

## ¿Cuál es el Stock de Fósforo óptimo en términos económicos en el suelo y que factores lo afectan?

Benito Amaro, Ignacio; CIEP-INTA

### Resumen

La producción agropecuaria tiene un rol muy relevante en Argentina, más del 70 % de las exportaciones del país provienen de productos agropecuarios y agroindustriales. El sector agropecuario utiliza un factor productivo que es específico de él, el suelo. Este recurso en los últimos años ha comenzado a manifestar déficit en nutrientes. Siendo que el sector agrícola es un sector tan relevante de la economía es que uno debe tratar de comprender que es lo que está ocurriendo.

Para entender qué es lo que está ocurriendo con el Stock de Fósforo (uno de estos nutrientes en déficit) es que uno se puede preguntar qué factores influyen en el aprovechamiento óptimo en términos económicos de este recurso. En este trabajo se llega a la conclusión de que los factores que afectan el Stock de Fósforo son, la tasa a la que descuentan los agentes sus fondos, la probabilidad de renovación del alquiler, el precio del fertilizante, el precio del bien, y el costo variable en términos del rinde del cultivo. Los costos fijos no modificaron el estado estacionario. Además, diferentes rotaciones de cultivos afectan los stocks de nutrientes en suelo óptimos.

### Abstract

Agricultural production plays a very relevant role in Argentina, more than 70 % of the country's exports come from agricultural and agro-industrial products. The agricultural sector uses a productive factor that is specific to it, the soil. This resource in recent years has begun to show a nutrient deficit. Since the agricultural sector is such a relevant sector of the economy, one must try to understand what is happening.

In order to understand what is happening with the Phosphorus Stock (one of these nutrients in deficit), one can ask what factors influence the optimal use of this resource in economic terms. In this work, it is concluded that the factors that affect the Phosphorus Stock are, the rate at which the agents discount their funds, the probability of rent renewal, the price of the fertilizer, the price of the good, and the variable cost in terms of crop yield. Fixed costs did not change the steady state. In addition, different crop rotations affect optimal soil nutrient stocks.

Palabras Clave: Conservación de suelos, incentivos económicos, agricultura, fertilización óptima.

Clasificación JEL: Q15, Q24

Eje Temático: Economía ambiental y de los recursos naturales

## Introducción

El suelo es un recurso primordial para las principales actividades productivas del país. La producción agropecuaria tiene un rol muy relevante en Argentina, más del 70 % de las exportaciones del país provienen de productos agropecuarios y agroindustriales. El sector agropecuario utiliza un factor productivo específico, el suelo. Los suelos son un recurso no renovable, se requiere más de 1000 años para formar 1 centímetro de suelo (FAO 2017).

Aplicar nutrientes en forma balanceada y precisa es un requerimiento para el desarrollo sustentable de la agricultura, el incremento de la producción y productividad agrícola, reducción de brechas de rendimiento y mayor rentabilidad. La fertilidad química de los suelos en Argentina atraviesa un proceso de insuficiencia marcado, donde comienzan a manifestar déficit en nutrientes, pérdidas significativas de materia orgánica, y pérdida de las propiedades físicas, entre otras. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2021).

Uno de estos nutrientes que manifiesta déficit es el Fósforo. Sainz Rozas et al (2012) muestran que la mayor parte de los suelos de la región pampeana presentan niveles de P-Bray<sup>1</sup> limitantes para la mayoría de los cultivos, y los balances siguen siendo negativos. Por lo que resulta muy relevante entender cuáles son los mecanismos de incentivos que existen detrás de las decisiones de fertilizar. Comprendiendo como es que el productor toma decisiones es que pueden desarrollarse políticas que contribuyan a mejorar la nutrición del suelo.

El objetivo del artículo es comprender cuál sería el Stock de Fósforo óptimo en términos económicos en el suelo y que factores son los que lo afectan. La contribución de este trabajo está dada por brindar un modelo que permite obtener tanto el estado estacionario del stock de nutrientes como la trayectoria óptima hacia este bajo determinadas condiciones (precios y costos). La relevancia del modelo propuesto radica en que se está proponiendo un modelo de optimización dinámica, donde se obtiene la estrategia de fertilización óptima en términos económicos para toda la vida productiva del lote.

Este modelo permite al usuario, si es un productor chequear su estrategia de fertilización, y si es un hacedor de política contar con una herramienta que le permite comprender como es el mecanismo de incentivos que posee el productor a la hora de tomar decisiones.

## Literatura

La discusión en literatura puede ser separada en dos, por un lado, aquella que discute desde una perspectiva teórica el uso óptimo del recurso suelo y otra que discute en términos prácticos las estrategias óptimas de fertilización.

En lo respectivo a los desarrollos teóricos existe una amplia literatura que discute como optimizar el uso del suelo. Uno de los precursores de esta línea de trabajo es Burt (1981) quien utiliza una metodología de reglas de decisión aproximadamente óptimas, la cual consiste en una aproximación lineal a la ecuación funcional de la programación dinámica en el "vecindario" del estado de equilibrio.

McConnell (1983) introduce la profundidad y la pérdida de suelo en un modelo simple de producción agrícola, buscando determinar cuándo el nivel y la tasa de cambio temporal de la erosión en términos privados difiere del camino socialmente óptimo. Para ello desarrolla un modelo económico para la óptima utilización privada y social del suelo, donde se centra en el

---

<sup>1</sup> P Bray es una herramienta utilizada para medir el stock de fósforo en el suelo

camino intertemporal del uso del suelo, incluidas las condiciones en que divergen los óptimos privados y sociales.

Siguiendo con esta línea Benito Amaro (2019) presenta un modelo de optimización dinámica para el caso particular de los incentivos a utilizar fertilizantes con el fin de describir cómo operan los incentivos generados por los diferentes tipos de contratos. Este modelo será la base del presente trabajo, el cual se utilizará para simular los escenarios para el caso particular del fósforo.

En lo que respecta a la literatura sobre elección de las dosis de fósforo a utilizar para fertilizar, existen distintos enfoques para abordar la nutrición y, en la actualidad, muchos de ellos coexisten sin estar definidos claramente cuál es su objetivo (Michiels 2015).

