

PROGRAMACION DINAMICA APLICADA A ROTACIONES DE CULTIVOS SUSTENTABLES

Carrizo, Gabriel Aníbal^{a,b}, Canziani, Ana Graciela^b and Lotito, Pablo Andrés^a

^a*PLADEMA-CONICET, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil, Argentina. gabrielanibal@gmail.com, plotito@exa.unicen.edu.ar.*

^b*Instituto Multidisciplinario sobre Ecosistemas y Desarrollo Sustentable, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Tandil, Argentina. canziani@exa.unicen.edu.ar.*

Keywords: Agricultura sustentable, rotaciones de cultivos, balance de nutrientes, programación dinámica.

Abstract. El objetivo de este trabajo es la modelización de la dinámica de indicadores de sustentabilidad para agroecosistemas y su relación con las actividades agrícolas de la llanura pampeana argentina. A partir del modelo se pueden establecer el impacto de la producción en dichos indicadores y en el balance de nutrientes. De este modo es posible analizar distintas rotaciones de cultivos, obteniéndose un sistema de control. Sobre este sistema se imponen restricciones agroecológicas que garanticen la sustentabilidad del proceso y se establece como objetivo maximizar las ganancias en un período de diez años.

1 INTRODUCCIÓN

La intensificación de las actividades agrícolas en la mayor parte de las áreas cultivables del país, junto con la expansión del cultivo de soja y el doble cultivo trigo/soja (Darwich (2003); ?), como el aumento de los rendimientos en los cultivos de maíz y girasol, han acentuado el empobrecimiento en nutrientes en los suelos, acarreado una pérdida de materia orgánica en el horizonte superficial. A su vez el uso de fertilizantes permite obtener niveles de producción mayores (Villasmil (1973); Ascheri (2005); Alvarez (2004b,a); Inkson (1964); Pimentel-Gomes (1953)).

Se han desarrollado múltiples estudios analizando los impactos de las distintas actividades agrícolas en el suelo y de la calidad del suelo en los niveles de producción (Casas (2003); Alvarez (2004b,a, 2006)). En este trabajo se propone la utilización de modelos de producción integrados con balances de nutrientes en pos de determinar qué rotaciones de cultivo sustentables desde el punto de vista ecológico y óptimas desde el punto de vista económico. Para ello en la segunda sección se presentan los indicadores de sustentabilidad a utilizar y modelos para calcularlos, en la cuarta sección se plantea un modelo a partir del cual el problema resulta equivalente al de hallar el camino más corto en un grafo (Bertsekas (2005)).

2 INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD Y BALANCE DE NUTRIENTES

Con el objeto de monitorear el impacto de las actividades agrarias en los ecosistemas, se han desarrollado indicadores agro-ambientales que sirvan para evaluar las tendencias de la calidad ambiental a diversas escalas (predio, agroecosistema, región, país).

En Argentina, el mayor desarrollo sobre indicadores de sustentabilidad se debe al grupo de investigadores del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) dirigido por el Dr. E. Viglizzo, quienes han desarrollado el software Agro-Eco-Index (Viglizzo (2006)). Este software realiza el cálculo de 12 indicadores de sustentabilidad a partir de la compilación de datos acerca de las propiedades del suelo, labores y actividades realizadas, agroquímicos aplicados y factores climáticos observados. Para este trabajo se consideraran dos de ellos: Balance de nitrógeno y balance de carbono en suelos.

2.1 Balance de nitrógeno

El nitrógeno es un elemento fundamental en la materia vegetal, ya que es un constituyente básico de las proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, etc. La presencia de nitrógeno en el suelo junto con la disponibilidad de agua son los principales factores que regulan el rendimiento de los principales cultivos de la región pampeana (Ascheri (2005)).

Cuando la extracción de este nutriente es predominante sobre la incorporación se da un balance negativo que afecta al rendimiento y a la rentabilidad de las actividades agrícolas, mientras que cuando el balance es positivo se corren riesgos de contaminación. Por lo que desde el punto de vista de la sustentabilidad es deseable contar con balances equilibrados a lo largo de los años. Dada la importancia desde el punto de vista ecológico y económico, se considera relevante analizar los balances de nitrógeno del suelo.

