

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE LA INTENSIDAD DE USO AGRÍCOLA DEL SUELO SOBRE EL
BALANCE DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO

por

Pablo ACKERMANN BARBERO
Nicolás GASPARRI GIRIBALDI

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2011

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Guillermo Siri Prieto

Ing. Agr. Mónica Barbazán

Fecha: 15 de julio de 2011.

Autores:

Pablo Ackermann Barbero

Nicolás Gasparri Giribaldi

AGRADECIMIENTOS

Al Director de Tesis Ing. Agr. Oswaldo Ernst por su orientación, apoyo y por la colaboración en todas las etapas de la realización de la tesis.

Al personal del laboratorio de la EEMAC que nos enseñaron y ayudaron en las diferentes tareas durante el trabajo de campo.

Al Departamento de Documentación y Biblioteca por la ayuda en la búsqueda de material y en la corrección del documento.

A nuestras familias por toda la ayuda y apoyo brindado.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 <u>SUSTENTABILIDAD</u>	2
2.1.1 <u>Definición de sustentabilidad</u>	2
2.1.2 <u>Como evaluar sustentabilidad</u>	4
2.1.2.1 Evaluación de la sustentabilidad <i>per se</i>	5
2.1.2.2 Evaluación comparativa.....	5
2.1.2.3 Evaluación retrospectiva.....	5
2.1.2.4 Evaluación prospectiva.....	6
2.1.2.5 Monitoreo en el tiempo.....	6
2.1.3 <u>Agro-ecosistema sustentable</u>	6
2.2. <u>BALANCE DE NUTRIENTES COMO MEDIDA DE SUSTENTABILIDAD</u>	7
2.2.1 <u>Que es un balance</u>	7
2.2.2 <u>Como se estima</u>	8
2.2.3 <u>Por qué usar Balances de nutrientes</u>	10
2.2.4 <u>Nutrientes en el sistema</u>	11
2.2.4.1 Entradas.....	11
2.2.4.2 Salidas.....	12
2.2.5 <u>Problemáticas con balances positivos y negativos</u>	13
2.3 <u>EXTRACCIÓN DEL SISTEMA POR CULTIVO</u>	14
2.4 <u>EFFECTO DE LAS ROTACIONES: INCLUSION DE PASTURAS</u>	17
2.5 <u>NUTRIENTES DEL SISTEMA Y SUS DINAMICAS</u>	19
2.5.1 <u>Nitrógeno</u>	19
2.5.1.1 Dinámica de N en el suelo.....	20
2.5.1.2 Variaciones del contenido de N: Flujos de entradas y salidas.....	21
2.5.1.3 Efecto del manejo sobre N del suelo.....	21
2.5.1.4 Balance aparente.....	25
2.5.2 <u>Fósforo</u>	26
2.5.2.1 Flujos de fósforo en el sistema.....	28
2.5.2.2 Balance de fósforo.....	30
2.5.3 <u>Potasio</u>	31
2.5.3.1 Potasio en la solución de suelo.....	31

2.5.3.2 El Potasio intercambiable.....	32
2.5.3.3 Potasio no intercambiable y en minerales....	32
2.5.3.4 Flujos de potasio en el sistema.....	32
2.5.4 <u>Efecto del sistema de labranza en la dinámica de nutrientes</u>	33
2.5.4.1 Dinámica de nutrientes no móviles: fósforo y potasio.....	34
2.5.4.2 Dinámica de nutrientes móviles: nitrógeno y azufre.....	35
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	37
3.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL.....	37
3.1.1 <u>Ubicación del ensayo</u>	37
3.1.2 <u>Tratamientos y diseño experimental</u>	37
3.1.3 <u>Manejo del ensayo</u>	39
3.2 DETERMINACIONES REALIZADAS.....	40
3.2.1 <u>Muestreo de suelo</u>	40
3.2.2 <u>Balance aparente de nutrientes</u>	40
3.2.3 <u>Otras consideraciones</u>	41
3.2.4 <u>Variables generadas</u>	42
3.2.5 <u>Análisis estadístico</u>	42
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	43
4.1 CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO.....	43
4.2 BALANCE DE NITRÓGENO.....	47
4.3 FÓSFORO DISPONIBLE.....	49
4.4 BALANCE APARENTE DE FÓSFORO.....	52
4.5 DISPONIBILIDAD DE POTASIO.....	56
4.6 BALANCE APARENTE DE POTASIO.....	57
5. <u>CONCLUSIONES</u>	61
6. <u>RESUMEN</u>	63
7. <u>SUMMARY</u>	64
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	65
9. <u>APÉNDICES</u>	72

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Escala de sustentabilidad. Adaptado de Smyth y Dumansky (1993).....	4
2. Concentración de nutrientes en granos de maíz, trigo, girasol, soja y forraje (A) y extracción por tonelada de producción (B).....	16
3. Balance de N para distintas secuencias en un período de 10 años.....	25
4. Cuadro 4. Profundidad (cm) del suelo por horizontes de cada sector.....	37
5. Manejo del suelo y relación de tiempo en cultivo/tiempo en pastura de los tratamientos evaluados.....	38
6. Balance de N acumulado y sus componentes.....	47
7. Balance de P acumulado y sus componentes.....	52
8. K extraído según los tratamientos AC, RC, RL, R-LC en Kg/ha	57
 Figura No.	
1. Concepto de balance de nutrientes para estimar el flujo de nutrientes dentro de un sistema agrícola, adaptado de NLWRA (2001).....	9
2. Relación aplicación/extracción de N, P, K y S para cultivos de grano en Argentina en el período 1993-2005.....	17
3. Evolución del contenido de nitrógeno total del suelo en diferentes rotaciones en INIA La Estanzuela (1963-2003), Uruguay.....	23

4.	Evolución de la concentración de P disponible Bray I en diferentes rotaciones en INIA La Estanzuela (1964-1987), Uruguay.....	28
5.	Extracción, ingreso y balance aparente promedio de P (kg/ha) para los distintos cultivos.....	30
6.	Efecto de la siembra directa y labranza convencional en la distribución del fósforo y el potasio en un suelo franco arcilloso de Manitoba.....	35
7.	Distribución espacial de los tratamientos rotación larga (RL), rotación corta (RC), agricultura continua (AC) y rotación larga con laboreo (R-LC).....	38
8.	Concentración de N (%N) según estratos de profundidad (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm) en agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL), y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC).....	43
9.	Concentración de N (%N) según los estratos de suelo 0-10 cm y 10-20 cm para el promedio de los tratamientos sin laboreo (SD) contra la rotación cultivos/pastura con laboreo (R-LC)....	44
10.	Concentración de N total (%N) según los estratos de suelo 0-10 cm y 10-20 cm para los tratamientos en agricultura continua (AC) y el promedio de los tratamientos con rotación con pasturas sin laboreo.....	45
11.	Contenido de N inicial (Ni010) y final (Nf010) en el estrato 0-10 cm para los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC).....	46
12.	Contenido de N inicial (Ni1020) y final (Nf1020) en el estrato 10-20 cm para los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC).....	46

13.	Relación entre nitrógeno agregado como fertilizante a los cultivos y el balance aparente anual de nitrógeno.....	49
14.	Fósforo disponible (ppm) según estratos de profundidad (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm) en los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC).....	50
15.	Concentración de P disponible (Bray I) de 0 a 5 cm en función del momento medido, tomando como referencia los semestres posteriores a la última pastura en la rotación.....	51
16.	Extracción de P (KgP/ha) según Rel P/C.....	53
17.	Balance acumulado de P (Kg/ha) en relación a la extracción (kg/ha).....	53
18.	Relación entre fósforo agregado como fertilizante a los cultivos y el balance aparente anual de fósforo.....	55
19.	K intercambiable (meqK/100g) según estratos de profundidad (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm) en los tratamientos AC, RC, RL, R-LC.....	56
20.	Relación entre la variación de potasio (meq/ha) y la extracción (Kg/ha) en el perfil de suelo 0-10 cm y 10-20 cm.....	58
21.	Potasio intercambiable inicial (meq/100g) según estratos de profundidad (0-10cm, 10-20cm) en AC, RC, RL, R-LC.....	59
22.	Potasio intercambiable final (meq/100g) según estratos de profundidad (0-10cm, 10-20cm) en AC, RC, RL, R-LC.....	60

1. INTRODUCCIÓN

Con la introducción de la siembra directa en los sistemas agrícolas del país se podría cumplir con el objetivo de poder controlar las pérdidas por erosión y oxidación de la materia orgánica (MO). Sin embargo, con la introducción de la misma se inició un proceso paulatino que finalizó con la exclusión de las pasturas en los sistemas agrícolas. Este proceso se dio, sobre todo a partir del 2002 cuando comenzó un aumento en los precios de los granos de oleaginosas, pasándose a implementar rotaciones de doble cultivos anuales, generando de esta manera una mayor intensificación en el uso del recurso suelo.

La utilización de pasturas donde se incluyen gramíneas y leguminosas tienen la capacidad de recuperar la calidad física y química del suelo. De esta manera, al quitar las pasturas de los sistemas se podría estar comprometiendo el potencial de producción de la actividad agrícola. Esto podría estar generando un incremento sustancial en el uso de fertilizantes químicos, problemas en la estructuración del suelo y dificultades en el control de la sanidad de los cultivos. Además, se podría estar generando un problema de sustentabilidad pensando en el futuro del recurso suelo.

En el presente trabajo, se evalúa: 1) el efecto de la proporción del tiempo de la rotación ocupado por pasturas sobre el contenido de nitrógeno total (NT), el fósforo disponible (P) y el potasio intercambiable (K); 2) el balance de nutriente generado por cada sistema utilizando los criterios de fertilización utilizados en la actualidad.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 SUSTENTABILIDAD

2.1.2 Definición de sustentabilidad

El desarrollo sustentable podría definirse como aquel que trata de satisfacer las necesidades y aspiraciones del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones del futuro (WCED, 1987). Dicha definición es considerada como la más utilizada y aceptada; sin embargo, según Viglizzo (1996), Sarandón (2002) el término sustentabilidad es un concepto bastante amplio y ambiguo.

Smyth y Dumansky (1993) señalan que la gestión de la sustentabilidad de la tierra combina: tecnologías, políticas y actividades destinadas a la integración de principios socio-económicos con conciencia ambiental. De esta manera se busca:

- Mantener o mejorar la producción (Productividad)
- Reducir los niveles de riesgo de producción (Seguridad)
- Proteger el potencial de los recursos naturales y prevenir la degradación del suelo y la calidad del agua (Protección)
- Ser económicamente viable (Viabilidad)
- Ser socialmente aceptado (Aceptabilidad)

Estos cinco objetivos: productividad, seguridad, protección, viabilidad, aceptabilidad son vistos como los pilares básicos en los cuales se construye el manejo sustentable de la tierra (Smyth y Dumansky, 1993).

Viglizzo (1999) señala en referencia al término de sustentabilidad que los usuarios podrían interpretar al mismo de diferente manera. Sería necesario distinguir entre la sustentabilidad como una propiedad del ecosistema y la sustentabilidad como paradigma del desarrollo socio-económico. La primera idea aparece asociada a un criterio de preservación del recurso natural y el ambiente productivo; la segunda, al mantenimiento de una buena calidad de vida de los seres humanos a través del tiempo.

El concepto puede tener distintos puntos de vista (ecológico, económico, social, cultural, etc.), y diferente significados a distinta escala geográfica (parcela potrero, predio, ecosistema, región, etc.). A nivel de potrero, el concepto puede ser expresado en términos de mantenimiento de propiedades edáficas como la materia orgánica. A nivel predio o ecosistema, adquiere significación el sostenimiento de la performance biológica y económica del sistema de producción a través del tiempo. A escalas mayores, es la sustentabilidad del sistema socio-económico el que se privilegia, sobre todo en los niveles de decisión política (Viglizzo, 1999).

La noción de sustentabilidad implicaría múltiples criterios las cuales todas poseen su propio valor. Un sistema de producción sustentable debería cumplir con los siguientes requisitos: 1) no tener efectos adversos en regiones frágiles y no debe poner en peligro futuras generaciones; 2) ser social y económicamente viables en términos de largo plazo; 3) usar los recursos no renovables lo más eficientemente posible; 4) ser ambientalmente balanceado; 5) producir suficiente y saludables productos para el consumo humano a un precio razonable; 6) tener en cuenta el bienestar animal (Van Bruchem et al., 1999).

La sostenibilidad se relaciona con las denominadas Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), que pueden definirse como “hacer las cosas bien, incorporando permanentemente la mejor tecnología disponible para el logro de los objetivos” y que por lo tanto, se modifican de manera permanente.¹

Para que el cambio a implementar sea definido como más sustentable que el sistema o manejo inmediato anterior, debería evaluarse con una serie de indicadores que permitan valorar si: 1) mantiene o aumenta los niveles productivos actuales; 2) reduce el nivel de riesgo; 3) protege la calidad y el potencial de los recursos naturales, previniendo la degradación y contaminación del suelo, agua y aire; 4) es económicamente viable y 5) es socialmente aceptable.¹

De la misma manera, Sarandón (2002) señala que la sustentabilidad es un concepto complejo en sí mismo, concordando en que se pretende cumplir con varios objetivos de manera simultánea los cuales involucran dimensiones productivas, ecológicas, sociales, culturales, económicas y fundamentalmente temporales.

¹ Ernst, O. 2009. Hacia una agricultura inteligente y sostenible (sin publicar)

2.1.2 Cómo evaluar sustentabilidad

Según Kaufmann y Cleveland, citados por Sarandón (2002), para la evaluación de la sustentabilidad se requiere un abordaje multidisciplinario, dado que es un concepto que incluye diversas disciplinas.

Un inconveniente que surge para un concepto tan complejo es que no existen parámetros o criterios comunes de evaluación. Tampoco existe un valor de sustentabilidad con el cual comparar. Es necesaria que la complejidad y la multidimensionalidad de la sustentabilidad sean simplificadas en valores claros, objetivos y generales, estableciéndose de esta manera indicadores. El uso de indicadores deberá permitir comprender perfectamente, sin ambigüedades, los puntos críticos de la sustentabilidad que presenta un sistema (Sarandón, 2002).

Uno de los componentes más difíciles de manejar cuando se pretende medir la sustentabilidad es establecer el componente temporal, ya que este intrínsecamente está asociado a la definición de sustentabilidad no pudiéndose separar de ella (Sarandón, 2002). Smyth y Dumansky (1993) sugieren una escala de sustentabilidad, fijándose un límite superior de 25 años.

Cuadro 1: Escala de sustentabilidad.

	Clase	Límites de confianza
SUSTENTABLE	A largo plazo	25 años
	En término medio	15 - 25 años
	A corto plazo	7 - 15 años
INSUSTENTABLE	Ligeramente insustentable	5 – 7 años
	Moderadamente insustentable	2 – 5 años
	Altamente insustentable	< 2 años

Fuente: adaptado de Smyth y Dumansky (1993).

Con el cuadro se intenta mostrar el lapso de tiempo antes que el uso continuado de un sistema sea considerado como inaceptable. Se podría interpretar como una medida de confianza del evaluador en la estabilidad de los factores que estarían afectando el sistema (Smyth y Dumansky, 1993).

2.1.2.1 Evaluación de la sustentabilidad *per se*

Intenta evaluar la sustentabilidad por sí misma. Generalmente este tipo de evaluación busca responder preguntas del tipo: ¿Es sustentable determinada rotación?, ¿Es sustentable la producción orgánica? Según Sarandón (2002) no existen puntos de comparación, por lo tanto, la respuesta sería categórica definiéndose un sí o no, con un valor absoluto de sustentabilidad. Aquí, el tiempo juega un rol esencial porque se transforma en el punto de comparación. Se compararía el sistema consigo mismo en el tiempo, por lo que se debe tener definido la escala temporal a utilizar. Smyth y Dumansky, citados por Sarandón (2002) consideran sustentable a corto o largo plazo entre 7 y 25 años. Por debajo de esta cifra se pasan a considerar distintos grados de insustentabilidad, siendo un sistema altamente inestable cuando el lapso de tiempo usado es menor a 2 años. Dado que en la definición de sustentabilidad se menciona que se pretende buscar satisfacer las necesidades de las futuras generaciones, el horizonte temporal no debería ser menor al de una generación, o sea, 25 años. Con este tipo de evaluación lo que importa es saber cuáles son los puntos débiles o los riesgos de sustentabilidad (Sarandón, 2002).

2.1.2.2 Evaluación comparativa

Las preguntas que se buscan responder con este tipo de evaluación son: ¿Cuál de estos dos sistemas, o tecnologías es más sustentable? Siendo la respuesta esperada, esto es más o menos sustentable que aquello. No importa obtener un valor absoluto, siendo quizás éste muy complicado de definir, solo se busca saber cuál de dos sistemas o tecnologías a comparar es mejor que el otro en ese aspecto. En este caso, hay dos situaciones posibles: 1) comparación retrospectiva ¿Qué pasó? 2) comparación prospectiva ¿Qué va a pasar? (Sarandón, 2002).

2.1.2.3 Evaluación retrospectiva

Responde al tipo de pregunta: ¿Quién ha manejado el sistema en forma más sustentable? ¿Qué sistema ha sido mejor? Muchas veces este tipo de preguntas puede conducir a respuestas erróneas. Para que esta forma de evaluación sea correcta debe cumplirse con ciertas condiciones: 1) conocer el

estado inicial o de referencia, se debe saber si el sistema se degradó o se mejoró; 2) los cambios en los valores de los indicadores deben ser atribuidos exclusivamente a lo que se está evaluando (Sarandón, 2002).

Conocer el estado inicial de ambos sistemas evaluados es de gran importancia, de esta manera sería posible conocer si la aplicación de una u otra tecnología o sistema de producción mejoró o degradó la calidad del sitio evaluado (Sarandón, 2002).

2.1.2.4 Evaluación prospectiva

Es necesaria para la planificación. Hace referencia ante la posibilidad de la adopción de un cambio tecnológico o sistema de producción: dónde la nueva tecnología a adoptar es más o menos sustentable a su antecesora. Una dificultad que presenta este tipo de evaluación es que se debe realizar una pregunta a futuro, requiriéndose por lo tanto capacidad de predicción. Existen dos maneras de encararla: 1) monitoreo en el tiempo; 2) evaluación de tendencias o predicción de la sustentabilidad (Sarandón, 2002).

2.1.2.5 Monitoreo en el tiempo

Se basa en la elección de una serie de parámetros que se consideran que son indicadores de sustentabilidad del sistema. El valor de estos parámetros, respecto al valor original permite evaluar o tener una idea de lo que ocurre. Sin embargo, este método presenta como desventaja que se requiere mucho tiempo para obtener una respuesta (Sarandón, 2002).

2.1.3 Agro-ecosistema sustentable

Como determina Gliessman, citado por de Boer (1997), un sistema ecológico o ecosistema podría ser definido como un sistema funcional de complementariedad entre organismos vivos y su medio ambiente. Un ecosistema bien desarrollado es relativamente estable en el tiempo, auto sostenible, pudiendo mantener la productividad solo con los ingresos generados por la radiación solar.

En un agro ecosistema, los seres humanos manipulan o alteran el ecosistema natural con el propósito de establecer una producción. Un agro ecosistema es más que un sistema abierto: hay materiales que son importados hacia dentro del sistema (semillas, fertilizante, energía fósil, etc.) y además existe también una exportación desde el sistema (granos, carne, leche, etc.), materiales que en un sistema natural serían acumulados en el sistema. En un agro ecosistema el ciclo de nutrientes es relativamente bajo, la diversidad biológica es reducida y la estructura trópica tiende a simplificarse. Como consecuencia, el equilibrio original es alterado y remplazado por algo que refleja una combinación de contrastes ecológicos, económicos y sociales. Un agro ecosistema es mucho más complejo que un ecosistema natural, debido al impacto de la interferencia humana en la estructura del ecosistema y a su normal funcionamiento (Gliessman, citado por de Boer, 1997).

2.2 BALANCE DE NUTRIENTES COMO MEDIDA DE SUSTENTABILIDAD

2.2.1 Qué es un balance

El balance de nutrientes es la diferencia entre la cantidad de nutrientes que entran y que salen de un sistema definido en el espacio y en el tiempo. En general, estos balances se consideran para la capa de suelo explorada por las raíces en períodos anuales. Los balances pueden resultar deficitarios o acumulativos generándose situaciones de pérdida (egresos mayores a los ingresos) o de ganancia (ingresos superiores a los egresos) (Ciampitti y García, 2008). También existe la posibilidad de que el balance sea neutro, en este caso se podría decir que sería el ideal para lograr sustentabilidad (NLWRA, 2001).

Esta definición permite estimar balances nutricionales de una chacra en una zafra agrícola a partir de los nutrientes que egresan del suelo en los granos y forrajes cosechados, en los productos animales y en los residuos de cultivos que son transferidos a otras chacras. Los ingresos de nutrientes al suelo están constituidos por los aportados por fertilizantes, abonos orgánicos (incluyendo residuos de cultivos no generados en el misma chacra) y en el caso del nitrógeno, por la fijación cuando se incorpora leguminosas (Ciampitti y García, 2008).

El concepto de balances de nutrientes se amplía en el tiempo cuando se considera una rotación determinada que incluye más de un cultivo o un ciclo agrícola. Dados los beneficios que resultan de la rotación de cultivos, es de importancia considerar un ciclo de rotación y no simplemente un cultivo al definir los balances de nutrientes. Por otra parte, la dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta implica transformaciones que en muchas ocasiones exceden el período de crecimiento de un cultivo, por ejemplo la residualidad de fósforo (García, 2003).

2.2.2 Cómo se estima

Los egresos de nutrientes de una chacra pueden ser estimados a partir de las concentraciones promedio en granos y forrajes cosechados (Ciampitti y García, 2007) y los rendimientos de los cultivos. Los ingresos de nutrientes se estiman a partir de las cantidades de fertilizantes o abonos orgánicos aplicados y su concentración en nutrientes. Las cantidades de nitrógeno fijado vía simbiótica y asimbiótica varían según especie, condiciones ambientales y de manejo. Por ejemplo, para soja en la región pampeana argentina, el aporte de nitrógeno vía fijación simbiótica se ha estimado entre un 30% a 70% de las necesidades totales del cultivo (Ciampitti y García, 2008). El aporte de nutrientes de los residuos de cultivos realizados en el mismo sitio, se considera un reciclaje de nutrientes dentro del mismo sistema suelo y por lo tanto no se incluye entre los ingresos (García, 2003).