Michiels (2015) integro diferentes resultados científicos publicados para desarrollar una herramienta que ayude en la toma de decisiones a la hora de desarrollar un plan de fertilización con fósforo. En su trabajo, se tiene en cuenta no solo las cuestiones agronómicas, sino también las condiciones económicas y empresariales. El trabajo de Michiels (2015) es la base de la que se partió para la obtención de las ecuaciones de comportamiento de los cultivos y del suelo.

### Modelo

Para comprender como operan los incentivos económicos detrás de la elección óptima de fertilización con fósforo se plantea el siguiente modelo. El productor desea maximizar sus beneficios por hectárea ( $\pi$ ).

$$\pi_t = P^C_t * C_t - F_t * P^F_t - Co_t(C_t) \quad (1)$$

Donde  $C_t$  son las toneladas del cultivo obtenido por hectárea (ha) en el periodo  $t$ ,  $P^C_t$  es el precio por tonelada que recibe el productor,  $F_t$  es el nivel de fertilizante por ha aplicado al cultivo,  $P^F_t$  es el precio en fertilizante aplicado, y  $Co_t$  son los costos por ha en función del rendimiento. Se considera el costo en función del rendimiento ya que se supone que existen costos que pueden ser afectados por el rendimiento del cultivo (fertilización con otros nutrientes, cosecha, etc.).

El problema del productor, el cual tiene un horizonte infinito, es maximizar el valor presente del flujo de beneficios ( $VP\pi_t$ ) durante la explotación del suelo. Para llevar a valor presente los flujos de dinero se utiliza un factor de descuento ( $\beta$ ), además para contemplar que el suelo puede ser alquilado, se incorpora la probabilidad de renovación del alquiler ( $\varphi$ )<sup>2</sup>.

$$\max_{F_t} VP\pi_t = \sum_{t=1}^{\infty} \beta^t * \varphi^t * (P^C_t * C_t - F_t * P^F_t - Co_t(C_t)) \quad (2)$$

La maximización de  $VP\pi_t$  estará sujeta al comportamiento del stock del nutriente en el suelo, en este caso del fósforo. El stock de fósforo en el suelo se mide a través del P Bray. Por lo que la maximización de  $VP\pi_t$  estara sujeta a la ecuacion que modela el comportamiento en el tiempo del P Bray, el cual dependerá a su vez de la fertilización realizada.

El stock de fósforo medido en P Bray se mueve a través de la siguiente ecuación:

$$P\text{ Bray}_{t+1} = P\text{ Bray}_t + \Delta P\text{ Bray}_t \quad (3)$$

<sup>2</sup>  $\varphi = 1$  cuando el suelo es propiedad del productor.

De Barbagelata y Chesta (2016) se obtiene la relación que existe entre el balance positivo de fósforo de los cultivos y el resultado obtenido en el análisis P Bray. De esta ecuación interesa la tasa de cambio que se genera con el balance positivo o negativo:

$$\Delta P \text{ Bray}_t = 0.138 * \text{Balance}P_t \quad (4)$$

El Balance de fósforo por cultivo ( $\text{Balance}P_t$ ) está dado por la diferencia entre la extracción en granos que se hizo y la fertilización realizada.

$$\text{Balance}P_t = F_t - P_{\text{extraido}_t} \quad (5)$$

El fósforo extraído en kilogramos por ha en el periodo  $t$  ( $P_{\text{extraido}_t}$ ) estará en función del rinde del grano en toneladas y el factor que representa cuantos kilogramos de fósforo hay por tonelada de grano ( $\delta$ ).

$$P_{\text{extraido}_t} = \delta * C_t \quad (6)$$

La ecuación de comportamiento del stock de fósforo es la siguiente:

$$P \text{ Bray}_{t+1} = P \text{ Bray}_t + 0.138 * (F_t - \delta * C_t) \quad (7)$$

Un supuesto importante aquí es que  $C_t = C_t(F_t, P \text{ Bray}_t)$ .

Dado que el problema del productor es (2) sujeto a (7), este se puede plantear como un problema de optimización dinámica. La ecuación de Bellman de dicho problema es (8).

$$V[P \text{ Bray}_t] = P^C_t * C_t - F_t * P^F_t - Co_t(C_t) + \beta * \varphi * V[P \text{ Bray}_{t+1}] \quad (8)$$

La Condición de primer orden (CPO), ecuación (9), es la derivada de la ecuación (8) con respecto a  $F_t$ . La cual a su vez es igual a cero.

$$\begin{aligned} \frac{dV[P \text{ Bray}_t]}{dF_t} &= 0 \\ &= P^C_t * \frac{dC_t}{dF_t} - P^F_t - \frac{dCo_t(C_t)}{dC_t} * \frac{dC_t}{dF_t} + \beta * \varphi * \frac{dV[P \text{ Bray}_{t+1}]}{dP \text{ Bray}_{t+1}} \\ &\quad * \frac{dP \text{ Bray}_{t+1}}{dF_t} \end{aligned} \quad (9)$$

Opero sobre la CPO, y reemplazando  $\frac{dP \text{ Bray}_{t+1}}{dF_t} = 0.138 * (1 - \delta * \frac{dC_t}{dF_t})$  se obtiene la ecuación (10).

$$\frac{dV[P \text{ Bray}_{t+1}]}{dP \text{ Bray}_{t+1}} = \frac{\left( P^C_t - \frac{dCo_t(C_t)}{dC_t} \right) * \frac{dC_t}{dF_t} - P^F_t}{\beta * \varphi * 0.138 * (1 - \delta * \frac{dC_t}{dF_t})} \quad (10)$$

Luego se calcula la envolvente, ecuación (11).

$$\begin{aligned} \frac{dV[P \text{ Bray}_t]}{dP \text{ Bray}_t} &= P^C_t * \frac{dC_t}{dP \text{ Bray}_t} - \frac{dCo_t(C_t)}{dC_t} * \frac{dC_t}{dP \text{ Bray}_t} + \beta * \varphi \\ &\quad * \left( 1 + 0.138 * \delta * \frac{dC_t}{dP \text{ Bray}_t} \right) * \frac{dV[P \text{ Bray}_{t+1}]}{dP \text{ Bray}_{t+1}} \end{aligned} \quad (11)$$

De cumplir con la CPO y la envolvente se encuentra el óptimo económico.