El método utilizado para estimar los balances de nitrógeno es el propuesto por Frank (2007), que considera las diferencias entre egresos e ingresos. Las vías de ingreso consideradas fueron los fertilizantes aplicados, la fijación biológica y el aporte de las lluvias. Por otro lado, la única vía de egreso considerada fue la exportación de nutrientes a partir de las producciones del lote.

Para calcular los ingresos se cuantificaron los kg y las ha en las que se aplican los distintos fertilizantes, afectándolos por sus contenidos de nitrógeno (N) según lo establecido en la tabla 1. Por su parte, para cuantificar el aporte de la fijación biológica producida durante el cultivo

de soja se utiliza un valor de 0,05 kg de N fijados por cada kg de grano obtenido a la cosecha. El aporte de N a partir de las precipitaciones se estima en 0,6 kg de nutriente por cada 100 mm de lluvias anuales. Finalmente, para calcular los egresos, se afecta el contenido de N de cada producto (ver tabla 2) a la cantidad producida en el año de evaluación.

Fertilizante	Contenido de N(% a partir de kg)
Complejo 18-9-0	18
Fosfato di-amónico	19
Fosfato mono-amónico	12
Hiperfosfato	0
MAP	12
Mezcla 18-46-0	18
Nitrato de amonio	33
SOLUAN	32
Sulfato de amonio	21
UREA	46
Urea amonio nitrato (UAN)	30

Table 1: % de N en fertilizantes comerciales.

Producto	contenido de N (gr/kg)
Girasol	40,8
Maíz	16,3
Soja	58,1
Trigo	22,9

Table 2: gr de N por kg cosechado.

Por lo tanto el balance de nitrógeno está dado por:

$$\Delta N = \sum_{i=1}^m F_i P_{F_i} + 0.0006L + 0.05P\chi_s - P\alpha.$$

Donde:

- Se considera la posibilidad de la utilización de diversos tipos de fertilizante para cada aplicación, siendo F_i la cantidad, en kg/ha, de fertilizante del tipo i y P_{F_i} la proporción de nitrógeno en el fertilizante de tipo i .
- L es la cantidad de lluvias anuales en milímetros.
- P es la producción obtenida en kg/ha.
- α es la proporción de nitrógeno de la producción obtenida.
- χ_s toma el valor 1 o 0, según el cultivo sea soja o no.

Por lo que el nitrógeno disponible para el año será:

$$N_{n+1} = N_n + \sum_{i=1}^m F_i P_{F_i} + 0.0006L + 0.05P\chi_s - P\alpha.$$

2.2 Balance de Carbono

La materia orgánica del suelo (MOS) está constituida por todas las sustancias carbonadas orgánicas del mismo. Su composición abarca desde materiales vegetales frescos sin descomponer, como una hoja, hasta cadenas carbonadas muy transformadas y estables como los ácidos húmicos. A modo de simplificación puede decirse que está compuesta por residuos vegetales y materia orgánica humificada (o humus).

Los residuos vegetales están compuestos en un 40% por carbono mientras que el humus tiene un promedio de 58% de carbono. En la composición del humus el porcentaje de carbono es lo suficientemente estable como para hablar indistintamente de MOS o carbono orgánico del suelo (COS).

El humus tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo: favorece la penetración y retención del agua, disminuye la erosión, favorece el intercambio gaseoso y la disponibilidad de nutrientes, principalmente el nitrógeno. También tiene efecto sobre las propiedades químicas ya que reserva nutrientes para la vida vegetal (N, P, S, etc.), y la capacidad de tapón del suelo favorece la acción de abonos minerales y la absorción a través de las raíces. Los efectos sobre las propiedades biológicas del suelo incluyen el favorecer los procesos de mineralización, estimular el crecimiento de microorganismos y estimular el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado (Julca-Otiniano (2006)). Por estos motivos la cantidad de materia orgánica del suelo es el indicador de mayor importancia para medir la calidad del suelo (Julca-Otiniano (2006); Casas (2003)).