Los datos de entradas y salidas del sistema podrían ser considerados de fácil medición ya que se cuantifica fertilizantes, granos cosechados y residuos de cultivos. Sin embargo, muchas de las variables que contribuyen al cálculo del balance deben ser estimadas a partir de la literatura. Un ejemplo de esto último son los valores de exportación de nutrientes en los productos cosechados. La extracción de nutrientes varía considerablemente dependiendo de la especie de cultivo que se esté considerando. Además puede variar de acuerdo a lo que sea removido del cultivo aparte del grano. Dicha remoción puede darse por quemado, pastoreo, entre otros (Roy et al., 2003).

Los conceptos anteriormente mencionados son resumidos en el siguiente cuadro, donde para un nutriente en específico el balance de nutrientes está definido como:

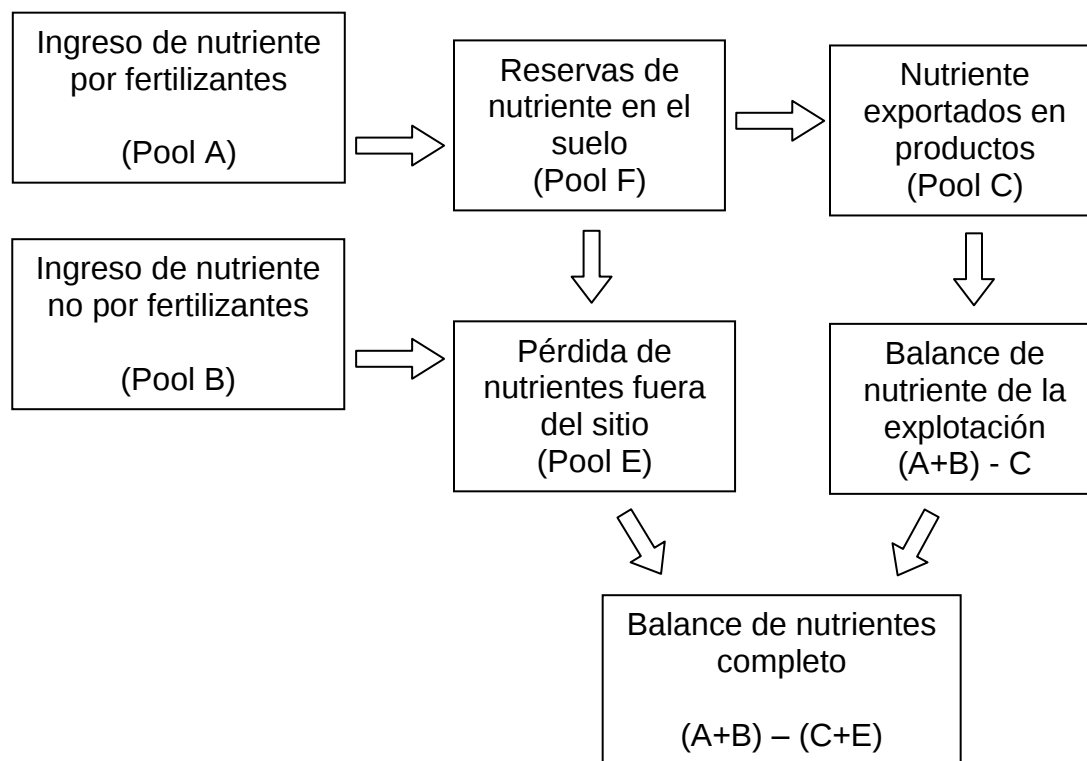


Figura 1: Concepto de balance de nutrientes para estimar el flujo de nutrientes dentro de un sistema agrícola, adaptado de NLWRA (2001).

Balance positivo: $[A + B] > [C + E]$; $\Delta F > 0$ (acumulación positiva)

Balance negativo: $[A + B] < [C + E]$; $\Delta F < 0$ (agotamiento de nutrientes)

Balance neutral: $[A + B] = [C + E]$; $\Delta F = 0$ (balance equilibrado),

La diferencia entre $\{[A + B] - C\}$ es definida como el balance de nutrientes de la explotación agropecuaria evaluada

Esta estimación del balance de nutrientes responde al concepto de “caja negra”, es decir que no considera las transformaciones de nutrientes en el sistema suelo-planta ni las pérdidas gaseosas, por lavado o erosión. Un balance negativo a nivel de una chacra que presenta excesivos niveles de fertilidad no debe ser considerado necesariamente como “malo” (Ciampitti y García, 2008). Si bien, un balance negativo podría estar indicando un agotamiento progresivo de las reservas de nutrientes en el suelo, no siempre

los cultivos responden al agregado de nutrientes en dichos suelos. Esto podría ser explicado porque dichos suelos pueden estar bien dotados en cuanto su fertilidad natural (NLWRA, 2001). Balances de nutrientes neutros (ingresos igualan a los egresos), indican que el stock del suelo no varió, pero la calidad y por ende la fertilidad del suelo podría haber sido alterada (Ciampitti y García, 2008). Debe reconocerse que los distintos sistemas de producción pueden dar lugar a las diferentes formas en los desequilibrios causando problemas de diferente carácter (Bindraban et al., 2000).

2.2.3 Por qué usar balances de nutrientes

Roy et al. (2003) proponen que la realización de balances de nutrientes serviría como instrumentos para proveer indicadores de los sistemas agrícolas. Una manera de utilizar la información obtenida de los balances es extrapolando los valores presentes hacia el futuro y de esta manera validar o no una práctica.

Los estudios de balances pueden realizarse a diferentes escalas: chacra, predio, región, país, etc. Por lo general, con el propósito de una evaluación, una chacra es considerada como la unidad aún cuando la misma puede contener diferentes tipos de suelos, pendientes, tipo de drenaje y manejos (Roy et al., 2003).

Es importante también estimar el balance de nutrientes, ya sea a nivel país o región o a nivel de chacra, debido a que en los balances negativos disminuyen la fertilidad de los suelos afectando la productividad y rentabilidad del sistema y degradando el recurso suelo (García 2001, 2003, Cordone y Martínez, citados por García 2005). Por otra parte, balances exageradamente positivos resultan en bajas eficiencias de uso de los nutrientes y pobres resultados económicos y pueden generar problemas ambientales (García, 2005).

En situaciones de alta disponibilidad de nutrientes en el suelo podría aceptarse balances negativos por determinado tiempo, pero deberá monitorearse periódicamente la disponibilidad en los suelos y analizar cómo la impactan los balances negativos. En la medida en que se acerca a niveles de disponibilidad crítica para los cultivos, los balances deberán ser neutros o positivos. Los balances positivos permitirán recuperar situaciones de baja disponibilidad de nutrientes (Ciampitti, 2009b).

2.2.4 Nutrientes en el sistema

En la utilización de balances aparentes los flujos de nutrientes en el sistema son caracterizados por medio de entradas y salidas del mismo.

2.2.4.1 Entradas

Dentro de los aportes de nutrientes al sistema la fertilización tiene una importancia excluyente siendo la principal vía de ingreso, ya sea a través de fertilizantes químicos como abonos orgánicos (Cano, 2005). Se ha destacado que la aplicación de fertilizantes considerando el balance de nutrientes constituye un pilar fundamental de la agricultura sustentable (Berardo, 2004). La gran mayoría de las fertilizaciones son llevadas a cabo en sistemas de cultivos, pero además se ha constatado un uso significativo de fertilizantes en pasturas en países como Australia y Nueva Zelanda o en Europa Occidental (Sheldrick et al., 2002).

Si bien como ya se ha mencionado anteriormente el aporte de nutrientes de los residuos de cultivos se considera un reciclaje de nutrientes dentro del sistema suelo y por lo tanto no se incluye entre los ingresos (García, 2003), existe la posibilidad de que los residuos que vuelvan al suelo varíen entre las distintas explotaciones, esto se basa en que una proporción de los residuos pueda consumirse como forraje perdiéndose parte de los nutrientes (Sheldrick et al., 2002).

En los sistemas agrícolas donde aparece la producción animal las excreciones de los mismos actúan como entradas de nutrientes al sistema. Obviamente esto puede variar significativamente según el tiempo que los animales estén pastoreando los residuos de los cultivos y qué fracción del residuo es pastoreado (Roy et al., 2003).

Otra vía de entrada de N es la fijación biológica del mismo; las leguminosas son usadas en rotaciones como una vía efectiva de suplementar nitrógeno a través de la fijación simbiótica. A su vez, ocasionalmente en algunos sistemas se incorpora el cultivo secundario al suelo antes del cultivo principal practicando lo que se denomina “abonos verdes” (NLWRA, 2001).

Según expresa Ernst (2004) existe coincidencia entre diferentes autores en relación en la cantidad de N que es posible fijar, estando el mismo directamente relacionado a la producción de materia seca de la leguminosa, las cuales en promedio fijan 30 kg de N por tonelada de materia seca producida. De esta manera, las condiciones climáticas durante el período de crecimiento de las leguminosas son determinantes del N que se logre incorporar al suelo.

2.2.4.2 Salidas

La extracción de nutrientes producida por un cultivo es aquella que corresponde a los elementos contenidos en los granos y que salen del sistema de producción con la cosecha. Los niveles de extracción de un determinado nutriente son variables de acuerdo al cultivo realizado y al rendimiento alcanzado por éste, de manera que la exportación para cada secuencia puede presentar valores muy diferentes. A su vez, cuando en los cultivos se dispone de genética con un potencial productivo creciente, los requerimientos aumentan y el déficit de nutrientes representa un factor cada vez más limitante a la productividad (Forján, 2004).

Estudios realizados en Australia por NLWRA (2001) estiman en lo que se refiere al N que la concentración del mismo en la cosecha de productos agrícolas es aproximadamente la siguiente: lana > granos de leguminosas > granos de oleaginosas > carne > cereales y heno > frutos secos > leche > frutas, vegetales y caña de azúcar. Igualmente se debe tener en cuenta que el N extraído variaría con la productividad alcanzada en cada sistema según sea el uso de la tierra. Las exportaciones de azufre poseen también el mismo orden que el N.

En lo que se refiere al P los mismos estudios de NLWRA (2001) sugieren que el orden en la concentración exportada en productos de origen agrícola es el siguiente: carne > oleaginosas y granos de leguminosas > cereales y heno > frutos secos > leche > frutos, vegetales, lana y caña de azúcar. Al igual que el N lo que egrese del sistema dependerá con la productividad del mismo.

En lo que respecta al K el orden es el siguiente: lana >> heno > granos de leguminosas > frutos secos y oleaginosas > cereales > carne, frutas y vegetales > leche y caña de azúcar (NLWRA, 2001).

El contenido de nutrientes en los residuos de los cultivos es diferente en relación al contenido presente en los granos y convendría ser contabilizado de manera diferente. Por ejemplo, el K en los residuos del cultivo representa más de dos tercios en relación a lo que se exporta de potasio en el grano. La eliminación de los residuos juega un rol importante en los ciclos de los nutrientes. En general, la mayor parte de los residuos de los cultivos retorna al suelo, lo que es conveniente para la sustentabilidad de un sistema agrícola, sobre todo en aquellos lugares donde la fertilización es baja. Sin embargo en varios países a los residuos se le ha dado un uso alternativo como combustible o como forraje; de esta manera los nutrientes logran salir del sistema (Sheldrick et al., 2002).

En un sistema de producción mixto donde aparece además la producción animal también se encuentran dentro de las salidas de nutrientes los productos de origen animal: carne, leche, lana, etc.

2.2.5 Problemáticas con balances positivos y negativos

Las prácticas agrícolas en las cuales existe un alto ingreso de entradas de nutrientes tienen como resultado un balance de nutrientes positivo pudiendo conducir a una contaminación de aguas superficiales y subterráneas, como sucede por ejemplo en Europa. Por otro lado, las prácticas agrícolas donde los ingresos de nutrientes son bajos, el resultado conduce a un agotamiento de las reservas de los nutrientes en el suelo, amenazando seriamente la producción agrícola en el futuro como sucede en varios países de África y Sudamérica (Stoorvogel y Smaling, citados por NLWRA, 2001).

Los análisis de los balances de NPK en Holanda mostraron que el exceso de dichos nutrientes son de importante magnitud (359 kg N, 35 kg P y 70 kg K por hectárea en 1989). Este superávit es el resultado de grandes importaciones de NPK hacia el sistema a través de fertilizantes, además se debe tener en cuenta que las exportaciones de los nutrientes desde el sistema son relativamente pequeñas. Cuando sucede esto, los excedentes de NPK son emitidos hacia el ambiente o acumulados en el suelo. En el largo plazo, la emisión y acumulación puede conducir a indeseables efectos secundarios como acidificación, eutrofización o reducción de la capacidad de producción del sistema agrícola (de Boer, 1997). El uso excesivo de N contribuye a la

acumulación de nitratos en el suelo (Corre y Breimer, citados por Shao-Wen Huang et al., 2007).

Un balance negativo en un suelo de alta fertilidad podría no afectar los rendimientos de los cultivos en el corto plazo, mientras que en un suelo de baja fertilidad el rendimiento de los cultivos disminuiría cada año como resultado del agotamiento de los nutrientes (Roy et al., 2003).

Estudios realizados en Argentina, en la región pampeana han demostrado que al analizar la evolución de la producción de granos y del consumo de fertilizantes en los últimos 50 años se ha observado que con un incremento de sólo 20 a 30% de la superficie agrícola, se ha triplicado la producción de granos. Esto implica que con la tecnología incorporada a la agricultura se ha triplicado también la extracción anual de nutrientes. Si bien en los últimos 15 años el incremento del uso de fertilizantes ha sido considerablemente superior (400 a 500%) al incremento en la producción de granos (120-130%) el balance de nutrientes sigue siendo negativo (Berardo, 2004).

2.3 EXTRACCIÓN DEL SISTEMA POR CULTIVO

La tasa de extracción de nutrientes es variable de acuerdo al cultivo realizado y al rendimiento alcanzado por éste. No debe confundirse la exportación de nutrientes que se realiza con los granos, con las necesidades nutricionales del cultivo. Estas últimas son mayores porque involucran la producción total de la biomasa producida por el cultivo (raíz, tallos, hojas, grano, etc), en tanto que la exportación sólo considera a los nutrientes que se van del campo a través de los granos producidos (Ventimiglia et al., 2000).

Estudios realizados por Berardo (2004) en la región pampeana de Argentina verificaron que en las rotaciones en las que se incluyen el trigo y el maíz, el balance de nutrientes no es tan negativo ya que se repone en general entre el 70 y 80% del N y del P exportado por el grano debido a una mejora en las fertilizaciones de los cultivos de trigo y maíz. Sin embargo no sucede lo mismo cuando los cultivos en cuestión son la soja y el girasol, dado que en las rotaciones donde predominan las oleaginosas (principalmente la soja) el balance de nutrientes es altamente negativo, por ser muy escaso el agregado de fertilizantes. Aún, en el mejor de los casos, con una fijación del 50-60% del N requerido, en toda la región la soja ocasiona un balance negativo. La magnitud

de tal pérdida de N se explica, además, por el tipo de rastrojo de rápida mineralización, explicando la mayor disminución de la MO en los sistemas donde predomina la soja. Asimismo, los altos requerimientos y exportación de P, de S y también de K de esta oleaginosa, son la causa principal del acelerado empobrecimiento de los suelos, en la medida que va desplazando a las gramíneas dentro de la rotación implicando que no se realice una fertilización adecuada.

El proceso de extracción de nutrientes de los suelos junto con la pérdida de MO se ha incrementado con la expansión de la soja debido a los altos requerimientos de nutrientes, baja cantidad de residuos y a la escasa fertilización que recibe esta leguminosa (Berardo, citado por Darwich, 2003). Se observó claramente que la soja es el cultivo que mayor desbalance de N produce lo cual se explica por presentar un elevado porcentaje de proteína en los granos y recibir un bajo aporte de fertilizante nitrogenado. Este balance negativo de N para la soja se da aun considerando la fijación biológica (González, citado por Forján, 2004).

A veces, los cultivos que menos responden a los fertilizantes son los de más altos requerimientos, ya que la naturaleza los ha dotado de mecanismos que le permiten utilizar al máximo los nutrientes del suelo. La soja es un cultivo que manifiesta esta ventaja adaptativa pero que empobrece el suelo (Berardo, 2004).

La concentración de nutrientes o los requerimientos por unidad de producción son mayores en las oleaginosas que en las gramíneas. A modo de ejemplo, en el Cuadro 2 se indican los valores promedio o más frecuentes de concentración de macronutrientes en grano y en forraje, obtenidos en numerosos ensayos realizados dentro de la región Pampeana por distintos grupos del INTA, grupos CREA y AAPRESID (Berardo, 2004).

La concentración de la mayoría de los nutrientes en los granos se incrementa progresivamente como se indica en el Cuadro 2, asociado a un mayor contenido de proteína en los granos, siendo el menor para maíz y progresivamente con mayores valores para trigo, para girasol y para soja. Por tal razón, en relación a los cereales, el grano de soja puede contener hasta el doble de concentración de P, el triple de S y una relación aún mayor de K (Berardo, 2004).

Cuadro 2: Concentración de nutrientes en granos de maíz, trigo, girasol, soja y forraje (a) y extracción por tonelada de producción (b).

		N	P	K	S
Maíz	Concentración	1,0 – 1,5	0,25 – 0,3	0,5	0,08 – 0,12
	Extracción	10 – 12	2,5	5	1
Trigo	Concentración	1,8 – 2,5	0,3 – 0,4	0,5	0,8 – 0,15
	Extracción	20 – 22	3,5	5	1,2
Girasol	Concentración	2,5 – 3,0	0,4 – 0,5	0,8 – 1	0,15 – 0,2
	Extracción	25 – 30	4,5	1	2
Soja	Concentración	5,5 – 6	0,4 – 0,6	1,8 - 2	0,25 – 0,35
	Extracción	30*	5	20	3
Pastura °	Concentración	2,5 – 3	0,2 – 0,3	2	0,18 – 0,2
	Extracción	25 - 30	2,5	2	2

Fuente: Berardo (2004).

a) Concentración: en %

b) Extracción: en kg

* Considerando una fijación biológica de N de más del 50%.

° Pastura coasociada con alfalfa para corte

Casas y Cruzarte (2009) consideran que bajo las condiciones en las cuales se realiza la agricultura en Argentina, existe en términos generales un balance negativo de los nutrientes del suelo debido a las bajas tasas de reposición, lo cual determina un creciente empobrecimiento en nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre y boro. A su vez, el germoplasma y las tecnologías empleadas en la agricultura moderna tienden a aumentar la producción, incrementando continuamente los rendimientos de los cultivos y con esto la extracción de los nutrientes.

Según expresa García (2007) para la situación argentina, a pesar del notable aumento en el consumo de fertilizantes, el mismo no ha permitido mejorar los balances de nutrientes como nitrógeno, fósforo, potasio y azufre (Figura 2). La estimación de extracción en grano y la aplicación de N, P, K y S en los cuatro principales cultivos de grano indicaron que, para la zafra 2005/06, se repuso vía fertilización el 27% del N, 43% del P, menos del 1% del K y el 21% del S, extraídos en los granos, cifras similares a las que se han observado en los últimos 5-6 años.

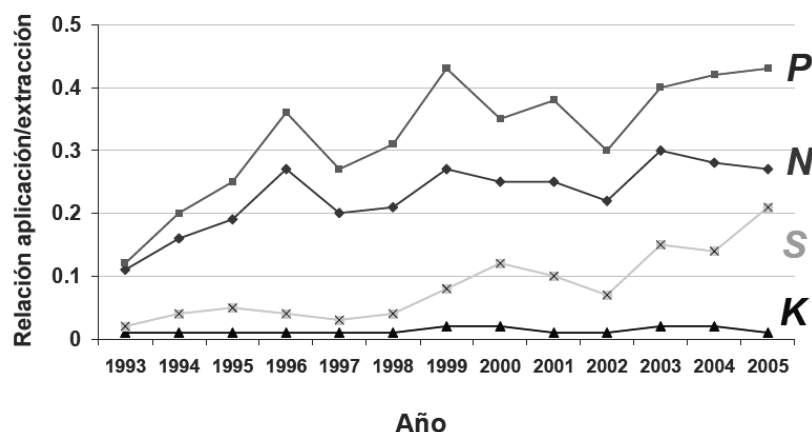


Figura 2: Relación aplicación/extracción de N, P, K y S para cultivos de grano en Argentina en el período 1993-2005. Fuente: García (2007)

En un estudio realizado por Cano et al. (2006) para Uruguay demostraron que el balance aparente promedio anual de las rotaciones en estudio es de 0,37 kg P/ha/año, con una reposición del P extraído en grano del 102%. De todos modos, dejando de lado el promedio obtenido, se constató la existencia de grupos de chacras con balances positivos de más de 4 kg P/ha/año y otras con valores negativos del entorno de los 9 kg P/ha/año. En general, dichos datos mostrarían un balance aparente de P que se podría clasificar como neutro o levemente positivo, esto estaría marcando una realidad diferente respecto a la que se presenta en Argentina en donde la reposición de P vía fertilizante se encuentra en torno al 50% (Martellotto et al. 2003, García 2007).

