un maíz; la disponibilidad hídrica, lográndose mayor respuesta cuanto mayor es la disponibilidad de agua; los años de agricultura, encontrándose mayor respuesta en suelos más empobrecidos provenientes de varios años de ciclos agrícolas; duración del barbecho y su capacidad para la descomposición de los rastrojos; sistema de labranza. En la actualidad, prácticamente todo el cultivo se realiza bajo siembra directa, que, al dejar los rastrojos en superficie, presenta descomposición más lenta de los mismos comparados con una labranza convencional, lo que implica una menor fertilidad actual y la necesidad de incrementar la dosis de fertilizante a aplicar.

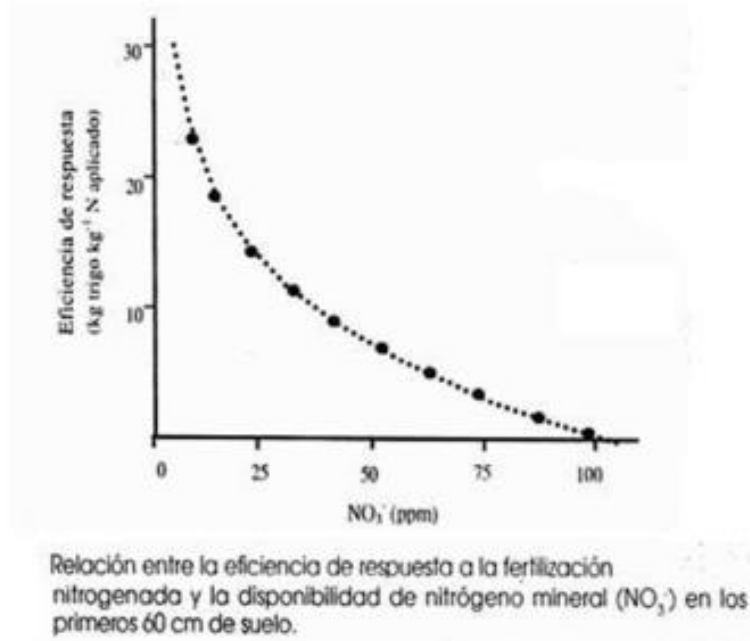


Fig.5.11. Curvas de eficiencia de respuesta al agregado de un nutriente.

Adaptado de Maddoni *et al.* (2004)

## Balance de nutrientes

### Balance de nitrógeno

Este método considera la oferta y la demanda en el sistema suelo-planta. La demanda está dada por el rendimiento objetivo para una zona determinada y el nitrógeno absorbido por toneladas de grano, conocido como coeficiente *b*. El valor de este coeficiente para el trigo es de aproximadamente 30 kg de N/t de grano, pero suele variar principalmente debido al contenido de proteína de los granos. Por el otro lado se considera la oferta de nitrógeno, dada por el N disponible a la siembra y N mineralizado durante el ciclo del cultivo y el N del fertilizante. La dinámica del N en el sistema suelo-planta incluye pérdidas de N disponible por lavado, volatilización y desnitrificación. La estimación de dichas pérdidas resulta difícil de cuantificar en forma práctica, por lo tanto, se considera una eficiencia para cada una de las fuentes de N utilizadas por el cultivo. Los valores de eficiencia para el N inicial y el proveniente de los fertilizantes se consideran similares y oscilan entre 0,4 y 0,6, mientras que la eficiencia de utilización del N mineralizado es mayor (0,7 a 0,8) (Meisinger, 1984). Las necesidades de fertilización **nitrogenada** se estiman a través del balance de N de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Yb = (N_i * E_i) + (N_{min} * E_{min}) + (N_f * E_f)$$

Donde:

Y: rendimiento esperado; *b*: nitrógeno requerido por tonelada de granos;  $N_i$  = N disponible a la siembra del cultivo (N-nitratos, N-NO<sub>3</sub>),  $E_i$  = Eficiencia de uso del N disponible a la siembra,  $N_{min}$  = N mineralizado durante el ciclo del cultivo,  $E_{min}$  = Eficiencia de uso del N mineralizado durante el ciclo del cultivo,  $N_f$  = N a aplicar como fertilizante,  $E_f$  = Eficiencia de uso del N del fertilizante.

Los aportes de N del suelo ( $N_i$  y  $N_{min}$ ) dependen principalmente de la materia orgánica, textura y estructura del suelo, de factores abióticos como la temperatura y las lluvias y cuestiones de manejo como tipo de labranzas, cantidad y calidad de los residuos del cultivo antecesor. El  $N_i$  puede ser estimado a través de un muestreo y análisis de los nitratos disponibles. El  $N_{min}$  es mucho más complejo de estimar. Dentro de las pérdidas, la volatilización del amoníaco se produce por la conversión del amonio a amoniaco (NH<sub>3</sub>) y resulta particularmente importante cuando se aplican fertilizantes amoniacales como la úrea, con PH elevado, baja capacidad buffer, alta actividad ureásica (muy importante bajo siembra directa), elevada temperatura y rangos de humedad específicos. La desnitrificación es un proceso que ocurre en anaerobiosis y consiste en la reducción de los nitratos a formas gaseosas, principalmente óxido nitroso y N<sub>2</sub> (Uhart, 2002). El  $N_{nic}$  se determina en presiembra, siembra o postsiembra temprana por métodos tradicionales de laboratorio. El  $N_{min}$  se estima en laboratorio o a partir del N absorbido por el cultivo en parcelas sin fertilizar. Salvagiotti *et al.* (2000) determinaron una amplia variación del  $N_{min}$  entre ciclos agrícolas en el área triguera del sur de Santa Fe, desde 11 hasta 157 kg.ha<sup>-1</sup> de N. En los últimos años se avanzó en el estudio de estimadores sencillos para este parámetro, siendo el N anaeróbico ( $N_{an}$ ) el que mejor resultado ha mostrado, permitiendo un mejor ajuste de las dosis de N a aplicar. El  $N_{an}$  corrige la sobrestimación de la dosis de N a

aplicar en ambientes de alto potencial (lotes que han tenido pasturas recientemente) o bien la subestimación de la misma en situaciones de bajo potencial de mineralización (lotes con prolongada historia agrícola) (Divito *et al.*, 2017).

Esta metodología presenta limitaciones debido a: variabilidad de los rendimientos objetivos, variabilidad del  $N_{\text{inic}}$ , las estimaciones del  $N_{\text{min}}$  y las eficiencias de uso de cada fracción y baja relación entre la cantidad de N en los residuos y el rendimiento de trigo, no obstante, es una de las más utilizadas por los productores.

### **Modelos de simulación**

Es una herramienta de gran utilidad en la predicción de respuestas y la evaluación del riesgo asociado a distintos manejos del cultivo, suelos y climas. Son capaces de simular con un paso diario el crecimiento y la absorción de nutrientes por el cultivo y el suministro de éstos por el suelo, permitiendo generar un diagnóstico más integral de las necesidades de N y definir el resultado económico de la fertilización (Doberman & Cassman, 2002). Dentro de sus limitaciones muchos no consideran a las plagas, enfermedades, malezas, adversidades climáticas como granizo. Requieren datos de entrada del clima (temperatura, radiación, lluvias), suelo (materia orgánica, perfil, granulometría), diarios; datos del cultivar para determinar los coeficientes genéticos y de las condiciones iniciales de agua y nitrógeno. Estos modelos deben ser calibrados y validados. En base a estos datos, se obtiene información de salida: como por ejemplo fenología, biomasa, rendimiento, componentes del rendimiento. Uno de los primeros modelos utilizados en el país, para el trigo fue el modelo CERES – WHEAT. Se observó una estrecha relación entre los valores relevados a campo y los simulados por dicho modelo en un amplio rango de condiciones ambientales. El modelo logra explicar el 94% de la variación de los rendimientos observados (Satorre *et al.*, 2001; Salvagiotti *et al.*, 2005). Actualmente existen muchos otros modelos de simulación como el Triguero y el Strin 2.0. Con ellos generalmente se obtienen dos tipos de gráficos. Uno de ellos representa la evolución de los rendimientos para tres condiciones del año a medida que se incrementa la dosis de N disponible (suelo + N fertilizante): la curva del centro indica la evolución media de los rendimientos (80 % de los casos), la curva superior explica el 20 % para los mejores casos y la curva inferior el 20 % para los peores casos. El otro tipo de gráficos indica la probabilidad acumulada de alcanzar un rendimiento dado.