La fuente primaria del carbono orgánico del suelo está constituida por las partes aéreas no cosechadas de los cultivos, las raíces y los exudados radicales. Una vez en el suelo, puede liberarse en forma de dióxido de carbono o incorporarse a éste mediante la humificación (Casas (2003)).

En forma aproximada, puede calcularse el balance de carbono mediante el modelo propuesto en Alvarez (2006):

$$\Delta C = PC_{AH} - C_a c_M,$$

donde:

- ΔC está expresado en toneladas de carbono por hectárea y año (t C/ha/año).
- P rendimiento del cultivo (t grano/ha/año, 14 % de humedad).
- C_{AH} coeficiente de aporte de humus de los residuos. Para girasol 0,0004 (t C humus/kg grano), para maíz 0,000020 (t C humus/kg grano), soja 0,00037 (t C humus/kg grano) y trigo 0,0004 (t C humus/kg grano).
- c_a carbono orgánico del suelo de 0 a 30 cm (t C/ha). Se obtiene a partir de un análisis de suelo. Como los resultados de laboratorio se expresan generalmente como porcentaje de materia orgánica, dividiendo ese porcentaje por 1,72 se lo transforma en porcentaje de carbono y asumiendo una densidad aparente de 1,3 t/m³ para el suelo, al multiplicarlo por 39 se lo lleva a t C/ha.
- c_M coeficiente de mineralización de la materia orgánica, que es el 5,7 % anual según Alvarez (2006). Corresponde señalar que el valor de este parámetro difiere con los establecidos por otros autores quienes estiman que varía entre el 2 y 5% dependiendo de condiciones del suelo y climáticas.

Este modelo puede aplicarse cuando los aportes de carbono debidos a la vegetación espontánea sean despreciables.

3 PRODUCCIÓN

Con el objeto de estimar la producción por hectárea se han planteado diversos modelos en los cuales se propone que los kilogramos a obtenerse por hectárea son función de los nutrientes presentes en el suelo (Villasmil (1973)), principalmente enfocados en los niveles de nitrógeno y fósforo (Ascheri (2005); Alvarez (2004b,a)). Estos modelos de producción están basados en la ley de mínimo según la cual el nivel de producción está determinado por el nutriente que se encuentre en menor cantidad.

Debido a su simplicidad un modelo comúnmente utilizado (Satorre1) es el lineal:

$$y = ax + b,$$

donde x representa la cantidad de N disponible, considerando el que se aplica como fertilizante y el disponible en el suelo, e y representa la producción a obtenerse por hectárea.

4 FORMULACIÓN COMO PROBLEMA DE CONTROL ÓPTIMO

Considerando a los niveles de nitrógeno y carbono en el suelo como variable de estado, utilizando los modelos mencionados en la sección 2, se obtiene el siguiente sistema dinámico discreto en el tiempo:

$$(N, C)_{n+1} = (N_n + x_n + 0.0006L + 0.05y_n\chi_s - y_n\alpha_n, C_n + y_nC_{AH} - C_n c_M)$$

donde:

- y_n es la producción obtenida en kg/ha.
- x_n es la cantidad de nitrógeno aplicada en kg/ha.
- α_n representa las extracciones de nitrógeno en grano, que varía de acuerdo al cultivo del año según se indica en la tabla 2.
- C_{AH} representa el aporte de humus de los residuos: para girasol 0,0004 (t C humus/kg grano), para maíz 0,000020 (t C humus/kg grano), soja 0,00037 (t C humus/kg grano) y trigo 0,0004 (t C humus/kg grano).
- Se considera $c_M = 4\%$.
- Los coeficientes de aporte de humus son: 0,0005078 (tn C/ kg grano) para girasol, 0,0003589 (tn C/ kg grano) para maíz, 0,0004988 (tn C/ kg grano) para soja y 0,0004950 (tn C/ kg grano) para trigo. Estos coeficientes de aporte de humus fueron calculados a partir de datos de INTA siguiendo la metodología propuesta por Alvarez (2006).

Las restricciones son:

- $N_n \geq 0$ y $C_n \geq 0$ para todo $n = 1, \dots, 10$
- $N_{11} \geq 100$.
- $C_{11} \geq 68$.

El conjunto de estrategias para el año n estará determinado por el cultivo a sembrar a_n y la cantidad de nitrógeno en el aplicar x_n .