2.4 EFECTO DE LAS ROTACIONES: INCLUSIÓN DE LAS PASTURAS

Como se menciona en diversos artículos, es un hecho conocido que la calidad del suelo y la producción de los cultivos se recupera luego de un período de implementación de pasturas de leguminosas y gramíneas. Muchos estudios han señalado que el carbono orgánico del suelo disminuye con la agricultura continua y el laboreo convencional, y se incrementa luego de un período de pasturas. La estabilidad de los agregados del suelo se incrementa luego de una inclusión de pasturas en rotación con cultivos, debido a la combinación de dos efectos: a) el laboreo no es usado durante el ciclo de pasturas y b) la densidad de los sistemas radiculares de las gramíneas promueven la agregación del suelo. Estos efectos se pierden cuando el suelo es nuevamente laboreado (García Préchac, 2004a). Por lo tanto, la

combinación del uso de rotaciones con la inclusión de pasturas y el no-laboreo podría resultar en una producción más sustentable (García Préchac et al., 2004b).

Entre las ventajas que se le atribuyen a la incorporación de pasturas a la rotación García Préchac (2004a) establece las siguientes: 1) la degradación del suelo generada por ciclos de cultivos continuos con laboreo, conducente a pérdida de productividad, es revertida por un período bajo pasturas mixtas; 2) la productividad de los cultivos siguientes a las pasturas de la rotación es mayor y menos variable que bajo cultivo continuo con laboreo, lo que no solamente se debe a mejor calidad del suelo, sino también a que las pasturas plurianuales contribuyen a interrumpir ciclos anuales de malezas, plagas y enfermedades de los cultivos de grano; 3) en dichos cultivos se reduce significativamente la necesidad de fertilización nitrogenada; 4) se agrega producción animal a la producción de granos, diversificando el sistema; esto le otorga mayor poder amortiguador frente a variaciones climáticas y económicas interanuales. Además, asumiendo que las pasturas ocupan aproximadamente la mitad del tiempo, la utilización de agroquímicos y combustibles fósiles es al menos 50% inferior en estas rotaciones, puesto que no son usados significativamente en las pasturas y tampoco durante su uso ganadero.

La rotación cultivos-pasturas con laboreo ha determinado mejoras en rendimiento en grano y disminución de su variabilidad anual. El efecto positivo se atribuye a distintas causas, dentro de las cuales se encuentran: mayor aporte de N, mejora en la condición física del suelo y menores problemas sanitarios (Ernst y Siri, 2010). Según explica Morón (2004) el desarrollo de la agricultura convencional ha conducido a un deterioro de la calidad del suelo y por ende de su capacidad productiva dado fundamentalmente por procesos erosivos y balances negativos de carbono, N y P. La reciente incorporación de la siembra directa con el no movimiento del suelo y la colocación de rastrojos en superficie así como la intensificación agrícola con la exclusión de las pasturas en la rotación y el predominio de la soja plantea nuevas interrogantes sobre la evolución del recurso natural suelo de nuestra región.

Ernst (2004) establece que la implementación de rotaciones de cultivos y pasturas, la reducción y posterior eliminación del laboreo han permitido iniciar un proceso de recuperación de la fertilidad del suelo determinado por aumentos en la producción, reducción de las pérdidas de suelo por erosión y menor oxidación de la MO.

García (2007) manifiesta que el mantenimiento de la MO del suelo no depende solamente de la adopción de sistemas de siembra directa. Varios estudios han demostrado cómo la rotación de cultivos puede aumentar los niveles de la MO de suelo o retardar la declinación a través de un mayor aporte de carbono, vía residuos de cultivos. Asimismo, el autor publica que la rotación de cultivos anuales podría ser una alternativa viable para incorporar residuos en mayor cantidad y calidad, raíces de distinta arquitectura y actividad biológica y coberturas de suelo que reduzcan los impactos erosivos del agua y el viento. Morón (2004) también menciona que existiría una diferencia cuantitativa importante entre los cultivos en cuanto cantidad y calidad de materia seca, siendo el maíz el cultivo con mayor aporte y la soja el menor aporte. Paralelamente, la relación C/N más alta la tiene el rastrojo de maíz lo que determinaría una descomposición más lenta y lo que generaría que sea más favorable para la formación de MO estabilizada en el suelo. La soja por el contrario estaría en la situación inversa.

Havlin et al. (1990) mencionan las ventajas de incluir maíz o sorgo en las rotaciones agrícolas en sustitución del cultivo de soja, demostrando que existe un incremento el carbono orgánico y N en los sistemas sin laboreo comparado con los que incorporan laboreo, además registra el mismo efecto con rotaciones de sorgo comparado con las de soja, relacionándose directamente a la cantidad de residuos (sorgo/sorgo > sorgo/soja > soja/soja). Las rotaciones que incluyen alta producción de residuos y su mantenimiento sobre la superficie en sistemas sin laboreo traen como consecuencia el incremento de carbono orgánico y N.

El efecto de la inclusión de pasturas de gramíneas perennes y leguminosas en una rotación con los cultivos es definido como positivo en el balance y dinámica del C y el N del suelo. Dentro de las secuencias de rotaciones de cultivos sin incluir pasturas, la soja presenta efectos negativos que pueden ser compensados por el planteamiento de secuencias en las cuales parte de la soja sea sustituida por maíz o sorgo (Morón, 2004).

2.5 NUTRIENTES DEL SISTEMA Y SUS DINAMICAS

2.5.1 Nitrógeno

De todos los elementos químicos esenciales, el N es el nutriente que tiene efectos más espectaculares sobre el crecimiento de la planta (Perdomo y

Barbazán, 1999) y suele ser uno de los factores limitantes de producción de los cultivos a nivel nacional.

Considerado como un macronutriente esencial, el N cumple funciones vitales dentro de los seres vivos, jugando un rol esencial en el crecimiento del vegetal, ya que es constituyente de moléculas como: i) clorofila; ii) aminoácidos esenciales; iii) proteínas; iv) enzimas; v) nucleoproteínas; vi) hormonas; vii) trifosfato de adenosina (ATP). Además, el N es esencial en muchos procesos metabólicos, como por ejemplo, la utilización de los carbohidratos.

Según Perdomo y Barbazán (1999) aproximadamente el 98% del N presente en el suelo se encuentra formando compuestos orgánicos, por lo que dependiendo de su contenido de MO, los primeros 20 centímetros de profundidad de un suelo pueden contener entre 1.000 y 10.000 kg de N por hectárea. Sin embargo, las plantas pueden absorber únicamente el N inorgánico que representa un 2% del N total del suelo, encontrándose en formas de nitrato, amonio y nitrito. Estas formas inorgánicas presentan baja estabilidad en el suelo, por lo cual las cantidades de N inorgánico del suelo son extremadamente variables, pudiendo existir desde unos pocos gramos hasta más de 100 kg por ha de N.

2.5.1.1 Dinámica de N en el suelo

A diferencia del P y K, la dinámica del N en el suelo no está regulada por un equilibrio químico, sino principalmente por procesos biológicos, derivados de la actividad microbiana del suelo que afectan sobre todo a las formas minerales y a las formas orgánicas de reserva (Perdomo y Barbazán, 1999).

Los procesos biológicos de mineralización e inmovilización se dan en forma simultánea, regulando el pasaje de N orgánico a inorgánico y viceversa, dando como resultado un efecto neto de mineralización o inmovilización del N del suelo. Las tasas de dichos procesos se ven afectadas por la temperatura, humedad, alternancia de secado y humedecimiento del suelo, pH, etc. pero el resultado neto de ambos procesos es afectado principalmente por las características del material en descomposición, en especial por la relación C/N del mismo. En tanto, las transformaciones de las distintas formas de N inorgánico se dan por procesos biológicos como la nitrificación (amonio a nitrito y luego a nitrato) y desnitrificación (reducción de nitrito y nitrato a las formas

gaseosas de óxido nitroso y gas nitrógeno) y el proceso abiótico de volatilización (pasaje de amonio a amoníaco en condiciones alcalinas).

2.5.1.2 Variaciones del contenido de N: flujos de entradas y salidas

Dentro del sistema suelo se reconocen como principales mecanismos de ganancia de N el ingreso de N con las lluvias, la fijación simbiótica y no simbiótica de N, el aporte de fertilizantes nitrogenados y abonos orgánicos y el N aportado por los procesos de mineralización de restos vegetales y animales. Las salidas por su lado se dan principalmente por la extracción por parte de los cultivos, lixiviación, erosión, desnitrificación y volatilización. Los cambios en el contenido de N del suelo bajo un sistema de producción y manejo definido será consecuencia de la interacción de estos procesos de pérdida y ganancia.

Morón (2003) toma las variaciones de N total (básicamente N orgánico) como el resultado de un balance entre entradas, fundamentalmente fertilizante y fijación biológica de nitrógeno (FBN) y salidas como la erosión de la MO, la lixiviación de nitratos, la volatilización del amonio, la desnitrificación y el retiro de productos vegetales y/o animales. Por su parte, Sawchik (2001) considera dentro de las entradas no solo la FBN y los fertilizantes sino también los aportes por parte de los residuos de los cultivos previos.

En base a su distribución entre las distintas formas, se puede inferir la estrecha relación entre el N total en el suelo con el pool de N orgánico y de este con el contenido de MO del mismo. En tal sentido, Díaz Rosello (1992) señala que para ensayos de largo plazo en La Estanzuela la evolución del N total del suelo presentó un paralelismo con lo sucedido con la MO, ya que salvo el escaso N mineral que haya en el suelo el resto se asocia a la MO.

2.5.1.3 Efecto del manejo sobre N del suelo

El manejo del suelo con laboreo convencional (LC) o siembra directa (SD) afecta la relación de entradas y salidas de N de distintas formas (Perdomo y Barbazán, 1999). La roturación del suelo en el laboreo aumenta la superficie específica del suelo, la exposición de la MO lábil del suelo, la aireación y el contacto suelo-rastrojo, por lo que se favorece la actividad microbiana del suelo aumentando principalmente la mineralización. Esto resulta en un aumento del N

inorgánico, lo cual si bien favorece la nutrición de los cultivos, expone parte del N a los procesos de lixiviación, volatilización y desnitrificación y puede resultar en un aumento de la proporción de N extraído en grano proveniente del suelo. A dichos procesos debe agregarse un aumento en el riesgo de erosión del suelo lo que ocasiona la pérdida preferencial de los primeros cm del suelo que suelen ser las fracciones más ricas en N y MO.

Por su parte, según Bordoli (2001) con la incorporación de SD se ha reportado que los suelos se presentan más fríos, más húmedos, menos aireados y más densos que bajo LC. Esto reduce la mineralización de la MO del suelo y la no incorporación de residuos enlentece la descomposición y mineralización de los mismos, por lo que una menor proporción del N del suelo se encuentra como N inorgánico más susceptible a perderse. Por otra parte, el incremento de macroporos, la mayor humedad e infiltración del suelo y la forma de aplicación de fertilizantes en superficie potencia las vías de pérdidas del mismo por lixiviación, volatilización y desnitrificación.

Según Perdomo y Barbazán (1999) en Uruguay, trabajos realizados desde 1963 en la Estación Experimental La Estanzuela han comprobado el efecto positivo de la inclusión de pasturas sobre el contenido de N en relación a suelos bajo cultivo continuo con LC.

Díaz Rosello (1992) reporta para dicho experimento a largo plazo con LC que luego de 28 años se verificó una pérdida de N total de $64,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para rotaciones de agricultura continua sin fertilización(S1), $47,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para agricultura continua con fertilización(S2), $20,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en rotaciones mixtas con 50% del tiempo bajo pasturas plurianuales(S5) y $7,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en rotaciones mixtas de agricultura con inclusión de pasturas de trébol rojo durante el 33% del tiempo(S7). A su vez se observó una caída constante en las secuencias de AC (Figura 3), mientras que en rotación con pasturas se observó un comportamiento cíclico del N total, aumentando durante las fases de pasturas pero con disminuciones durante la etapa de cultivos posterior. En base a dicho comportamiento el autor estima (para el tratamiento bajo el 50% del tiempo en pasturas) un ingreso promedio de 500 kg de N/ha (en los 20 cm de capa arable) durante cada fase de pasturas y una pérdida promedio de 650 kg de N/ha durante la fase agrícola. Cabe resaltar que en dicho experimento la erosión hídrica presumiblemente sea una vía de pérdida significativa (Sawchik, 2001) y las pasturas luego de evaluadas son cortadas y devueltas al suelo por lo que tanto las pérdidas de N como el aporte por parte de las pasturas podrían encontrarse sobreestimadas. A su vez para la rotación con pasturas de trébol

rojo las pérdidas pueden haber sido menores debido a que la pastura siempre se sembró en forma asociada a los cultivos de invierno, lo que reduce las pérdidas por erosión.

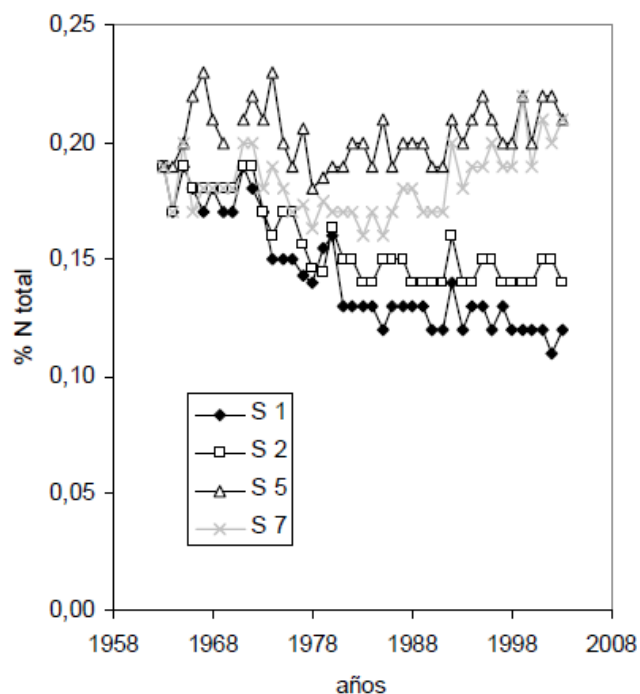


Figura 3: Evolución del contenido de nitrógeno total del suelo en diferentes rotaciones en INIA La Estanzuela (1963-2003), Uruguay (Morón, 2003).

Por su parte, Quinke et al. (2010) en un ensayo de largo plazo en INIA La Estanzuela contrastando sistemas de AC y rotación cultivo pasturas bajo SD y LC observaron que de 0-7,5 cm la inclusión de pasturas en la rotación significó un aumento del N total de 17,6% y 25% para manejo de laboreo y SD respectivamente y que el aumento debido al uso de SD fue de 17,6% para AC y 25% para rotación cultivos pasturas. Cabe destacar que únicamente se encontraron diferencias significativas en el contenido total de N de 0-7,5 cm a favor del tratamiento bajo SD con rotación cultivos-pasturas y que en el estrato de 7,5-15 cm no se encontraron diferencias.

Fabrizzi et al., citados por Morón (2004) reportaron el efecto del tipo de labranza y de la fertilización nitrogenada (0 y 120 kg N-urea/ha) en la calidad del suelo para un ensayo de larga duración con una rotación de AC con cuatro repeticiones en el INTA-FCA Balcarce (instalado en un suelo con 25 años de historia agrícola bajo LC). Para el estrato de 0-7,5 cm luego de 8 años de agricultura los contenidos de N total fueron mayores en SD que en labranza

convencional, presentando los mayores valores en SD con fertilización (0,248%N), seguido por SD sin fertilización (0,235%N), LC con fertilización (0,212%N) y por ultimo LC sin fertilización (0,212). Sin embargo para el estrato de 7,5-15 cm no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, lo que fue calificado como un efecto de la SD en la distribución vertical del carbono y nitrógeno a favor de los primeros centímetros del suelo.

Abril et al. (2005) para un ensayo realizado en la EEA INTA Manfredi evaluaron la evolución del contenido de N total en los primeros 10 cm de suelo para monocultivo de soja y rotaciones soja-maíz bajo laboreo conservacionista, SD con barbecho químico durante invierno y SD con cobertura de avena. Luego de 5 años de ensayo para monocultivo de soja el tratamiento bajo SD con cobertura invernal registro un incremento significativo del N total (0,16%) frente al testigo de laboreo conservacionista (0,13%) y el tratamiento de barbecho químico (0,14%); mientras que para la rotación maíz-soja ambos tratamientos bajo SD presentaron diferencias significativas de aumento de N total (0,22% para barbecho químico y 0,23% con coberturas) en contraste con el tratamiento laboreado (0,20%). A los 10 años de iniciado el experimento se confirma el aumento del N total bajo SD, observándose diferencias significativas de estas contra LC para ambas rotaciones. Los valores de N total para el monocultivo de soja fueron de 0,15% para barbecho químico, 0,16% con cultivo de cobertura y 0,13% para LC; mientras que para la rotación soja-maíz se encontraron valores de 0,19% para tratamiento con cobertura invernal, 0,18% cuando contó con barbecho químico y 0,14% bajo LC.

Ernst y Siri (2010) presentando información basada en un experimento a largo plazo realizado en la EEMAC donde se evalúa el impacto de la inclusión de pasturas (agricultura continua: AC y rotación con pasturas: ROT) y del tipo de laboreo (LC y NL) en algunas características del suelo reportan diferencias de N total en el suelo y N como contenido en los primeros 18 cm mostrando ventajas para todos los tratamientos contra AC-LC. Para este último el descenso luego de 12 años de agricultura fue de 520 kg N/ha (43 kg/año), lo que se confirma los resultados de la estimación del balance aparente, donde se observó un descenso de casi 550 kg N/ha. Si bien no se detectaron diferencias significativas para el tratamiento AC-NL con pérdidas de aproximadamente 300 kg/ha los autores concluyen que se observó una tendencia generada en tan solo 12 años, por lo que se requerirán mayores niveles de fertilización para mantener los niveles de suficiencia de N.

2.5.1.4 Balance aparente

Como se mencionó anteriormente, en la realización de balances aparentes se consideran como entradas de N al sistema el N aportado por las fertilizaciones y el N incorporado por medio de la fijación biológica de nitrógeno de las leguminosas y como salidas únicamente el N extraído en grano. Si bien el resultado es un valor estimado por un modelo simplificado de la realidad, el resultado del mismo puede dar una idea de cómo va a evolucionar la disponibilidad de nutrientes del suelo.

Forján (2004) presenta los resultados del balance aparente de 6 rotaciones bajo labranzas realizado en la Chacra Experimental Integrada Barrow en Argentina. Luego de 10 años de ensayo se presentaron los siguientes datos:

Cuadro 3: Balance de N para distintas secuencias en un período de 10 años.

Secuencia	N
T/M	7,36
T/G	-128,98
T/S	-210,93
T/T/G	-52,07
T/M/S	-208,33
T/M/G	-156,9

Fuente: Forján (2004).

Luego se presentaron los datos de balance de N promedio para cada cultivo por año, quedando en claro que para este ensayo la soja con un balance de -49,08 kgN/ha/cultivo era el cultivo que más desbalanceaba el balance de la rotación, seguida por el girasol con -35,09 kgN/ha/cultivo, el maíz con -23,92 kgN/ha/cultivo y por último el trigo con un balance aparente positivo de 10,8 kgN/ha/cultivo.

Darwich (2003) estimando balances aparentes por cultivo en la región pampeana de Argentina encuentra también en la soja el mayor desbalance, con un saldo de -105 kg N/ha, seguida por el maíz con -50 kgN/ha, luego girasol con -38 kgN/ha y finalmente trigo con -25 kgN/ha.

2.5.2 Fósforo

El P junto con el N son los dos nutrientes que con mayor frecuencia afectan la producción de los cultivos y de las praderas (Berardo, 2004). El P es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Junto al N y el K, conforma el grupo de macro nutrientes por las cantidades requeridas por los cultivos y por la frecuencia en que se encuentran en cantidades limitantes (Cano, 2005).

Es posible separar al P del suelo en tres pools: el P presente en la solución del suelo, el P presente bajo forma de compuestos inorgánicos; y el P presente en materiales orgánicos y humus del suelo (Hernández, 1999). La mayoría de los estudios que se han llevado a cabo hasta el momento centran su atención en la fracción inorgánica, debido a que es principalmente bajo esta forma que las plantas toman el P presente en el suelo (Abella y Nin, 2003).

La fracción orgánica se halla principalmente en tres fracciones: 1) humus del suelo; 2) restos frescos de cultivos no humificados y excreciones de origen animal; 3) biomasa microbiana del suelo, donde forma parte de las estructuras de los microorganismos del suelo (Hernández, 1999). Dentro de la fracción inorgánica, los tipos de compuestos presentes pueden variar según las características de los suelos, tales como el material generador de los mismos y las condiciones de meteorización (Hernández et al., 1995). Es posible hallar en numerosas combinaciones con hierro, aluminio, calcio, flúor y otros elementos (Abella y Nin, 2003), así como con minerales arcillosos de tipo 1:1 o 2:1 (Morón, 1992a).

Los contenidos de P total dependen de la naturaleza del material madre, el grado de meteorización, la ocurrencia de lavado y los efectos antrópicos del cultivo (extracción por cosechas, aplicación de abonos y fertilizantes). Los suelos bajo cultivo pierden P a través de la remoción en los productos de cosecha (granos, frutos, forrajes) y, eventualmente, por erosión. Los primeros efectos se ven en las caídas del P orgánico, ya que la MO disminuye rápidamente cuando los suelos se cultivan: un 1% de pérdida de MO puede representar una pérdida de 80-120 kg/ha de P de la capa superficial (Ciampitti, 2009).

Haciendo referencia a la caracterización del contenido de fósforo para los suelos del Uruguay se cita el estudio de Hernández et al. (1995), donde fue estudiado 31 muestras de los 15 primeros centímetros del horizonte A de distintos suelos del Uruguay. El contenido total de P osciló entre 126 y 887 mg P kg⁻¹, con un promedio de 321 mg P kg⁻¹. No teniendo en cuenta el valor extremo de 887 mg P kg⁻¹, el valor más alto encontrado corresponde a 536 mg P kg⁻¹, y el valor promedio para los 30 suelos fue 302 mg P kg⁻¹. Los contenidos guardan relación con el material de origen de los suelos. Los contenidos más altos están asociados a suelos desarrollados a partir de sedimentos cuaternarios con influencia de la alteración de basalto, y sedimentos limo arcillosos de la Formación Fray Bentos. La textura de los suelos formados a partir de estos materiales es pesada, y presenta también altos contenidos de MO.

