

Design of a Software Tool for Optimal Crop Planning

Agustina Anselmino^{1,2} , Santiago Bechir¹, Santiago T. Gavino¹, Matías D. Mendez³,
Carlos A. Casanova P.¹ , Mariana E. Cóccola^{1,2} 

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Grupo de Investigación sobre Inteligencia Computacional y Optimización de Sistemas, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

³ GC Agro S.R.L., Villa San Marcial, Entre Ríos, Argentina
anselmioagustina@conicet.gov.ar; santiagobechir05@gmail.com;
santigavinoutn@gmail.com; matias@gcagro.com.ar; casano-
vac@frcu.utn.edu.ar; marcoccola@santafe-conicet.gov.ar

Abstract. The Argentine agro-industrial sector is one of the country's main drivers of economic development, and crop planning is a key task for sustainable development. Generally, these decisions are made based on farmers' experience, without the support of digital tools that integrate production, economic, and spatial information. This paper presents a project to develop a computational tool to support crop planning, based on the integration of agronomic, operational, and economic data. The tool will incorporate information on fields, crop alternatives, expected yields based on field history, sowing windows, available technological packages, and potential market outlets. Using this information, the tool will generate planning recommendations, including crop allocation by field, the scheduling of sowing and harvesting, and the selection of the most suitable market outlet for each season. The analytical core of the system is based on an optimisation model whose objectives are to maximise expected profitability and land-use efficiency. A potential application example for the Province of Entre Ríos is presented to illustrate the scope of the tool and its potential as a decision-support tool.

Keywords: digital agriculture; crop planning; decision support systems; optimisation.

Diseño de una herramienta de software para la planificación óptima de cultivos

Resumen. El sector agroindustrial argentino constituye uno de los principales motores económicos del país, siendo la planificación de las campañas agrícolas una tarea clave para el desarrollo sustentable. Generalmente, estas decisiones suelen tomarse a partir de la experiencia de los productores, sin el apoyo de he-

herramientas digitales que integren información productiva, económica y territorial. En este trabajo se presenta el proyecto de desarrollo de una herramienta computacional para dar soporte a la planificación de campañas agrícolas, basada en la integración de datos agronómicos, operativos y económicos. La herramienta contemplará la información de los lotes de producción, las alternativas de cultivos, el efecto del rendimiento en función del historial del lote, las ventanas de siembra, los paquetes tecnológicos disponibles y los potenciales destinos comerciales. A partir de esta información, generará recomendaciones de planificación que incluyan la asignación de cultivos por lote, la secuencia temporal de siembra y cosecha, y la selección del destino comercial más conveniente para cada campaña. El núcleo analítico del sistema se basa en un modelo de optimización cuyos objetivos serán maximizar la rentabilidad esperada y el uso eficiente del suelo. Se presenta un potencial ejemplo de aplicación para la provincia de Entre Ríos que permite ilustrar el alcance de la herramienta y su potencial como soporte para la toma de decisiones.

Palabras clave: agricultura digital; planificación de cultivos; sistemas de apoyo a la decisión; optimización.

1 Introducción

El sector agroindustrial enfrenta el desafío de incrementar la producción de alimentos en un contexto de creciente presión sobre los recursos naturales. A nivel global, se estima que la agricultura deberá producir un 50% más de alimentos para el año 2050 con el fin de abastecer la demanda de una población de 9.700 millones de personas (FAO, 2025). Este escenario se desarrolla en paralelo a procesos de degradación del suelo, variabilidad climática y restricciones en el uso de insumos, lo que exige una planificación más eficiente, sostenible e integrada de los sistemas productivos.

En la Argentina, dicho sector constituye un pilar estructural de la economía nacional, representando un 20% del Valor Agregado Bruto (VAB), uno de cada cinco puestos de trabajo y tres de cada cinco dólares exportados por el país (Ferrari et al., 2025). En este contexto, la planificación de campañas agrícolas adquiere gran importancia, dado su impacto directo sobre la rentabilidad, la sostenibilidad del sistema productivo y la eficiencia en el uso de los recursos. Sin embargo, en la práctica, estas decisiones suelen basarse principalmente en la experiencia de los productores y asesores técnicos, sin el apoyo de herramientas analíticas que permitan integrar la creciente cantidad de información disponible.