La función objetivo será la suma de los márgenes brutos por hectárea a lo largo de los años. Luego tenemos el siguiente problema:

$$\max \sum_{n=1}^{10} g_n(a_n, N_n, C_n),$$

sujeto a

- $N_n \geq 0$ y $C_n \geq 0$ para todo $n = 1, \dots, 10$.
- $N_{11} \geq 100$.
- $C_{11} \geq 68$.
- $C_{n+1} = C_n + y_n C_{AH}(a_n) - C_n C_M$ para todo $n = 1, \dots, 10$.
- $N_{n+1} = N_n + x_n + 0.0006L + 0.05y_n \chi_s - y_n \alpha_n(a_n)$ para todo $n = 1, \dots, 10$.
- $y_n(a_n, N_n, C_n)$ es la cantidad de grano producida en el año n .
- N_0 y C_0 dados.

5 DISCRETIZACIÓN Y RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para el abordaje de este problema se hacen algunas simplificaciones y supuestos:

- Se consideran los cuatro cultivos principales de la llanura pampeana: Trigo, soja, girasol y maíz, considerando un solo cultivo por año.
- Se supone una lluvia anual de 1000 mm.
- La variable de decisión estará dada por el tipo de cultivo y la tecnología a utilizar, para ello se consideran las propuestas por [AACREA \(2007\)](#), resultan un total de 17 opciones en cada etapa.
- Los cálculos económicos se hacen con los valores de noviembre de 2007 proporcionados por [AACREA \(2007\)](#).
- El contenido de nitrógeno del suelo se lo representa como una variable discreta tomando tres intervalos, llamándolos: N_b para contenidos bajos, entre 0 y 75 kg/ha; N_m para contenidos medios, entre 75 y 125 kg/ha; y N_a para contenidos altos, superiores a 125 kg/ha. Se consideran los valores: de 50, 100 y 150 kg/ha como representantes de N_b , N_m y N_a , respectivos. Haciendo uso de ellos se hace el cálculo del balance de nitrógeno para cada una de las actividades y se considera como nivel de nitrógeno para el inicio de la etapa siguiente al intervalo al cual conduzca dicho balance.
- Los niveles de producción establecidos como mínimos y máximos en se los asoció a los niveles de nitrógeno N_b y N_a , y para el nivel N_m se considera el promedio de los valores máximo y mínimo.

- El contenido de carbono del suelo se lo representa con una variable discreta de veinte intervalos posibles, tomando como IC_1 para los valores menores que 40,81 t/ha, IC_{20} para valores mayores que 85.71 t/ha; y IC_2, \dots, IC_{19} intervalos de igual longitud entre estos valores. Para los estados IC_2 hasta IC_{19} se consideran los puntos medios de los intervalos de carbono como representantes para el cálculo del balance. Para los estados IC_1 e IC_{20} se consideran como representantes 39,56 y 86,95 t/ha respectivamente.
- Para establecer el estado siguiente del nivel de carbono se aplicó la siguiente regla: Se calculó el balance para el representante del intervalo:
 - Si el nivel obtenido pertenece al mismo intervalo desviándose en menos de 0,75 tn/ha del representante, se considera que permanece en el mismo intervalo.
 - Si el nivel obtenido pertenece al mismo intervalo desviándose en más de 0,75 tn/ha del representante, se considera que cambia al intervalo superior o inferior, según sea positivo o negativo el balance.
 - Si el stock obtenido no pertenece al intervalo, se considera como estado siguiente al intervalo al cual pertenezca.
- Las restricciones agroecológicas se traducen en:
 - $C_{11} = IC_i$ con $i = 13, \dots, 20$.
 - $N_{11} = N_m$ o N_a .

Bajo estos supuestos el problema puede resolverse como un problema de control óptimo discreto mediante el algoritmo de recursión hacia atrás (Bertsekas (2005)). A modo de ejemplo se presenta la tabla 3 con una de las rotaciones halladas teniendo como condición inicial (N_m, IC_{18}) .

Estado inicial	Actividad	Margen bruto	Estado final
(N_a, IC_{18})	Soja c/fertilización directa	616.19	(N_a, IC_{17})
(N_a, IC_{17})	Trigo alta producción	586.28	(N_a, IC_{17})
(N_a, IC_{17})	Trigo alta producción	586.28	(N_a, IC_{17})
(N_a, IC_{17})	Soja c/fertilización directa	616.19	(N_a, IC_{16})
(N_a, IC_{16})	Trigo alta producción	586.28	(N_a, IC_{16})
(N_a, IC_{16})	Soja c/fertilización directa	616.19	(N_a, IC_{15})
(N_a, IC_{15})	Trigo alta producción	586.28	(N_a, IC_{15})
(N_a, IC_{15})	Soja c/fertilización directa	616.19	(N_a, IC_{14})
(N_a, IC_{14})	Trigo alta producción	586.28	(N_a, IC_{14})
(N_a, IC_{14})	Girasol fertilizado	821.55	(N_m, IC_{13})

Table 3: Ejemplo de rotación óptima calculada.

6 TRABAJOS POSIBLES

Dentro de los aspectos a mejorar se consideran los siguientes:

- La utilización de funciones de producción, lo que permitiría la utilización de variables continuas para la cantidad de fertilizante a utilizar.

- El análisis de factores climáticos y su incidencia en la producción y variables de estado considerando un modelo estocástico adaptado a este fin.
- La utilización de mayor cantidad de indicadores de sustentabilidad.
- La consideración de la implantación de pasturas y del cultivo trigo y soja de segunda.
- Debido a que las fechas de siembra y cosecha tienen relevancia en la producción a obtener, el desarrollo de un modelo con pasos de tiempo más cortos o continuo permitiría tener en cuenta esta característica.

REFERENCES

- AACREA. Suplemento económico, noviembre. www.crea.org.ar, 2007.
- Alvarez R.; Steinbach H.S.G.S.G.R. Disponibilidad de nitrógeno y rendimiento de trigo en la pampa ondulada. *Proyecto Fertilizar*. INTA. www.fertilizar.org.ar, 2004a.
- Alvarez R. Balance de carbono en suelos, información técnica de trigo campaña 2006,. *INTA Publicación Miscelánea*, 2006.
- Alvarez R.; Grigera S. Factores de fertilidad y manejo determinantes de los rendimientos de trigo y maíz en la pampa ondulada. *Informaciones agronómicas*, 2004b.
- Ascheri L.M.; Sánchez M. Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba, crea monte buey-inriville campañas 2003-04 y 2004-05. *Informaciones agronómicas*, 2005.
- Bertsekas D. Dynamic programming and optimal control. *Athena Scientific, Belmont, Masachuset*, 2005.
- Casas R. Sustentabilidad de la agricultura en la región pampeana. *INTA Balcarce*. www.inta.gov.ar, 2003.
- Darwich N. El balance físico económico en las rotaciones agrícolas. *Proyecto Fertilizar*. INTA. www.fertilizar.org.ar, 2003.
- Frank G. Impacto agroecológico del uso de la tierra a diferentes escalas en la región pampeana de Argentina. *Tesis de Magíster en Manejo y Conservación de Recursos Naturales para la Agricultura Orientación: Agroecosistemas*. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Mar del Plata, 2007.
- Inkson R.H.E. The precision of estimates of the soil content of phosphate using the Mitscherlich response equation. *Biometrics*, 20, 1964.
- Julca-Otiniano A.; Meneses-Florian L.B.S.R.B.A.S. La materia orgánica importancia y experiencias de uso en la agricultura. *IDESIA (Chile)*, 24, 2006.
- Pimentel-Gomes F. The use of Mitscherlich's regression law in the analysis of experiments with fertilizers. *Biometrics*, 9, 1953.
- Satorre E. H.; Menéndez F.T.G. Modelos de simulación agronómica para predecir la fertilización nitrogenada en trigo: El modelo triguero. ????
- Viglizzo E. F.; Frank F.B.J.B.D.E.C.S. A rapid method for assessing the environmental performance of commercial farms in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117:109–134, 2006.
- Villasmil J.J. Conceptos económicos y estadísticos en la experimentación con fertilizantes. *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, 2, 1973.