Se puede interpretar de la CPO que el valor de una unidad adicional de P Bray en el suelo en el próximo periodo debe ser igual beneficio adicional que generaría una unidad adicional de fertilizante dividido la tasa de conversión marginal a la que el balance de nutrientes (ya sea positivo o negativo) se convierte en P Bray con respecto al fertilizante aplicado, siendo este valor en dinero del momento futuro.

La envolvente se puede interpretar como que el valor de una unidad adicional de P Bray en  $t$  debe ser igual al beneficio marginal que se obtendrá en el periodo  $t$  por una unidad mas de P Bray en  $t$  mas el valor presente del valor de una unidad adicional de P Bray en  $t + 1$  multiplicado por la tasa marginal de conversión a la que el balance de nutrientes (ya sea positivo o negativo) se convierte en P Bray con respecto al stock de P Bray de periodo anterior.

### Método

Para resolver el problema del productor se desarrolló en Matlab un programa que realiza la optimización dinámica. El programa consiste en una función llamada Fosforo\_optimo a la cual se le introduce cual es la rotación de cultivos a realizar, cuantos años quiere que dure la simulación, el stock de P Bray inicial, un parámetro  $k$  que representa cuantas chances como máximo se quiere dar al algoritmo para que halle la solución antes de detener el programa, una variable que contiene los precios, el rinde potencial, los datos del campo (Densidad Aparente, Profundidad y porcentaje de arcilla), el margen de error que se le permite al programa, y la tasa de descuento del agente simulado.

La función Fosforo\_optimo consiste en un proceso iterativo que busca la solución. El objetivo del programa de optimización es maximizar la ecuación de Bellman (8) aunque para realizar las simulaciones fue levemente modificada. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$V_t = P^C_t * C_t - F_t * P^F_t - Co_t(C_t) + \beta * \varphi * P^{PB}_{t+1} * P Bray_{t+1} \quad (12)$$

Donde  $V_t$  es el valor que posee el lote en el momento  $t$ . Este valor está dado por la suma entre el margen Bruto que se obtendría en el momento  $t$  ( $P^C_t * C_t - F_t * P^F_t - Co_t(C_t)$ ) y el valor presente que tiene el Stock de nutrientes ( $\beta * \varphi * P^{PB}_{t+1} * P Bray_{t+1}$ ).  $P^{PB}_{t+1}$  sería el precio implícito que posee el Stock de nutrientes para el productor. Básicamente lo que implica esto es que se está suponiendo que la función valor de la ecuación de Bellman es lineal y puede representarse el coeficiente como un precio.

Para obtener el precio  $P^{PB}_t$  en cada iteración se recurre a la ecuación de la envolvente (11). Por lo que el sendero de  $P^{PB}_t$  se puede reescribir de la siguiente forma:

$$P^{PB}_t = P^C_t * \frac{dC_t}{dP Bray_t} - \frac{dCo_t(C_t)}{dC_t} * \frac{dC_t}{dP Bray_t} + \beta * \varphi * \left( 1 + 0.138 * \delta * \frac{dC_t}{dP Bray_t} \right) * P^{PB}_{t+1} \quad (13)$$

Con estas dos ecuaciones se ira iterando hasta que se logra una de dos cosas, o se llegó al límite máximo de iteraciones posibles, caso en el cual no halla el óptimo o el precio implícito del stock de Fósforo en el suelo se repite en las ultimas 2 iteraciones. En caso de hallar el óptimo devuelve la dosis óptima de fósforo a aplicar cada año, el precio implícito que tiene cada unidad en el stock de fósforo en el suelo para cada año, el margen bruto del lote para dicho año, el nivel de P Bray que hay en el suelo a inicio de la campaña para cada año, el rinde de cada año, y el ultimo, una variable de control del programa que mide cuantas iteraciones necesito para obtener el óptimo.

## Parametrización y Datos

Para la implementación del modelo con datos de la realidad se recurre a la literatura y a la Revista Márgenes Agropecuarios. La región sobre la que se aplica los datos es el norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe. Se utilizó como guía para plantear el problema y la búsqueda de datos el trabajo de Michiels (2015).

El comportamiento del rendimiento se obtiene de Gutiérrez Boem et al (2010). La función de rendimiento es una función de tipo Mitscherlich.

$$C_t = C^p_t * (1 - e^{-c(X_t+b)}) \quad (14)$$

$X_t$  representa el fósforo disponible que tiene el cultivo para su uso, se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$X_t = P Bray_t + \frac{F_t}{H_t} \quad (15)$$

El termino  $H_t$  representa un factor para corregir la eficacia en el aprovechamiento del fósforo utilizado. La ecuación del termino  $H_t$  es la siguiente:

$$H_t = \frac{0.1 * DA * PF}{a_t} \quad (16)$$

Donde  $DA$  es densidad aparente del suelo en toneladas por metro cubico,  $PF$  es profundidad del suelo en cm, y  $a_t$  la pendiente con la que una dosis aplicada de fósforo puede convertirse en fósforo extractable para el cultivo (Rubio et al 2007). La ecuación de  $a_t$  es la siguiente:

$$a_t = 0.61614 + 0.00356 * P Bray_t - 0.00344 * Arcilla \quad (17)$$

Donde  $Arcilla$  es el % de arcilla que componen el suelo.

El comportamiento del rendimiento se obtiene de Gutiérrez Boem et al (2010). Para maíz:

$$M_t = M^p * (1 - e^{-0.106(P Bray_t+9.05)}) \quad (18)$$

Para Soja:

$$S_t = S^p * (1 - e^{-0.14(P Bray_t+4.34)}) \quad (19)$$

De Gutiérrez Boem et al (2010) se obtiene también los rindes potenciales de cada cultivo. En soja de primera el rinde esperado potencial es  $S^p = 4281$ . El maíz esperado potencial es  $M^p = 11465$ .

Para la estimación de  $a_t$  se necesitan el porcentaje de arcilla, la densidad del suelo y la profundidad. De Michiels (2015) se obtiene para observar cómo funciona la simulación que el porcentaje de arcilla es 25 %, la densidad del suelo es de 1.2 y la profundidad de 20 cm.