En la literatura, diversos trabajos han abordado el problema de la planificación agrícola mediante modelos de optimización a través de formulaciones de programación lineal entera (ILP) y programación lineal entera mixta (MILP), que permiten representar decisiones discretas y restricciones agronómicas complejas (Benini et al., 2023; Rusdiansyah et al., 2023). También se han desarrollado herramientas de apoyo a la decisión orientadas a la generación de rotaciones de cultivos, como ROTAT (Dogliotti et al., 2003), que permiten evaluar la factibilidad agronómica de distintas secuencias productivas a partir de reglas predefinidas. Sin embargo, la mayoría de estos enfoques se centran en decisiones productivas, con una limitada incorporación de aspectos comer-

ciales, así como de indicadores asociados a la calidad del suelo, tales como la estructura, la materia orgánica o la susceptibilidad a la erosión.

Esta falta de integración limita el potencial de las herramientas existentes para representar de manera adecuada la complejidad de los sistemas agrícolas reales, donde las decisiones productivas no pueden desvincularse de sus implicancias económicas, operativas y ambientales. Por ello, se identifica la necesidad de desarrollar enfoques que permitan abordar la planificación agrícola de manera integral, incorporando múltiples dimensiones en un único marco analítico.

Por lo previamente mencionado, se propone el desarrollo de una herramienta computacional de apoyo a la toma de decisiones para la planificación de campañas agrícolas, basada en un modelo de Programación Lineal Entera Mixta (MILP). La herramienta integra de manera simultánea decisiones de asignación de cultivos por lote, calendariación de siembra y cosecha, y efectos de rotación sobre el rendimiento, incorporando información agronómica, económica y territorial relevante para la toma de decisiones. Dicha herramienta contará con 2 objetivos principales: (i) maximizar las ganancias del productor; y (ii) intensificar el uso del suelo. En un desarrollo preliminar, el motor de optimización de la herramienta de software propuesta considera un modelo mono-objetivo que busca maximizar la primera alternativa, debido a que representa el mayor interés del productor. La última alternativa se puede incluir a partir de la formulación de un modelo multiobjetivo (utilizando el método *ϵ -constraint*).

2 Metodología

2.1 Enfoque general del problema

El problema abordado consiste en la planificación de campañas agrícolas, considerando la necesidad de asistir al productor en la toma de decisiones complejas que involucran las dimensiones previamente mencionadas, adoptando una visión integrada de las operaciones.

En este contexto, la planificación de una campaña no se limita únicamente a la selección de cultivos, sino que involucra simultáneamente decisiones sobre la asignación de cultivos por lote, la definición del calendario de siembra y cosecha, la configuración de esquemas de rotación (considerando su efecto en el rendimiento obtenido) y la determinación de estrategias comerciales para la producción obtenida.

La herramienta permitirá representar este proceso de decisión de manera estructurada, integrando información agronómica (compatibilidad suelo–cultivo, efectos de rotación, ventanas de siembra), económica (costos, precios esperados, márgenes) y territorial (distribución espacial de los lotes y distancias a destinos comerciales), con el objetivo de generar recomendaciones consistentes y comparables entre distintos escenarios.

Un aspecto distintivo del enfoque propuesto radica en la incorporación explícita del historial agronómico de los lotes como elemento central en la toma de decisiones. En la práctica, los antecedentes productivos influyen significativamente en los rendimientos futuros y en la calidad del suelo, pero su consideración suele depender del conocimiento tácito del productor. La herramienta formaliza esta información, permitiendo

evaluar de manera sistemática el impacto de distintas secuencias de cultivos sobre el desempeño del sistema.

Asimismo, el enfoque contempla la intensificación del uso del suelo como un criterio relevante, incorporando alternativas como los cultivos de cobertura o cultivos de servicio (CS), lo que permite analizar la conveniencia económica y ambiental por campaña. Esto resulta especialmente importante en contextos donde la maximización del beneficio no depende únicamente del rendimiento individual de cada cultivo, sino de la eficiencia global del sistema a lo largo del tiempo.

En la Fig. 1 se observa un esquema generalizado de los datos de entrada de la herramienta, las decisiones a las que permitirá dar soporte y los resultados obtenidos mediante su uso para la planificación de campañas agrícolas. De esta manera se propone un cambio de paradigma en la planificación agrícola, pasando de un enfoque basado en la intuición y/o en márgenes unitarios, hacia un esquema integrado, sistemático y apoyado en datos, que permite explorar múltiples configuraciones productivas y evaluar sus implicancias de manera objetiva.



Fig. 1. Esquema de planificación agrícola (datos de entrada, decisiones y resultados).

2.2 Modelo de optimización

La herramienta agroinformática incorpora un modelo de optimización de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) como núcleo analítico para la asignación y el secuenciamiento de cultivos en un conjunto preestablecido de lotes, desarrollado por Anselmino y colab. (2026). El modelo matemático permite estructurar formalmente el problema, integrando las distintas dimensiones agronómicas, económicas y operativas, y evaluando de manera simultánea múltiples alternativas.

Dicho modelo se compone de funciones objetivo, variables de decisión, parámetros y restricciones. En términos generales, las funciones objetivo (FO) buscan maximizar el desempeño del sistema considerando aspectos económicos y de uso del suelo. La FO1 (Ec.1) maximiza las ganancias para el productor, y considera la diferencia entre los ingresos por ventas y los costos de siembra, de cosecha, de arrendamiento, y los postcosecha. La FO2 (Ec.2) maximiza el uso del suelo o ILU, y surge de la sumatoria para todos los cultivos i , lotes j , y periodos de tiempo t , de la multiplicación entre el parámetro gt_i , que indica la duración de un ciclo (en días) de cada cultivo i , y la variable

binaria $X_{i,j,t}$, que indica si el cultivo i se asigna en el lote j en el segmento de siembra t . Específicamente, se consideran 2 segmentos de siembra por campaña agrícola, estival e invernal.

$$\begin{aligned} \text{FO1: max } \text{Ganancias}[\text{USD}] & \\ &= \text{Ingresos por ventas} - \text{Costo de siembra} \\ &\quad - \text{Costo de cosecha} - \text{Costo de arrendamiento} \\ &\quad - \text{Costos post cosecha} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{FO2: max } ILU [\text{días}] = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} gt_i \times X_{i,j,t} \quad (2)$$

Las variables de decisión del modelo MILP se presentan en la Tabla 1.

Tabla. 1. Variables de decisión del modelo MILP, adaptación de Anselmino y colab. (2026)

Variable	Tipo	Descripción	Unidad
$X_{i,j,t}$	Binaria	1 si el cultivo i se asigna al lote j en el segmento t	{0,1}
$H_{i,j,t,l}$	Binaria	1 si el cultivo i se sembró en lote j con antigüedad l respecto a segmento t	{0,1}
$ST_{i,j,t}$	Continua	Día de siembra del cultivo i en lote j segmento t	[día]
$HT_{i,j,t}$	Continua	Día de cosecha del cultivo i en lote j segmento t	[día]
$Y_{i,j,t}$	Continua	Producción del cultivo i en lote j slot t	[ton]
$Z_{i,j,t}$	Continua	Factor de eficiencia de rendimiento por rotación	-

Los parámetros del modelo MILP se presentan en la Tabla 2.

Tabla. 2. Parámetros del modelo MILP, adaptación de Anselmino y colab. (2026)

Parámetro	Descripción	Unidad
$fsp_{i,c}$	Precio de venta al momento de la cosecha del cultivo i en la campaña c	[USD/ton]
$sc_{i,c}$	Costo de siembra del cultivo i en la campaña c (incluye costos de insumos, labores y costos fijos de estructura)	[USD/ha]
ha_j	Superficie del lote j	[ha]
$hc_{i,c}$	Costo de cosecha del cultivo i en la campaña c	[USD/ha]
$fr_{i,j,c}$	Costo fijo de arrendamiento del cultivo i en el lote j en la campaña c	[USD/ha]
$vr_{i,j,c}$	Porcentaje del costo variable de arrendamiento para el cultivo i en el lote j en la campaña c	[%]
tf_i	Tarifa de transacción/comercialización para el cultivo i	[%]
scp_i	Proporción a acondicionar del rendimiento del cultivo i	[%]
$cp_{i,c}$	Costo de acondicionamiento del cultivo i en la campaña c	[USD/ton]
st_i	Porcentaje de la producción del cultivo i que se embolsa en campo o se envía a un destino cercano	[%]
$cst_{i,c}$	Costo de flete corto o embolsado del cultivo i en la campaña c	[USD/ton]
$clt_{i,c}$	Costo de flete largo del cultivo i en la campaña c	[USD/ton]
st_i^{start}	Día de inicio de la ventana de siembra del cultivo i	[días]
st_i^{end}	Día final de la ventana de siembra del cultivo i	[días]
gt_i	Duración del ciclo del cultivo i desde su implantación hasta su cosecha	[días]