Las plantas absorben el P desde la fracción soluble en el suelo, la que a su vez es reabastecida por una fracción lábil de naturaleza orgánica e inorgánica. Esta fracción de P lábil esta en equilibrio con fracciones moderadamente lábiles y de muy baja labilidad. Dada la baja concentración de fósforo soluble, el abastecimiento de P desde la fracción lábil es de extrema importancia para garantizar un adecuado suministro de P a las plantas (Ciampitti, 2009). El P presente en la solución del suelo se encuentra bajo diferentes formas iónicas derivadas del ácido fosfórico. La forma predominante presente en la solución dependerá del pH de la misma (Hernández, 1999).

Desde el punto de vista de la disponibilidad de las plantas se entiende por un planeamiento de equilibrios químicos inorgánicos entre las fases de P en solución, lábil y no lábil (Larsen, citado por Morón, 1992a). Se entiende por lábil a la fracción de P inorgánico en la fase sólida capaz de reponer el P presente en la solución del suelo, en la medida que disminuye su valor en el mismo. La absorción por parte de las raíces de las plantas quienes disminuyen constantemente la concentración de P en el suelo con respecto al valor de equilibrio (Morón, 1992a). Si bien las plantas absorben P inorgánico, existen numerosos trabajos que indican la importancia del P orgánico como un reservorio de P disponible para las plantas (Stewart y Tiessen, citados por Suñer et al., 2005).

En cuanto a la evolución del P disponible medido como Bray 1 según el uso del suelo, Morón y Kehlz (1992) reportan el efecto de la agricultura continua sin fertilización (Sistema1), agricultura continua con fertilización (Sistema 2) y rotación pastura-cultivos (50/50) con fertilización en ambas fases (Sistema 5) para un ensayo ubicado en INIA la Estanzuela desde 1963 bajo alboreo

convencional (Figura4). Se observó que los sistemas que incluían fertilización lograron mantener o incluso elevar los niveles de P disponible en el suelo, mientras que el sistema de agricultura continúa sin fertilización mostró un descenso en los niveles de P disponible.

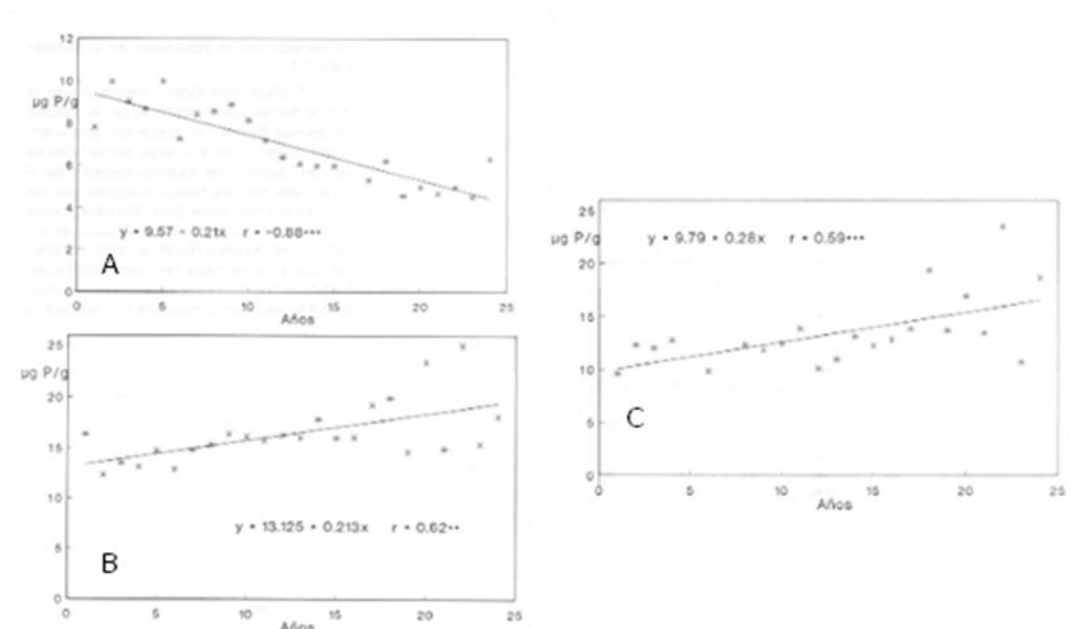


Figura4: Evolución de la concentración de P disponible Bray I en diferentes rotaciones en INIA La Estanzuela (1964-1987), Uruguay. Sistemas 1 (A), 2(B) y 5(C) (Morón y Kehlz, 1992).

2.5.2.1 Flujos de fósforo en el sistema

Dentro de los aportes de P al sistema, la fertilización tiene una importancia excluyente, siendo la principal vía de ingreso, ya sea a través de fertilizantes químicos como abonos orgánicos.

En un ensayo realizado por Morón y Pérez (1981) en el que se aplicaron distintos niveles de fertilización fosfatada en la etapa agrícola para posteriormente ver su efecto residual en la etapa de pastura, se observó que de acuerdo a la fertilización realizada durante la etapa agrícola se llega a la implantación de la pastura con distintos niveles de P disponibles estimados por el método Bray 1. Los mayores valores correspondieron a las mayores fertilizaciones en la etapa agrícola. Posteriormente durante la fase de pasturas

se observó que las pérdidas en fertilidad en términos absolutos fueron decrecientes con los años, es decir que las mayores pérdidas son al principio. Además cuanto mayor fue el nivel del cual se partió mayores fueron las pérdidas. Se constató que a medida que transcurren los años de pastura el suelo tiende a volver a valores similares al valor natural del mismo. Se estableció una tasa de descenso anual de P disponible de 28 por ciento. Si bien la tasa en porcentaje es constante, esta se aplica a cantidades cada vez menores a medida que pasa el tiempo, por lo que la tasa de pérdida de fertilidad residual desciende.

Se debe tener en cuenta que la variabilidad de retención y retrogradación de P en los suelos se encuentra afectada por el tipo de suelo. Las situaciones más extremas son: en cuanto a la alta fijación por ejemplo luvisoles del Cristalino y suelos sobre Basalto y baja fijación en suelos arenosos o fuertemente desferrificados (Solods y algunos Planosoles ócricos) (Zamalde, 1992).

La salida de P del sistema está relacionada mayoritariamente a la exportación vía cosecha de los cultivos, la absorción del fósforo dependería principalmente, del grado en que las raíces de los cultivos exploran los diferentes dominios del suelo, en tiempo y espacio (Barber, citado por Ciampitti, 2009b). Según indica el mismo autor el P exportado mediante el grano y/o forraje está directamente relacionado con la frecuencia de cultivos y las dosis de fertilizante fosfatado aplicado.

Otras vías de salidas serían las pérdidas generadas por la erosión y lixiviación. Los procesos de inmovilización, precipitación y adsorción no son considerados como salidas, ya que si bien afectan la disponibilidad del P, este se mantiene en el sistema. Aquellos sistemas que además de grano retiran rastrojos ya sea por medio de silos de planta entera, fardos, etc, son aún más extractivos. La erosión hídrica de suelos es una importante vía de pérdida de P en muchos sistemas agrícolas; la magnitud de este flujo depende de varios factores, como ser régimen hídrico, topografía, textura del suelo, estabilidad estructural, sistema de laboreo, cobertura del suelo, entre otros. En cuanto a las posibilidades de lixiviación del P, estas son bajas, ya que la escasa solubilidad de las sales fosfatadas determina una baja concentración del elemento en la solución del suelo (Cano, 2005).

2.5.2.2 Balance de fósforo

Evaluaciones realizadas por Cano et al. (2006) para Uruguay demostraron que el balance aparente promedio anual de las rotaciones estudiadas (secuencias continuas en agricultura de secano de al menos 5 cultivos) fueron de $0,37 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mostrando un balance aparente de fósforo que se podría clasificar como neutro. Además, se indica que los cultivos de maíz, soja y sorgo son quienes exportan más P en el grano. A su vez, revela que el sorgo y la soja son los cultivos menos fertilizados, esto estaría asociado a que son sembrados generalmente como cultivos de segunda, habiendo productores que optan por no fertilizar o hacerlo con una menor cantidad de fertilizante al recomendado. Por otra parte, el maíz si bien es el que más P exporta, es también quien más fertilizante recibe.

Otro aspecto a tener en cuenta es el rendimiento del cultivo ya que el mismo tiene una alta relación en lo que se refiere a la salida de P en grano, esto implica que por ejemplo el maíz exporte casi el triple de P en grano que el girasol, a pesar de que este último tenga un mayor % P. A su vez, la concentración de P en grano es también muy importante, por ejemplo en la soja y la cebada, donde los rendimientos promedio son similares, la primera exporta más del doble de P en grano que la segunda por tener un mayor % P en grano. Los cultivos de invierno y el girasol son los que exportan menos P en grano. A su vez, la fertilización que reciben está dentro de los niveles promedio, lo que lleva a que tengan balances aparentes positivos (Figura 5).

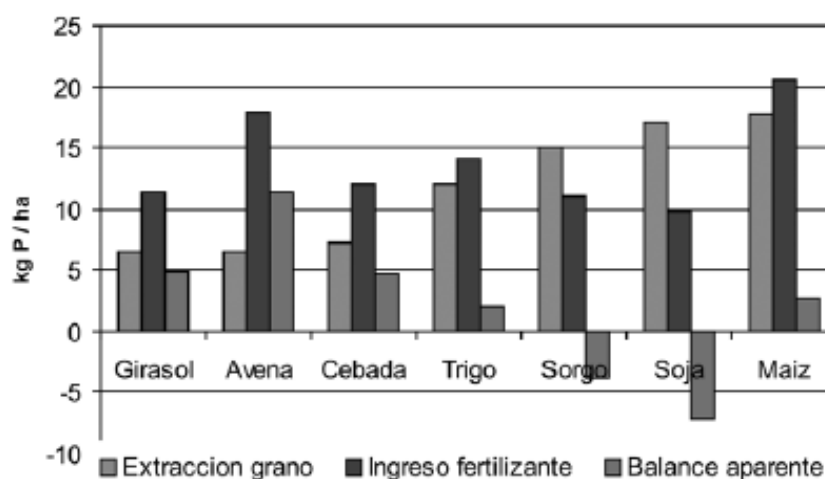


Figura 5: Extracción, ingreso y balance aparente promedio de P (kg/ha) para los distintos cultivos. Fuente: Cano et al. (2006).

2.5.3 Potasio

El K es un elemento nutritivo esencial cumpliendo un rol importante en la activación de un número de enzimas que actúan en diversos procesos metabólicos tales como fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos; también tiene incidencia en el balance de agua y en el crecimiento meristemático (Mengel y Kirby, citados por Conti, 2000).

Desde el punto de vista de su asimilabilidad para las plantas, el K en los suelos se ha clasificado en cuatro categorías. En orden creciente de su asimilabilidad, las formas y contenidos respectivos de K son los siguientes: mineral (estructural), no intercambiable (fijado o lentamente asimilable), intercambiable y en solución. Existe un equilibrio entre las diferentes formas de K en el suelo. El equilibrio entre las formas intercambiables y en solución es rápido, mientras que entre estas formas y el K fijado, el equilibrio es muy lento. La transferencia de K de las formas minerales (estructurales) hacia las otras formas es extremadamente lento en la mayoría de los suelos, y en consecuencia se las considera no asimilables para las plantas (Hernández, 1992).

Las plantas obtienen el K del suelo que proviene de la meteorización de los minerales, de la mineralización de los residuos orgánicos o el que proviene de los abonos y fertilizantes. Los procesos pedogenéticos actúan sobre los materiales presentes en el suelo y producen en mayor o menor medida la disponibilidad del nutriente (Conti, 2000).

Según un ensayo realizado por Casanova et al. (1988) sobre trece suelos del Uruguay el contenido de K total osciló entre 0,06 y 0,69% con un promedio de 0,27%. En el mismo se observaron niveles de K intercambiable que variaron entre 0,11 y 1,5 meq/100g, siendo en promedio esta fracción el 6,3% del K total. En dicho ensayo también se encontró una estrecha relación entre la fracción K total con K intercambiable y con K no intercambiable del suelo.

2.5.3.1 Potasio en la solución de suelo

El K es absorbido por las plantas fundamentalmente bajo formas de ión K^+ de la solución del suelo. La concentración de K en solución requerida para las

plantas es variable, se indica que el nivel óptimo de K en la solución del suelo oscila entre 20 y 60 ppm, dependiendo de la naturaleza del cultivo, estructura, nivel de fertilidad y suministro de agua (Hernández, 1992).

2.5.3.2 El Potasio intercambiable

Es la forma iónica del K unido electrostáticamente a los materiales que componen la fase sólida coloidal mineral y orgánica. A medida que la concentración del K de la solución desciende, el K adsorbido disminuye porque es liberado a la solución del suelo. A la inversa, si la concentración de K de la solución del suelo aumenta por la aplicación de fertilizantes potásicos, parte de éste dejará la solución y se unirá electrostáticamente al material coloidal de la fase sólida (Conti, 2000).

2.5.3.3. Potasio no intercambiable y en minerales

El K remanente generalmente está referido a dos formas: no intercambiable y de reserva o en minerales. En algunos suelos el K no intercambiable puede llegar a ser asimilable en la medida que el K intercambiable y en solución sea removido por cultivo o perdido por el lavado (Hernández, 1992).

La reserva de K intercambiable y no intercambiable depende fundamentalmente de la cantidad y calidad de arcillas presentes en el suelo. La fuerza de retención varía con el tipo de arcilla y la posición del ión en la misma (Conti, 2000).

2.5.3.4 Flujos de potasio en el sistema

Una agricultura intensiva requiere una gran velocidad de reposición de potasio a la solución del suelo y ello está ligado solo a grandes cantidades de potasio intercambiable. Los aportes de potasio por fertilizante son necesarios para reponer potasio en estas posiciones, en especial en aquellos suelos en agricultura continua, con baja saturación y baja regulación potásica (Conti, 2000).

Casanova et al. (1988) por medio de un ensayo de invernáculo evaluando la capacidad de suministro de K de distintos suelos de Uruguay establecieron que en suelos con mineralogías de tipo mica determinan un suministro más sostenido de K, mientras que en suelos con mineralogía del tipo montmorillonítico o caolinítico la absorción de potasio disminuyó luego de sucesivas extracciones, siendo ésta disminución más acentuada cuanto menor porcentaje de arcilla presentaba el suelo.

En países como Argentina lo que sucede es que se debe considerar que los niveles de disponibilidad de potasio en el suelo son elevados en la mayor parte de sus suelos bajo producción de granos, esto traería como consecuencia que no tendría sentido productivo, ni económico, ni ambiental, reponer el potasio extraído. Sin embargo se debe tener presente que se estaría generando sistemáticamente balances negativos del nutriente, disminuyendo en la medida en que la producción sea más intensiva (García y González, 2010). Las deficiencias que se puedan generar en los suelos de uso agrícolas irán fundamentalmente relacionadas con la historia de manejo de los suelos y cultivos (García, 2005).

De los cultivos agrícolas más usuales es el cultivo de soja quien presenta los mayores niveles de extracción de potasio por tonelada de grano producido y también en cantidad total que se exporta cuando la extracción la expresamos en términos de kg de nutriente en grano cosechado por hectárea (Ciampitti y García, 2007).

2.5.4 Efecto del sistema de labranza en la dinámica de nutrientes

En SD se elimina la inversión del suelo y las únicas perturbaciones que se realizan son en el surco de siembra o cuando se aplican fertilizantes localizados debajo de la superficie del mismo. Esta no perturbación del suelo junto con la acumulación de residuos sobre la superficie produce grandes cambios en la dinámica y distribución de nutrientes al establecerse un sistema de SD (Bordoli, 2001).

Con la labranza reducida, se acumula mayor cantidad de residuos en la superficie del suelo, minimizando la erosión eólica e hídrica y mejorando la calidad del suelo. Los residuos de los cultivos en superficie incrementan la infiltración del agua en el suelo, reducen las pérdidas por evaporación y las

pérdidas de nutrientes por erosión, y producen un descenso en la temperatura superficial del suelo. Al disminuir las labranzas, los residuos se acumulan en y sobre el suelo, incrementando los residuos fácilmente descomponibles y la fracción activa de la MO (Terry y Johnston, 2006).

2.5.4.1 Dinámica de nutrientes no móviles: fósforo y potasio

La falta de incorporación de las aplicaciones en superficie de fertilizantes fosfatados y potásicos y de los residuos de los cultivos, junto con el ciclaje de nutrientes a través de la absorción de los cultivos desde capas más profundas del suelo produce estratificación de estos nutrientes inmóviles en la superficie del mismo (Bordoli, 2001).

Una característica de la dinámica de P en los sistemas de SD es la estratificación a profundidad. Se encuentran mayores concentraciones de P disponible en la capa superficial (0 -10 cm) debido a la acumulación de residuos y a la aplicación superficial de fertilizantes fosfatados (García y Picone, 2004). Terry y Johnston (2006) en forma similar mencionan que bajo sistemas sin labranzas y mezclado de suelo, los nutrientes inmóviles se pueden acumular en la superficie (0-5 cm). Rhoton (2000) encontró que en cero laboreo aumentó el contenido de P en la superficie (2,5 cm) después de 4 y 8 años, y después de 8 años en los 2,5-7,6 cm.

Las sucesivas fertilizaciones fosfatadas en el tiempo tienden a elevar al menos temporalmente el P disponible, A su vez se han demostrado relaciones entre el P disponible y los procesos de mineralización e inmovilización de P (García y Picone, 2004). Por otra parte según Zaumer et al., citados por García y Picone (2004) mencionan que los mayores niveles de P lábil registrados en SD en los estratos superficiales se debe a una combinación del efecto de la acidificación del suelo que incrementa el desarrollo de cargas positivas dependientes del pH y al aumento en la concentración de C orgánico total que favorece la formación de complejos que contienen P.

En cuanto al potasio se encontró que en SD existe un aumento en el contenido de potasio disponible debido a la liberación de este nutriente desde los rastrojos cuando éstos vuelven al suelo. A través del rastrojo que va quedando sobre la superficie año a año se logra aumentar los niveles de potasio disponible para las plantas, dado que a pesar que el K no forma parte

de combinaciones orgánicas, permanece activo en las plantas, siendo su liberación muy rápida cuando los rastrojos vuelven al suelo (Crovetto, citado por Reyes et al., 2002).

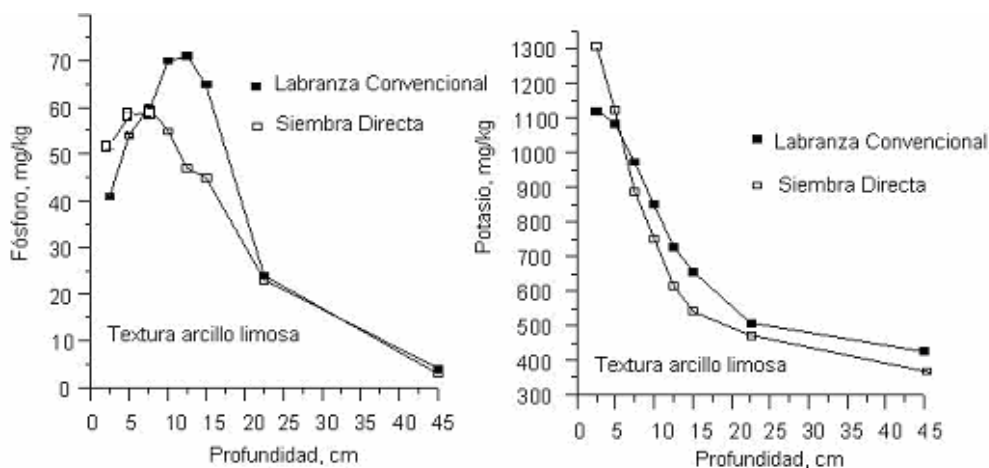


Figura 6: Efecto de la siembra directa y labranza convencional en la distribución del fósforo y el potasio en un suelo franco arcilloso de Manitoba, adaptado de Grant y Bailey (Terry y Johnston, 2006).

2.5.4.2 Dinámica de nutrientes móviles: nitrógeno y azufre

Sawchik (2001) menciona que bajo SD se produce cambios que pueden tener impactos sobre la dinámica de N, independientemente del sistema de producción. Los efectos producidos radicarían en acumulación de residuos en superficie de más lenta descomposición que en condiciones de LC, determinando un incremento en el contenido de MO en la zona superficial con una marcada estratificación de nutrientes.

Si bien el N es móvil en el suelo, las labranzas pueden alterar su distribución en el perfil del suelo. Un estudio hecho en Manitota (Malhi et al., citados por Terry y Johnston, 2006) en un suelo franco arenoso fino, mostró un mayor contenido de N-NO₃ en SD a la profundidad de 0-7.5 cm, presumiblemente debido a la liberación desde los residuos orgánicos retenidos en la superficie del suelo y a la retención de N residual por aplicación de

fertilizantes. Resultados similares se encontraron en un estudio en suelo arcillolimoso a 0-2.5 cm. El N-NO_3^- también se acumuló en la profundidad 60-120 cm del perfil en ambos sistemas de labranzas y tipos de suelo. Otros investigadores en las praderas canadienses no encontraron diferencias entre labranzas en N-NO_3^- o en S-SO_4 a 0-60 cm de profundidad (Terry y Johnston, 2006).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL

3.1.1 Ubicación del ensayo

Las muestras de suelos utilizadas y los datos de rendimiento de los diferentes cultivos fueron tomados en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni a 10 km al sur de la ciudad de Paysandú. El experimento se instaló en 1994 sobre una pastura originalmente compuesta por *Trifolium repens* y *Lotus corniculatus*

3.1.2 Tratamientos y diseño experimental

Se evalúan cuatro tratamientos dispuestos en 18 parcelas al azar, distribuidos en una a ladera (Figura 7).

En el Cuadro 4 se resumen las características de los suelos de cada sector del campo.