Las extracciones de fósforo que hace el cultivo se obtiene de Cruzate y Casas (2009) dando lugar a las siguientes ecuaciones:

$$Pextraido_t = 2.64 * M_t \quad (20)$$

$$Pextraido_t = 5.4 * S_t \quad (21)$$

Los precios de los granos, junto al costo de producción y precio del fertilizante se obtienen de la revista márgenes agropecuarios, para el periodo de agosto 2022. Tomando de la revista los datos referentes al Norte de Buenos Aires-Sur de Santa Fe. El precio del maíz es de 215 dólares

y el de la soja es de 360 dólares. El precio del fósforo se toma a partir del Fosfato Monoamónico, el cual tiene un precio de 1.32 dólares por kilogramo. Cada Kg de Fosfato Monoamónico posee un 23 % de fósforo aproximadamente, por lo que el precio del fósforo por kilogramos aplicado es 5.75 dólares (1.32/0.23).

De la revista Márgenes agropecuarios también se toman los costos. La revista para cada cultivo en cada zona particular presenta el costo para 2 rindes diferentes. Esta diferencia permite que se pueda estimar una parte variable del costo y una fija. Esto será una burda aproximación, este número puede ser más afinado con mayor información. El costo del maíz si se producen 9.5 toneladas será de 741 dólares y si se producen 8 toneladas será de 727 dólares.

Para estimar la parte del costo que varía con el rinde (por tonelada) se hace  $\frac{741-727}{9.5-8} = 9.3$  para maíz y  $\frac{415-404}{4-3.5} = 22$  para soja. Por lo que cada tonelada extra de maíz incrementara los costos de producción en 9.3 dólares mientras que cada tonelada extra de soja incrementara los costos en 22 dólares. Para esto se usó el costo de producir en los dos escenarios que plantea la revista márgenes y se usa la variación en los costos entre los dos rindes para estimar la pendiente de este cambio suponiendo que es un comportamiento lineal para todos los demás rindes posibles.

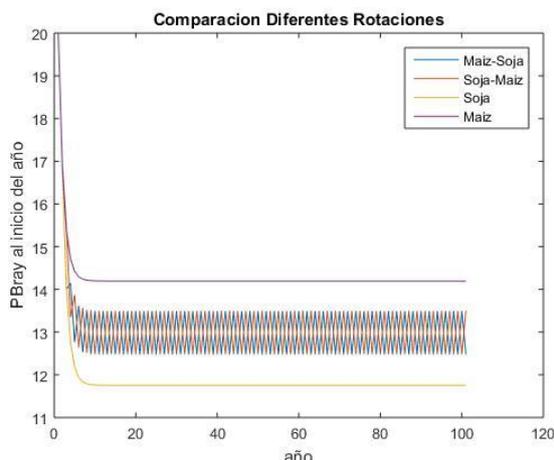
Para calcular la parte fija del costo lo que se hace es tomar alguno de los dos rindes, multiplicarlo por el costo variable y usar el resultado de esta operación para sustraerlo del costo total para ese rinde y así obtener la parte fija del costo. Además, se debe restar la dosis de fósforo utilizada para ambos cultivos. Por lo que queda un costo fijo para maíz de 553.6 dólares y para soja de 274.2 dólares.

## Resultados

Con el modelo propuesto, parametrizado con los datos mencionados en el apartado anterior, se realizaron simulaciones de diferentes escenarios para obtener el Stock de Fósforo en suelo de Estado Estacionario. Siendo este nivel de Estado Estacionarios aquel que se mantendrá constante en el tiempo salvo que cambien las condiciones que llevaron a este estado. Para comenzar las simulaciones se partirá de un escenario base de un P Bray de 20 y una tasa de interés de 5 % en dólares.

En una primera simulación se puede observar cómo afectan las rotaciones al Stock de P Bray. Para esto se simulan 4 escenarios distintos, donde las rotaciones agrícolas serian, monocultivo de Soja, monocultivo de Maíz, rotación Maíz-Soja y Soja-maíz (estas dos últimas si bien son la misma rotación se utilizó para testear si el orden desde el punto de inicio afectaba la convergencia).

Grafico 1. Comparación de P Bray entre diferentes rotaciones



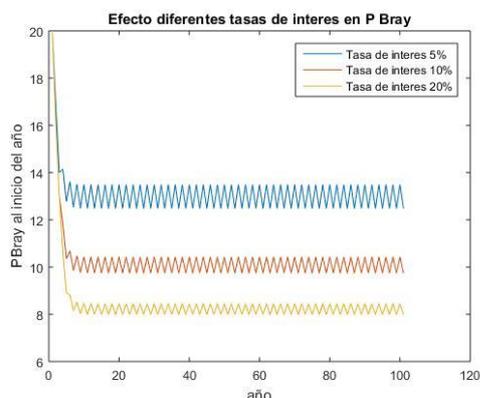
En anexo 1 puede observarse el grafico con la dosis de fertilizante aplicadas, precio implícito del stock de fósforo en el suelo (p/u P Bray), y Margen Bruto. De analizar el grafico 1 presentado y considerando también lo observado en aquellos que se encuentran en anexos se puede notar que en un inicio utilizara una fertilización que le permite maximizar beneficios con una reposición de nutrientes inferior a la necesaria. Esto a fin de que en el largo plazo se llegue al stock de nutrientes óptimo económicamente hablando.

Al comparar los resultados entre rotaciones, puede notarse que el monocultivo de soja posee un estado estacionario en un nivel de P Bray inferior al maíz. Por otro lado, la rotación maíz-soja o soja-maíz posee un stock de P Bray intermedio entre los dos escenarios recién mencionados donde oscila dependiendo de cuál cultivo es el que se realiza en la campaña.

El P Bray de Estado Estacionarios es, para monocultivo de soja 11.73, para monocultivo de Maíz 14.22. En la rotación Maíz-Soja o Soja-Maíz, en estado estacionario, se recibe el lote para hacer maíz con un P Bray de 12.48 (lo que dejó el lote de soja anterior) y lo entrega con un P Bray de 13.49 (para realizar soja en la próxima campaña).