$setup_{i,i'}$	Tiempo de acondicionamiento del suelo entre la cosecha del cultivo i y la siembra del cultivo i'	[días]
$ar_{i,i'}$	Indica si un cultivo i' puede sembrarse a continuación de un cultivo pasado i (1) o no (0)	{0,1}
$xh_{i,j,ch}$	Indica si el cultivo i fue sembrado en el lote j en la campaña histórica ch (1) o no (0)	{0,1}
max_j^M	Cantidad máxima de cultivos principales a considerar en la planificación agrícola del lote j	-
max_j^S	Cantidad máxima de cultivos secundarios a considerar en la planificación agrícola del lote j	-
$yield_{i,s}^{av}$	Rendimiento promedio del cultivo i en el suelo s	[Ton/ha]
α_l	Factor de ponderación por antigüedad del lote j	-
$red_{i,i'}$	Impacto sobre el rendimiento asociado a sembrar el cultivo i' posterior al cultivo i	[%]

Estos parámetros permiten representar de manera consistente las condiciones productivas del sistema.

Las restricciones del modelo representan las condiciones y/o limitaciones asociadas al problema desde múltiples dimensiones. En particular, se incluyen condiciones de asignación de cultivos por lote y período, compatibilidad suelo–cultivo, y restricciones de rotación que regulan la secuencia de cultivos y consideran el historial productivo. Además, se modelan restricciones operativas asociadas a la planificación temporal, tales como ventanas de siembra, duración de los ciclos productivos y tiempos mínimos entre actividades. Finalmente se incorporan relaciones que vinculan la producción con los rendimientos potenciales, afectados por las características del suelo y las decisiones previas.

2.3 Arquitectura de la herramienta

La herramienta de software será desarrollada como una aplicación web monolítica con renderizado en servidor (*server-side rendering*), bajo el *framework* Django. Bajo este esquema, tanto la lógica de la aplicación como la generación de las vistas HTML se resuelven en el servidor, lo que simplifica el despliegue y reduce la complejidad arquitectónica respecto a enfoques basados en *frontend* desacoplado. Esta decisión de diseño resulta apropiada dado el perfil del usuario destinatario (el productor agropecuario o su asesor técnico) para quien una interfaz basada en páginas HTML tradicionales representa una experiencia familiar y de baja curva de aprendizaje.

La aplicación se organiza en tres módulos funcionales que operan de manera integrada dentro del mismo proceso servidor: el módulo de datos, el motor de optimización y el módulo de interfaz y visualización. A continuación, se detallan cada uno de los módulos:

Módulo de datos. Este componente es responsable de la carga, validación, preprocesamiento y persistencia de toda la información requerida por el modelo. Los datos se organizan en tres categorías según su origen y frecuencia de actualización.

La primera categoría comprende los parámetros agronómicos de referencia regional, que son precargados por el administrador del sistema y permanecen disponibles para

todos los usuarios sin necesidad de ingreso manual. Entre estos se incluyen las ventanas de siembra por cultivo, la duración del ciclo productivo, los días mínimos de preparación requeridos entre pares de cultivos, las restricciones de secuenciamiento agronómico, la compatibilidad suelo–cultivo, los rendimientos máximos por tipo de suelo y los factores de reducción de rendimiento por rotación. Dado que estos valores responden a conocimiento agronómico regional relativamente estable, su precarga evita la necesidad de que el usuario los ingrese en cada planificación y reduce el riesgo de errores de parametrización.

La segunda categoría agrupa los datos propios del establecimiento, que el usuario ingresa a través de la interfaz web. Estos incluyen las características de cada lote (superficie, tipo de suelo y restricciones de ocupación por campaña), el historial productivo de los últimos 3 años, y los parámetros económicos de la campaña a planificar (precios esperados de venta, costos de siembra, cosecha, acondicionamiento, arrendamiento y transporte). Para los parámetros económicos, la interfaz presenta valores de referencia sugeridos que el usuario puede confirmar o ajustar según su situación particular.

La tercera categoría corresponde a los resultados de las corridas del modelo de optimización, que también se almacenan en la base de datos. Esto permite al usuario recuperar y comparar planes generados en distintos escenarios sin necesidad de re-ejecutar el *solver*, facilitando el análisis iterativo de alternativas.

Toda esta información reside en PostgreSQL y es accedida mediante el ORM de Django, que se encarga de traducir las consultas a las estructuras de datos que el motor de optimización requiere para construir y resolver el modelo.

Motor de optimización. El motor de optimización descrito en el punto 2.2 constituye el núcleo analítico de la herramienta. En este componente se implementa el modelo matemático que representa el problema de planificación agrícola, incluyendo la definición de parámetros, variables, función objetivo y restricciones. A partir de los datos procesados, el motor construye y resuelve el modelo, generando soluciones que corresponden a planes de cultivo factibles y optimizados según los criterios definidos.

Módulo de interfaz y visualización. Este componente gestiona tanto la interacción del usuario con la herramienta como la presentación de los resultados. Las vistas HTML son generadas y renderizadas íntegramente en el servidor por Django, y enviadas al navegador como páginas completas o como fragmentos parciales según el tipo de interacción. Las salidas del modelo se presentan al usuario mediante tablas de asignación de cultivos por lote y campaña, calendarios de actividades de siembra y cosecha, indicadores económicos consolidados y gráficos comparativos entre escenarios. Este componente también permite al usuario modificar parámetros de entrada y relanzar el proceso de optimización de forma iterativa, lo que resulta fundamental para el análisis de escenarios bajo distintas hipótesis de precios, costos o condiciones agronómicas.

Flujo de información

El funcionamiento de la herramienta sigue un flujo secuencial. El usuario ingresa o modifica los parámetros del problema a través de formularios web. Django procesa la solicitud en el servidor, invoca el módulo de datos para validar y estructurar la infor-

mación, y luego ejecuta el motor de optimización. Los resultados obtenidos son procesados y renderizados como HTML por el mismo servidor antes de ser enviados al navegador del usuario. Este ciclo puede repetirse de forma iterativa dentro de una misma sesión, permitiendo explorar múltiples configuraciones productivas sin necesidad de recargar la aplicación completa. Parte de los datos necesarios como entrada para el modelo son precargados en la base de datos, como serían los cultivos por elegir, los destinos, y diferentes características que no son respectivas a una única campaña.

Integración de datos

Un aspecto central de la arquitectura es la capacidad de integrar información heterogénea en un único entorno de análisis. La herramienta permite combinar datos agronómicos, económicos y operativos, que en la práctica suelen encontrarse dispersos en diferentes fuentes y formatos.

La utilización de estructuras de datos estandarizadas facilita la interoperabilidad entre los distintos módulos, asegurando que la información fluya de manera consistente a lo largo del sistema. La arquitectura admitirá, como propuesta a futuro, la incorporación de nuevas fuentes de datos, como información climática o indicadores de mercado, lo que amplía las posibilidades de análisis y mejora la capacidad de adaptación de la herramienta a distintos contextos productivos.

2.4 Implementación

La herramienta será implementada en Python, utilizando Django como *framework* principal de la aplicación web. Django gestiona el ruteo de solicitudes, la lógica de las vistas, el acceso a la base de datos mediante su ORM y la generación de los *templates* HTML que se envían al navegador. La persistencia de datos se delega a una base de datos relacional PostgreSQL, cuya integración con Django a través del ORM permite operar sobre los datos del modelo (parámetros agronómicos, económicos, operativos, y los datos de resultados de optimización) mediante una capa de abstracción que desacopla la lógica de negocio de las consultas a la base de datos.

Para enriquecer la experiencia del usuario sin incurrir en los costos de desarrollo y mantenimiento de un *frontend* desacoplado, se incorporaron dos bibliotecas complementarias: *htmx*, que permite actualizar fragmentos específicos del HTML mediante peticiones parciales al servidor sin recargar la página completa, y *Alpine.js*, que gestiona pequeños estados locales en el cliente (como la visibilidad de paneles o el estado de controles de formulario) sin lógica de negocio. Ambas bibliotecas operan sobre HTML generado en el servidor, manteniendo la consistencia con el paradigma monolítico adoptado.

El modelo de optimización es formulado utilizando la biblioteca *Pyomo*, un entorno de modelado algebraico que permite representar problemas MILP de manera estructurada y flexible. Durante la fase de desarrollo, para la resolución del modelo se emplea el *solver* Gurobi, seleccionado por su robustez y su capacidad de resolver instancias de tamaño considerable en tiempos computacionales adecuados para uso interactivo. Para un uso comercial, se debe optar por una opción de *solver* con licencia gratuita. La invocación al *resolvedor* MIP se realiza de forma sincrónica dentro del ciclo de solicitud–

respuesta de Django, lo que resulta viable dado el tamaño de la instancia del caso de estudio; para instancias de mayor escala, se contempla como trabajo futuro la ejecución asíncrona mediante una cola de tareas y un servicio de optimización desacoplado mediante una API.

Para el procesamiento de los datos de entrada previo a la construcción del modelo se requiere una transformación de la información recuperada desde la base de datos hacia los formatos requeridos por Pyomo. Las visualizaciones de resultados (gráficos de asignación de cultivos, calendarios de actividades e indicadores económicos) son generadas en el servidor mediante la librería matplotlib y transmitidas al navegador como imágenes embebidas en las vistas HTML.

En la Fig. 2 se observa el *framework* de la herramienta. La implementación busca equilibrar robustez técnica y accesibilidad, permitiendo que herramientas avanzadas de optimización sean utilizadas en contextos productivos reales a través de una interfaz de trabajo basada en estructuras de datos familiares para el usuario.

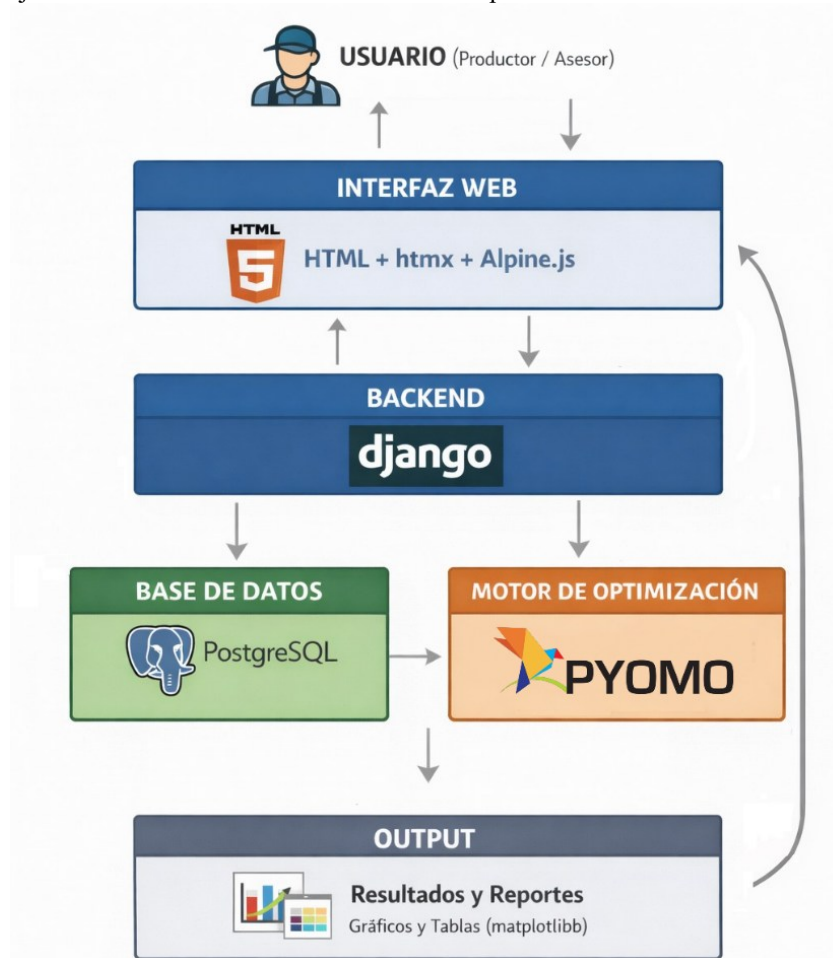


Fig. 2. Framework de la herramienta computacional.

3 Ejemplo de aplicación

El potencial de la herramienta se demuestra a través del planteo de un ejemplo de aplicación en la provincia de Entre Ríos, Argentina. La selección de esta región se fundamenta en su relevancia dentro del sector agroindustrial nacional, así como en las características productivas que la convierten en un entorno representativo para el análisis de decisiones agrícolas integradas.

Entre Ríos concentra aproximadamente el 6,8% de la superficie sembrada del país, y presenta una estructura productiva fuertemente orientada a la generación de productos primarios, los cuales explican el 49,7% de sus exportaciones totales. En particular, cultivos como la soja, el trigo y el maíz constituyen los principales pilares del sistema agrícola provincial, concentrando cerca del 90,4% de la producción. Esta alta dependencia de un conjunto reducido de cultivos, junto con la creciente presión por intensificar el uso del suelo, plantea desafíos relevantes en términos de sostenibilidad, rotación y eficiencia productiva.

Para la construcción del ejemplo se utilizaron datos representativos provistos por la empresa GC Agro S.R.L., productores agrícolas e ingenieros agrónomos de la región. Estos incluyen información sobre la delimitación y características de los lotes, parámetros agronómicos de los cultivos y los lotes (ventanas de siembra, tiempos entre siembra y cosecha, rendimientos potenciales, compatibilidad suelo-cultivo, efectos de rotación, información histórica del lote, entre otros), así como parámetros económicos (tales como los diferentes costos implicados y los precios de venta esperados).

El ejemplo analizado corresponde a la planificación de 3 campañas agrícolas, considerando 19 cultivos (8 principales, 8 secundarios y 3 de servicio) y el barbecho (periodo en el que el suelo no está cubierto). Se seleccionan 7 lotes, con una superficie total de 361 ha. Se considera el tipo de suelo Vertisol por ser el que está presente en la región bajo estudio, pero además están incluidos otros tipos de suelos, como el Alfisol y el Molisol. Se dispone de la información sobre qué cultivos fueron implantado en las 3 campañas anteriores, representado mediante el parámetro $xh_{i,j,ch}$ del historial agronómico del lote. Respecto al rendimiento de un cultivo en función al cultivo antecesor, se considera el parámetro $red_{i,ir}$, cuyos datos se encuentran en una matriz confeccionada por productores e ingenieros agrónomos, la cual se encuentra en estado de validación por parte del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Para el ejemplo planteado, considerando solo el objetivo económico, se obtiene un modelo matemático con 8.407 variables (5.040 binarias y 3.367 continuas) y 67.746 restricciones, que se resuelve a optimalidad en un tiempo de 1.75 s usando GRUOBI como resolutor MIP.

4 Resultados esperados

La aplicación de la herramienta al caso de estudio propuesto permitirá anticipar una serie de resultados relevantes tanto desde el punto de vista productivo como metodológico. En particular, se espera que el sistema facilite la generación de planes agrícolas integrados que superen las limitaciones de los enfoques tradicionales.

En primer lugar, se prevé que la herramienta permita identificar configuraciones de asignación de cultivos que optimicen el desempeño económico global del establecimiento, considerando de manera simultánea los efectos temporales de las decisiones. Esto implica no solo seleccionar los cultivos más rentables en el corto plazo, sino también evaluar el impacto de las rotaciones sobre los rendimientos futuros, promoviendo esquemas productivos más equilibrados y sostenibles.

Además, se espera que los resultados evidencien el valor de incorporar explícitamente el historial agronómico de los lotes en el proceso de planificación. La posibilidad de modelar el efecto de cultivos antecesores permitirá cuantificar pérdidas o mejoras en los rendimientos asociadas a distintas secuencias productivas, lo que constituye una mejora significativa respecto a enfoques que no consideran esta dimensión de manera sistemática.

Otro aspecto relevante es la capacidad de la herramienta para analizar estrategias de intensificación del uso del suelo. Se espera que la inclusión de alternativas (como los cultivos de servicio) permita incrementar la productividad global del sistema, aunque también podría introducir nuevos desafíos en términos de compatibilidad agronómica y restricciones operativas. En este sentido, la herramienta posibilitará evaluar estos *trade-offs* de manera explícita, proporcionando información valiosa para la toma de decisiones.

Desde una perspectiva operativa, se anticipa que los resultados incluyan planes de cultivo factibles que respeten las ventanas temporales de siembra y cosecha, así como otras restricciones propias del sistema productivo. Esto refuerza la aplicabilidad práctica de las soluciones generadas, acercando los resultados del modelo a condiciones reales de implementación.

Adicionalmente, se espera que la herramienta permita comparar distintos escenarios productivos, variando parámetros clave como precios, costos o condiciones agronómicas. Esta capacidad de análisis de escenarios resulta fundamental en contextos de incertidumbre, ya que permite evaluar la robustez de las decisiones y explorar alternativas ante cambios en el entorno.

Finalmente, desde el punto de vista agroinformático, se espera que el trabajo evidencie el aporte de integrar modelos de optimización dentro de herramientas accesibles para el usuario. Se busca demostrar que es posible traducir estructuras matemáticas complejas en sistemas de apoyo a la decisión que sean utilizables en la práctica, contribuyendo así a reducir la brecha entre el desarrollo teórico y su aplicación en el sector agroindustrial.

Los resultados esperados no solo apuntan a mejorar el desempeño económico del sistema agrícola analizado, sino también a fortalecer el proceso de toma de decisiones mediante el uso de información estructurada, análisis sistemático y evaluación integrada de alternativas.

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó el proyecto de una herramienta de software para la planificación de campañas agrícolas basada en un modelo MILP, que integra decisiones agro-

nómicas, económicas y operativas en un único marco analítico. El enfoque propuesto permite estructurar de manera formal el proceso de planificación, incorporando aspectos clave como la asignación de cultivos, la calendarización de actividades y el historial agronómico de los lotes.

La implementación en un entorno web facilita su aplicación en contextos reales, contribuyendo a acercar técnicas de optimización a la práctica productiva. Además, la herramienta permitirá analizar distintos escenarios y evaluar de forma consistente sus implicancias, lo que resulta especialmente relevante en entornos de decisión complejos.

Como líneas de trabajo futuro se contempla avanzar hacia una formulación multiobjetivo mediante el método ε -constraint, la migración a *solvers* de licencia libre para su uso comercial, y la incorporación de nuevas fuentes de información, como datos climáticos y de mercado.

Referencias

- Anselmino, A., Mendez, M. D. & Cóccola, M. E. (2026). Optimización de Cultivos y Rotaciones Agrícolas mediante un Modelo MILP [Manuscrito aprobado, en proceso de publicación]. JAIIO, Jornadas Argentinas De Informática.
- Benini, M., Blasi, E., Detti, P., & Fosci, L. (2023). Solving crop planning and rotation problems in a sustainable agriculture perspective. *Computers & Operations Research*, 159, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106316>
- Dogliotti, S., Rossing, W. A. H., & Ittersum, M. K. (2003). ROTAT, a tool for systematically generating crop rotations. *European Journal of Agronomy*, 19, 239–250. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00047-3)
- FAO. 2025. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura 2025: El potencial para producir más y mejor*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cd7488es>
- Ferrari, B., Rodríguez Zurro, T., D'Angelo, G., & Terré, E. (2025, 19 de diciembre). ¿Qué aporta el agro a la economía argentina? *Informativo semanal de mercados* (Año XLIV, Edición N.º 2225, pp. 2–11). Bolsa de Comercio de Rosario.
- Rusdiansyah, A., Malano, S. N., Isnaini, F., & Dewi, R. S. (2023). Optimization model of crop planning considering crop rotation with adjacency plots and nutrient cycling. *Agriculture and Natural Resources*, 57(4), 569–578. <https://doi.org/10.34044/j.an-res.2023.57.4.02>