### **Momento de aplicación**

Una de las principales causas que hace a las bajas eficiencias en el uso del N observadas a escala mundial radica en el hecho de que las prácticas de fertilización son realizadas sin tener en cuenta la sincronización entre la demanda del cultivo y la capacidad del suelo para suministrar el nutriente, utilizándose como práctica común la aplicación de fertilizantes en pre- siembra o siembra por razones operativas o de costos (Cassman *et al.*, 2002; Fageria & Baligar, 2005). Diversos estudios sostienen que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en plena estación de

crecimiento resulta en mayores eficiencias en el uso del N comparadas a las aplicaciones en pre-siembra-siembra (Raun *et al.*, 2001; Randall *et al.*, 2003). Estos autores coinciden en que el éxito de ello radica en el aplicar fertilizante en el momento de mayor demanda por parte del cultivo. Esto reduce las posibilidades de pérdida de N en cualquiera de sus formas. No obstante, diversos factores condicionan el momento de fertilización. En base a ello, en la mayor parte de las regiones trigueras, las precipitaciones durante estadios iniciales del cultivo determinan el momento de aplicación de N especialmente por dos motivos: ya sea porque la deficiencia hídrica limita la incorporación del nutriente al suelo o bien porque los excesos hídricos incrementan la probabilidad de que ocurran pérdidas, principalmente por lavado. La primera situación es muy frecuente en gran parte de la región triguera, especialmente hacia el oeste y norte, por lo que las aplicaciones a la siembra resultan en una eficiencia de uso del N igual o mayor que la de las aplicaciones al macollaje. Por el contrario, en el sudeste de Buenos Aires (subregión IV), las aplicaciones en macollaje presentan mayor eficiencia (Divito *et al.*, 2017). Las aplicaciones divididas son frecuentes cuando se usan dosis elevadas de N, para cultivos de altos rendimientos, con siembras tempranas. Si se quiere aumentar el rendimiento y mejorar el contenido de proteína en grano se deben realizar aplicaciones tempranas de base y complementar luego entre hoja bandera (EC39, Zadoks *et al.*, 1974) y post-floración (EC 60) (Divito *et al.*, 2017).

Para obtener altos rendimientos en trigo es necesario obtener un elevado número de macollos por unidad de superficie. Para asegurar la máxima formación de macollos, además de establecer una fecha correcta de implantación del cultivo, es importante un correcto suministro de nutrientes, sobre todo de nitrógeno (N). Así desde etapas tempranas del cultivo se inicia el establecimiento de subcomponentes que determinarán el componente principal de rendimiento como es el número final de granos por unidad de superficie (Slafer., 2003). Diversos autores indican que si la cantidad de macollos es baja hacia fines del macollaje (EC29), (menos de 1000 macollos. m<sup>-2</sup>, llegando algunos a fijar inclusive valores críticos de 550), aplicaciones de N en esta etapa, estimulan la formación de nuevos vástagos. Por lo tanto, considerar la densidad de macollos podría ser utilizada como un instrumento más para decidir una aplicación de N.

## Fuentes y forma de aplicación

Existen numerosas fuentes de fertilización nitrogenada (Tabla 5.2) y pueden dividirse en tres grupos: amoniacales (urea, amoníaco anhidro, sulfato de amonio); nítricos (nitrato de potasio) y nítrico-amoniacales (nitrato de amonio, nitrato de amonio calcáreo (CAN), urea-amonio-nitrato (UAN), sulfonitrato de amonio. Su eficiencia de su uso es similar cuando son incorporados. Pero, las aplicaciones superficiales de N pueden provocar pérdidas por volatilización de amoníaco principalmente cuando se utiliza urea o fuentes que contengan urea (Uhart, 2002). Las pérdidas por volatilización se incrementan con contenidos de humedad cercanos a capacidad de campo y temperaturas de 25 °C o superiores, bajo SD por la alta actividad ureásica de los residuos, pH neutro, suelos de bajo poder buffer; en estos casos se recomienda el empleo de fuentes como CAN o UAN. Aunque en la región triguera argentina, estas pérdidas no son muy



relevantes (<10% de lo aplicado) debido a las bajas temperaturas y, según las zonas, la falta de humedad en el suelo. El principal mecanismo de pérdidas del nutriente durante el ciclo del cultivo es el lavado de nitrato, ante el cual las distintas fuentes se comportan de manera similar (Divito et al., 2017).

**Tabla 5.2. Fuentes de fertilización nitrogenada**

Fuente de N	Fórmula qca	N %
Amoníaco anhidro	NH <sub>3</sub>	82
Nitrato de amonio	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	33,5
Sulfato de amonio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21
Fosfato diamónico	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	18-21
Fosfato monoamónico	NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	11
Nitrato de calcio	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	15
Nitrato de potasio	KNO <sub>3</sub>	13
Nitrato de sodio	NaNO <sub>3</sub>	16
Urea	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	46
Urea-Amonio-nitrato (UAN)	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	32

Es indispensable realizar un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de los cuatro “requisitos” (4Rs) básicos: la “fuente” correcta de nutrientes, en la “dosis” correcta, en el “momento” correcto, y en la “ubicación” correcta para cada caso en particular (Divito *et al.*, 2017).

## Fósforo

El P llega a las raíces por difusión, al igual que el potasio y es absorbido como ión ortofosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) o fosfato mono o diácido contra un gradiente electroquímico, por lo que la absorción es activa, con gasto de energía. No necesita ser reducido para su asimilación, integrándose rápidamente a compuestos orgánicos. La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en el suelo, pero también es afectada por diversos factores como ser la textura del suelo, la temperatura, el contenido de materia orgánica, el pH, la capacidad buffer (resistencia a cambiar la concentración de equilibrio del fósforo), tortuosidad de los poros (aumenta a partir de una densidad aparente mayor de 1,3 g.cm<sup>-3</sup>) y presión de oxígeno (Uhart, 2002); mientras que entre los factores del cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de rendimiento. El diagnóstico de la fertilización fosfatada se basa en el análisis de muestras de suelo del horizonte superficial (0-20 cm) en presiembra, utilizando un extractante

adaptado a los suelos del área en evaluación. En la región pampeana, en general, el extractante utilizado es Bray y Kurtz 1 (García, 2007).

La dosis recomendada dependerá del nivel de P Bray, del rendimiento esperado, de la relación de precios grano/fertilizante, y del criterio de recomendación del laboratorio y/o asesor. Existen dos criterios de recomendación: el de suficiencia y el de reconstrucción y mantenimiento. El criterio de suficiencia satisface los requerimientos del cultivo, mientras que el de reconstrucción y mantenimiento también incluye aportes adicionales para mejorar el nivel de P disponible en el suelo (Uhart & Etcheverría, 2002). En general se considera que valores por debajo de 5 mg kg<sup>-1</sup> son muy bajos, entre 5 – 10 mg kg<sup>-1</sup> son bajos, entre 10–20 mg.kg<sup>-1</sup> medios y superiores a 20–25 mg.kg<sup>-1</sup> pueden considerarse adecuados (Quintero, 2003) (Tabla 5.3).

Entre las fuentes de P, los fosfatos diamónico y monoamónico tienen la ventaja sobre el superfosfato triple de presentar N-amonio en su composición, lo que mejoraría el efecto arrancador del fertilizante. No obstante, estas diferencias entre fuentes fosfatadas no suelen ser representativas a campo (Ventimiglia *et al.*, 2001).

**Tabla 5.3. Recomendación de fertilización fosfatada para trigo según nivel de P Bray del suelo y el rendimiento esperado del cultivo**

Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Concentración de P disponible en el suelo (ppm)						
	<5	5 – 7	7 – 9	9 – 11	11 – 13	13 – 16	16 – 20
	Kg de P ha <sup>-1</sup>						
2000	20	15	13	11	9	7	0
3000	23	19	17	15	13	11	0
4000	27	22	21	18	17	14	10
5000	31	26	24	22	20	18	14
6000	38	33	31	29	28	26	21

Fuente: Echeverría & García, 1998

Un aspecto a tener en cuenta es que en suelos con bajo nivel de fósforo disponible o con dosis bajas de fertilización en labranza convencional, la aplicación en banda cerca de la semilla resulta la más eficiente, pues en caso contrario el poder de retención o de fijación de P que tienen los suelos, hará que no quede disponible para las plantas (Uhart, 2002, Maddonni., 2004; García, 2007).

También son posibles los análisis de planta de P. Que son utilizados para monitorear el estado nutricional del cultivo durante su crecimiento y así efectuar los cambios en la planificación de la fertilización de los siguientes cultivos. Resultados experimentales en la región pampeana han mostrado que con concentraciones de P en hoja bandera a floración de 0,26–0,30% se obtuvieron rendimientos de trigo de 4.500 a 5.000 kg.ha<sup>-1</sup> (García & Berardo, 2006).

## Azufre

Es un nutriente móvil en el suelo y la planta lo absorbe como ión sulfato. Es provisto en forma natural por la materia orgánica del suelo. Posee una dinámica de acumulación similar a la del N, pero a diferencia de aquel, el S no es removilizado desde las estructuras vegetativas, y, por lo tanto, todo el S del grano proviene exclusivamente de la absorción durante el período de llenado. Las mayores respuestas a su aplicación se obtienen en ambientes con prolongada historia agrícola, con alta frecuencia de la soja en la rotación, en suelos de textura gruesa, arenosos, con bajos contenidos de materia orgánica, alto grado de erosión, compactaciones subsuperficiales, bajo siembra directa y con elevados rendimientos acumulados (Cordone & Martínez, 2000; Ferraris *et al.* 2002).

Las deficiencias de S se determinan por análisis de S – SO<sub>4</sub> en presiembra, en los primeros 20 cm de profundidad, con umbrales críticos que varían entre 5– 2 mg.kg<sup>-1</sup> según autores. En la zona sur de Santa Fe los resultados de la Red de nutrición de los CREA indicaron un posible umbral crítico de 10 mg.kg<sup>-1</sup> (García *et al.*, 2006). Otra forma de analizar la respuesta al agregado de azufre que se está analizando es a través de la relación Nan/MO, donde el Nan es el N anaeróbico, ya que la mineralización del el N y el S suelen depender de los mismos factores. Esta relación nos estaría dando una idea de la materia orgánica joven, por lo tanto, cuanto más baja es la relación tendríamos más MO recalcitrante y por lo tanto mayor probabilidad de respuesta al agregado del fertilizante azufrado (lo mismo vale para el agregado de N) (Ferraris, 2021). Como ejemplo un sitio con valor de esa relación de 17,6 nos daría mayor respuesta al agregado de fertilizante que otro donde dicha relación sea de 22,5.

Aunque algunos autores consideran que las respuestas a la fertilización azufrada presentan gran variabilidad, según distintas experiencias, las dosis recomendadas de aplicación oscilan entre 10 y 20 kg. ha<sup>-1</sup>. Sus aplicaciones pueden realizarse en bandas o al voleo, ya que tiene buena movilidad en el suelo. Es frecuente su aplicación en mezclas con fertilizantes fosfatados a la siembra o en mezclas líquidas o sólidas con N a la siembra o en macollaje temprano (García, 2007).

## Potasio

Es un elemento poco móvil en el suelo y llega a las raíces por difusión. Se acumula en el cultivo alcanzando en floración hasta un 85% del total que tendrá a cosecha, con elevadas tasas de absorción durante los 15 a 20 días previos a la floración, pero su índice de cosecha es bajo, 20 a 25%. El K es un nutriente móvil en la planta, por lo que los síntomas de deficiencia aparecen en las hojas basales. En madurez, las plantas tienden a volcar, debido a que los tallos son débiles y más sensibles a enfermedades. Este efecto es agravado cuando se aplican altas dosis de fertilizantes nitrogenados.

Tal como ocurre con el fósforo, las cantidades de potasio a aplicar varían en función del potasio intercambiable en el suelo y de la estrategia a seguir: reposición (se agrega lo que se exporta) o de reconstrucción y mantenimiento (se eleva la dosis) (Uhart, 2002).

Para este elemento se han determinado umbrales de respuesta a la fertilización ubicados entre 100 y 120 ppm, cuando la capacidad de intercambio catiónico en el suelo es de 10 a 15 meq/100 gramos. La aplicación de cloruro de potasio en trigo en condiciones no limitantes de N, P y S ha mostrado con frecuencia aumentos significativos en la producción de granos en la región pampeana. Dado que los suelos de esta región no presentan falta de potasio, las respuestas se atribuyen principalmente al cloro (García, 2007). El agregado de potasio en suelos con niveles medios o altos de este nutriente y valores medios a bajo de magnesio y calcio pueden deprimir la oferta de estos dos últimos nutrientes, debido a la interacción negativa existente entre ellos.

## Cloro

El trigo presenta un requerimiento específico de cloro que supera en mucho a los niveles de un micronutriente, encontrándose en el suelo como cloruro y constituyendo un nutriente similar al N por su movilidad. Entre las principales funciones del Cl se encuentran: participación en la fotosíntesis, actividad enzimática y la regulación de procesos osmóticos (Fixen, 1993). El cloro se absorbe como cloruro (Cl<sup>-</sup>) compitiendo con bromuro, nitrato y sulfato. Interactúa con el nitrógeno (N) (inhibición de nitrificación y competencia con nitratos), el fósforo y el manganeso (Castellarin, 2009).

Los efectos del Cl en el desarrollo de trigo varían con el estado de crecimiento. Con fertilizaciones con cloro se ha observado una formación más temprana de la espiguilla terminal y de la antesis, sin modificar la fecha a madurez fisiológica y, por ende, alargando el periodo de llenado de granos. Los mayores pesos de grano registrados con fertilización clorada se han relacionado, entonces, con una duración más prolongada del periodo de llenado, aunque también se han observado incrementos en la tasa de llenado de los granos (Fixen, 1993).

Las deficiencias de este nutriente se dan con mayor probabilidad en suelos arenosos y con buen drenaje, sin embargo, Castellarín *et al.* (2008), en experimentos realizados en el sur de Santa Fe sobre suelos franco-limoarcillosos, obtuvieron una respuesta promedio al agregado de KCl de 450 kg ha<sup>-1</sup>, lo que resultó en incrementos de hasta un 17% de los rendimientos comparado con los testigos sin agregado de KCl. Los casos de máxima respuesta se asociaron con aplicaciones de altas dosis de KCl (100 -150 kg.ha<sup>-1</sup>).

## Zinc

El Zinc es un micronutriente esencial para las plantas, constituyente de las paredes y las membranas celulares, participa en la activación de enzimas, en síntesis de carbohidratos y proteínas, y tiene un rol clave en la tolerancia de las plantas al estrés y en el crecimiento repro-

ductivo (Bianchini, 2021). También es fundamental para las personas, ya que interviene en el crecimiento, en el desarrollo del cerebro, en el funcionamiento del sistema inmunológico, en la digestión y otras actividades esenciales del organismo (Mesquida, 2021).

Diversos trabajos realizados por la Asociación Civil Fertilizar desde 2016, demostraron que nuestros suelos presentaban una seria deficiencia de zinc, siendo el micronutriente más deteriorado y que la aplicación de este nutriente lograba un efecto importante en los rendimientos de los cultivos, especialmente en las gramíneas. La respuesta en el maíz fue de aproximadamente 600 kilos por hectárea (Bassi, 2021). Se estableció como nivel crítico por debajo del cual el zinc es deficiente en 1,2 ppm. En la actualidad existen diversos fertilizantes para corregir esa deficiencia, líquidos para el tratamiento de las semillas y otros que se agregan al fertilizante nitrogenado.

## **Bioestimulantes y fertilizantes biológicos (inoculantes)**

Actualmente en la Argentina más del 13% de los fertilizantes usados son fertilizantes especiales que contienen bioestimulantes y más del 50% contienen fertilizantes biológicos (inoculantes). Ambos grupos estimulan el crecimiento. Los bioestimulantes son compuestos químicos, moléculas (no hay un ser vivo en su constitución), cuyo origen puede venir de un proceso biológico o compuestos análogos a los naturales. Se aplican en pequeñas cantidades y requieren que las células vegetales tengan receptores para ellos. Las plantas los identifican como algo propio y desencadenan respuestas, procesos en células, tejidos u otros órganos de las mismas. Como ejemplos de ellos tenemos: hormonas vegetales como giberelinas, auxinas; extractos de algas; extractos orgánicos como ácidos húmicos o fúlvicos; moléculas microbianas activas producidas por bacterias, hongos o levaduras; aminoácidos (proteínas vegetales o animales hidrolizadas) (Diaz Zorita, 2021).

Los fertilizantes biológicos o inoculantes son productos que contienen microorganismos vivos que son aplicados en las semillas o en el surco de siembra, necesitan proliferar, crecer, tener actividad en la zona de la rizosfera y cuyo objetivo directo es contribuir a la fijación biológica de N por ejemplo *Bradyrhizobium* ssp o bien actuar como promotores del crecimiento de la planta, de las raíces, con lo cual mejoran la eficiencia en el uso de los recursos por parte del cultivo, por ejemplo *Pseudomonas* ssp, *Azospirillum* ssp (Diaz Zorita, 2021).