A partir de aquí todos los análisis de sensibilidad se realizarán a partir de la rotación Maíz-Soja. Un Factor relevante que influenciara el nivel de Estado Estacionario es la tasa de interés que se le exige al proyecto productivo. Por lo que es interesante observar que ocurre con el P Bray de Estado Estacionario cuando se modifica dicha tasa, Grafico 2.

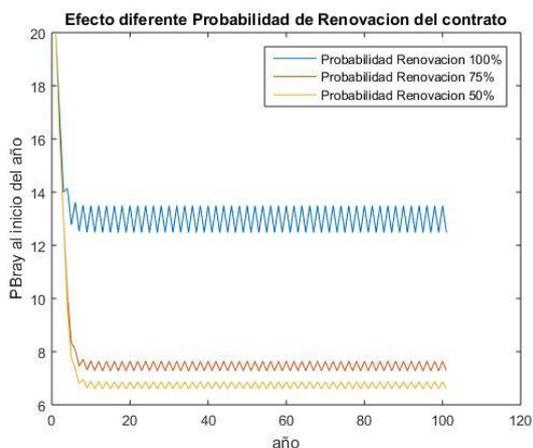
Grafico 2. Efecto de variación de la tasa de interés en el P Bray.



Aquí se puede notar como ante mayores tasas de interés, menor es el P Bray de Estado Estacionario. Esto dado que, a mayores tasas de interés, el precio implícito del stock de

nutrientes en el suelo se reduce. Algo similar podrá observarse ante variaciones en la probabilidad de que se renueve un alquiler, grafico 3.

Grafico 3. P Bray ante variaciones en la probabilidad de renovación

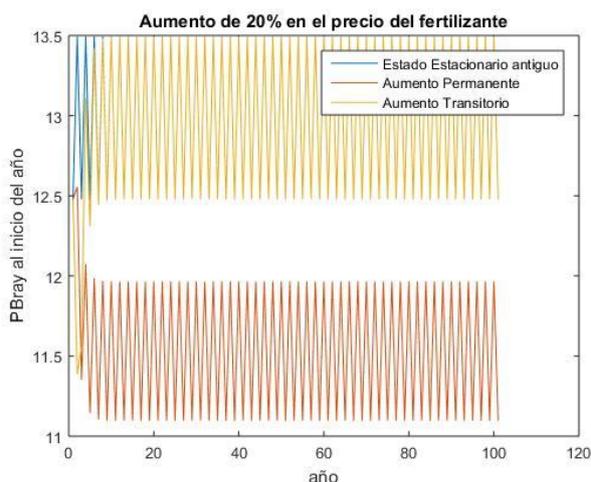


Se puede notar que mientras menor sea la probabilidad de renovación del alquiler, menor será el stock de P Bray en el suelo que existirá en estado estacionario. Obviamente el P Bray de estado estacionario mayor se da cuando es el propietario (Probabilidad de renovación 1).

También se plantearon una variedad de Shocks al modelo para observar cómo se modificaba el estado estacionario. Se plantearán por ende 3 situaciones, el estado estacionario obtenido anteriormente (para comparar contra este), y el shock en dos opciones, si este es transitorio o si este es permanente.

El primer shock a analizar es que ocurre si aumenta un 20 % el precio del fertilizante, grafico 4. Se nota en el grafico que cuando el Shock es transitorio se da un efecto muy grande al inicio de sobreutilización del stock de fósforo en el suelo para luego retornar al estado estacionario, mientras que cuando el shock es permanente va levemente convergiendo al nuevo estado estacionario.

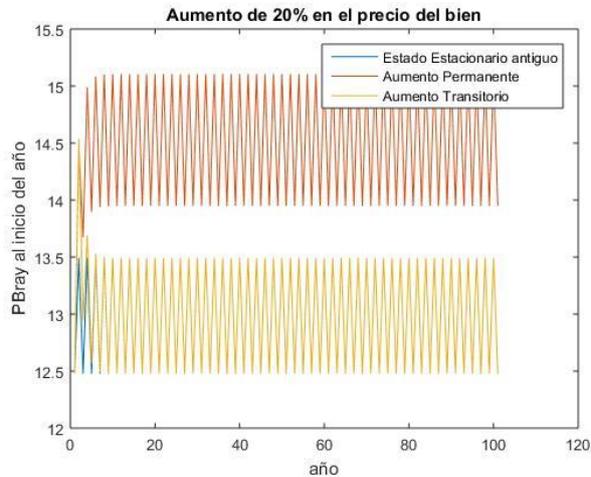
Grafico 4. aumento 20 % en precio del fertilizante



El segundo shock analizado es un aumento de 20 % en el precio del bien que producen, grafico 5. Se puede notar como cuando es permanente comienza a converger a un nuevo equilibrio

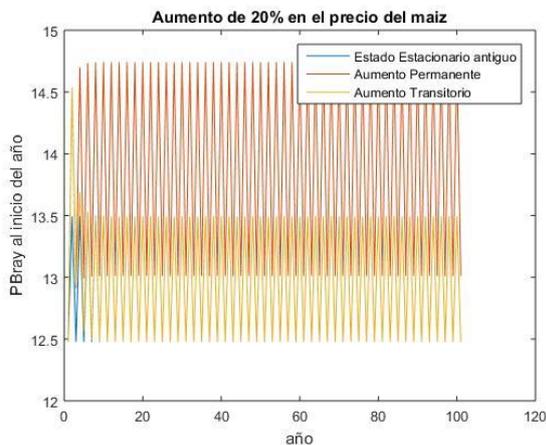
mientras que cuando es transitorio tiene un leve salto y rápidamente retorna al estado estacionario que estaba originalmente.

Grafico 5. Aumento 20 % en el precio de ambos bienes (Soja y Maíz).