Cuadro 4. Profundidad (cm) del suelo por horizontes de cada sector

	parcelas	Horizonte (*)				
		A	Bt	B	BC	C
Secto1 1	1 a 5	19	39	-	81	81+
Sector 2	6 a 10	24	48	-	81	81+
Sector 3	11 a 13	16	40	-	74	74+
Sector 4	14 a 18	21	-	40	-	40+

(*) Profundidad a la base de cada horizonte

El suelo en las parcelas 1 a 10 corresponde a un Brunosol Eutrico Típico de la Unidad San Manuel, con una profundidad entre 74 y 81 cm, y el de las parcelas 14 a 18 a un Brunosol Háptico de la misma Unidad de 40cm de profundidad.

Los tratamientos corresponden a una combinación de una misma secuencia de cultivos realizada sin laboreo, con diferente proporción del tiempo de la rotación ocupado por pasturas, más un tratamiento definido como “testigo

tecnológico” que corresponde a la misma secuencia de cultivos realizada con laboreo en rotación con pasturas en una relación de tiempo del 50% (Cuadro 5).

Cuadro 5. Manejo del suelo y relación de tiempo en cultivo/tiempo en pastura de los tratamientos evaluados.

Manejo del suelo	Parcela	Nomenclatura	Rotación años	Relación cultivo/pastura
Laboreo	5, 6, 15	ROTACIÓN LARGA CON LABOREO (R-LC)	7	50%/50%
No laboreo	1, 3, 4, 8, 11, 12, 16	ROTACIÓN LARGA (RL)	7	50%/50%
No laboreo	7, 10, 13, 14, 18	ROTACIÓN CORTA (RC)	5	70%/30%
No laboreo	2, 9, 17	AGRICULTURA CONTINUA (AC)	3	100

Cada parcela del experimento es de 500 m² (10m por 50m).

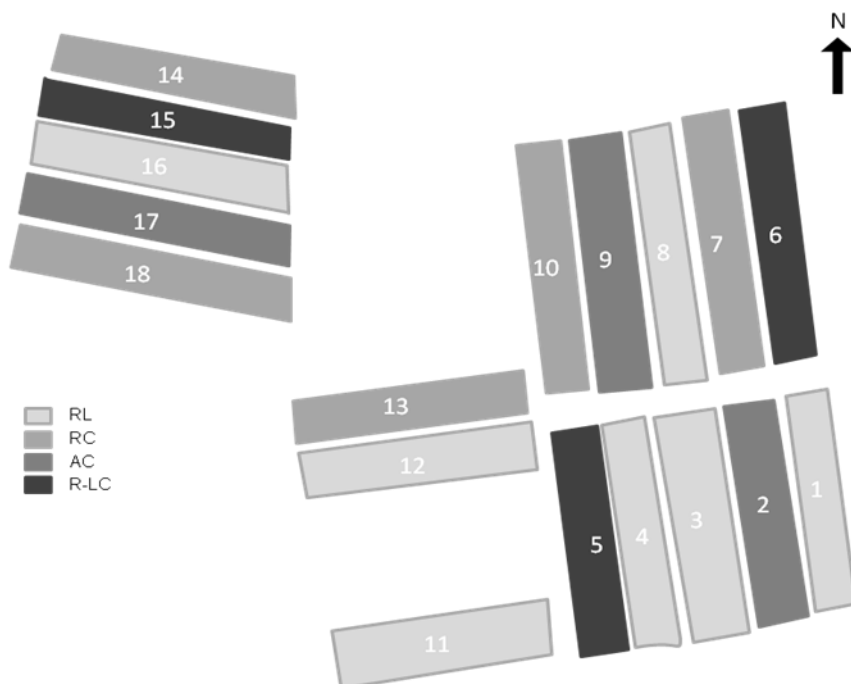


Figura 7: Distribución espacial de los tratamientos rotación larga (RL), rotación corta (RC), agricultura continua (AC) y rotación larga con laboreo (R-LC).

Todas las fases de cada rotación están presentes en cada año, conformando repeticiones desfasadas en el tiempo. El número de repeticiones de cada tratamiento es función del tiempo total ocupado por la rotación, por lo que son tres para AC, cinco para RC y siete para RL. El testigo tecnológico (R-LC) cuya rotación es de siete años, tiene sólo tres repeticiones en el tiempo.

La secuencia de cultivos es la misma para todos los tratamientos y está compuesta por doble cultivo anual trigo/soja seguido por cebada/sorgo en los dos primeros años, y, en el tercer año no hay cultivo de invierno y se siembra girasol de primera (girasol de estación completa) barbecho/girasol.

En los tratamientos LC, R-LC y RC, luego de girasol se siembra trigo asociado con pradera, por lo que existe una superposición de cultivo/pastura durante un semestre.

Las composición botánica de las praderas es de *Festuca andurinacea*, *Trifolium repens* y *Lotus corniculatus* sembrándose 10, 2 y 6 kg. de semillas respectivamente, para los tratamientos RL y R-LC, y una mezcla de *Cichorium intibus* y *Trifolium pratense* (4 y 6 kg de semilla a la siembra) para el tratamiento RC.

3.1.3 Manejo del ensayo

La fertilización con N y P fue realizada según los niveles críticos de cada nutriente para cada cultivo (Perdomo, s.f.). En tanto las aplicaciones de fitosanitarios fueron realizadas en función de lo necesario en cada caso en cada año.

Las pasturas en general no fueron refertilizadas, por lo que su producción se realizó con el efecto residual de la fertilización de los cultivos, incluyendo la de los de trigo asociados. Se realizó fertilizaciones únicamente en el 2007 (parcelas 4 y 7) y en 2008 (parcelas 4, 6, 8, 12 y 18).

Las pasturas fueron pastoreadas entre cinco y siete veces por año con 15 a 20 novillos de aproximadamente 350 kg de peso vivo, que permanecieron

dos o tres días en el área de pasturas del experimento (3000 m²). El ingreso de los animales fue definido por una disponibilidad mínima de 2000 kg ha⁻¹ de materia seca. Después de cada pastoreo se estimó la disponibilidad y rechazo de materia seca, respectivamente. Para ello se tomaron tres muestras al azar de 0,09 m² de cada parcela, usándose un cuadrado de 0,30 metros de lado.

3.2 DETERMINACIONES REALIZADAS

3.2.1 Muestreo de suelo

El muestreo de suelo fue realizado el 8 de junio del 2010 luego de la cosecha de los cultivos de verano. Se sacó una muestra compuesta de 20 tomas por parcela de los primeros 20 cm del perfil, las cuales fueron fraccionadas de 0-5, 5-10 y 10-20 cm. De forma independiente, se obtuvo otra muestra compuesta de tres tomas por parcela hasta una profundidad de 60 cm. A cada muestra se le determinó el contenido de Nitrógeno total (% N) por el método Kjeldahl, Fósforo disponible por método Bray No.1 (ppm de P) y Potasio intercambiable (meqK/100g).

Los mismos análisis fueron realizados a una muestra compuesta de 10 muestras tomas por parcela correspondiente al verano 2001-2002 y que se conservan en el banco de muestras del laboratorio de suelos de la EEMAC.

La cantidad de NT del suelo en 0-20 cm se estimó para una masa de suelo constante de 2,5 Mg ha⁻¹ utilizando la densidad aparente de cada tratamiento determinada al momento del muestreo de suelo realizado para la determinación de NT.

3.2.2 Balance aparente de nutrientes

Para la realización del balance aparente de N, P y K se consideraron como entradas las fertilizaciones realizadas en el período 2001-2010 y la fijación biológica de N por parte de las pasturas. Para esto último se dispuso de los registros de producción de las pasturas y la proporción de leguminosas.

Las entradas de N se definieron en función del N aplicado y el ingresado por fijación biológica, teniendo en cuenta la cantidad de MS producida y el porcentaje de leguminosas en la pastura, se estableció la siguiente ecuación: $\text{Entrada de N (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{kg N fertilizante} + (\text{Mg de materia seca total producida por pastura} * \text{proporción de leguminosa en la mezcla}) * 30$, siendo 30 kg de N por tonelada de materia seca producida por leguminosa, según Díaz Rosello, citado por Ernst y Siri (2009).

Durante la fase pastura no se contabilizó la extracción de nutrientes, considerando que, por la forma de pastoreo utilizada, la mayoría de los nutrientes se reciclarían.

En cuanto a las salidas de N, P y K se estimaron como el producto del rendimiento en grano de cada cultivo por la concentración de nutrientes en el grano. Para realizar el balance se utilizó la planilla de cálculo de requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosas, forrajeras e industriales de International Plant Nutrition Institute (Ciampitti y García, 2009a).

Para estimar la extracción de N en grano de soja se consideró que un 35 % corresponde al aporte generado por la fijación biológica de N (Forján, 2003).

3.2.3 Otras consideraciones

Durante las zafras del 2001 y del 2002 aún continuaban estabilizándose las rotaciones en determinadas parcelas del ensayo, explicándose la aparición de Trébol Alejandrino en la parcela 11 y 18 y maíz para silo en la parcela 11 y 13. Para el momento de realizar el procesamiento de datos en referencia a las entradas y salidas se los considero tal como un barbecho, es decir, sin aportes o salidas de nutrientes.

Para las pasturas del año 2001 se estimó el porcentaje de leguminosas en la mezcla, promediando las proporciones de leguminosas del resto de las pasturas a la misma etapa de crecimiento.

3.2.4 Variables generadas

Como los tratamientos están desfasados en el tiempo cada parcela estaba en un momento diferente de la rotación al momento del muestreo, en junio 2010. Por lo tanto, para contemplar este efecto que modifica las relaciones de tiempo entre los componentes de la rotación aún para un mismo tratamiento, se generaron dos variables para cuantificar el “efecto pastura”.

1. Semestre Post Pastura (SPP): Para el cálculo de esta variable se ponderan en forma positiva, partiendo de 1, los semestres con pastura y en forma negativa partiendo -1, los semestres con cultivo. Por ejemplo, al tercer cultivo luego de una pastura se le asignó el valor -3 y al tercer semestre con pastura el +3. Este parámetro fue calculado para todas las parcelas individualmente para el último semestre del experimento (verano 2009/10).

2. Relación Pastura/Cultivo (Rel P/C): para el cálculo de esta variable se realizó el cociente entre semestres bajo pasturas y bajo cultivo para cada parcela a lo largo de todo el período experimental. Con esta variable se pretende corregir las diferencias entre las distintas relaciones de pasturas/cultivos en parcelas con el mismo tratamiento.

3.2.5 Análisis estadístico

El procesamiento de los datos experimentales se realizó con el paquete PROC Mixed del programa del Sistema Statistical Analysis Systems, tomando como efectos fijos los tratamientos y los años como aleatorios. Las variables SPP y Rel P/C fueron utilizadas como co-variables en el análisis de varianza. De esta manera se estimó la proporción de la variación cuantificada en la variable de respuesta que se explica por el efecto tratamiento y por la edad o proporción del tiempo en pastura dentro del período evaluado.

Para los balances aparentes de nutrientes se realizaron modelos de regresión entre la extracción de nutrientes y los años de cultivo y la extracción realizada en el grano de los cultivos producidos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO

En la Figura 8 se presenta la concentración de N total en el suelo por estratos del perfil correspondiente al muestreo de junio del 2010.

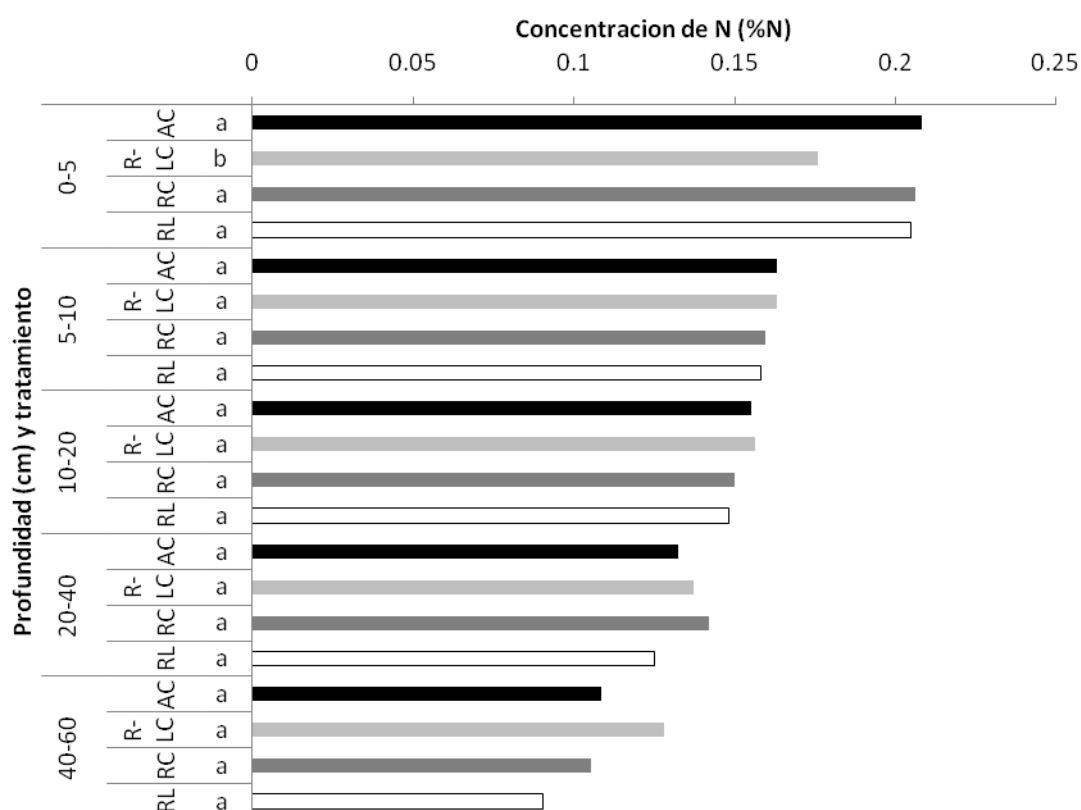


Figura 8: Concentración de N (%N) según estratos de profundidad (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm) en agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL), y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC). Letras diferentes dentro de cada estrato indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

Se verificaron diferencias significativas en la concentración de N en los primeros 5 cm de suelo, presentando el R-LC los niveles más bajos. Esto podría explicar que los tratamientos en SD estratificarían la MO en superficie, efecto contrario al del R-LC que expone a la MO en la zona superficial con la consecuente pérdida del nutriente por mineralización. Por debajo de los 5 cm no existieron diferencias entre los tratamientos. La mayor concentración de N en sistemas con SD radicaría en la acumulación de residuos en superficie de más lenta descomposición que en condiciones de LC, determinando un incremento en el contenido de MO y N en la zona superficial (Sawchik 2001, Morón 2004).

Al realizar un contraste entre el manejo R-LC con el promedio de los tratamientos sin laboreo (AC, RC y RL), se determinó que existió diferencia significativa para el estrato de suelo 0 a 10cm ($Pr < 0,048$), pero no para el estrato de 10-20cm, por lo que los efectos se cuantificaron sólo hasta los 10 cm de profundidad donde la mineralización y estratificación tienen mayor impacto (Figura 9).

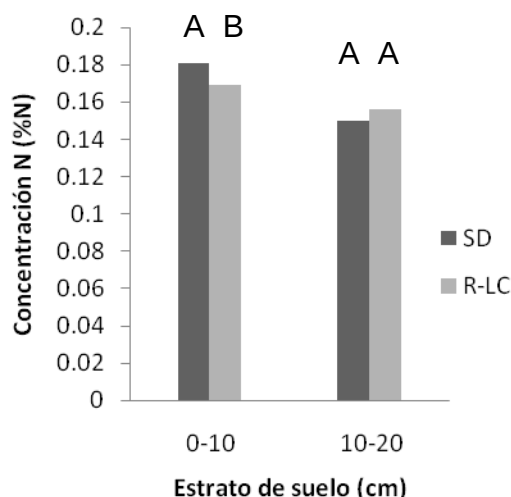


Figura 9: Concentración de N (%N) según los estratos de suelo 0-10 cm y 10-20 cm para el promedio de los tratamientos sin laboreo (SD) contra la rotación cultivos/pastura con laboreo (R-LC). Letras diferentes dentro del mismo estrato representan diferencias en el contraste ($Pr < 0,050$)

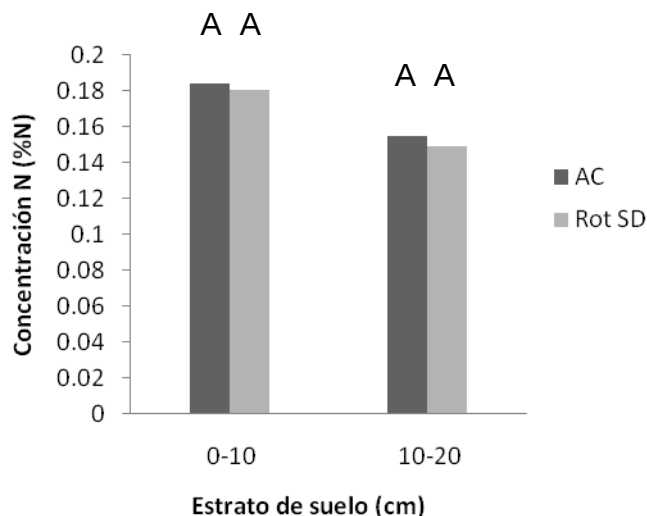


Figura 10: Concentración de N total (%N) según los estratos de suelo 0-10 cm y 10-20 cm para los tratamientos en agricultura continua (AC) y el promedio de los tratamientos con rotación con pasturas sin laboreo (RotSD).

No hubo diferencias significativas para el contraste entre AC y las rotaciones con pasturas en SD (RC y RL) en ninguno de los estratos evaluados ($Pr < 0,540$), por lo que no se cuantificó un “efecto pastura” sobre la concentración de N total en el suelo para el promedio de los tratamientos sin laboreo (Figura 10).

Estos resultados no concuerdan con los cuantificados en el experimento de rotaciones instalado en INIA La Estanzuela en 1963, en el que los tratamientos que rotan con pastura tienen mayor concentración de NT que los de AC. Probablemente esto se explica porque en nuestro caso, los tratamientos de AC son realizados sin laboreo y la agricultura en rotaciones con pasturas con y sin laboreo incluye doble cultivo anual y con fertilización nitrogenada según los requerimientos de los cultivos. En estos casos, con cultivos de alta cantidad de rastrojo producido junto a una baja presencia de soja en la rotación, no se generaron diferencias en la concentración del NT en el suelo (Havlin et al. 1990, Morón 2004, García 2007).

La cantidad de NT en el suelo en el muestreo de junio de 2010 fue menor a la cuantificada en marzo de 2001 en todos los tratamientos. La variación total del período estuvo asociada al contenido inicial ($Pr < 0,0053$ para el estrato 0-10

cm y $Pr < 0,0001$ para el de 10-20 cm) (Figuras 11 y 12). Los tratamientos que tuvieron más N total en el suelo en el 2001 fueron los que más N perdieron en el período, sin interacción significativa con tratamientos.

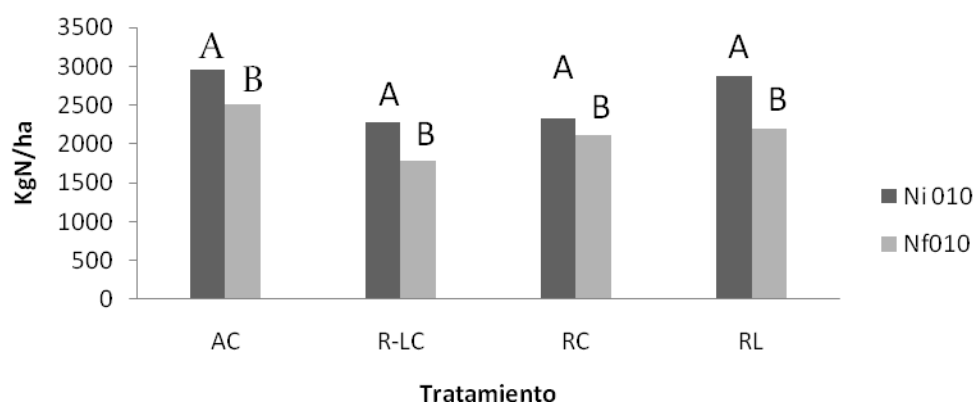


Figura 11: Contenido de N inicial (Ni010) y final (Nf010) en el estrato 0-10 cm para los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC) en una masa de $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de suelo.

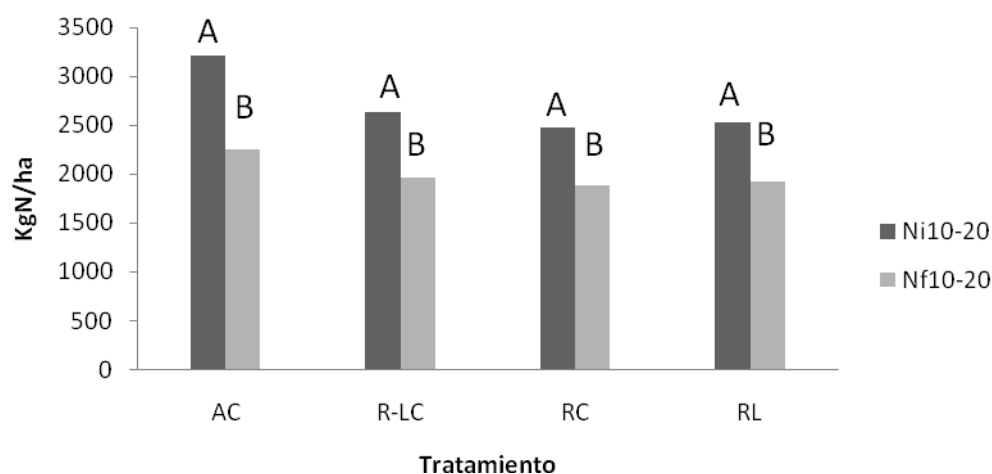


Figura 12: Contenido de N inicial (Ni1020) y final (Nf1020) en el estrato 10-20 cm para los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC) en una masa de $2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de suelo.

4.2 BALANCE APARENTE DE NITRÓGENO

Existieron diferencias significativas en el balance aparente de N acumulado. Las diferencias se explican por las diferencias en los kg ha^{-1} de N extraído en lo producido por cada tratamiento en el período, ya que el ingreso de N fijado biológicamente compensó las mayores entradas generadas por agregado de N como fertilizante en los manejos con más agricultura y, por lo tanto, no se diferenciaron los ingresos totales (Cuadro 6).

Cuadro 6: Balance aparente de N acumulado y sus componentes: fijación biológica de N, N agregado como fertilizante, entrada total de N, N extraído en productos según los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC) en kg/ha .

Tratamiento	N FBN	N fertilizante	N entrada	N extraído	Balance de N acumulado
AC	0 b	485 a	485 a	842 a	-358 b
RC	161 ab	390 a	551 a	688 ab	-137 ab
RL	200 a	282 a	482 a	449 b	33 a
R-LC	243 a	315 a	558 a	435 b	123 a

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

Puesto que la AC no presenta pasturas, la fijación de N estimada es de cero kg ha^{-1} . Existieron diferencias entre los tratamientos en las entradas de N, por fijación biológica. El 52% del efecto se explica por la relación de tiempo en pasturas/cultivos, ya que si se corrige el tiempo de ocupación de la pastura, la producción de materia seca de la componente leguminosa de las pasturas no se diferenció entre RC y RL. La FBN resultaría mayor cuanto más es el tiempo ocupado por pastura en la rotación y por esta razón RC manifestó un comportamiento intermedio entre RL y AC. Las rotaciones largas (RL y R-LC) promediaron un ingreso estimado de 222 kg ha^{-1} contra 161 kg ha^{-1} de RC. Anualizando el ingreso, esto representa $65 \text{ y } 107 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de N fijado en RL y RC respectivamente. Esto implica que el N FBN anualizado en el tiempo ocupado por pastura fue mayor en RC, producto de que las pasturas de estas rotaciones son básicamente de 2do año. En tanto, en RL la composición botánica de la producción de forraje del 3er año y parte del 4to año de vida es bajo.

Por otra parte, el N agregado como fertilizante presentó una tendencia ($Pr < 0,080$) a que la AC determinó mayores ingresos por fertilizantes en contraposición con la RL, que fue el tratamiento que menos ingresos tuvo por fertilizaciones. Si bien las diferencias se manifestaron como una tendencia, la fertilización durante la fase agrícola logró igualar las entradas por fijación biológica de N durante la fase pastura de las rotaciones, dando como resultado entradas totales de N similares en todos los sistemas. Es decir que, siguiendo el criterio de fertilizar en función de niveles críticos de suficiencia por cultivo, se logró equiparar las entradas totales de N al sistema AC.

La extracción de N en producto fue significativamente modificada por los tratamientos. El 39% del resultado fue explicado por la relación pastura/cultivo. En los tratamientos donde la proporción del tiempo ocupada por pasturas fue mayor, menor fue la fase de cultivos en el período, por lo que se espera una menor extracción de nutrientes. De esta forma los tratamientos de RL y R-LC en los que el tiempo de pasturas ocupa el 50% del tiempo de la rotación tuvieron menor extracción en comparación a la AC. En cuanto a la RC, con un 33% del tiempo ocupado por pasturas, obtuvo un comportamiento intermedio sin presentar diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

En el balance aparente de N acumulado además de las diferencias generadas por los tratamientos, hubo un efecto determinado por la Rel P/C que efectivamente tuvo cada parcela en el período. Del total de la variación cuantificada, el 63% se atribuye al efecto tratamiento y el 37% a la Rel P/C (Apéndice 7).

Por otra parte, si se tuvieran en cuenta las extracciones promedio estimadas por la producción de carne durante el pastoreo las mismas serían 34 kg ha⁻¹, 31 kg ha⁻¹ y 19 kg ha⁻¹ para R-LC, RL, RC respectivamente durante todo el período experimental (Apéndice 25). Esto implica que no se producirían grandes cambios en los valores finales del balance. Tampoco sería de esperarse un impacto sobre la disponibilidad de nutriente en el suelo.

No se encontró relación entre los resultados de balance aparente de N y la concentración de NT en el suelo. Mientras que en AC se produjeron los balances aparente de N más negativos para el período 2001/10, no se cuantificó una reducción significativa en la concentración de NT en el suelo. Este hecho cuestiona la utilización de los balances aparente de N para estimar la evolución del nutriente en el suelo. Sin embargo, sí existe asociación entre el

balance aparente y la necesidad de N a ingresar como fertilizante, por lo que sería un indicador útil para estimar el déficit de N que será necesario reponer en el mediano plazo para mantener el nivel productivo del sistema (Figura 13).

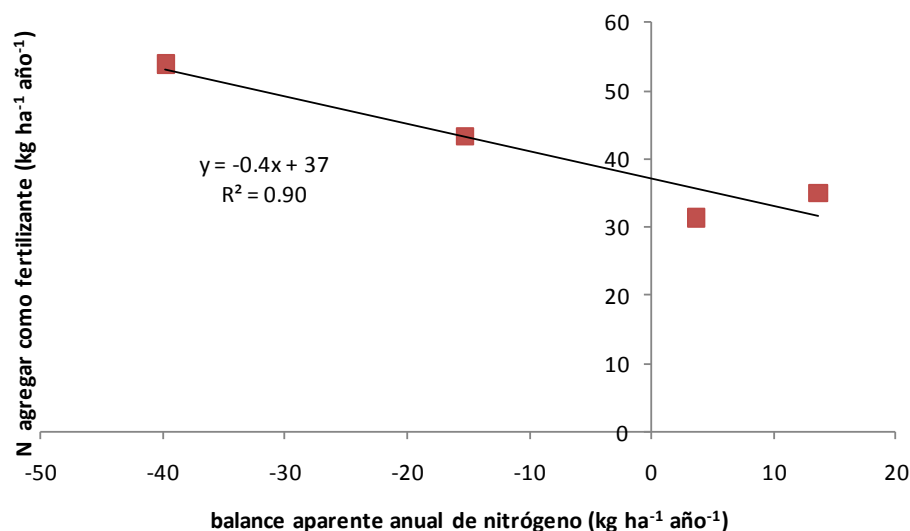


Figura 13. Relación entre nitrógeno agregado como fertilizante a los cultivos y el balance aparente anual de nitrógeno (EEMAC, período 2001-2010).

Los tratamientos con balance aparente nulo determinaron una media de fertilización nitrogenada anual de $37 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, situación que sólo se logró con tratamientos que incluyeron pasturas de larga duración en la rotación. Los sistemas agrícolas puros (AC) y con rotación corta (RC) determinaron $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de nitrógeno como fertilizante adicional por cada kg ha^{-1} de desbalance anual de la rotación. Resultados similares fueron reportados por Ernst y Siri (2009) quienes determinaron un incremento anual de $4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Mg}^{-1}$ de grano producido en sistemas agrícolas puros con relación a sistemas que rotan con pasturas plurianuales de mezclas de gramíneas perennes con leguminosas.

4.3 FÓSFORO DISPONIBLE

A pesar de las diferencias absolutas determinadas en el P disponible en los primeros 5cm del perfil, no existieron diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 14).

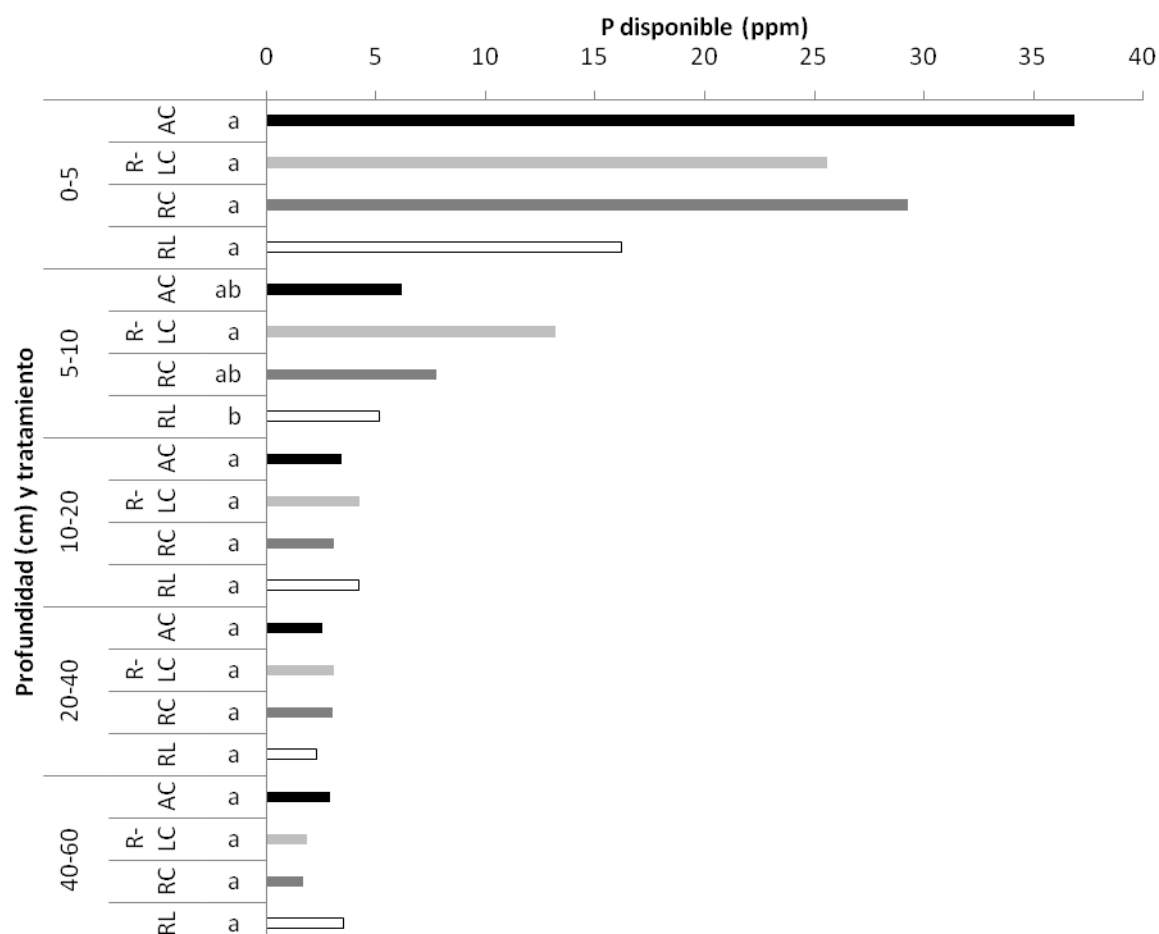


Figura 14: Fósforo disponible (ppm) según estratos de profundidad (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm) en los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC). Letras diferentes dentro de cada estrato indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

En tanto, el estrato de 5 a 10 cm existieron diferencias, donde el R-LC tuvo la mayor disponibilidad de P Bray 1 en comparación con RL, pero no fue estadísticamente diferente al AC y RC. Esto se explicaría porque en los sistemas con laboreo se genera una mezcla de los perfiles del suelo por lo habría una mejor distribución de P con una mayor concentración de P disponible. Resultados similares obtuvieron Terry y Johnston (2006) quienes

mencionan que, como en SD no se produce el mezclado del suelo, los nutrientes inmóviles se acumulan en la superficie.

Como la rotación va desfasada en el tiempo, la disponibilidad de P en la capa superficial se asoció ($Pr < 0,090$) con el tiempo en que efectivamente estuvo en la fase agrícola cada parcela muestreada (Figura 13). Esto podría explicarse por la falta de refertilizaciones con P durante la fase de pasturas. Como la disponibilidad de P del suelo se corrigió durante la fase agrícola, los tratamientos de AC mantuvieron alta su disponibilidad permanentemente. En tanto, la disponibilidad durante la fase de pastura se redujo y volvió a ser corregida en la fase agrícola siguiente. En los sistemas en los que aparecen pasturas el P disponible fue menor cuanto más tiempo el suelo estuvo en la etapa de pastura (valores de SPP positivos en la Figura 15). Morón y Pérez (1981) ya habían obtenido resultados similares constatando que a medida que transcurrían los años desde el último cultivo de la etapa agrícola el suelo tendía a volver su valor natural de P disponible.

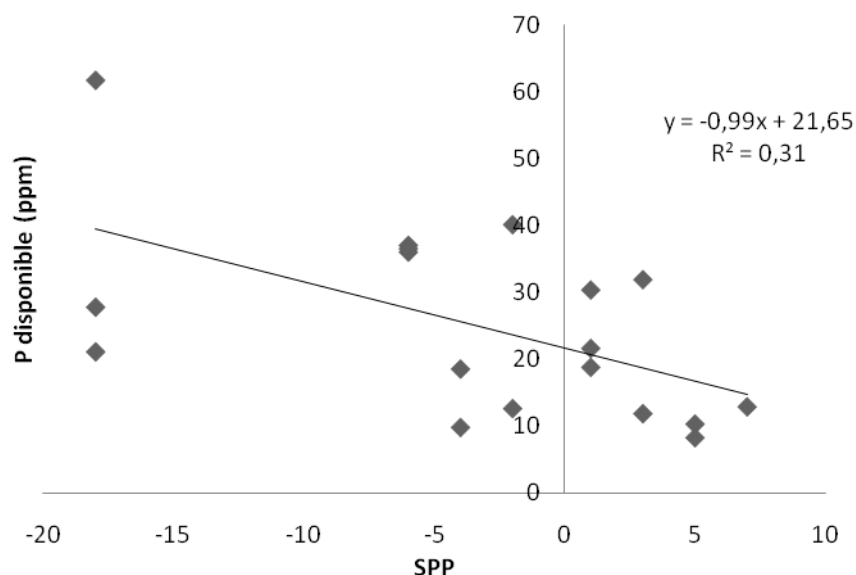


Figura 15: Concentración de P disponible (Bray 1) de 0 a 5 cm en función del momento medido, tomando como referencia los semestres posteriores a la última pastura (SPP) en la rotación. (Valores negativos indican semestres de agricultura a partir de la pastura y los positivos semestres desde sembrada la pastura).

Por cada semestre a partir de la última pastura en el tratamiento R-LC aumentó 3 kg de P en los primeros 20 cm, mientras que en RC aumentó 0,25 kg y en RL, 1,2 kg.

Las variaciones registradas en la disponibilidad de P Bray 1 en el suelo entre 2001 y 2010 se encuentran relacionadas al contenido inicial. Cuanto mayor fue la disponibilidad en el año 2001, mayor fue la pérdida registrada hasta el 2010. La variación de P disponible se encontró significativamente relacionada al valor inicial tanto para el estrato 0-10cm ($Pr < 0,0002$) como para el de 10-20cm ($Pr < 0,0001$).

En relación a la variación de P en el estrato 0 a 10 cm no presentó diferencias significativas entre los tratamientos; a su vez, tampoco existió relación con el tiempo desde la última pastura, la relación pasturas/cultivo, las entradas y extracción de P acumulado (Apéndice 23).

4.4 BALANCE APARENTE DE FÓSFORO

Únicamente existieron diferencias entre los tratamientos en la extracción de P; esto se debe a que se encuentra relacionado a la producción agrícola por lo que en los tratamientos que incluyeron rotaciones con pasturas la extracción fue menor.

Cuadro 7: Balance aparente acumulado de P y sus componentes: entrada de P, P extraído según los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC) en kg/ha.

Tratamiento	P entrada acumulado (kg)	P extracción acumulado (kg)	Balance acumulado P(kg)
AC	101 a	168 a	-67 a
RC	100 a	134 ab	-35 a
RL	75 a	89 b	-14 a
R-LC	72 a	91 b	-19 a

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

El balance aparente acumulado de P se relaciona en un 95% a la relación pastura/cultivo real de cada parcela (Apéndice 9). De esta manera, cuanto mayor fue la duración de la pasturas menor fue la extracción de P en el sistema (Figura 16).

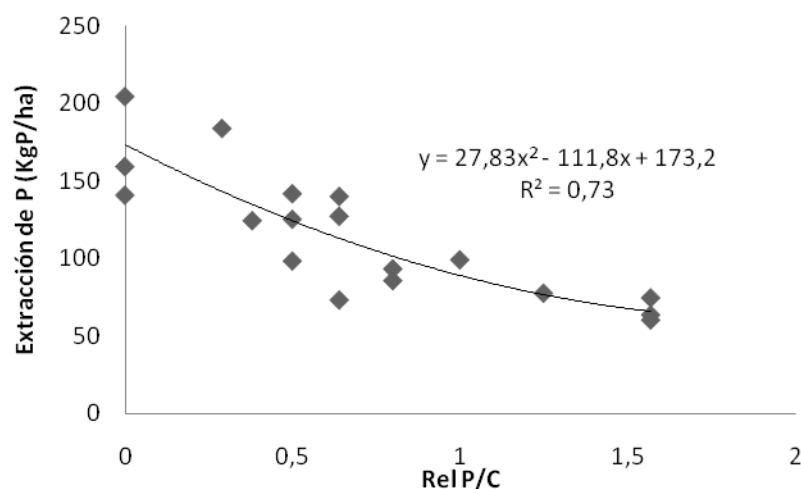


Figura 16: Extracción de P (kg P/ha) según la relación tiempo en pasturas/tiempo en cultivo de cada parcela (Rel P/C).

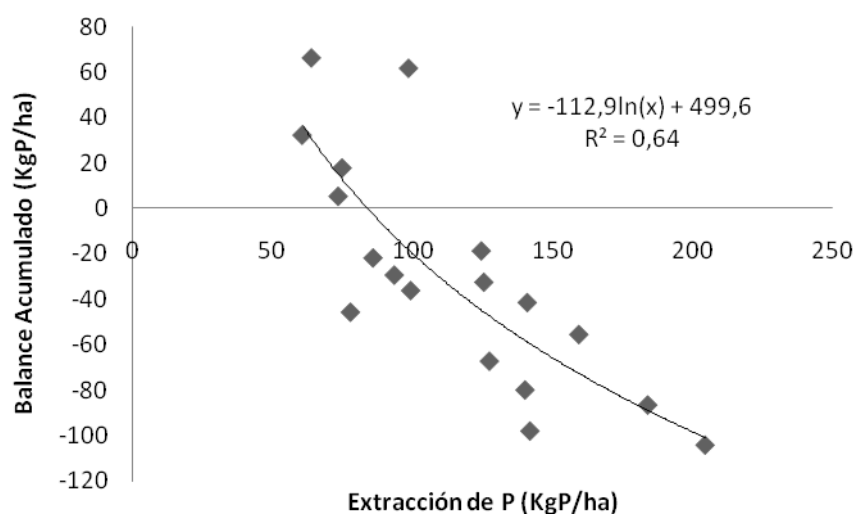


Figura 17: Balance aparente acumulado de P (kg/ha) en relación a la extracción (kg/ha).

Cuanto mayor fue la extracción registrada en las parcelas más negativo resultó el balance aparente acumulado. Puede establecerse que el balance aparente está correlacionado con la extracción, sin embargo la fertilización no está acorde a la extracción realizada por los cultivos. A pesar de que la extracción se correlacionó significativamente con el balance aparente acumulado, no se encontró relación entre este último y la disponibilidad de P en el suelo (Bray 1). Esto último depende de la variable SPP. Esto explica que parcelas con balance positivo que se encuentran en estados avanzados de pasturas presenten menores valores de P disponible (Bray 1) que en manejos más extractivos en AC. Los primeros estarían definidos por la retrogradación del P en el suelo a formas menos disponibles y las segundas, en las que la disponibilidad tiende a mantenerse elevada en el período debido a las sucesivas fertilizaciones realizadas en los cultivos anuales. Esto se vio reflejado en las parcelas que tuvieron balance aparente positivo: 3, 4, 6, 7 y 8, donde las parcelas 4 y 8 corresponden a los tratamientos RL y la parcela 6 al tratamiento R-LC, encontrándose en la etapa final de la fase pastura y presentando los menores valores de P Bray 1.

Al igual que en N, si bien no se tuvo en cuenta la extracción de nutrientes en la carne producida en el período, las salidas por esta vía serían de 9 kg ha^{-1} , 8 kg ha^{-1} y 5 kg ha^{-1} para R-LC, RL y RC respectivamente (Apéndice 25), por lo que no generarían un cambio importante en los valores finales de los balances de cada tratamiento.

De la misma manera de lo que sucedió con el NT en el suelo, no se encontró relación entre la disponibilidad de P en el suelo (Bray 1) y el balance aparente del nutriente en la rotación. El tratamiento AC tendió a tener una mayor concentración de P disponible; por otro lado obtuvo una tendencia a ser el tratamiento con el mayor desbalance en el período de evaluación. Se debe tener en cuenta que las continuas fertilizaciones que llevan a mayores valores de P disponible por el lado de la AC, y por el contrario, en los tratamientos que incorporan pasturas el efecto de la retrogradación del P lleva a menores valores del P disponible, esto podría estar afectando para que el balance aparente no sirva para estimar la evolución del P disponible en el suelo. Sin embargo, relacionando el balance medio anual de cada rotación con la cantidad de P agregado como fertilizante utilizando el nivel crítico de suficiencia en el suelo durante la fase cultivo, indicaría que, un balance neutro se asociaría a una fertilización promedio anual de $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de P en la fase cultivos de una rotación cultivo-pastura. El sistema de AC y RC, que determinaron un balance aparente negativo de P, implicaría una necesidad anual de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de P incremental por cada $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de desbalance (Figura 18).

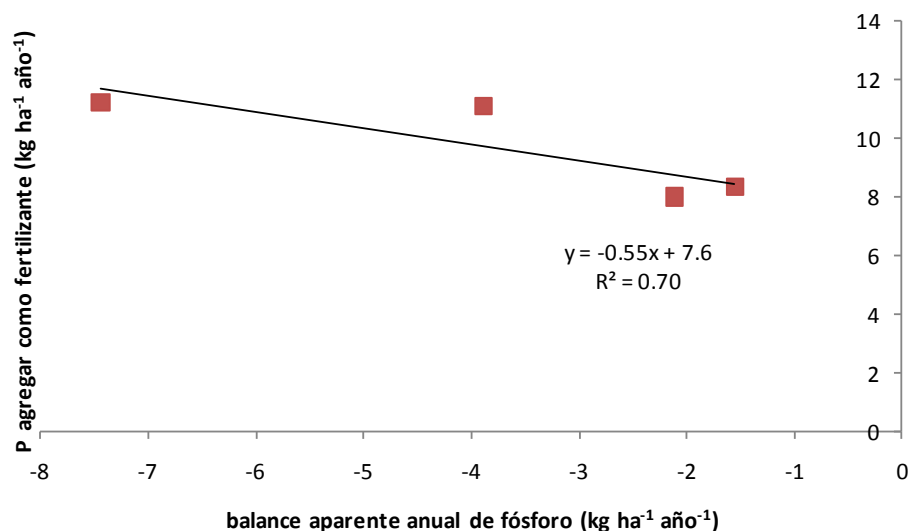


Figura 18: Relación entre fósforo agregado como fertilizante a los cultivos y el balance aparente anual de fósforo (EEMAC, período 2001-2010).

Al igual que con N, si bien el balance aparente de P no se ajusta con la disponibilidad de P (Bray 1) en el suelo, sería un indicador factible de utilizar para contemplar las necesidades incrementales de fertilización con P en función de la extracción realizada en productos.

4.5 DISPONIBILIDAD DE POTASIO

No existieron diferencias significativas entre los tratamientos en las distintas profundidades a excepción del perfil 20-40 donde se verificó una mayor concentración de K int en el tratamiento RL y la menor en RC (Figura 19). Sin embargo un 77% de este efecto se explica por diferencias en la profundidad del suelo ($Pr < 0,0017$).

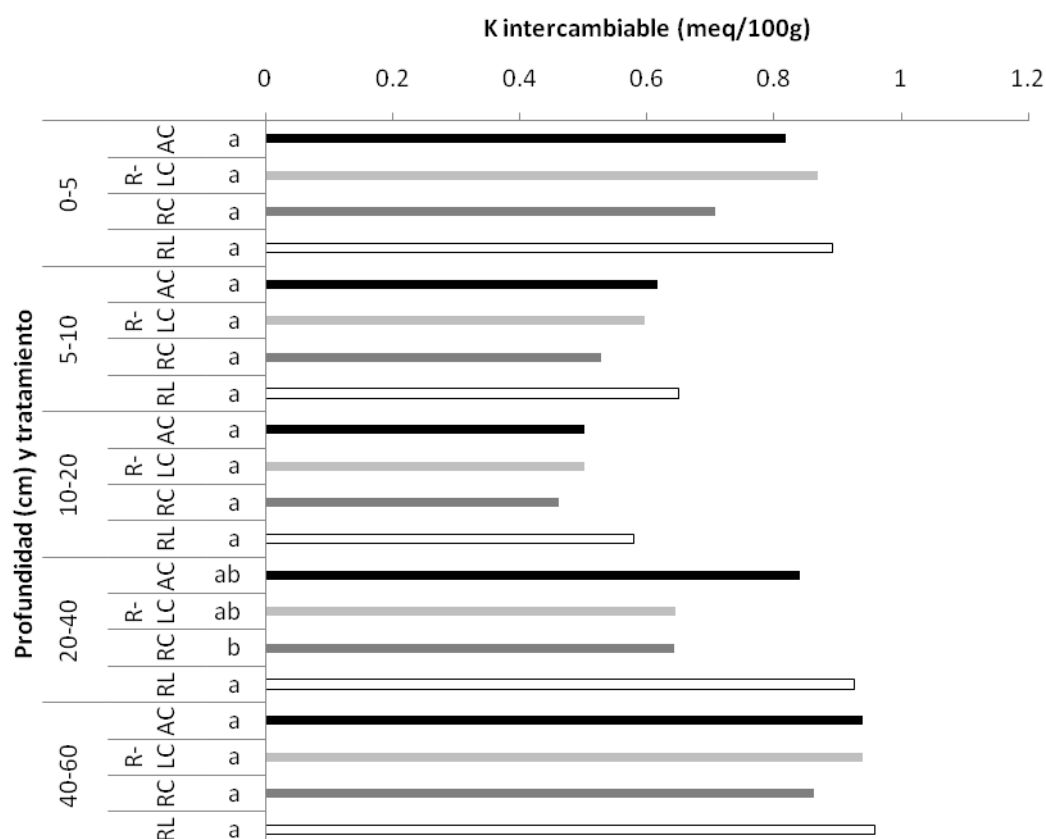


Figura 19: Potasio intercambiable (meqK/100g) según estratos de profundidad (0-5cm, 5-10cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm) en los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC). Letras diferentes dentro de cada estrato indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

La profundidad varía con el tipo de suelo en el cual encuentran las parcelas, donde los suelos menos profundos son del tipo Brunosol eútrico háplico y los más profundos Brunosol eútrico típico. Esto provoca que mientras en el estrato 20-40 algunos tratamientos estén en el horizonte Bt, donde es de esperar una mayor concentración de K intercambiable, otros estén prácticamente en el horizonte “BC_k”. Si bien todos los tratamientos se encuentran en todas las situaciones la proporción de las parcelas RC es mayor en dichos suelos (dos tercios), lo que explicaría en gran medida los bajos niveles de K int para el tratamiento en los estratos profundos. En contraposición, el tratamiento que presentó mayores niveles de K int en profundidad fue RL, el cual tuvo solo una parcela de las 7 presentes en total en el experimento ubicadas sobre el suelo más superficial y sin diferenciación textural.

4.6 BALANCE APARENTE DE POTASIO

Existió una tendencia a una mayor extracción de K en los tratamientos con más agricultura ($Pr < 0,070$), lo que se explica porque, en el caso de K el único componente del balance es la extracción, ya que no se realizaron fertilizaciones con K durante la evaluación (Cuadro 8).

Cuadro 8: Potasio extraído según los tratamientos agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC) en kg/ha.

Tratamiento	K extraído acumulado (kg)
AC	244 a
RC	202 a
RL	133 a
R-LC	112 a

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

Si se tuvieran en cuenta las salidas de K generadas por la producción animal las mismas serían $1,9 \text{ kg ha}^{-1}$, $1,7 \text{ kg ha}^{-1}$ y $1,1 \text{ kg ha}^{-1}$ para RL-C, RL y RC respectivamente, lo que no implicarían cambios relevantes en el resultado

final del balance de K de los sistemas con que rotan con pasturas (Apéndice 25).

Las parcelas que en las que se exportó más K durante el período 2001-2010, fueron las que presentaron mayores pérdidas entre el contenido inicial y final de K en el suelo (Figura 20). Comparando los distintos perfiles se verifica que el estrato 10-20 tiene una menor tasa de pérdida y a su vez tiene una menor correlación entre las variables.

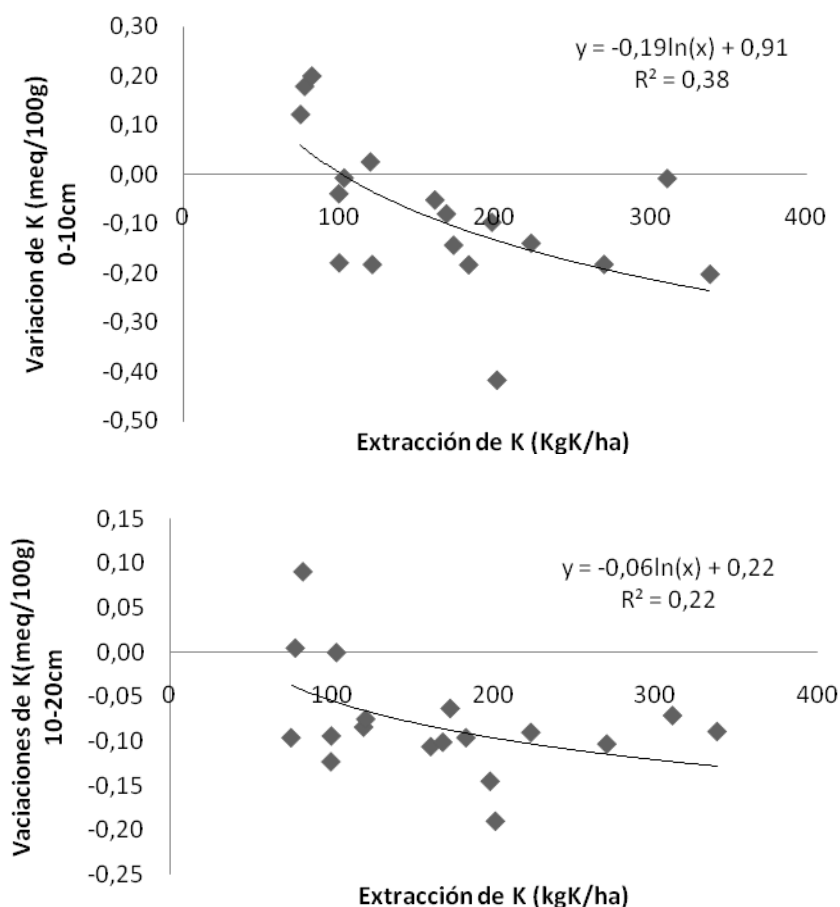


Figura 20: Relación entre la variación de potasio (meq/100g) y la extracción (kg/ha) en el perfil de suelo 0-10 cm y 10-20 cm.

Algunas parcelas tuvieron ganancias en K intercambiable en el suelo, lo que no puede explicarse por fertilización. Con la excepción de la parcela 3 en la cual había rastrojo de sorgo, todas las demás estaban en la fase pastura en el

momento del muestreo en junio de 2010. En tales circunstancias es probable que la explicación radique en que se haya tomado muestras sobre algún sector contaminado con estiércol vacuno como resultado del pastoreo. Más de dos tercios del K extraído queda en el rastrojo y éste a su vez queda disponible en el corto plazo (Reyes et al. 2002, Sheldrick et al. 2002). Esta podría ser la explicación para el caso de la parcela 3 que estaba cubierta por rastrojo de sorgo al momento del muestreo de suelos, determinando un incremento en la disponibilidad de K intercambiable en superficie.

No hubo diferencias significativas entre los tratamientos al inicio y final del experimento para las profundidades 0-10cm y 10-20cm (Figuras 21 y 22). Sin embargo las variaciones registradas en el contenido de K int en el suelo entre 2001 y 2010 fueron significativas para el estrato 10-20. Para el estrato 0-10 si bien no fue significativo igualmente se registró la misma tendencia ($Pr < 0,070$). En resumen todos los tratamientos en promedio perdieron K-intercambiable durante el período de evaluación (Apéndice 21 y 22).

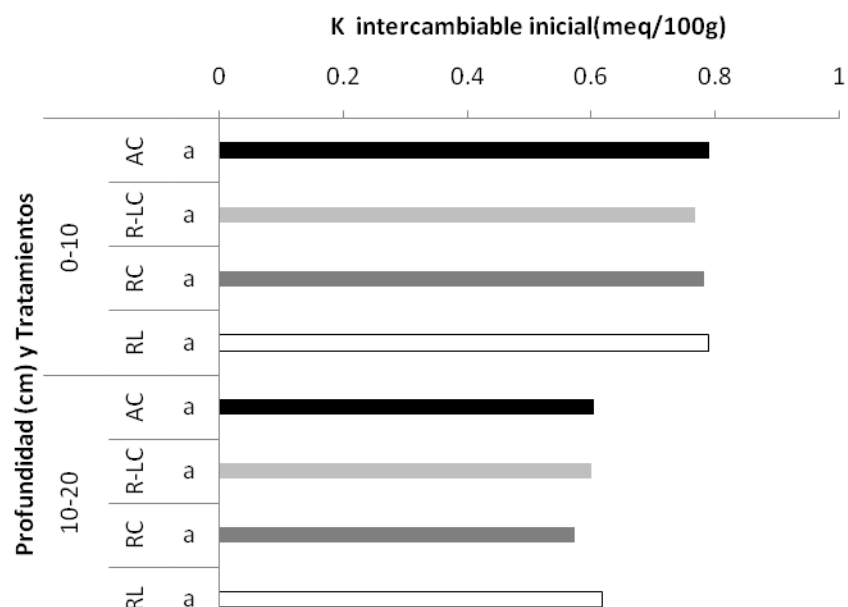


Figura 21: Potasio intercambiable inicial en el año 2001 (meq/100g) según estratos de profundidad (0-10cm, 10-20cm) en agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC). Letras diferentes dentro de cada estrato indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

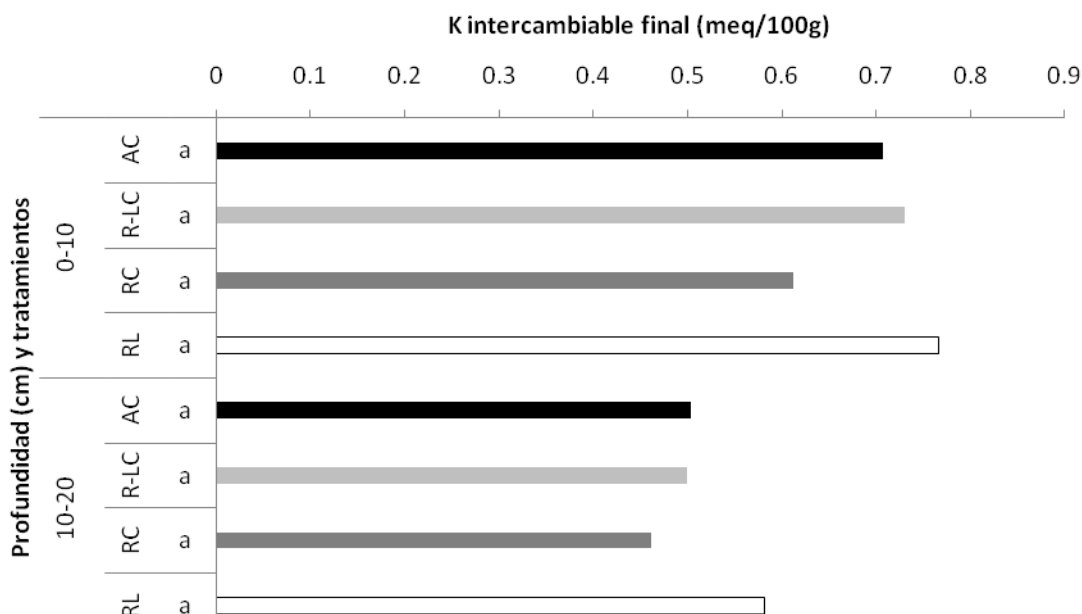


Figura 22: Potasio intercambiable final en el año 2010 (meq/100g) según estratos de profundidad (0-10cm, 10-20cm) en agricultura continua (AC), rotación corta con pasturas (RC), rotación larga con pasturas (RL) y rotación larga con pasturas con laboreo convencional (R-LC). Letras diferentes dentro de cada estrato indican diferencias entre tratamientos (Tukey 0,05).

No hubo diferencia significativa en la extracción de K, aunque la tendencia marcó un mayor K extraído en el sistema AC y el menor en R-LC y RL. La reducción fue de un 11 por ciento del K int en AC, y por otro lado en R-LC y RL fue de 5 y 3 por ciento del K int respectivamente. Sin embargo al final del ensayo tampoco existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos.

En base a la regresión obtenida entre el cambio en la disponibilidad de K int. en el suelo y la extracción en los productos (Figura 18), se estimó los años que le tomaría a cada tratamiento llevar al suelo a un nivel de 0,4 meq/100g de suelo. Se encontró que a RC y AC les tomaría 20 y 21 años, respectivamente, llegar a dicho nivel, mientras que al tratamiento RL le corresponderían 216 años. Al tratamiento R-LC no se le realizó la estimación debido a que la variación de K dio levemente positiva.

5. CONCLUSIONES

La cantidad de N, P y K en el suelo en el muestreo de junio del 2010 fue menor a la cuantificada en marzo del 2001 para todos los nutrientes en todos los tratamientos. Asimismo, se encontró que la variación estuvo asociada al contenido inicial, dado que los tratamientos que partían con niveles más altos de nutrientes fueron los que más perdieron en el período de evaluación.

La concentración de N en los primeros 5 cm fue superior en los tratamientos bajo siembra directa. Por debajo de los 5 cm no existieron diferencias significativas entre los tratamientos.

El balance acumulado de N resultó positivo en los tratamientos R-LC y RL (123 y 33 kg/ha respectivamente) y negativo en los tratamientos RC y AC (-157 y -358 kg/ha). Las diferencias generadas en el balance se explicaron por las diferencias encontradas en los kg de N extraídos, ya que el N fijado biológicamente en los tratamientos con pasturas compensó las distintas entradas que hubo por el agregado de N como fertilizante.

El resultado que generó la incorporación de pasturas en las distintas rotaciones se tradujo en una mayor entrada de N por vía de la FBN, siendo ésta mayor en la medida que la duración de la pastura fue más extensa. Sin embargo, anualizando el ingreso RC presentó mayores valores que las rotaciones con pasturas de larga duración (107 y 65 kg ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente). Por otra parte, cuando existió una mayor relevancia de la agricultura, la menor cantidad de N que entró por fijación simbiótica fue compensada por una mayor entrada de aplicación de fertilizantes nitrogenados.

Como consecuencia del uso de implementos de laboreo se encontró significativamente más P en el estrato de 5 a 10 cm, donde el R-LC obtuvo la mayor disponibilidad de P Bray 1.

Durante la fase pastura se redujo la disponibilidad de P en el suelo, lo que se atribuye al procesos de retrogradación del P en ausencia de refertilizaciones. La disponibilidad se redujo a medida que pasó más tiempo desde el comienzo de la fase de pastura. Al retomar la etapa agrícola, la

disponibilidad de P aumentó como consecuencia de la fertilización a los cultivos anuales.

El balance acumulado de P se explicó principalmente por la Rel P/C; por lo tanto cuanto mayor fue la duración de la pasturas menor fue la extracción de P en el suelo.

Con respecto al K, al no registrarse fertilizaciones, cuando la duración de la etapa agrícola fue mayor se registró una mayor extracción de K en el suelo. Existió una relación entre la extracción de K y la variación del K intercambiable del suelo entre el inicio y fin del experimento. La tasa de pérdida fue mayor en el estrato 0-10 cm, mientras que de 10-20 cm tanto la correlación como la tasa de pérdida fueron menores.

No se encontró relación entre los resultados de balance aparente de N y P y la concentración o disponibilidad de los mismos en el suelo. Sin embargo, existe una asociación entre los balances aparentes y la necesidad incremental del ingreso de fertilizantes de dichos nutrientes, por lo que sería un indicador útil para estimar el déficit de nutriente que será necesario reponer en el mediano plazo para mantener el nivel productivo del sistema. Para el caso de N se determinó que por cada kg por ha de desbalance anual es necesario incorporar $0,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ adicionales para mantener el nivel productivo. Con respecto al P se registró una necesidad anual de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de P incremental por cada kg $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de desbalance

6. RESUMEN

El trabajo consistió en evaluar el efecto de la intensidad de uso agrícola del suelo sobre el balance de nitrógeno, fósforo y potasio en un experimento instalado en el año 1993 en la Estación Experimental Mario A. Cassinoni a 10 Km al sur de la ciudad de Paysandú. Los tratamientos fueron: cultivo continuo bajo siembra directa (AC), rotación pastura-cultivo bajo siembra directa con 33% del tiempo en pastura (RC), rotación pastura-cultivo bajo siembra directa con el 50% del tiempo en pastura (RL) y rotación con el 50% del tiempo en pastura bajo laboreo convencional (R-LC). Se tomaron muestras de suelo en el 2001 (inicio) y 2010 (final) y se determinó N total (%N), P disponible (ppm P Bray) y K intercambiable (meqK/100g) para los estratos de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm. En cuanto al %N final, el contraste R-LC vs SD arrojó una mayor disponibilidad de N en los primeros 5 cm bajo SD, pero no se detectaron diferencias a mayor profundidad ni entre tratamientos con distinto tiempo bajo pasturas. Los niveles finales de P disponible no presentaron diferencias entre tratamientos salvo en el estrato de 5-10 cm donde el R-LC registró valores significativamente superiores, presumiblemente por el efecto de mezclado de perfil durante la labranza. A su vez se constató que en las rotaciones con pastura la retrogradación del P durante las mismas producía una disminución del nivel de P disponible al inicio de la siguiente fase agrícola. Con respecto al K no se detectaron diferencias significativas explicadas por los tratamientos, aunque sí se constató la influencia del tipo de suelo dando en algún estrato significativo. También fue posible encontrar una relación entre la tasa de pérdida de K intercambiable y la extracción del mismo en grano. A nivel general, contrastando los valores de 2001 con los de 2010, todos los nutrientes mostraron un descenso en sus valores, el cual se vio mayormente relacionado al nivel inicial de nutriente. Los mayores descensos se registraron en las parcelas cuyos valores originales eran más elevados. No hubo relación entre los resultados de Balance aparente de N y P y la concentración o disponibilidad de los mismos en el suelo. Sin embargo, existió una asociación entre los balances aparentes y la necesidad incremental del ingreso de fertilizantes de dichos nutrientes, por lo que sería un indicador útil para estimar el déficit de nutriente que será necesario reponer en el mediano plazo para mantener el nivel productivo del sistema.

Palabras clave: Sustentabilidad; Agricultura; Balance de nutriente; Nitrógeno; Fósforo; Potasio; Rotaciones; Manejo de suelo.

7. SUMMARY

The objective of this work was to evaluate the effect of intensity of agricultural land use on the nutrient balance of nitrogen, phosphorus and potassium. The experiment was conducted at the Experimental Station Mario A. Cassinoni 10 km south of the city of Paysandú since 1993. The treatments were continuous cropping under no tillage (AC), crop rotation under no tillage with 33% of time on pasture (RC), crop rotation under no tillage with 50% of the time on pasture (RL) and crop rotation with 50% of time on pasture under conventional tillage (R-LC). Soil samples were taken in 2002 (beginning) and 2010 (end) and were evaluated N content (% N), available P (Bray P ppm) and exchangeable K (meqK/100g) for 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm layers. For the final content of N, the contrast R-LC vs NT showed a higher availability of N in the first 5 cm under no tillage (NT), but there was no difference in more depth or with different time of pasture between treatments. The final levels of available P did not differ among treatments except for the 5-10 cm layer where the CT-R record significantly higher values, presumably by the mixing effect during tillage. At the same time was found that pasture rotations generates P retrogradation, producing a reduction in the level of available P at the beginning of the agricultural phase. Regarding exchangeable K, the treatments did not produce significant differences, although it was found the influence of soil type. It was also possible to find a relationship between the rate of loss of exchangeable K and the extraction of K in grain. In general, comparing 2001 values to 2010, all nutrients showed decreases in their values, which was found to be mostly related to the initial level of nutrient. The largest decreases were recorded in plots where original values were higher. There was no relationship between the results of apparent balance of N and P and the concentration or availability of data in the soil. However, there was an association between apparent balance and the need of incremental fertilizer income; it would be a useful indicator to estimate the nutrient deficit that will need replacing in the medium term to maintain the production level of the system.

Keywords: Sustainability; Agriculture; Nutrient balance; Nitrogen; Phosphorus; Potassium; Rotations; Soil management.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABELLA, M. R.; NIN, A. 2003. Evolución en las formas y contenidos de fósforo del suelo bajo sistemas de rotaciones de pasturas y cultivos con laboreo convencional y siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 67 p.
2. ABRIL, A.; SALAS, P.; LOVERA, E.; KOPP, S.; CASADO-MURILLO, N. 2005. Efecto acumulativo de la siembra directa sobre algunas características del suelo en la región semiárida central de la Argentina. *Revista Ciencias del Suelo*. 23(2): 179-188.
3. BERARDO, A. 2004. Manejo de la fertilización en una agricultura sustentable. *Inpofos, Investigaciones Agronómicas del Cono Sur*. 23: 23-25.
4. BORDOLI, J.M. 2001. Dinámica de nutrientes y fertilización en siembra directa. *In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el cono sur*. Montevideo, PROCISUR/IICA. pp. 289-298.
5. BRINDANAN, P. S.; STOORVOGEL, J. J.; JANSEN, D. M.; VLAMING, J.; GROOT, J. J. R. 2000. Land quality indicators for sustainable land management: Proposed method for yield gap and soil nutrient balance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 81: 103-112.
6. CANO, J.D. 2005. Balance aparente de fósforo en rotaciones agrícolas del litoral oeste del Uruguay. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. Facultad de agronomía, Escuela de Graduados Alberto Soriano. 48 p.
7. _____.; ERNST, O.; GARCÍA, F. 2006. Balance aparente de fósforo en rotaciones agrícolas del litoral oeste del Uruguay. *Inpofos, Informaciones Agronómicas*. 32: 8-11.
8. CASANOVA, O.N.; HERNÁNDEZ J.; ZAMALVIDE J.P. 1988. Capacidad de suministros de potasio en los suelos de Uruguay. Facultad de Agronomía. *Boletín de investigaciones* no. 19. 20 p.
9. CASAS, R.; CRUZARTE, G. 2009. Extracción de nutrientes en la agricultura Argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 44: 21-26.

10. CIAMPITTI, I.; GARCÍA, F. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. *Informaciones Agronómicas*. 11: 13-16.
11. _____.; _____. 2008. Balance y eficiencia de uso de los nutrientes en sistemas agrícolas. *Revista Horizonte A*. 4 (18): 22-28.
12. _____.; _____. 2009a. CalcReq2009; planilla de cálculo para estimar requerimientos nutricionales de cultivos de cereales, oleaginosos, forrajeras e industriales. (en línea). Norcross, GA, IPNI. Consultado sep. 2010. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/573A3BBA6EF828E903256960006DCFC7?opendocument&navigator=home+page](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/573A3BBA6EF828E903256960006DCFC7?opendocument&navigator=home+page)
13. _____. 2009b. Dinámica del fósforo del suelo en rotaciones agrícolas en ensayos de nutrición a largo plazo. Tesis Magister Scientiae. Buenos Aires, Argentina. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. 116 p.
14. CONTI, M. E. 2000. Dinámica de la liberación y fijación de potasio en el suelo. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 8: s.p.
15. CREMPIEN, C. 2008. Antecedentes técnicos y metodología básica para utilizar en presupuestación en establecimientos ganaderos. 2ª. ed. corr. Montevideo, Hemisferio Sur. 72 p.
16. DARWICH, N. A. 2003. El balance Físico económico en las rotaciones agrícolas Proyecto Fertilizar. (en línea). s.l., Agromail Servicio de Información Agropecuaria. 3 p. Consultado feb. 2011. Disponible en <http://www.agromail.net>.
17. DE BOER, I.J.M. 1997. Health and biophysical sustainability of agroecosystems. In: Seminar of Agro Ecosystem Health (1996, Wageningen). Proceedings. Wageningen, National Council for Agricultural Research. pp. 37-49.
18. DIAZ ROSELLO, R. 1992. Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas. *INIA. Investigaciones Agronómicas*. 1 (1): 27-35.
19. ERNST, O. 2004. Sistemas agrícolas pastoriles: determinantes de su sustentabilidad biológica, económica y social. In: Reunión del

Grupo Técnico Regional del Cono Sur (2004, Salto). Trabajos presentados. s.n.t. s.p.

20. _____.; SIRI PRIETO, G. 2009. Manejo del suelo y rotación con pasturas: efecto sobre rendimiento de cultivos, su variabilidad y el uso de insumos. In: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º., 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Montevideo, Universidad de la República. Facultad de Agronomía. pp. 125-140.
21. _____.; SIRI PRIETO, G. 2010. Manejo del suelo y rotación con pasturas; efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. 45: 22-26.
22. FORJÁN, H. J. 2003. Balance de nutrientes en sistemas agrícolas. *Agrobarrow*. 28: 17-19.
23. _____. 2004. Balance de nutrientes en secuencias agrícolas de la región sur bonaerense. *Informaciones agronómicas del Cono Sur*. 21: 8-11.
24. GARCÍA, F. 2001. Balance y manejo de nutrientes en rotaciones agrícolas. In: Rotación de cultivos en siembra directa. Rosario, AAPRESID. pp. 59-68 (Publicación Técnica).
25. _____. 2003. Balance de nutrientes en la rotación: Impacto en rendimientos y calidad de suelo. In: Trucco, V.; Melgar, R.; y García, F. eds. Fertilidad y fertilización en siembra directa. Buenos Aires, Inpofos/ AAPRESID. pp. 60-65.
26. _____.; PICONE, L. 2004. Fósforo; dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. *Informaciones Agronómicas*. 55: 1-5.
27. _____. 2005. Balance de nutrientes y necesidades de fertilización del cultivo de trigo. In: Jornada de Trigo de la Región Centro (1º, 2005, Córdoba). Trabajos presentados s.n.t.s.p.
28. _____. 2007. Intensificación ecológica de los sistemas de producción de la región pampeana de Argentina. (en línea) In: Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (17º, 2007, Guanajuato, México). Trabajos presentados. Acassuso, IPNI. s.p. Consultado febrero 2011. Disponible en <http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e>

[0053ea70/773b2ffcae0617d8032574cb007fb3e7/\\$FILE/FGarcia-Int%20Ecologica%20Argentina%20CLACS%202007.pdf](http://0053ea70/773b2ffcae0617d8032574cb007fb3e7/$FILE/FGarcia-Int%20Ecologica%20Argentina%20CLACS%202007.pdf)

29. _____.; GONZALEZ, M. F. 2010. Balances de nutrientes en Argentina ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? Informaciones Agronómicas. 48: 1-5.
30. GARCÍA PRÉCHAC, F. 2004a. Cultivo continuo en siembra directa o rotaciones de cultivos y pasturas en suelos pesados del Uruguay. Revista Científica Agropecuaria. 8 (1): 23-29.
31. _____.; ERNST, O.; SIRI PRIETO, G.; TERRA, J. A. 2004b. Integrating no-till in livestock/crop-pastures rotations in Uruguay. Soil and Tillage Research. 77(1): 1-13.
32. HAVLIN, J.L.; KISSEL, D.E.; MADDUX, L.D.; CLAASSEN, M.M.; LONG, J.H. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. Soil Science Society of America Journal. 54 (2): 448-452.
33. HERNÁNDEZ, J. 1992. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 36 p.
34. _____.; OTEGUI, O.; ZAMALVIDE, J.P. 1995. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía. Boletín de Investigaciones no. 43. 32 p.
35. _____. 1999. Fósforo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 89 p.
36. MARTELLOTTI, E.; SALINAS, A.; GIUBERGIA, J.P.; SALAS, P.; LOVERA, E. 2003. La intensificación de la agricultura ¿se está haciendo de manera sustentable? (en línea). s.l., INTA. 3 p. Consultado feb. 2011. Disponible en <http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/boletines/bole2002/boltec01.htm>
37. MORÓN, A.; PEREZ, J. 1981. Dinámica del fósforo en la productividad de una pastura convencional. CIAAB Estación Experimental La Estazuela. Miscelánea no. 37. p. irr.
38. _____.; KIEHL, J.C. 1992a. Dinámica del fosforo en tres sistemas agrícolas en el sureste del Uruguay. INIA. Investigaciones Agronómicas. 1 (1): 61-84.

39. _____. 1992b. El fósforo en el sistema suelo-planta. INIA. Investigaciones Agronómicas. 1 (1): 45-60.
40. _____. 2003. Principales contribuciones del experimento de rotaciones cultivos-pasturas de INIA La Estanzuela en el área de fertilidad de suelos (1963-2003). In: Díaz, R.; Morón, A. ed. 40 años de rotaciones agrícolas ganaderas. Montevideo, INIA. pp. 1-9 (Serie Técnica no. 134).
41. _____. 2004. Efecto de las rotaciones y el laboreo en la calidad del suelo. In: Simposio Fertilidad (Rosario, 2004). Fertilidad de suelos para una agricultura sustentable. s.n.t.s.p.
42. NLWRAP (National Land and Water Resources Audit Project). 2001. Nutrient balance in regional farming systems and soil nutrient status. Canberra, Commonwealth Government of Australia. 101 p.
43. PERDOMO, C. s.f. Recomendación de dosis de fertilización. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado may. 2011. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/curso/docs/RecDosis.pdf>
44. _____.; BARBAZÁN, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 72 p.
45. QUINCKE, A.; SAWCHIK, J.; MORÓN, A. 2010. Siembra directa y rotación con pasturas: efectos sobre el carbono orgánico, nitrógeno total y potencial de mineralización de nitrógeno en suelo agrícola del SW de Uruguay. In: Seminario Dinámica de las Propiedades del Suelo bajo Diferentes Usos y Manejos. (2010, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados s.n.t. s.p.
46. REYES, J.I.; SILVA, P.; ACEVEDO, E. 2002. Efecto de 4 temporadas de cero labranzas y manejo de rastrojo en las condiciones físicas y químicas de un suelo aluvial de la zona central de Chile. Tesis Ing. Agr. Santiago de Chile, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. 156 p.
47. RHOTON, F. E. 2000. Influence of time on soil response to no-till practices. Soil Science Society of America Journal. 64: 700-709.

48. ROY, R.N.; MISRA, R.V.; LESSCHEN, J.P.; SMALING, E.M.A.
2003. Assessment of soil nutrient balance; approaches and methodologies. Rome, FAO. 101 p. (FAO. Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin no. 14).
49. SARANDÓN, S.J. 2002. La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El impacto de la agricultura intensiva de la revolución verde. In: Sarandón S.J. ed. Agroecología; el camino hacia una agricultura sustentable. La Plata, Ediciones Científicas Americanas. pp. 393-414.
50. SAWCHIK, J. 2001. Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo. pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el cono sur. Montevideo, PROCISUR/IICA. pp. 323-345.
51. SHAO-WEN HUANG; JI-YUN JIN; YOU-LU BAI; LI-PING YANG. 2007. Evaluation of nutrient balance in soil-vegetable system using nutrient permissible surplus or deficit rate. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 38(7): 959 – 970.
52. SHELDRIK, W.F.; SYERS, J.K.; LINGARD, J. 2002. A conceptual model for conducting nutrient audits at national, regional, and global scales. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 62: 61-72.
53. SMYTH, A.J.; DUMANSKI, J. 1993. FESLM; an international framework for evaluating sustainable land management. Rome, FAO. 74 p. (World Soil Resources Report no. 73).
54. SUÑER, L.; GALANTINA, J. A.; ROSELL, R. 2005. Cambios del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. Informaciones Agronómicas. 25: 5-8.
55. TERRY, L.R.; JOHNSTON, A.M. 2006. Intensidad de cultivo, rotaciones y tecnología de fertilización para la producción sustentable de trigo Una experiencia norteamericana. Informaciones Agronómicas. 26: 1-9.
56. VAN BRUCHEM, J. 1996. Some comments from a biophysical point of view. In: Seminar of Agro Ecosystem Health (1996, Wageningen). Proceedings. Wageningen, National Council for Agricultural Research. pp. 97 – 104.

57. _____.; LATINGA, E.A.; OVEREST, J.; JORICK, J.P.M. 1999. Environmental tuning of agriculture in the Netherlands. In: Kyusei Nature Farming and Effective Microorganisms for Agricultural and Environmental Sustainability (1999, Bangkok). Proceedings. Bangkok, Thailand, Asian Pacific Natural Agriculture Network (APNAN). pp. 233-245.
58. VENTIMIGLIA, L. A.; CARTA, H. G.; RILLO, S. N. 2000. Exportación de nutrientes en campos agrícolas. Inpofos. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 7: 11-12.
59. VIGLIZZO, E. 1996. La sustentabilidad en la agricultura ¿Como evaluar y medir?. RIA. 26: 1-15.
60. _____. 1999. Sustentabilidad ecológica y económica de la ganadería. Revista Argentina de Producción Animal. 19(1): 1-13.
61. WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. Our common future. Oxford, Oxford University Press. 400 p.
62. ZAMALVIDE, J. 1992. Dinámica del fósforo en los suelos con especial referencia a la disponibilidad en rotaciones de cultivos y pasturas. Revista INIA. 1(1): 85-93.

9. APÉNDICES

Apéndice No. 1. Contraste LC vs. SD de % N para el estrato 0-10 cm.

Fuente	DF	Tipo III SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	0.00049206	0.00016402	1.62	0.2300
Contraste	DF	Contraste SS	CM	F Valor	Pr > F
LC vs resto	1	0.00047767	0.00047767	4.71	0.0476

Apéndice No. 2. Contraste AC vs. Rotación de % N para el estrato 0-10 cm.

Fuente	DF	Tipo III SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	0.00049206	0.00016402	1.62	0.2300
Contraste	DF	Contraste SS	CM	F Valor	Pr > F
AC vs ROT	1	0.00003910	0.00003910	0.39	0.5445

Apéndice No. 3. Contraste LC vs. SD de % N para el estrato 10-20 cm.

Fuente	DF	Tipo III SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	0.00022159	0.00007386	0.23	0.8761
Contraste	DF	Contraste SS	CM	F Valor	Pr > F
LC vs RESTO	1	0.00008353	0.00008353	0.26	0.6203

Apéndice No. 4. Efecto de los tratamientos y de la Relación pastura/cultivo sobre la fijación biológica de N acumulada.

Fuente	DF	Tipo I SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	108770.6486	36256.8829	10.78	0.0008
RelPC	1	38770.3877	38770.3877	11.52	0.0048

Apéndice No. 5. Efecto de los tratamientos y de la Relación pastura/cultivo sobre la fertilización nitrogenada acumulada.

Fuente	DF	Tipo I SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	98126.92422	32708.97474	2.71	0.0878
RelPC	1	41972.58504	41972.58504	3.48	0.0848

Apéndice No. 6. Efecto de los tratamientos y de la Relación pastura/cultivo sobre el N extraído acumulado.

Fuente	DF	Tipo I SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	447660.3606	149220.1202	8.67	0.0020
RelPC	1	96156.7292	96156.7292	5.59	0.0344

Apéndice No. 7. Efecto de los tratamientos y de la Relación pastura/cultivo sobre el balance de N acumulado.

Fuente	DF	Tipo I SS	CM	F Valor	Pr > F
Trat	3	457093.5616	152364.5205	7.75	0.0032
RelPC	1	91277.3049	91277.3049	4.64	0.0505

Apéndice No. 8. Efecto de los tratamientos y de la Relación pasturas/cultivo sobre la extracción de P.

Variable	DF	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	1	162.32363	9.56485	16.97	<.0001
RelPC	1	-66.77418	11.06731	-6.03	<.0001

Apéndice No. 9. Efecto de los tratamientos y de la Relación pasturas/cultivo sobre el balance acumulado de P.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	13	0.38	0.7670
RelPC	1	13	5.84	0.0312

Apéndice No. 10. Efecto del tratamiento y de la profundidad para la concentración de K para el estrato 20-40cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	13	4.53	0.0221
Prof	1	13	15.48	0.0017

Apéndice No. 11. Efecto de la Relación pastura/cultivo sobre el K extraído acumulado.

Variable	DF	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	1	242.96387	23.51617	10.33	<.0001
RelPC	1	-107.87459	27.21012	-3.96	0.0011

Apéndice No. 12. Efecto de los Semestre Postpastura en el contenido de P para el perfil 0-20 con LC.

Parámetro	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	33.75333333	1.24417791	27.13	0.0235
Spp	-3.04145161	0.27368265	-11.11	0.0571

Apéndice No. 13. Efecto de los Semestre Postpastura en el contenido de P para el perfil 0-20 con RC.

Parámetro	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	30.98864662	4.74968647	6.52	0.0073
Spp	-0.25334586	1.30730817	-0.19	0.8587

Apéndice No. 14. Efecto de los Semestre Postpastura en el contenido de P para el perfil 0-20 con RL.

Parámetro	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	24.43543568	2.79477112	8.74	0.0003
Spp	-1.22201245	0.62492982	-1.96	0.1079

Apéndice No. 15. Efecto del contenido inicial de P y los Semestres Postpasturas sobre la variación de P para el estrato 0-10 cm.

Variable	DF	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	1	6.88011	4.92256	1.40	0.1825
Pi010	1	-0.68939	0.14424	-4.78	0.0002
Spp	1	-0.58904	0.28962	-2.03	0.0601

Apéndice No. 16. Efecto del contenido inicial de P y los Semestres Postpasturas sobre la variación de P para el estrato 10-20 cm.

Variable	DF	Estimación	Error	t Valor	Pr > t
Intercepto	1	3.54619	1.84771	1.92	0.0742
Pi1020	1	-0.92335	0.09955	-9.28	<.0001
Spp	1	-0.04078	0.07897	-0.52	0.6131

Apéndice No. 17. Efecto del tratamiento, año y de la interacción tratamiento*año sobre la pérdida de N en el perfil 0-10 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	14	2.10	0.1457
año	1	14	24.27	0.0002
Trat*año	3	14	1.47	0.2660

Apéndice No. 18. Efecto del tratamiento, año y de la interacción tratamiento*año sobre la pérdida de N en el perfil 10-20 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	14	0.60	0.6275
año	1	14	13.28	0.0027
Trat*año	3	14	0.17	0.9152

Apéndice No. 19. Efecto del tratamiento, año y de la interacción tratamiento*año sobre la pérdida de P en el perfil 0-10 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	14	1.80	0.1938
año	1	14	13.06	0.0028
Trat*año	3	14	0.11	0.9541

Apéndice No. 20. Efecto del tratamiento, año y de la interacción tratamiento*año sobre la pérdida de P en el perfil 10-20 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	14	0.08	0.9717
año	1	14	60.85	<.0001
Trat*año	3	14	0.67	0.5827

Apéndice No. 21. Efecto del tratamiento, año y de la interacción tratamiento*año sobre la pérdida de K en el perfil 0-10 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	14	0.82	0.5041
año	1	14	3.85	0.0700
Trat*año	3	14	1.02	0.4129

Apéndice No. 22. Efecto del tratamiento, año y de la interacción tratamiento*año sobre la pérdida de K en el perfil 10-20 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	14	1.01	0.4191
año	1	14	34.53	<.0001
Trat*año	3	14	2.06	0.1519

Apéndice No. 23. Efecto del tratamiento, Semestre Postpastura, Entrada de P acumulada y de la extracción de P sobre la variación de P en el estrato 0-10 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	11	1.24	0.3424
Spp	1	11	0.62	0.4463
Peacum	1	11	2.00	0.1849
Pextacum	1	11	1.54	0.2409

Apéndice No. 24. Efecto del tratamiento, Semestre Postpastura y de la Relación pastura/cultivo sobre la variación de P en el estrato 0-10 cm.

Efecto	Num DF	Den DF	F Valor	Pr > F
Trat	3	12	0.56	0.6535
Spp	1	12	1.05	0.3265
RelPC	1	12	0.16	0.6979

Apéndice No. 25. Estimación de la extracción de nutrientes por producción animal.

A la producción de forraje, se la pondero por un porcentaje de utilización de 65%. Por otra parte se considero un requerimiento de consumo de 10,7 kg de MS para aumentar 1 kg de peso vivo animal (en base a Crempien, 2008). Del cociente entre los Kg de MS utilizables y los requerimientos de MS para producir un kilo de carne se obtuvo los kg de carne producidos por la pastura. Una vez obtenida la producción de carne se calculo la extracción en base a valores aportados por Mathews et al., citados por García (2005). Las mismas fueron de 27,2gN/kg carne, 6,8gP/kg carne y 1,5gK/kg carne.

En el cuadro se presentan el promedio de las extracciones de nutriente para cada tratamiento a lo largo de todo el experimento.

	N(kg/ha)	P(kg/ha)	K(kg/ha)
AC	0	0	0
R-LC	34,3	8,6	1,9
RC	19,4	4,9	1,1
RL	31,2	7,8	1,7