## **Rotaciones, cultivos de cobertura y compost**

Los sistemas productivos en la Argentina vienen registrando cambios hacia una agricultura continua, con un desplazamiento de la frontera agrícola hacia zonas tradicionalmente mixtas o ganaderas (Cruzate & Casas, 2009). Este proceso de agriculturización actual tiene como principal actor, en el país, al cultivo de la soja (Pengue, 2001). Esta oleaginosa ha venido

creciendo a un ritmo cercano al millón de hectáreas anuales en los últimos años y se ha convertido en el cultivo por excelencia representando más del 50% del área sembrada de nuestro país y aportando un volumen mayor del 50% de la producción agrícola de la Argentina (Grobocopatel, 2013). Los efectos de la expansión de la soja en el país, y de su modelo productivo, relacionados con el creciente deterioro ambiental, la fuerte concentración económica y la exclusión social, han sido ampliamente documentados (Ghersa, 2005; Mengo, 2008). La eficiencia productiva de la soja se basa en la sobreexplotación de la fertilidad que ofrece la pampa húmeda, además redundando en problemas como compactación, pérdida de fertilidad y estructura del suelo, exportación de nutrientes sin reposición, encostramiento, impactos sobre la biodiversidad, afectación del acuífero y problemas de inundaciones (Mengo, 2008). Si bien este cultivo es el más rentable y de mayor retorno por capital invertido, a largo plazo este proceso no es la mejor alternativa ya que se contrapone con un desarrollo agropecuario sustentable. La **rotación de cultivos** (Fig. 5.12) es una importante herramienta que contribuye a la conservación del suelo. En la región pampeana es necesario adoptar sistemas de producción con inclusión de gramíneas (trigo, maíz y sorgo) que aseguren una cobertura de residuos permanente para el suelo y un balance positivo de la materia orgánica (Ferro *et al.*, 2009; Todoagro, 2011). Según la FAO (2015), la rotación ideal en la agricultura de conservación es aquella en la cual los cereales son diversificados principalmente con leguminosas, y otras familias botánicas. Este tipo de rotación interrumpe ciclos de plagas y enfermedades (Ventimiglia & Carta, 2005; Forján & Manso, 2010), permite el mejor control de malezas (Corbin *et al.*, 2010), produce diferentes cantidades y tipos de residuos, mejora los balances de nutrientes, varía las épocas de siembra (Voisin *et al.*, 2018). Por lo tanto en la planificación de una rotación de cultivos es necesario alternar cultivos que produzcan gran cantidad de residuos, con alta relación C/N que determina una descomposición lenta de los rastrojos, favoreciendo la formación de MO, acompañados de una correcta fertilización, que aseguren una elevada producción de materia seca, con cultivos que producen pocos residuos, con alta tasa de descomposición, con bajo aporte de carbono, pero con buena fertilidad actual, como las leguminosas (FAO, 2015; Voisin *et al.*, 2018) (Fig. 5.12). Por lo que dijimos, los cereales de invierno como: trigo pan, trigo candeal, avena, cebada, centeno (y también los de verano) cumplen un rol fundamental en la rotación, ya que el aporte de sus residuos promueve el mantenimiento de las propiedades físicas y químicas del suelo permitiendo obtener una productividad estable y sustentable en el tiempo. La alternancia de diferentes cultivos tanto en el tiempo como en el espacio permite, también, diversificar los riesgos productivos, ya que las condiciones ambientales pueden ser desfavorables para un cultivo, pero para otros no (Katsvairo & Cox, 2000; Helmers *et al.*, 2001). Una rotación de cultivos bien planificada también protege los recursos naturales porque favorece la infiltración del agua, previene la erosión y conserva los nutrientes (Todoagro, 2011). Comparada con el monocultivo de soja, la rotación de cultivos (gramíneas con leguminosas) disminuye la pérdida de suelos de 5.000 a 1.100 kilos por hectárea por año, lo que permite conservar nutrientes y la productividad de los suelos (Todoagro, 2011). En cambio, los monocultivos, incluso bajo siembra directa, pueden disminuir la productividad debido a la pérdida de nutrientes y carbono, entre muchos otros

problemas. La materia orgánica, es un componente fundamental en la fertilidad edáfica para la producción de los cultivos. Las diferentes fracciones de la materia orgánica del suelo pueden cambiar dependiendo del uso que se le dé al suelo y son utilizadas como indicadores de sostenibilidad de los agroecosistemas (Chamorro *et al.*, 2019; Lozano *et al.*, 2011). Las rotaciones de cultivos como ya dijimos también influyen en las condiciones físicas de los suelos, principalmente en lo que a estructura se refiere. Los cultivos, con sus distintos sistemas radiculares exploran diferentes estratos del perfil, permitiendo cada uno de ellos la generación de una clase determinada de poros, que según su tamaño tendrán funciones de aireación, ingreso del agua al perfil, almacenamiento o funciones mixtas. Así mientras una raíz de alfalfa generará macroporos que alcanzan una profundidad importante, el trigo desarrolla un sistema radical en cabellera, ocupando esencialmente la superficie del suelo. Estos poros, que se generan al descomponerse las raíces por actividad de los microorganismos presentan alta estabilidad y continuidad espacial, favoreciendo una buena dinámica del aire y del agua llamados biocanales (Forján & Manso, 2010).

El logro de una agricultura sustentable requiere mantener el capital natural y la calidad de los recursos lo que, en el caso del suelo implica (entre otras cosas) que la calidad y cantidad de los nutrientes debe mantenerse constante. Dado que los agroecosistemas son sistemas abiertos porque se extraen productos de cosecha, necesariamente requieren de la incorporación externa de **nutrientes** para compensar dichas salidas. Es decir, en el cálculo del balance de nutrientes del suelo para una actividad agrícola todos los valores debieran tender a 0 para mantener su calidad, si se parte de un suelo saludable (Voisin *et al.*, 2017; Chamorro *et al.*, 2019). Cruzate & Casas en el año 2003 mostraron que, en la Argentina, existe un balance negativo de nutrientes del suelo debido a las bajas tasas de reposición, que determinan índices crecientes de empobrecimiento en nitrógeno, fósforo, azufre, calcio y boro. Los mismos autores en 2009 confirmaron el diagnóstico a pesar de haber aumentado la cantidad de productores que fertilizaron los cultivos y también los cultivos fertilizados. Esto se debe a que, para el caso de los nutrientes poco móviles, en muy pocos casos los lotes se fertilizaron bajo el criterio de reconstrucción y mantenimiento, práctica consistente en aplicar un poco más de la cantidad de nutrientes necesaria para satisfacer los requerimientos del cultivo y evitar balances negativos. Es decir, que, si bien la aplicación de fertilizantes ha aumentado notablemente, los balances de nutrientes de los sistemas productivos en las diferentes regiones del país continúan siendo negativos (García, 2006; Forján & Manso, 2012; Ghida Daza, 2013; Voisin *et al.*, 2018; Chamorro *et al.*, 2019). El principal causante de esto es la utilización de materiales genéticos con mayor potencial productivo que incrementa la extracción de nutrientes y la baja reposición de los mismos, de alrededor de un 37% de acuerdo con Cordone (2012).



Fig. 5.12. Imágenes propias de ensayos de rotaciones

El uso de manejos alternativos como **cultivos de cobertura (CC) y compost** en los barbechos en los actuales sistemas de producción constituyen una herramienta bastante novedosa y eficiente y económica porque permiten sustituir gran parte de los fertilizantes de síntesis química por fertilizantes orgánicos (Fig. 5.15), que muchas veces forman parte del mismo establecimiento, como es el caso de establecimientos mixtos, lográndose iguales rendimientos (Kruger & Quiroga, 2012; Novillo *et al.*, 2019; Voisin & Golik, 2019; Voisin *et al.*, 2019; Golik *et al.*, 2020 a, b).

En los sistemas de agricultura continua de la Región Pampeana prevalecen los cultivos de verano (Caviglia & Andrade, 2010), por lo tanto, la mayor parte de los suelos bajo agricultura se encuentran en barbecho durante el otoño y el invierno.

Como los cultivos estivales (principalmente soja y maíz) se cosechan entre marzo y mayo y la siembra del próximo cultivo se produce entre septiembre y diciembre, el período de barbecho es amplio (Basanta *et al.*, 2008). Por ello el uso de cultivos de cobertura es totalmente factible. Además de aportar nutrientes, estos cultivos de cobertura mejoran la eficiencia del uso de los recursos (nutrientes, radiación y agua) en el sistema suelo-cultivo, lo que se traduce en mayor aporte de C al suelo, con aumento de la MO (Villamil *et al.*, 2006; Basanta *et al.*, 2012). En experimentos de largo plazo conducidos en Córdoba (Basanta & Álvarez, 2015), Santa Fe (Duvál *et al.*, 2015) y Buenos Aires (Martínez *et al.*, 2013), se observó que la inclusión de una gramínea como CC en un sistema de monocultivo de soja mejoró significativamente los aportes de residuos vegetales y por ende los niveles de carbono orgánico del suelo. Los residuos del CC se degradan lentamente y los nutrientes son liberados al suelo quedando disponibles para el cultivo siguiente (Fernández *et al.*, 2012; Scianca *et al.*, 2013). Los CC retienen el nitrógeno mineral, que sin ellos podría perderse por lixiviación, al ser un nutriente sumamente móvil. Restovich & Andriulo (2011) en un estudio de cuatro años observaron una reducción de por lo menos el 50% del N mineral en el suelo luego de un CC en relación al barbecho químico típico de la siembra directa. La cubierta generada por los CC tiene un efecto protector sobre el suelo ya que reduce la ruptura de los agregados por el impacto de la gota de lluvia y evita la oclusión de



los macroporos, además de crear condiciones favorables para la generación de bioporos estables y profundos. A este efecto de la parte aérea se suma el aporte de las raíces que generan una estructura porosa de gran estabilidad (Álvarez & Quiroga, 2013). Los CC también pueden atenuar las pérdidas de suelo por erosión eólica, disminuir la presión de las malezas y el uso de herbicidas, mejorar la captación de agua y reducir el encharcamiento y/o encostramiento, reducir los riesgos de salinización por ascenso capilar desde las napas, reducir la evaporación incrementando la conservación y disponibilidad de agua en el perfil, etc. Dependiendo de su manejo es posible sincronizar mejor la oferta de nutrientes para los cultivos sucesores (Kruger & Quiroga, 2012) (Fig. 5.13).

Otra alternativa es la utilización de **compost** de distintos orígenes (Fig.5.14) Las actividades de la moderna sociedad de consumo, el crecimiento demográfico y el desarrollo industrial, determinan un aumento ilimitado en la generación de residuos. La producción mundial de estiércol procedente de la ganadería está cercana a 12.193 millones de toneladas (Tortosa, 2011). Para los residuos agrícolas, se estima que de los 1,6 billones de toneladas de materia orgánica exógena que se producen al año en la Unión Europea, 415 millones corresponden a residuos agrícolas, siendo el trigo, la cebada y el maíz los que generan mayor cantidad de residuos de este tipo. La industria alimenticia, en Europa, se estima que produce cerca de 222 millones de toneladas anuales de residuos agroindustriales, la mayor parte de naturaleza biodegradable (Tortosa, 2011). A nivel local, se hace necesario el estudio de los distintos sustratos disponibles y sus posibles mezclas con diferentes características y su posterior efecto en el suelo. La Plata produce 300 t/día de residuos orgánicos o sea 150 t potenciales de compost por día, equivalente a 55000 t /año (Ceamse, 2016). Sumado a ello se encuentra en nuestra ciudad la intensa actividad hípica (con una elevada producción de estiércol equino) y diversos establecimientos avícolas. La aplicación del compost puede producir en el suelo un incremento en la materia orgánica una vez establecido el balance mineralización y humificación y a su vez, contribuye a una producción sustentable, considerando la importancia en la reducción y/o sustitución de los fertilizantes inorgánicos. La utilización de compost aumenta la fertilidad de los suelos (Alvaríño, 2003; Gambaudo & Sosa, 2015). Confirmando lo citado, nuestros resultados indicaron que se aumentaron significativamente los niveles de P, N y CO en todos los ensayos en que se utilizó un barbecho con compost (Novillo *et al.*, 2019; Voisin & Golik, 2019; Voisin *et al.*, 2019; Golik *et al.*, 2020 a, b). La utilización de compost debería ser una alternativa a considerar para la mayoría de los establecimientos agropecuarios porque no solo aumenta la fertilidad del suelo, sino que, a la vez, y no menos importante, estamos reciclando residuos orgánicos urbanos y/o de otros establecimientos. El impacto ambiental se vería reducido por la menor contaminación de los residuos urbanos ya que estos en lugar de ser arrojados a sitios específicos (causando contaminación) serían utilizados, en parte, para la producción de alimentos disminuyendo la fabricación de fertilizantes con energías no renovables como el petróleo (Novillo *et al.*, 2019; Voisin & Golik, 2019; Voisin *et al.*, 2019; Golik *et al.*, 2020 a, b). Existe en la actualidad maquinaria para la aplicación de compost para cultivos extensivos (Fig. 5.15). El área de influencia de la Facultad de Ciencias Agrarias y Foresta-

les, de la UNLP es extensa, abarcando varios partidos que no quedan exceptuados de la problemática planteada, principalmente el Partido de Magdalena. Trabajos recientes indican que alrededor del 40% de los suelos de Magdalena son aptos o moderadamente aptos para el cultivo de soja (Etchegoyen, 2011), superficie equivalente a unas 73.000 hectáreas, lo cual da una idea de las posibilidades de crecimiento de este cultivo en el Partido. Investigadores de nuestra cátedra de Cerealicultura, de Oleaginosas y Cultivos Regionales y Edafología llevamos adelante ensayos de secuencias de diferentes cultivos, con distintas dosis de fertilizantes y diferentes tipos de barbechos (Novillo *et al.*, 2019; Voisin & Golik, 2019; Voisin *et al.*, 2019; Golik *et al.*, 2020 a, b). En nuestros trabajos hemos encontrado que aquellas secuencias con mayor participación de gramíneas aportan mayor C orgánico mejorando en el tiempo el balance de C y por ende la MO del suelo. Asimismo, para las condiciones climáticas de la zona durante los barbechos, los manejos alternativos resultaron superiores al manejo tradicional en la conservación de agua útil para el cultivo sucesor (Novillo *et al.*, 2019; Voisin & Golik, 2019; Voisin *et al.*, 2019; Golik *et al.*, 2020 a, b). Al igual que Restovich & Andriulo (2011), podemos concluir que algunas especies utilizadas como cultivos de cobertura invernales permiten aumentar el período de ocupación del suelo mejorando la eficiencia de uso del agua, realizando también un importante aporte de residuos (o biomasa al sistema) (Basanta *et al.*, 2013; Villamil *et al.*, 2006; Peyron, 2019). Y principalmente hemos encontrado que los rendimientos de los cultivos sucesores bajo estos manejos alternativos del barbecho no han disminuido con respecto a un barbecho químico convencional (Mejura, 2019; Golik, 2000 a,b) lo cual resulta de sumo interés por el ahorro económico al no aplicar fertilizantes de síntesis química preservando el medio ambiente, con una producción mucho más sustentable.



Fig. 5.13. Fuente propia. Se observa la implantación de cultivos de cobertura (vicia + avena)



Fig. 5.14. Fuente propia. Se observa la implantación de cultivos de cobertura y compost durante el barbecho entre dos cultivos estivales.



Fig. 5.15. Maquinaria para la aplicación de compost en cultivos extensivos.

## Referencias

- Álvarez, C. & Quiroga, A. (2013). Avances en aportes de los cultivos de cobertura en la región agrícola argentina. En C Álvarez, A Quiroga, D Santos, M Quiroga (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (186-195). La Pampa: Ediciones INTA.
- Álvarez, R. & Grigera, S. (2005). Analysis of soil fertility and fertilizer effects on wheat and corn yield in the Rolling Pampa of Argentine. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 191, 321 – 329.

- Álvarez, R. & Steinbach, H. (2006). Asociación entre el nitrógeno del suelo y el rendimiento de los cultivos. En Roberto Álvarez (Coord.), *Materia Orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos* (79-92). Buenos Aires: UBA.
- Alvariño, Cr. (2003). Residuos orgánicos de origen urbano e industrial que se incorporan al suelo como alternativa económica en la agricultura. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 36, N°1.
- Andrade, F., Cirilo, A., Uhart, S. & Otegui, M. (1996). Nutrición mineral. En *Ecofisiología del cultivo de maíz* (101- 117). Buenos aires. Editorial La Barrosa-Dekalb Press.
- Andrián, M.L., Melchiori, R.J., Caviglia, O.P., Barbagelata, P.A. & Paparotti, O.F. (2001). Evaluación de la nutrición nitrogenada en trigo por medio de un índice de verdor en hojas. En *Actas V Congreso nacional de Trigo, Mesa: Ecofisiología y manejo de cultivos*. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- Basanta, M., Alvarez, C., Giubergia, J.P., Lovera, E. (2012). Cultivos de cobertura en sistemas de agricultura continua en la región central de Córdoba. En Álvarez, C., Quiroga, A., Santos, D., Bodrero, M. (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (50-57). La Pampa: Ediciones INTA.
- Basanta, M., Ghiotti, M L., Giubergia, J.P. & Lovera, E. (2010). Fracciones de carbono orgánico en un Haplustol bajo sistemas de agricultura continua en la región central de Córdoba. *XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario*. Disponible en CD.
- Bassi, J. (2021). Zinc, el micronutriente clave para los cultivos argentinos. Recuperado de <https://www.infocampo.com.ar/zinc-el-micronutriente-clave-para-los-cultivos-argentinos/>
- Bergh, R., Loewy, T. & Echeverría, H. (2004). Aportes del índice de verdor al manejo del nitrógeno en trigo pan. *VI Congreso Nacional de Trigo y IV Simposio de Cereales de Siembra Otoño-Invernal*. Bahía Blanca, Argentina.
- Bianchini, A. (2021). Recuperado de Zinc, el micronutriente clave para los cultivos argentinos. <https://www.infocampo.com.ar/zinc-el-micronutriente-clave-para-los-cultivos-argentinos/>
- Calviño, P. & Sadras, V. (2002). On – farm assesment of constraints to wheat yield in south – eastern Pampas. *Field Crops Research*, 74, 1–11.
- Casal, J., Sánchez, R. & Deregibus, V. (1986). Effects of plant density on tillering: The involvement of the red/far-red and the proportion of radiation intercepted per plant. *Exp. Environmental Botany*, 26, 365–371.
- Castellarín, J.M., Pedrol, H.M., Gerster, G. & Ferraguti, F. (2008). Respuesta en rendimiento a la fertilización con cloruro de potasio y su relación con propiedades químicas del suelo en cultivos de trigo del sur de Santa Fe. Campaña 2007-08. *VII Congreso Nacional de Trigo. Sesión Manejo y Fertilización*, pág. 28.
- Castellarín, J.M. (2009). Influencia de las prácticas de manejo sobre la generación del rendimiento en el cultivo de trigo. *Para mejorar la producción* 40, 23 -38. INTA EEA Oliveros. Recuperado de <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-influencia-practic-manejo-sobre-la-generacion-de.pdf>
- Caviglia, O.P. & Andrade, F.H. (2010). Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas. Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology* 3 (Special Issue 1), 1-8.

- Ceamse (2016). Residuos sólidos urbanos generados en la ciudad de La Plata. Recuperado de <http://www.ceamse.gov.ar>
- Chamorro, A.M., Bezus, R., Golik, S., Pellegrini, A., Novillo, B. & Voisin, A. (2019). Rotaciones agrícolas en buenos aires (argentina): evaluación de la sustentabilidad ecológica. *Primer Congreso Argentino de Agroecología*. 1a. ed. adaptada. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo. Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado. 1423 pp. Eje temático: Indicadores de sustentabilidad, 918-922. Recuperado de <https://bdigital.uncu.edu.ar/14315>.
- Corbin, A.T., Thelen, K.D., Robertson, G.P. & Leep, R.H. (2010). Influence of cropping Systems on soil aggregate and weed seedbank dynamics during the organic transition period. *Agronomy Journal* 102, 1632-1640.
- Cordone, G. (2012). La Argentina sólo repone el 37% de los nutrientes del suelo. Recuperado de [www.pregonagropecuario.com](http://www.pregonagropecuario.com)
- Cordone, G. & Martínez, F. (2000). El azufre en el sistema productivo agrícola del centro – sur de Santa Fe. En *Informaciones agronómicas del Cono Sur N° 5*, (13–14). INPOFOS.
- Cruzate, G.A. & Casas, R. (2003). Balance de nutrientes. Número Especial Sostenibilidad. *Revista Fertilizar*, 8, 7-13.
- Cruzate, G.A. & Casas, R. (2009). Extracción de nutrientes en la Agricultura Argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur. N° 44*, 21-26. INPOFOS.
- de la Vega, A. J. & de la Fuente, E. (2004). Elección de genotipos. En Antonio J Pascale (Ed.), *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo* (318 – 349). Buenos Aires: FAUBA.
- Diaz Zorita, M. (2021). Panel técnico II, de nutrición. Congreso A todo Trigo 2021. Recuperado de <http://www.atodotrigo.com.ar/auditorio.php?id=>
- Divito, G.A., Correndo, A.A. & García, F.O. (2017). La nutrición del cultivo de trigo. En G. A. Divito & Fernando Oscar García (Eds.), *Manual del cultivo de trigo* (67-84). Recuperado de <https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/2017/10/Resumen-Manual-Trigo-IPNI.pdf>. Último acceso: marzo de 2021.
- Doberman, A. & Cassman, K.G. (2002). Plant nutrient management for enhanced productivity in intensive grain production systems of the United States and Asia. *Plant and Soil*, 247, 153–175.
- Dreccer, M.F. & Ruiz, R.A. (2004). Bases ecofisiológicas de la nutrición en los cultivos de grano. En Antonio J Pascale (Ed), *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo* (481-497). Buenos Aires: FAUBA.
- Duval, M., Martínez, J.M., Iglesias, J., Galantini, J.A. & Wall, L. (2015). Secuencia de cultivos y su efecto sobre las fracciones orgánicas del suelo. En De Sá Pereira, E., Minoldo, G., Galantini, J.A., (Eds.), *Impacto de los sistemas actuales de cultivo sobre las propiedades químicas del suelo: efectos sobre los balances de carbono* (51-55). Coronel Suárez, Buenos Aires: Ediciones INTA. Recuperado de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_bordeanve\\_impacto\\_de\\_los\\_sistemas\\_actuales\\_de\\_cultivo.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_bordeanve_impacto_de_los_sistemas_actuales_de_cultivo.pdf).
- Echeverría, H.E & García, F.O. (1998). Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico 149*. Buenos Aires, Argentina. EEA INTA Balcarce.
- Echeverría, H., Strada, R. & Studdert, G.A. (2000). Métodos rápidos de análisis de plantas para evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo*, 18, 105–14.

- Echeverría, H., (2004). Fertilización de cultivos en la región pampeana. ¿Qué sabemos y qué nos falta saber? En *Simposio Fertilidad 2004*. “Fertilidad de suelos para una agricultura sustentable”. Págs. 45–52. Rosario, Argentina. INPOFOS Cono Sur.
- Etchegoyen, J. (2011). *Evaluación de la aptitud de los suelos para el cultivo de soja. Partido de Magdalena, Pcia de Buenos Aires*. Trabajo final de Carrera Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, 71pp. UNLP.
- Fageria, N.K. & Baligar, V.C. (2005). Mejora de la eficiencia del uso de nitrógeno en plantas de cultivo. *Avances en agronomía*, 88, 97-185.
- Falótico, J., Studdert, G.A. & Echeverría, H.E. (1999). Nutrición nitrogenada del trigo bajo siembra directa y labranza convencional en condiciones de agricultura continua. *Ciencia del Suelo*, 17, 9–20.
- FAO (2015). La importancia de los cultivos de cobertura en la Agricultura de Conservación. Recuperado de <http://www.fao.org/ag/ca/es/2a.html>
- Fernández, R., Quiroga, A., Noellemeyer, E. (2012). Cultivo de cobertura como antecesor del cultivo de maíz en la Región semiárida pampeana. En C. Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, M. Bodrero, (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de coberturas a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (117-127). La Pampa: Ediciones INTA.
- Ferraris, G. 2021. Panel técnico II, de nutrición. Congreso A todo Trigo 2021. Recuperado de <http://www.atodotrigo.com.ar/auditorio.php?id=>
- Ferraris, G., Gutiérrez Boem, F. & Echeverría, H.E. (2002). Respuesta a la fertilización en el cultivo de soja de primera. *IDIA XXI, II* (3): 52–58.
- Fischer, R.A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105, 447–461.
- Ferro, D.A., Pellegrini, A., Chamorro, A., Bezus, R., Golik, S. (2018). Balance de carbono del suelo en una secuencia de cultivos trigo/soja 2<sup>da</sup> y colza/soja 2<sup>da</sup>. *XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: Legado social de edición limitada*. Comisión 4: Manejo y conservación de suelos y agua. Riego y drenaje (C4P93), 1205 – 1211. San Miguel de Tucumán.
- Fixen, P. (1993). Crop responses to chloride. *Advances in Agronomy*, 50, 107-150.
- Forján, H. & Manso, L. (2002). *Los cereales de invierno en la secuencia de cultivos. Su aporte a la sustentabilidad del sistema de producción*. Pcia. Buenos Aires. Argentina. INTA. Chacra Experimental Integrada Barrow. Tres Arroyos. Recuperado de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_-\\_rotaciones\\_y\\_secuencias\\_de\\_cultivos\\_en\\_la\\_region\\_mixta\\_cerealera\\_del\\_centro\\_sur\\_bonaerense.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_rotaciones_y_secuencias_de_cultivos_en_la_region_mixta_cerealera_del_centro_sur_bonaerense.pdf)
- Forján, H. & Manso, L. (2010). Los cereales de invierno en la secuencia de cultivos. Su aporte a la sustentabilidad del sistema de producción. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Chacra Experimental Integrada Barrow, Convenio INTA – MAA Convenio INTA – Ministerio de Asuntos Agrarios - Pcia. de Buenos Aires. Recuperado de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_-\\_rotaciones\\_y\\_secuencias\\_de\\_cultivos\\_en\\_la\\_region\\_mixta\\_cerealera\\_del\\_centro\\_sur\\_bonaerense.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_rotaciones_y_secuencias_de_cultivos_en_la_region_mixta_cerealera_del_centro_sur_bonaerense.pdf)

- Forján, H. & Manso, L. (2016). Los cereales de invierno en la rotación de cultivos. *Recomendaciones de la Chacra Experimental Integrada Barrow para potenciar el funcionamiento de los agroecosistemas mediante un sistema de producción sustentable*. Pcia. Buenos Aires. Argentina. INTA. Chacra Experimental Integrada Barrow. Tres Arroyos. Recuperado de [https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta\\_-\\_rotaciones\\_y\\_secuencias\\_de\\_cultivos\\_en\\_la\\_region\\_mixta\\_cerealera\\_del\\_centro\\_sur\\_bonaerense.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_-_rotaciones_y_secuencias_de_cultivos_en_la_region_mixta_cerealera_del_centro_sur_bonaerense.pdf)
- Fraschina J., Bainotti C. & Salines J. (2003). El cultivo de trigo y la siembra directa en la región central norte. *Trigo, Actualización 2003*, 59–61.
- Galarza, C., Cazorla, C. & Bonacci, F. (2010). Influencia de los cultivos de cobertura en algunas propiedades físicas del suelo en sistemas agrícolas en siembra directa. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. En CD.
- Gambaudo, S., Sosa, N. (2015). Residuos pecuarios: problema u oportunidad. INTA EEA Manfredi. Recuperado de <http://inta.gob.ar/documentos/residuos-pecuarios-problema-u-oportunidad/>
- García, F.O. (2007). Requerimientos nutricionales del cultivo: respuestas a la fertilización. En E. Satorre (Coord.), *Producción de trigo (37-42)*. Buenos Aires: AACREA.
- García, F. & Berardo, A. (2006). Trigo. En H.E. Echeverría & F.O. García (Eds.), *Fertilidad de suelo y de cultivos (233– 253)*. Buenos Aires, Argentina. Ediciones INTA.
- Ghersa, C.M. (2005). El cultivo de soja como motor de cambio en el agro pampeano. *Actas del Congreso Mundo Soja*, 15-22. Buenos Aires.
- Ghida Daza, C. (2013). Valoración económica del balance de nutrientes en la Provincia de Córdoba. *Información para Extensión 141*, Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez, INTA. 9pp. Recuperado de <http://inta.gob.ar/documentos/valoracion-economica-del-balance-de-nutrientes-en-la-provincia-de-cordoba/>
- Golik, S., Chamorro, A., Bezus, R., Pellegrini, A., Novillo, B. & Voisin, A. (2020). Uso de compost de cama de pollo y cultivos de cobertura previo a soja y maíz. En G.A. Divito (Ed). *Revista Nuestro Suelo*, (4), 14. Revista de divulgación de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Recuperado de [http://www.suelos.org.ar/sitio/wp-content/uploads/2020/nuestro\\_suelo/Nuestro\\_Suelo4\\_AACS-Oct20.pdf](http://www.suelos.org.ar/sitio/wp-content/uploads/2020/nuestro_suelo/Nuestro_Suelo4_AACS-Oct20.pdf)
- Golik, S., Chamorro, A.M., Bezus R., Pellegrini, A., Novillo, B. & Voisin, A. (2019). Ecological sustainability assessment of crop rotations in Buenos Aires (Argentina). *Current Investigations in Agriculture and Current Research*, 7(4).
- Golik S., Voisin A., Chamorro A., Bezus R., Pellegrini A. & Novillo B. (2020). Efecto de la rotación de cultivos y distintos barbechos sobre la productividad del trigo. *Boletín Estación Experimental Los Hornos*. Actividades de docencia, investigación y extensión 2018-2020. (Facultad de Cs. Agrs. y Ftles, UNLP), 68-70. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/101203>
- Grobocopatel, G. (2013). Telam: informes especiales. Recuperado de <http://www.telam.com.ar/informes-especiales/1-soja-y-poder-economico/2-el-negocio>

- Helmets, G.A., Yamoah, Ch F. & Varvel, G.E. (2001). Separating the impacts of crop diversification and rotation on risk. *Agronomy Journal*, 93 (6), 1337-1340.
- Katsvairo, T.W. & Cox, W.J. (2000). Economics of Cropping Systems Featuring Different Rotations, Tillage and Management. *Agronomy Journal*, 92, 485–493.
- Kruger, H. & Quiroga, A. (2012). La “interfase suelo-atmósfera” y su valor estratégico en regiones semiáridas. En: C. De Álvarez, A. Quiroga, D. Santos, M. Bodrero (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (5-6). Anguil, La Pampa. INTA EEA.
- Landriscini, M.R., Galantini, J.A. & Rosell, R.A. (2001). Aplicación de la metodología DRIS al cultivo de trigo en la región semiárida pampeana. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 12, 6–11. INPOFOS.
- Lorenzatti, S. (2005). Siembra directa: trigo. Su impacto en la materia orgánica. Recuperado de <http://www.eeaoc.org.ar/noticias/noticia.asp?seccion=noticias&id=230>
- Lozano, P.Z., Rivero, C., Bravo, C. & Hernández, R.M. (2011). Fracciones de la materia orgánica del suelo bajo sistemas de siembra directa y cultivos de cobertura. *Revista Facultad de Agronomía*, 28, 35-56.
- Maddonni, G., Ruiz, R.A., Vilaríño, P. & García de Salomone, I. (2004). Fertilización en los cultivos para grano. En A.J. Pascale (Ed.), *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo* (501–557). Buenos Aires: Facultad de Agronomía U.B.A.
- Martínez, J.P., Barbieri, P.A., Sainz Rosas, H.R. & Echeverría, H.E. (2013). Inclusion of Cover Crops in Cropping Sequences with Soybean Predominance in the Southeast of the Humid Argentine Pampa. *The Open Agriculture Journal*, 7, (Suppl 1-M2): 3-10.
- Meisinger, J.J. (1984). Evaluating plant available nitrogen in soil crop systems. En R.D. Hauck et al. (Eds.), *Nitrogen in crop production* (391–416). Madison, WI EEUU. American Society of Agronomía.
- Mejura, P. (2019). *Efecto de diferentes barbechos sobre la producción del cultivo sucesor. Trabajo final de carrera Ingeniería Agronómica*. Tesis de grado. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/browse?authority=http%3A%2F%2Fvoc.sedici.unlp.edu.ar%2Fnode%2F68655&type=author>
- Mengo R. (2008). República Argentina: Impacto social, ambiental y productivo de la expansión sojera. Recuperado de <http://www.ecoportel.net/content/view/full/76397>
- Mesquida, F. (2021). Zinc, el micronutriente clave para los cultivos argentinos. Recuperado de <https://www.infocampo.com.ar/zinc-el-micronutriente-clave-para-los-cultivos-argentinos/>
- Novillo, B., Golik, S.I. & Lanfranco, J. (2019). Aportes de diferentes secuencias de cultivos y manejos a la preservación/mejoramiento de los suelos agrícolas del borde sur de la pampa ondulada. *Revista Investigación Joven*, vol 6 (especial), 24. La Plata: Resúmenes-Ebec UNLP 2018. Publicado 23 mayo 2019. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/index>.
- Novillo, B.V., Voisin, A., Pellegrini, A.E., Chamorro, A.M., Bezus, R., Machetti, N. & Golik, S.I. (2018). Diferentes estrategias de barbecho en cultivos extensivos: efecto sobre propiedades químicas del suelo. *XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. San Miguel de Tucumán.



- Pellegrini, A.E., Skulimowski, S.R., Voisin, A.I., Novillo, B.V., Chamorro, A.M., Bezus, R. & Golik, S.I. (2020) La producción de compost y su relación con un ambiente sustentable. XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo "Suelos: Desafíos para una producción y desarrollo sustentables". Corrientes, Prov. de Corrientes. Contaminación del suelo y calidad del ambiente, 1515-1519. Organizador: asociación Ciencia del Suelo. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/1rqzLJOx7uWzGq0eGlvGZ8foW3d43xtr2/view?usp=sharing>
- Pengue, W. (2001). Impactos de la expansión de la soja en Argentina. Globalización, desarrollo agropecuario e ingeniería genética: un modelo para armar. *Biodiversidad* 29, 7-14. Recuperado de <http://www.axel.org.ar/articulos/nutricion/soja/pengue.pdf>
- Peyron, G. (2019). *Efecto de diferentes estrategias de barbecho sobre la disponibilidad de nutrientes y de agua para el cultivo sucesor en distintas rotaciones*. Trabajo final de carrera Ingeniería Agronómica. Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/browse?authority=http%3A%2F%2Fvoc.sedici.unlp.edu.ar%2Fnode%2F66553&type=author>. Último acceso: mayo de 2021.
- Quintero, C.E. (2003). Capacidad de fijación de P en el suelo y su efecto sobre la dosis a aplicar. En *Simposio El fósforo en la agricultura argentina (73-76)*. Rosario Argentina. INPOFOS Cono Sur.
- Randall, G.W., Vetsch, J.A. & Huffman, J.R. (2003). Pérdidas de nitrato en el drenaje subsuperficial de una rotación maíz-soja según se ve afectado por el tiempo de aplicación de nitrógeno y el uso de nitrapirina. *Journal of Environmental Quality*, 32, 1764 - 1772.
- Raun, W., Solie, J., Johnson, B., Stone, W., Lukina, E., Thomason, W & Schepers, J. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93, 131–138.
- Restovich, S.B., Andriulo, A.E. & Améndola, C. (2011). Introducción de cultivos de cobertura en la rotación soja-maíz: efecto sobre algunas propiedades del suelo. *Ciencia del suelo*, 29, 61-73.
- Salvagiotti, F., Vernizzi, A., Bodrero, M., & Bacigaluppo, S. (2012). Cambios en el corto plazo en distintas fracciones de la materia orgánica en respuesta a la inclusión de cultivos de cobertura en secuencias basadas en soja. En C. Álvarez, R. Quiroga (Eds.), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (88-91). Buenos Aires: FAUBA.
- Salvagiotti, F. (2004). Estrategias en el manejo de nutrientes en el sur de Santa Fe, 13–18. En *Simposio de Fertilidad de suelos para una agricultura sustentable*. Rosario, Argentina.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J.M. & Pedrol, H.M. (2005). On farm validation of grain yield and nitrogen dynamics in soil – wheat systems using CERES Wheat. En *Abstracts 7th International Wheat Conference*. Mar del Plata, Argentina.
- Salvagiotti, F., Castellarín, J. M., Pedrol, H.M. & Rosso, O. (2000). La mineralización neta de nitrógeno durante el ciclo del cultivo de trigo y su uso en el balance de nitrógeno. En *Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Mar del Plata, Argentina.
- Satorre, E.H., Ruiz, R.A., Miralles, D.J., Calderini, D.F. & Maddoni, G.A. (2001). Bases de decisión para la fertilización nitrogenada en las zonas Norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe y Centro de AACREA. *Cuaderno de actualización técnica de AACREA N° 63, Trigo*, 30-38.

- Satorre, E., Menéndez, F. & Tinghitella, G. (2005). El modelo Triguero: Recomendaciones de fertilización nitrogenada en trigo. Simposio de *Fertilidad 2005: Nutrición, Producción y Ambiente* (3-11). Rosario, Argentina.
- Scianca, C., Varela, M.F., Barraco, M., Álvarez, C. & Quiroga, A. (2013). En C. Álvarez *et al.* (Eds), *Contribuciones de los cultivos de cobertura a la sostenibilidad de los sistemas de producción* (105-116). La Pampa: INTA EEA Anguil.
- Slafer, G.A. (2003). Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology*, 142, 117–128.
- Strada, R.A., Echeverría, H.E. & Studdert, G.A. (2000). Diagnóstico de la respuesta a la fertilización nitrogenada por medio de la concentración de nitratos en seudotallos de trigo. *Ciencia del Suelo*, 18, 64–68.
- Stone, P.J & Savin, R. 1999. Grain quality and its physiological determinants, En E. Satorre & G.A. Slafer (Eds.), *Wheat: ecology and physiology of yield determination* (85–120). Estados Unidos: Food Products pr inc (NY).
- Summer, M.E., (2001). Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. Archivo agronómico N° 5 INPOFOS. En: *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* N° 9.
- Todoagro (2011). *Los suelos producen cinco veces más con rotación de cultivos*. Recuperado de <http://www.todoagro.com.ar/todoagro2/nota.asp?id=16128>
- Tortosa, G. (2011). *Materia orgánica en agricultura y los residuos orgánicos*. Recuperado de: <file:///E:/Proyecto%20Doctorado/Materia%20org%C3%A1nica%20en%20agricultura%20y%20los%20residuos%20org%C3%A1nicos%20-%20Compostando%20Ciencia.html>
- Uhart, S.A. (2002) nutrición mineral y diagnóstico de la fertilización en maíz. En E. Satorre (Coord.), *Cuaderno de actualización técnica* N°65 (26-52). Buenos Aires: AACREA.
- Uhart, S.A & Andrade F.H. (1996). Curva de dilución de N y fertilización nitrogenada en maíz. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal (448-449). Mendoza, Argentina.
- Uhart, S.A. & Echeverría, H. (2002). Diagnóstico de la fertilización. En F.H. Andrade & V. Sadrás (Eds.), *En Bases para el manejo de maíz, girasol y soja* (239-272). Balcarce: INTA Balcarce-Facultad de Ciencias Agrarias.
- Ventimiglia, L.A. & Carta, H.G. (2005). *Pensando en la sustentabilidad del sistema productivo. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Unidad de Extensión y Experimentación Adaptativa 9 de Julio.
- Vigliezzi, A., Studdert, G.A. & Echeverría, H.E. (1996). Nitratos en seudotallos de trigo como indicador de la disponibilidad de nitrógeno. *Ciencia del Suelo*, 14, 57–62.
- Villamil, M.B., Bollero, G.A., Darmody, R.G., Simmons, F.W. & Bullock, D.G. (2006). No-Till corn/soybean systems including winter cover crops: Effects on soil properties. *Soil Science*, 70, 1936-1944.
- Voisin, A., Novillo, B., Chamorro, A., Bezus, R., Pellegrini, A. & Golik, S. (2018). Análisis de diferentes secuencias de cultivos: aportes al sistema productivo. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 44 (2), 105 - 112.
- Voisin, A., Chamorro, A., Bezus, R., Pellegrini, A., Novillo, B. & Golik, S. (2020). Enmiendas orgánicas y cultivos de cobertura en soja (*Glicine max l.*) y maíz (*Zea mays l.*). Impacto en

los componentes del rendimiento. *Boletín Estación Experimental Los Hornos*. Actividades de docencia, investigación y extensión 2018-2020, 2-76. (Facultad de Cs. Agrs. y Ftles, UNLP). Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/101203>

Voisin, A.I. & Golik, S.I. (2019). Aportes a la sustentabilidad de los sistemas productivos extensivos. Utilización de cultivos de cobertura y compost en diferentes secuencias de cultivos. *Revista Investigación Joven*, 6 (especial): 32-33, Resúmenes-Ebec UNLP 2018. Publicado 23 mayo 2019. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/InvJov/index>.

Waldren, R.P. & Florerday G.A. (1979). *Agronomy Journal*, 71, 391-397.

Zadoks, J.K., Chang, T.T. & Konzak, C.F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421.