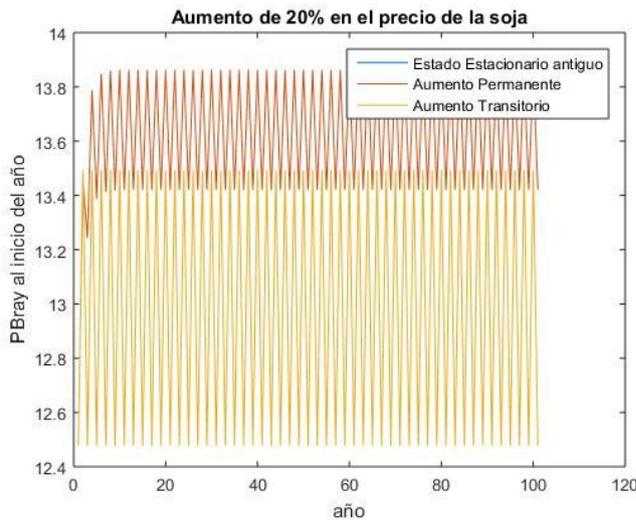
Interesante es ver qué pasa si el aumento de 20 % en el precio del maíz, esto implicaría un cambio de precios relativos en favor del Maíz, Grafico 6. Puede notarse que en un inicio el efecto del shock tanto transitorio como permanente impacta igual reduciendo el P Bray de estado estacionario, pero luego retorna en el caso del shock transitorio al estado estacionario anterior mientras que cuando el shock es permanente converge a un nuevo estado estacionario superior. Algo a mencionar además es que la amplitud de variación entre el nivel de P Bray con el que se inicia la campaña del maíz y con el que se deja el lote aumenta.

Grafico 6. Aumento de 20 % en el precio del maíz



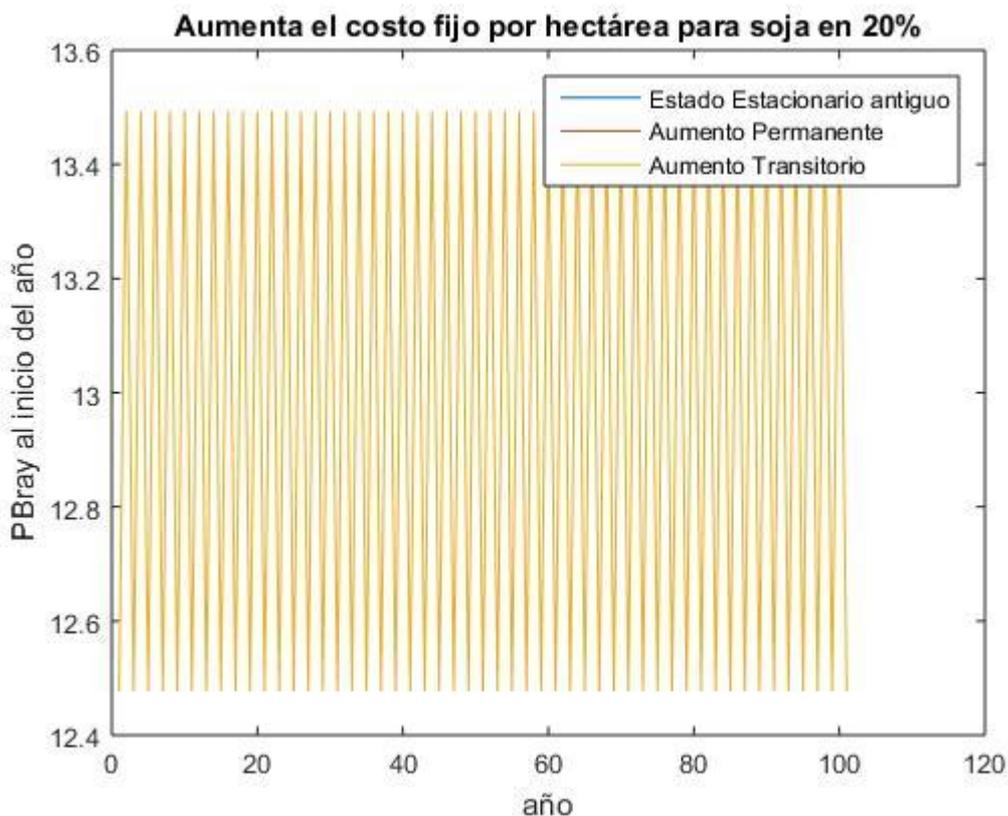
Un escenario diferente es un aumento de 20 % en el precio de la soja, grafico 7. Puede notarse que cuando el precio de la soja aumenta, si el shock es transitorio el P Bray en suelo sube levemente y luego converge al estado estacionario anterior, pero cuando el shock es permanente se puede observar que el nuevo estado estacionario, no solo es superior al anterior estado estacionario, sino que posee una menor variabilidad que los otros dos escenarios (estado estacionario antiguo y shock transitorio).

Grafico 7. Aumento de 20 % en el precio de la soja



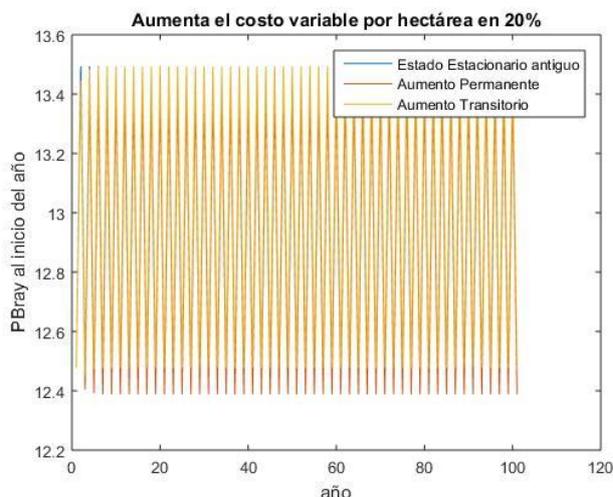
Si se analiza un aumento en el costo fijo por hectárea en 20 %, gráfico 8, se puede observar que no modifica el estado estacionario cuando el shock es permanente. Lo que, si ocurre, cuando el shock es transitorio, es una reacción inicial de ir a un menor nivel de P Bray para luego retornar al estado estacionario.

Gráfico 8. Aumenta el costo fijo por hectárea en 20 %



Cuando el que aumenta es el costo variable por hectárea en 20 %, gráfico 9, se puede notar que luego de la caída inicial que genera el shock cuando este es transitorio vuelve al estado estacionario anterior y cuando el shock fue permanente va hacia un nuevo estado estacionario levemente inferior al anterior.

Grafico 9. Aumenta el costo variable por hectárea en 20 %



### Discusión

Dada la relevancia del sector agropecuario en la economía del país, es normal que desde el sector público se busque fomentar el aumento de la producción en el sector. Para eso surgen iniciativas como la de “producir 200 Millones de Toneladas” que tiene el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2021). Ellos entienden que el camino es a través de un aumento en la fertilización. Llegan a esta conclusión a través del estudio de Merlos et al. (2015), quien estima que alrededor del 40-50 % de las brechas son explicadas por la inadecuada nutrición. Esto quiere decir que es posible obtener una mayor producción de granos, y para esto una parte del camino a recorrer es mediante el aumento en las dosis de fertilización.

Para tal fin el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2021) propone una serie de medidas tendientes a lograr esto. Desgravación impositiva como medida de fomento al uso de fertilizantes y enmiendas (Ley de Fertilizantes). Apoyo al financiamiento para compra de fertilizantes a tasas accesibles (con el requisito de presentación de análisis de suelo con aval profesional). Créditos promocionales para incremento de dosis de fertilizantes. Mejora en la recopilación de datos y asesoramiento a productores.

Estas medidas pueden ser analizadas a ojos del modelo propuesto. Una medida de desgravamiento impositivo sería lo mismo que decir que se reduce el precio del fertilizante. Por lo que si se recurre al grafico 4 (que muestra en realidad el efecto opuesto), se puede deducir que esta medida tendería a fomentar un mayor nivel de fertilización y por ende mayores niveles de nutrientes en el suelo. Además, tendría un efecto positivo en el rinde de los cultivos.

Los créditos promocionales para incremento de dosis de fertilizantes, utilizarían como mecanismo bajar la tasa a la que pueden endeudarse los productores y esto es de esperar que influya en que los productores descuenten sus flujos de fondos a una menor tasa. Esto como muestra el grafico 2 llevaría a mayores dosis de fertilización y un stock de nutrientes en suelo de estado estacionario superior.

El apoyo al financiamiento para compra de fertilizantes a tasas accesibles (con el requisito de presentación de análisis de suelo con aval profesional y factura de compra) es similar a los créditos promocionales, pero adiciona un aumento en los costos fijos, como se muestra en el grafico 8 un aumento en los costos fijos si es permanente no afectaría el estado estacionario.

Una de la recomendación es la mejora en la recopilación de datos y asesoramiento a productores. Esto mejoraría la toma de decisiones de los productores y les permitiría, si no están aún optimizando el aprovechamiento de los recursos, hacerlo. Esto, siempre y cuando, el asesoramiento sea el adecuado y las recomendaciones tengan una base integral mirando suelo-cultivo-beneficios y no simplemente una base que mire suelo o cultivo.

Estas recomendaciones que buscan aumentar la producción chocan en su espíritu con otras políticas públicas con fines recaudatorios. Especialmente las retenciones a los productos agropecuarios. Las retenciones implican un menor precio pagado por el producto, como puede verse en el gráfico 5 (las retenciones generarían el efecto opuesto, bajar el precio). Un menor precio implica un menor uso de fertilizantes y menor stock de nutrientes en el suelo en estado estacionario. Pero aún más relevante quizás es que las alícuotas suelen ser diferentes entre cultivos. Por ejemplo, suele soja poseer una mayor alícuota que el maíz, lo que no es inocuo ya que afecta los precios relativos entre dichos bienes. En el gráfico 6 y 7 puede notarse como una alícuota de retenciones mayor en soja que en maíz implica no solo que se estará en un menor nivel de P Bray de estado estacionario, sino que la volatilidad entre años de cultivo de soja y maíz aumentará.

Un ítem relevante también a discutir es el tipo de contrato, como se puede observar en Benito Amaro (2019) este puede afectar a través de dos dimensiones. Una dimensión es la probabilidad de renovación del alquiler y otra dimensión es la forma de tarificación del alquiler. Con respecto a la forma de tarificación se hace referencia a si es un contrato por un porcentaje del rendimiento o un contrato por un monto fijo.

Allen y Lueck (2003) proponen que los contratos de alquiler por un porcentaje del cultivo, desincentivan el uso intensivo de los insumos ya que afectan el valor del producto marginal de los insumos. Esto se debe a que parte del producto marginal del insumo es capturado por el propietario de la tierra a través del monto percibido en alquiler, reduciendo el producto marginal que percibe el productor; que lo lleva a utilizar una menor cantidad de insumos. Si entre los insumos se incluye los nutrientes del suelo, entonces los contratos de alquiler a porcentaje incentivarían a utilizar menos fertilizantes y extraer una proporción mayor de nutrientes del suelo.

Para pensar esta idea, aunque dentro del modelo no se consideró el valor del alquiler ya que solo se analizó margen bruto, uno debe identificar como modelar el alquiler. Un alquiler por monto fijo es un costo fijo valga la redundancia, mientras que un alquiler a porcentaje es un costo variable. Por lo que la diferencia entre usar uno u otro se puede analizar a través de observar que pasa cuando varía en una dirección el costo fijo y en la opuesta el costo variable, gráficos 8 y 9. Puede verse que el costo fijo no afecta al Stock de nutrientes, pero si lo hace el costo variable el cual ante un aumento reduce el stock de nutrientes en el suelo de estado estacionario. Por lo que puede notarse que un alquiler a porcentaje disminuiría los incentivos a utilizar fertilizantes y por ende motivaría un menor stock de nutrientes en el suelo.

Pero, como se menciona en Benito Amaro (2019) un contrato a porcentaje del cultivo posee un menor componente de riesgo, por lo que la tasa de descuento que se le pediría a dicho proyecto sería inferior. Por lo que operaría en favor de un contrato a porcentaje que se le pediría a este una tasa menor, y una tasa de retorno menor genera mayores incentivos a fertilizar y a mantener un mayor stock de nutrientes en el suelo. El efecto neto de los contratos dependerá de la combinación de estos dos efectos.

La otra dimensión a analizar es la probabilidad de renovación de los contratos. Esto dado que en el sector agropecuario gran parte de los lotes son arrendados y por ende no existe para estos una probabilidad de 100 % de volver a explotarlo (cosa que solo ocurre con el dueño). El agente debe formar una expectativa sobre la probabilidad de que él sea quien explote el suelo en el próximo periodo. Esta expectativa sobre la probabilidad de que vuelva el año siguiente a explotar el suelo afecta los incentivos a fertilizar.

En el grafico 3 puede notarse como diferentes niveles de probabilidad de renovación del alquiler impactan en los incentivos a utilizar fertilizantes. Mientras mayor la probabilidad de explotar el suelo en el próximo periodo, mayor es el nivel de fertilización utilizado y mayor el stock de nutrientes a mantener en el suelo.

Este efecto de la probabilidad de renovación podría en parte ser compensado por una menor tasa de descuento. Gallacher (2004) argumenta que podría ocurrir, que el arrendamiento de tierras otorgue flexibilidad en la asignación de recursos, y facilite la inyección de capital al sector, reduciendo los costos de financiación del productor y por lo tanto reduciendo la tasa de descuento de ingresos futuros, lo que induciría a un mayor nivel de fertilización.

### Conclusiones

La fertilidad química de los suelos en Argentina atraviesa un proceso de insuficiencia marcado, donde comienzan a manifestar déficit en nutrientes. Siendo que el sector agrícola es un sector tan relevante de la economía es que uno debe tratar de comprender que es lo que está ocurriendo. Al comprender que es lo que ocurre y cuáles son los factores determinantes detrás de esto es que uno puede tomar medidas en post de remediarlo de ser necesario.

Uno de estos nutrientes que manifiesta déficit es el Fósforo. Por esta razón es que resulta interesante entender cuáles son los mecanismos de incentivos que existen detrás de las decisiones de fertilizar con dicho nutriente. Así es que surge la pregunta de este trabajo, ¿cual sería el Stock de Fósforo óptimo en el suelo y que factores son los que lo afectan?

Para responder esa pregunta se planteó un modelo de optimización que permitió obtener los estados estacionarios bajo distintas circunstancias. Pero lo más relevante del trabajo fue obtener aquellos factores que determinan los estados estacionarios y las trayectorias desde las situaciones actuales hacia ellos.

Por lo que se puede concluir que los factores que afectan a los estados estacionarios son:

- La tasa a la que descuentan los agentes sus fondos, mientras menor sea, mayor será el stock de nutrientes de estado estacionario.
- La probabilidad de renovación del alquiler, mientras mayor sea, mayor será el stock de nutrientes de estado estacionario.
- Precio fertilizante, mientras menor sea el costo de este, mayor será el stock de nutrientes de estado estacionario.
- Precio del Bien, mientras mayor sea el precio del bien, mayor será el stock de nutrientes de estado estacionario.
- Costo Variable, mientras menor sea el costo variable, mayor será el stock de nutrientes de estado estacionario.

Un punto interesante a mencionar es que los Costo Fijo no modificaron el estado estacionario.

Una de las grandes limitaciones es que debería pensarse la estrategia de fertilización en forma integral analizando los demás nutrientes del suelo, con especial atención a nitrógeno y azufre,

nutrientes que en estos momentos reaccionan a fertilización. Con mayor disponibilidad de datos lo ideal sería avanzar en un modelo integral.

### Bibliografía

Allen, Douglas W.; Lueck Dean. (2003). "The nature of the farm: contracts, risk, and organization in agriculture". Massachusetts Institute of Technology.

Barbagelata, P.A. y Chesta, M. (2016). "Evolución del P Bray del suelo en función del balance de P en el largo plazo". IAH 23.

Benito Amaro, I. (2019). "Un análisis económico de los incentivos para la conservación de suelos en contratos agrícolas". Tesis de Maestría, Universidad del CEMA.

Burt, Oscar R. Burt. (1981). "Farm Level Economics of Soil Conservation in the Palouse Area of the Northwest", American Journal of Agricultural Economics, Volume 63, Issue 1, 1 February 1981, Pages 83–92 (01 February 1981).

Cruzate, G.A., y R. Casas. 2009. Extracción de nutrientes en la Agricultura Argentina. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (LACS). IPNI .44:21.26. Buenos Aires, Márgenes Agropecuarios, agosto 2022.

FAO. (2017). "Apreciar el suelo sobre el que caminamos". Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la agricultura. 05/12/2017.

Gallacher, M. (2004). "Estructura de Empresa y Adopción de Tecnología: Conservación de Suelos". Documento de trabajo Universidad del CEMA.

Gutiérrez Boem, F.H.; García, F.O.; y Boxler M. (2010). ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de Fósforo Disponible para Soja, Maíz y Trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mayo 31 a 4 junio de 2010. Rosario. Argentina.

Márgenes agropecuarios (agosto 2022). Año 38, N° 446.

McConnell, Kenneth (1983), "An Economic Model of Soil Conservation", American Journal of Agricultural Economics, Volumen 65 Numero 1 February 1983 (pp 83-89)

Merlos, F.A.; Monzon, J. P.; Mercau, J.L.; Taboada, M.; Andrade, F.H.; Halle, A.J.; Jobbagy, E.; Cassman, K.G.; y Grassini, P. (2015). "Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps." Field Crops Research, 184, 145-154

Michiels, C.L. (2015). "Calculador de aplicación de fósforo para el cultivo de maíz en la región pampeana norte de Argentina". Trabajo Final para optar al título de Especialista de la Universidad de Buenos Aires. FAUBA.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2021). "FERTILIDAD Y NUTRICIÓN DE SUELOS". Informe Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina, noviembre 2021.

Rubio G.; Gutiérrez Boem, F.H.; y Cabello, M.J. (2007). ¿Cuánto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? II. Cálculos para las zonas sur y norte de la Región Pampeana. Informaciones Agronómicas 35: 5-8. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina.

Sainz Rozas, H.R.; Echeverría, H.E.; y Angelini, H. (2012). "Fósforo extractable en suelos agrícolas de la región pampeana y extra pampeana argentina". RIA 38: 33-39.

## Anexo

### Anexo 1:

