



**ENTRENAMIENTO EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE
MAÍZ EN EL NORTE ARGENTINO**

Henckes, Andrés Nathanael

**Trabajo final de graduación modalidad “PASANTÍA” para ser presentado como
requisito para optar al Título de INGENIERO AGRÓNOMO.**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE**



Corrientes, Argentina

Agosto 2024

**ENTRENAMIENTO EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE
MAÍZ EN EL NORTE ARGENTINO**

Henckes, Andrés Nathanael

Asesor:

Ing. Agr. Pérez Daniel Oscar

Asesor

Tribunal evaluador:

Ing. Agr. Garay Jorge Marcelo

Evaluador

Ing. Agr. (Mgter.) Moulin Juan Francisco

Evaluador

Ing. Agr. Kettler Belén Araceli

Evaluador

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia: a mi madre, padre y hermano. Sin su esfuerzo y apoyo, jamás lo hubiera logrado. Solo Dios sabe lo que hicieron y dejaron de hacer para que yo hoy esté aquí, son mi mayor orgullo y motivación.

En segundo lugar, a mis amigos, que son mi segunda familia. Ellos siempre me aconsejaron y me dieron ánimos para nunca bajar los brazos. Nunca me faltó su acompañamiento ni su compañerismo en todos los desafíos que afronté durante estos años. Siempre supe que podía lograr lo que me propusiera, porque contaba con cada uno de ellos en el proceso. Más allá de los conocimientos y experiencias, ellos son el tesoro más grande que me llevo de la universidad.

A la Ingeniera Agrónoma Celsa Balbi (Vanina), que fue mi jefa, amiga y segunda madre durante mi trayectoria en la carrera. Me extendió sus brazos y me acogió como a un hijo, guiándome y enseñándome en el trayecto.

A la Nueva Agrupación de Ciencias Agrarias, que depositó su confianza en mí para estar al frente de tan prestigiosa organización, y mediante la cual pude forjar amistades que perdurarán para siempre y aprender cosas que en ningún aula se podrían enseñar.

A la Universidad Nacional del Nordeste, en especial a la Facultad de Ciencias Agrarias ya su equipo docente y no docente, que me dio la posibilidad de estudiar y rodearme de personas realmente increíbles.

A mi asesor y amigo Ing. Agr. Daniel Pérez, que me acompañó, guío y enseñó tantas veces, dejando de lado muchas cosas importantes y brindándome todo su tiempo y dedicación.

Por último, y no menos importante, quiero agradecerme a mí, por nunca rendirme y estar firme ante todas las adversidades, por todas las noches y madrugadas estudiando, por los domingos y fechas importantes lejos de mi casa, por tener mis objetivos claros y nunca perder el foco, y por sobre todas las cosas por haberme demostrado a mí mismo de lo que soy capaz con disciplina y trabajo duro.

Índice general

Introducción	8
Objetivos	10
Localidad en estudio	11
Descripción de la adopción de agricultura de precisión y digital.....	12
Desarrollo de las actividades	13
Diagnóstico y registro de datos.....	15
Análisis geoespacial	16
Entrenamiento en uso de aplicaciones y herramientas digitales.....	16
Generación de mapas nutricionales e Índice Topográfico Compuesto.....	17
Ambientación del lote	20
Descripción del proceso de ambientación.....	20
Recomendación agronómica de siembra y fertilización con N	23
Prescripción de densidad de siembra	23
Prescripción de fertilización con N al voleo.....	26
Máquinas de siembra y fertilización	26
Análisis productivo y económico	27
Comentarios finales.....	29
Bibliografía	30

Índice de figuras

Figura 1: Modelo Digital de Elevación del paisaje	11
Figura 2: Tipo de suelos	12
Figura 3: Fotos de los equipos. Rastra Veris y consola T7	15
Figura 4: Perímetro y Muestreo del lote.....	15
Figura 5: Ejemplo de 2 mapas de nutrientes.	17
Figura 6: Proceso de importación de los datos y ecuación para generar el ITC.....	18
Figura 7: Mapa de altimetría del lote.....	19
Figura 8: Modelos de regresión ajustados	19
Figura 9: Entorno de ejecución del script de zonificación en rstudio.....	21
Figura 10: Gráfico obtenido a partir del análisis MULTISPATI-PCA.....	21
Figura 11: Mapa de índice ambiental del lote y mapa con 3 ambientes	23
Figura 12: Utilización de la plataforma cultivio.....	24
Figura 13: Prescripción de siembra variable para el cultivo de maíz.....	25
Figura 14: Prescripción de fertilización variable para el cultivo de maíz.....	26
Figura 15: Fotos de los equipos.....	27
Figura 16: Fotos con DRONE del lote	28

Figura 17: Prescripción de densidad con los ensayos de NxD **28**

Índice de tablas:

Tabla 1: Factores determinantes para realizar agricultura de precisión. **13**

Tabla 2: Resumen de aplicaciones que se utilizaran para el análisis geoespacial **16**

Introducción

Los logros de la agricultura han sido notables. Sin embargo, el impacto ambiental resultante de la actividad agropecuaria marca la necesidad de encontrar maneras más eficientes y sostenibles para satisfacer las demandas de productos del campo. (Andrade, 2020)

El rol del maíz para aumentar la producción de alimentos en cantidad y calidad y para disminuir el impacto ambiental vinculado a la agricultura es particularmente importante basado en que es el cultivo de mayor producción global, es un componente importante en muchos sistemas de producción relevantes, presenta elevados rendimientos potenciales de grano, muestra alta sensibilidad a la disponibilidad de recursos e insumos y contribuye considerablemente a la sostenibilidad de los sistemas productivos por mejorar la productividad, la eficiencia de uso de insumos y recursos del sistema, la diversidad, la intensificación de la secuencia, y los aportes de C y rastrojos al suelo. (Andrade *et al.*, 2023)

En Argentina, el principal uso del maíz es como cultivo forrajero (grano, silo o pastoreo directo) o como base para la fabricación de productos alimenticios o químicos en la industria. En mucha menor medida el maíz es utilizado para el consumo directo humano, particularmente en el Noroeste del país (NOA) donde el grano se incorpora en la dieta preparado de diferentes maneras. El uso predominante del maíz como grano forrajero o industrializado lo ubica como un actor relevante de las agriculturas abiertas del mercado mundial, entre las que se destaca Argentina como el tercer exportador mundial con un 20% del valor global en 2019 (FAOSTAT, 2021).

Argentina produce actualmente 60 M t de maíz al año, lo que representa cerca del 5% de la producción global de este cultivo. Este valor triplica la producción nacional de hace tan solo 10 años atrás (Satorre y Andrade, 2021). Históricamente, el área de cultivo dedicada a la producción de maíz oscilaba entre 2 y 4 M ha. Sin embargo, en los últimos años el área de maíz se expandió a razón de cerca de 0,5 M ha por año hasta llegar a 8 M ha. Pero en la última década, el rendimiento promedio se ha mantenido en el rango de entre 7 y 8 t/ha en años normales. Esta tendencia se explica parcialmente porque el crecimiento de área de este cultivo en Argentina ha ocurrido en parte a través de su expansión en ambientes de menor productividad, en los cuales, a su vez, los cambios en el sistema de producción del cultivo tienden a mejorar su estabilidad antes que maximizar rendimiento por unidad de área. (Andrade & Satorre, 2021).

Este tipo de “planteos agronómicos” se valen de la identificación de la heterogeneidad ambiental, para luego aplicar una “receta productiva” adaptada a los diversos microambientes que existen en una propiedad agrícola (e. g., variando así la densidad de siembra, la aplicación de fertilizantes, la aplicación selectiva de herbicidas, etc.). Si bien este nuevo paquete tecnológico lleva ya algunos años en el mercado, su proceso de difusión lejos está lejos de ser masivo, tanto en el escenario local como internacional. (Lachman *et al.*, 2023).

En términos generales, este conjunto de nuevas herramientas habilita a los productores a implementar estrategias productivas flexibles. Estas tecnologías permiten identificar la heterogeneidad ambiental dentro de un lote y así implementar estrategias de producción diferenciadas las cuales se adecúan a las particularidades de cada uno de esos ambientes (e. g., con respecto a los requerimientos hídricos, de nutrientes, de aplicación de insumos para la protección de cultivos). De esta forma, la AP permite a los agricultores disponer de información “sitio específica” de suelos, malezas, plagas, niveles de humedad para poder entregar la dotación óptima de insumos (e. g., agua, herbicidas, semillas, fertilizantes, etc.) según los requerimientos de cada ambiente mejorando la eficiencia y la sustentabilidad de los sistemas de producción. Estas tecnologías también facilitan a sus usuarios adaptar sus procesos productivos en función de las condiciones climáticas que exploren, mejorando sus estrategias de producción (i.e., riego, fertilización, aplicación de herbicidas, etc.). (Lachman *et al.*, 2023).

Objetivos

- Realizar entrenamiento en agricultura de precisión a través de herramientas digitales.
- Aprender el uso de herramientas digitales y plataformas de información.
- Aplicar los conocimientos adquiridos en la carrera a efectos de integrarlos en la eficientización del uso de los recursos.

Localidad en estudio

El establecimiento se encuentra en la zona este de la provincia de Tucumán, más precisamente en el límite con Santiago del Estero, en la localidad de Las Cejas.

El relieve presenta una combinación de montañas, cerros y áreas más planas, con una altitud que puede variar significativamente a lo largo del área. Es importante comprender la ubicación en el paisaje del lote, porque nos brinda una información valiosa de cómo el agua circula a nivel cuenca. En lote desde el año 2000 ya posee sistematización con curvas de nivel debido a la intensidad de drenaje alta en la cuenca. Es más seco que el distrito oriental, registrando de 450 a 700 mm de precipitación anual, con clima continental más marcado.

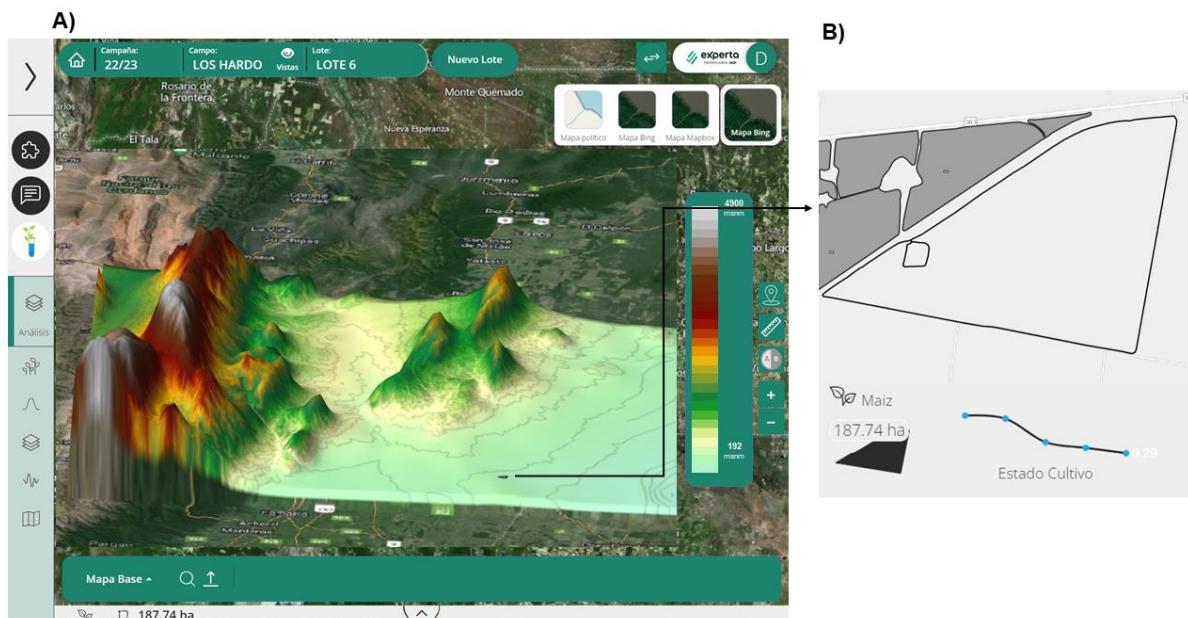


Figura 1: A) Modelo Digital de Elevación (DEM) del paisaje: m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) en base a SRTM Tiles from NASA Server ; B) Perímetro del lote donde se realizó el estudio. Elaboración propia.

El lote posee suelos de tres series diferentes, pertenecientes al orden de los molisoles, tienen una textura franca, son suelos bien drenados con una profundidad efectiva de 100 cm, cuya principal limitante es la susceptibilidad a la erosión hídrica, (INTA, 1985.), en la figura 2 se observa las interceptas de las series de suelos que cortan al lote, información que se encuentra disponible en la plataforma [Experta AGD](#), en base a SAGyP - INTA - Proyecto PNUD ARG/85/019. Con la participación del Instituto de Suelos y EEAs del INTA.

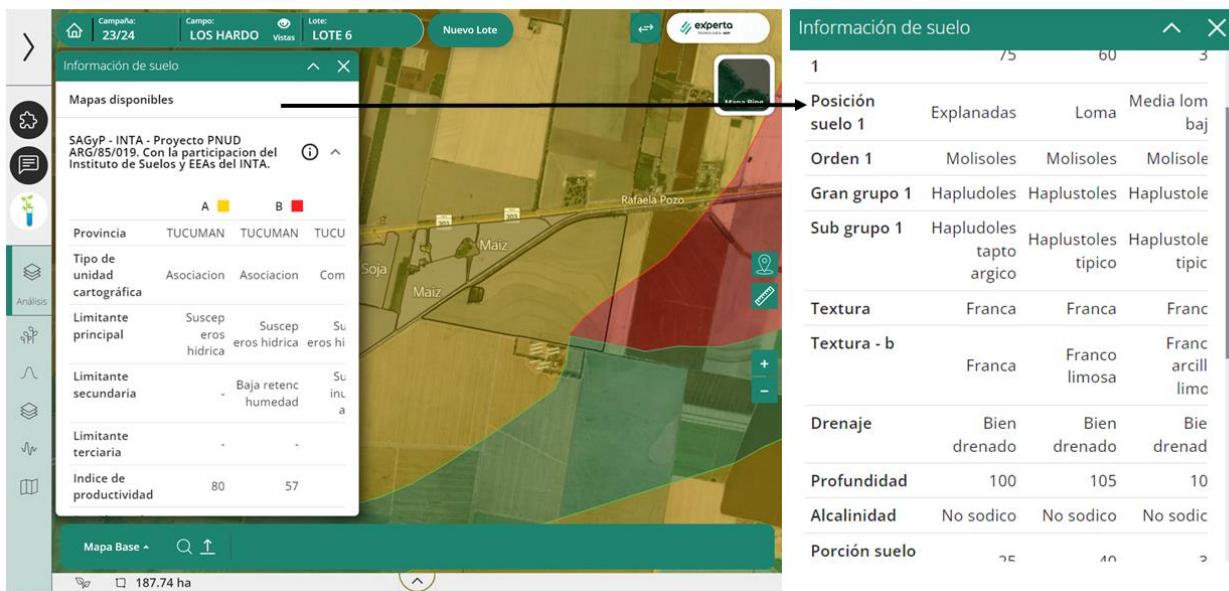


Figura 2: Tipo de suelos en base a INTA (1985) superpuesta sobre la geometría del lote.

Descripción de la adopción de agricultura de precisión y digital

La región donde se ubica el establecimiento agrícola cuenta con una larga historia de actividad agrícola que se remonta a 1980 con el cultivo inicial de caña de azúcar. En la década del 2000, se observa un predominio del monocultivo de soja. Hacia la década del 2010, se introdujo de manera significativa la rotación de cultivos con maíz y trigo. Esta breve descripción proporciona el contexto necesario para entender las diversas prácticas de manejo implementadas en el área. La degradación de la fertilidad química y física del suelo, junto con los bajos rendimientos y los elevados costos de los insumos, llevaron al establecimiento a incorporar tecnologías avanzadas para mitigar estas problemáticas. En 2015, se adoptó la agricultura de precisión (AP), centrada en el diagnóstico químico y físico de los suelos. El principio rector de la AP fue el de aplicar la cantidad correcta de insumos, en el momento adecuado y en el lugar preciso.

Esto se fundamentó con la recolección de datos clave, tales como electroconductividad aparente, altimetría, pH, nutrientes, rendimientos, entre otros. Esto permitió la segmentación del lote en sectores con características específicas, facilitando la toma de decisiones precisas para cada ambiente identificado.

En los últimos años, el crecimiento exponencial de los datos generados por metro cuadrado en el lote ha impulsado la adopción de la agricultura digital. Esta tecnología actúa como un gestor

interconectado de datos, análisis y plataformas, facilitando la toma de decisiones basadas en información precisa y actualizada. En este contexto, se implementó la plataforma Experta AGD, cuya función principal es integrar, procesar y analizar datos provenientes de diversas fuentes, permitiendo al productor gestionar su establecimiento de manera más eficiente y efectiva.

En este Trabajo Final de Graduación (TFG) y en base a varios años de recopilación de datos y la experiencia empírica de los profesionales que han guiado esta pasantía, se logró establecer un orden de factores que, a la fecha, son determinantes para la adopción exitosa de la AP (ver Tabla 1). Dada la variedad de herramientas disponibles que conducen al mismo objetivo, es fundamental establecer un criterio y un orden para facilitar la comprensión y la implementación de una metodología de trabajo eficaz. Esto es algo cíclico, dinámico y a largo plazo.

Factores determinantes	Breve descripción
1) Diagnóstico y registro de datos	Información de alta resolución espacial. Muestreo intensivo de suelos. Mapas de rendimiento, Sensores remotos.
2) Identificar la variabilidad y ambientar	Cuantificar y atribuir variables. Proceso estadístico. Integrar variables, asociarlas.
3) Recomendación Agronómica	Qué hacer en cada ambiente. Prácticas de manejo. Agronomía.
4) Maquinaria Agrícola	Capacidad de respuesta temporal y espacial para aplicar los insumos. Telemetrías.
5) Análisis productivo - económico.	Tomar decisiones estratégicas para maximizar los beneficios económicos y productivos. Cuál es el impacto de la tecnología.

Tabla 1: Factores determinantes para realizar agricultura de precisión. Fuente: árbol de decisiones empresariales desarrollado en 20 años por AGD.

Desarrollo de las actividades

Aunque existe un orden de factores para implementar la AP, las herramientas disponibles son numerosas y no siempre siguen un orden cronológico. En muchas situaciones, los datos ya se han generado antes de este TFG, pero resultan indispensables para las decisiones agronómicas

y los planteamientos productivos al momento de la siembra del cultivo de maíz (2023). Estos datos son un back up que se “traen” al momento que se requiere para trabajarlos y darle un valor específico, por ejemplo, ambientar al lote.

1) Diagnóstico y registro de datos.

Actualmente con las tecnologías existentes podemos obtener una gran cantidad de información y datos de distintos tipos. Pero no todos pueden ser utilizados para hacer AP dada la necesidad de poseer información de alta resolución espacial (tamaño del píxel), con la cual podamos realizar una correcta lectura del lote y su evolución, haciendo posible un diagnóstico acertado del mismo. Mediante una caracterización regional podemos ubicar al lote en su entorno (Figura 1) y entender el contexto en el cual se inserta el mismo, pero al ser datos con una muy baja resolución espacial no nos permitirá realizar agricultura de precisión.

Para salvar ese problema, se inició el proceso de medición de límites a campo. Esta tarea como las demás se llevan a cabo con GPS con corrección satelital (omnistar). Mediante la rastra veris se mide la electroconductividad aparente (ECa) del suelo. La ECa es la capacidad de la materia de transmitir la electricidad. Además de la EC el equipo también va registrando la altimetría con los datos recibidos de un GPS. La distancia entre las cuchillas define la profundidad de la lectura. Se pasa en el lote cada 20-25 metros, teniendo una capacidad aproximada de 40 has/h. Con la interpretación de mapa de ECa se diferencian las zonas de muestreo.

El muestreo superficial (20 cm) se realiza extrayendo una muestra compuesta por 10-12 piques cada 3.5 has y el muestreo en profundidad (200 cm, estratificado en 20 cm) se realiza para 50/70 has, dependiendo del tamaño y variabilidad del lote. Las muestras se envían al laboratorio de última tecnología Aglab de AGD que se encuentra en La Carlota, provincia de Córdoba.

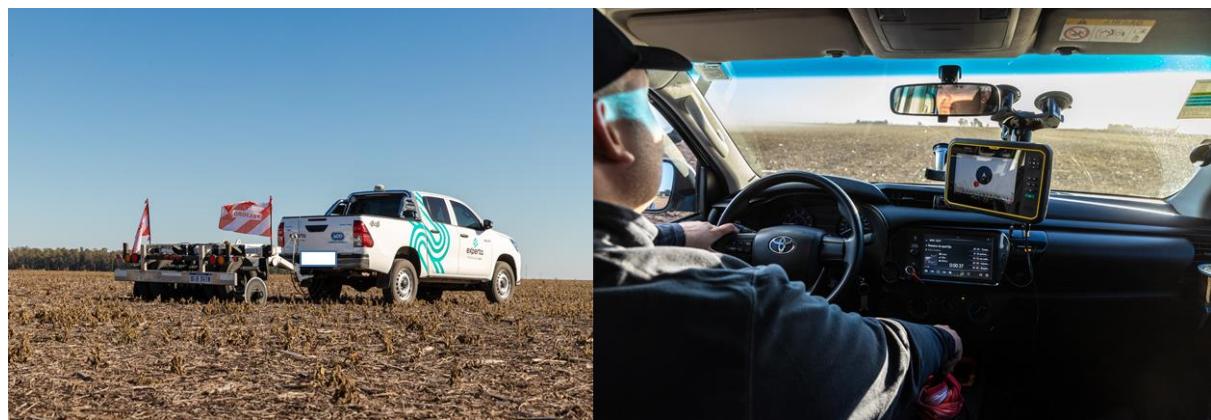


Figura 3: Fotos de los equipos. Rastra Veris y consola T7 (trimble), realizando un proceso de medición con corrección satelital.

En el laboratorio se miden determinaciones químicas y físicas para cada punto de muestreo, que se detallan a continuación: pH, Conductividad, Materia Orgánica, Fósforo, Nitrógeno Total, Nitrógeno (N-NO₃), Azufre, Potasio, Calcio, Magnesio, Sodio, CIC, Saturación de bases, Zinc, Cobre, Manganeso, Boro, Cobalto, Molibdeno, Hierro, Densidad Aparente, Relación calcio/magnesio, Arena, Arcilla, Limo, PSI (porcentaje de sodio intercambiable), NAN (nitrógeno anaeróbico).

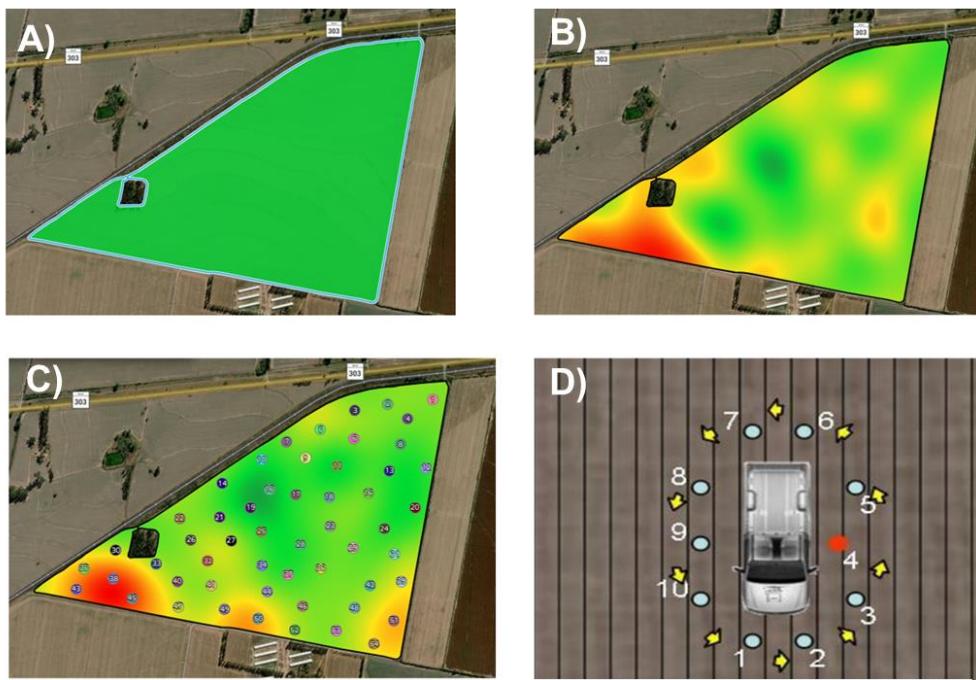


Figura 4: A) Perímetro del lote definido mediante GPS. B) Mapa depurado e interpolado de ECa 30cm. C) Ubicación de los puntos de muestreo superficial en base a la capa de ECa (dirige al muestreo intensivo). D) Generación de la muestra compuesta en cada punto georreferenciado.

2) Análisis geoespacial

Luego del protocolo de recolección de datos, es crucial analizarlos e interpretarlos para generar los distintos mapas de nutrientes e índices derivados. El análisis de los datos es de suma importancia, ya que involucra procesos complejos, tales como la estadística geoespacial, métodos de interpolación de datos y ajustes de modelos. Estos procesos son esenciales para la generación de índices con relevancia agronómica, permitiendo una comprensión detallada de las variaciones espaciales en el campo y la toma de decisiones informadas para la gestión del cultivo.

a) Entrenamiento en uso de aplicaciones y herramientas digitales

El proceso de capacitación sobre el uso de herramientas digitales que se utilizan para mismo fin y para otros trabajos que no fueron abarcados en esta pasantía. El aprendizaje fue progresivo, iniciando desde la instalación misma de los programas hasta la generación de mapas. Es importante recalcar la necesidad de un equipo con una buena capacidad de procesador y memoria RAM para poder ejecutar de forma correcta y fluida los programas requeridos.

Aplicaciones	Breve descripción
SMS Advanced	Interpolación de los datos georreferenciados. Generación del Índice Topográfico compuesto. Generación de Prescripciones de semilla y fertilizante.
Plataforma Experta	Visualización de imágenes satelitales, mapas de nutrientes, correlación de capas, mapas de rendimientos.
Infostat	Modelos de regresión espacial, ajuste de proyección de las capas, entre otros.
RStudio	Generación de ambientes. Script de ambientación Multispati-PCA.

Tabla 2: Resumen de aplicaciones que se utilizarán para el análisis geoespacial de los datos previamente generados.

En este trabajo se utilizó el software SMS Advanced de Ag Leader y la Plataforma Experta para gestionar la variabilidad dentro de los campos, utilizar estadística geoespacial para generar mapas y prescripciones.

b) Generación de mapas nutricionales e Índice Topográfico Compuesto

El primer dato que se importó a la aplicación SMS advanced fue el límite del campo, para que el programa pueda ubicar espacialmente al mismo. Seguido de esto se importaron los datos de altimetría, ECa, tanto superficial (30 cm) como subsuperficial (90 cm) y los valores de los resultados de los muestreos de suelo que se obtuvieron del laboratorio. Para los datos de suelos, se realizó una interpolación para cada nutriente, según el método de Kriging Universal, el cual es utilizado en situaciones que se cuenta con pocos puntos de datos (Pérez, D. com. personal).



Figura 5: Ejemplo de 2 mapas de nutrientes interpolación en una grilla de 20 x 20 metros. A) Mapa de MO. B) Mapa de fósforo.

Luego de generar los mapas de nutrientes para comprender mejor la variabilidad espacial de los mismos, se realizó el Índice Topográfico Compuesto (ITC). En la mayoría de los casos la altimetría del lote por sí sola es un buen indicador para entender la dinámica de la fertilidad y de los ambientes. Pero en otras situaciones, podemos estar subestimando cuencas cerradas que se encuentren en zonas elevadas del lote o sobre estimando divisorias de agua ubicadas en las partes bajas. Por esto normalmente se trabaja con un índice calculado a partir de la altimetría y que analiza varios atributos. Este es denominado comúnmente como índice Topográfico Compuesto o Potencial de Humedad y es un indicador de la redistribución del agua en el terreno o potencial de la zona de recibirla.

Para generar el Índice de Terreno y Cultivo (ITC), se siguieron los siguientes pasos (Figura 5):

- I. **Importación de Datos:** Se importaron al software SMS los datos de altimetría desde la capa VEC, que contiene información de Electroconductividad Aparente (ECa) y altimetría.
- II. **Configuración de la Cuadrícula 3D:** Una vez importados los datos, se configuró el software utilizando la opción "Regenerar Cuadrícula 3D".

Este paso es crucial para crear una representación tridimensional precisa del terreno, basándose en los datos de altimetría.

- III. **Regeneración de Cuadrículas 3D:** Tras configurar la cuadrícula 3D, el software procesa los datos y genera una cuadrícula tridimensional que refleja las variaciones topográficas del lote.
- IV. **Análisis del Terreno:** En la sección de "Asistente de Análisis" del software, se seleccionó la opción "Análisis del Terreno". Este análisis permite examinar las características topográficas del terreno de manera detallada.
- V. **Selección del Lote:** Dentro del análisis del terreno, se eligió la opción "Lote Simple", lo que permite analizar un lote específico de manera individual.

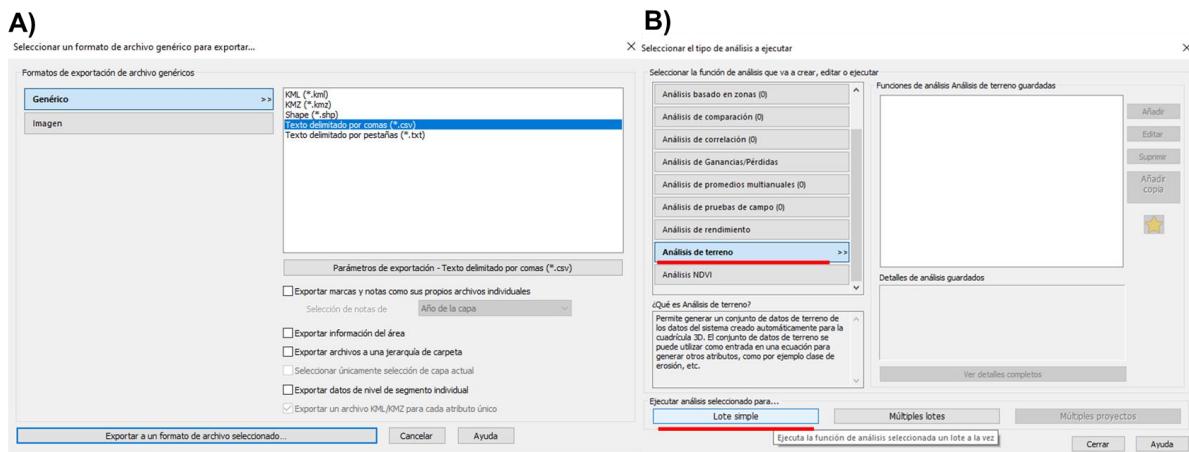


Figura 6: A) proceso de importación de los datos. B) Selección de la ecuación para generar el ITC.

Mediante este proceso, se genera una capa denominada “análisis de terreno”, que se visualizará en el árbol de administración del software. Esta capa incluirá valores de intensidad de drenaje, potencial de humedad, fuerza de flujo, dirección de flujo, elevación, entre otros parámetros. La interpretación de esta capa, combinada con la interpolación de datos de nutrientes, como los niveles de fósforo, permitirá observar el comportamiento y la distribución de estos nutrientes en relación con el relieve y el flujo del agua en el lote (Figura 6). Esto proporciona una comprensión detallada de cómo las características topográficas y el movimiento del agua afectan la distribución de nutrientes, facilitando una gestión agronómica más precisa y eficiente.

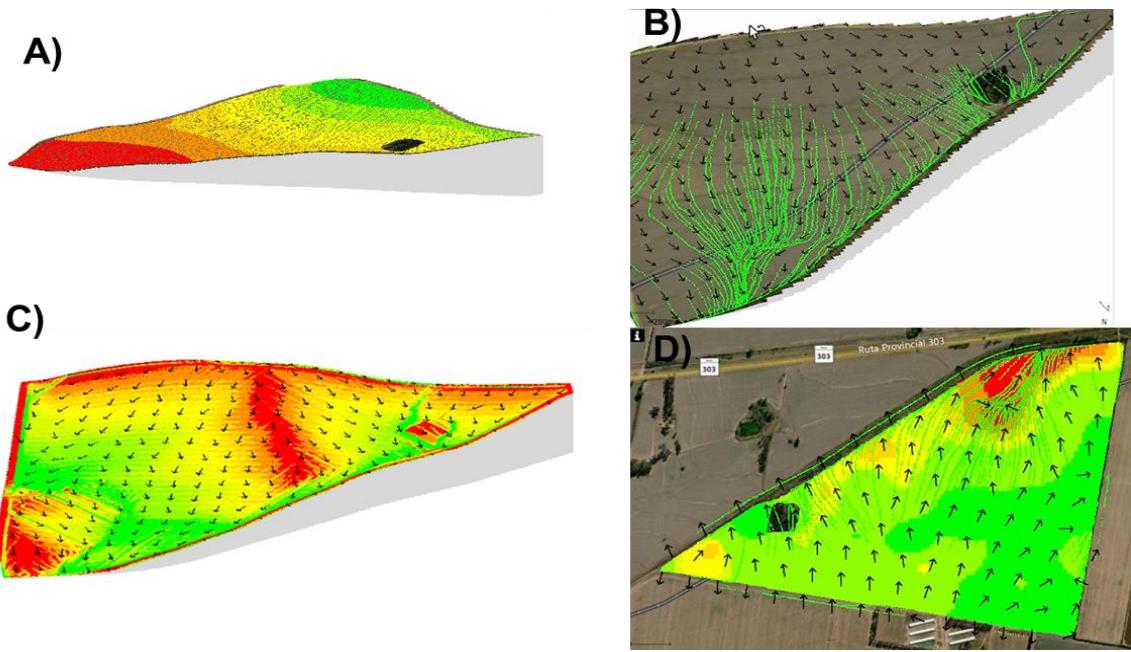


Figura 7: A) Mapa de altimetría del lote visualizado en un modelo digital de elevación (DEM). B) Variable que resulta del ITC, denominada intensidad de drenaje. C) ITC, las regiones rojas indican la menor capacidad de potencial de humedecimiento y las verdes indican mayor. D) Intensidad de drenaje superpuesta sobre el mapa de fósforo.

Para cada variable, se puede realizar un proceso estadístico descriptivo ajustando un modelo de regresión. Aunque los datos presentan una fuerte correlación espacial y no cumplen con el supuesto de independencia, este enfoque sigue siendo útil para comprender el comportamiento de las variables estudiadas (ver Gráfico 1).

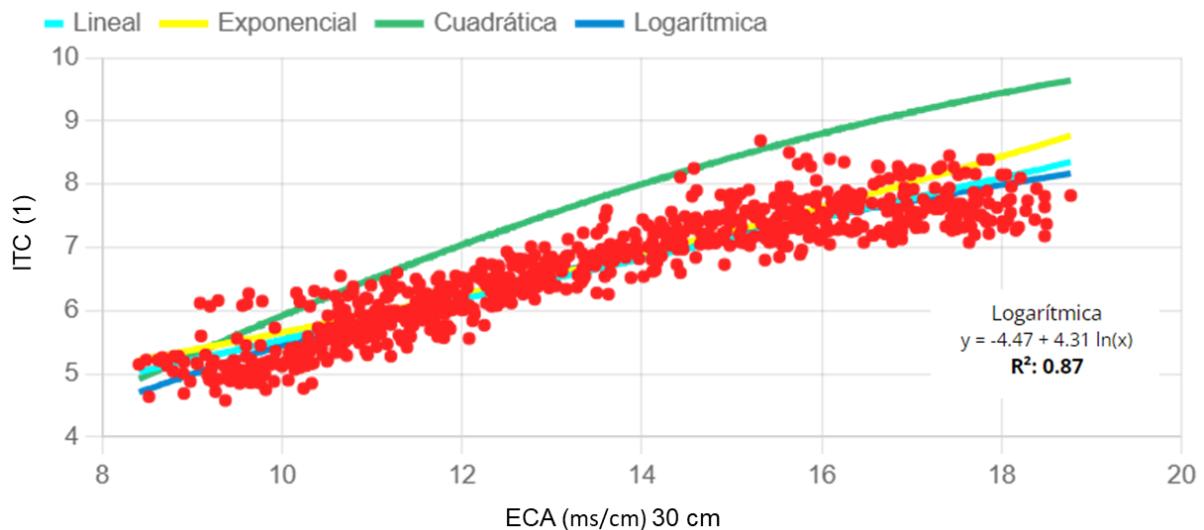


Figura 8: Modelos de regresión ajustados para ECa 30 cm y el ITC (adimensional). Solo se detalla los estadísticos del modelo que tuvo mejor ajuste.

3) Ambientación del lote

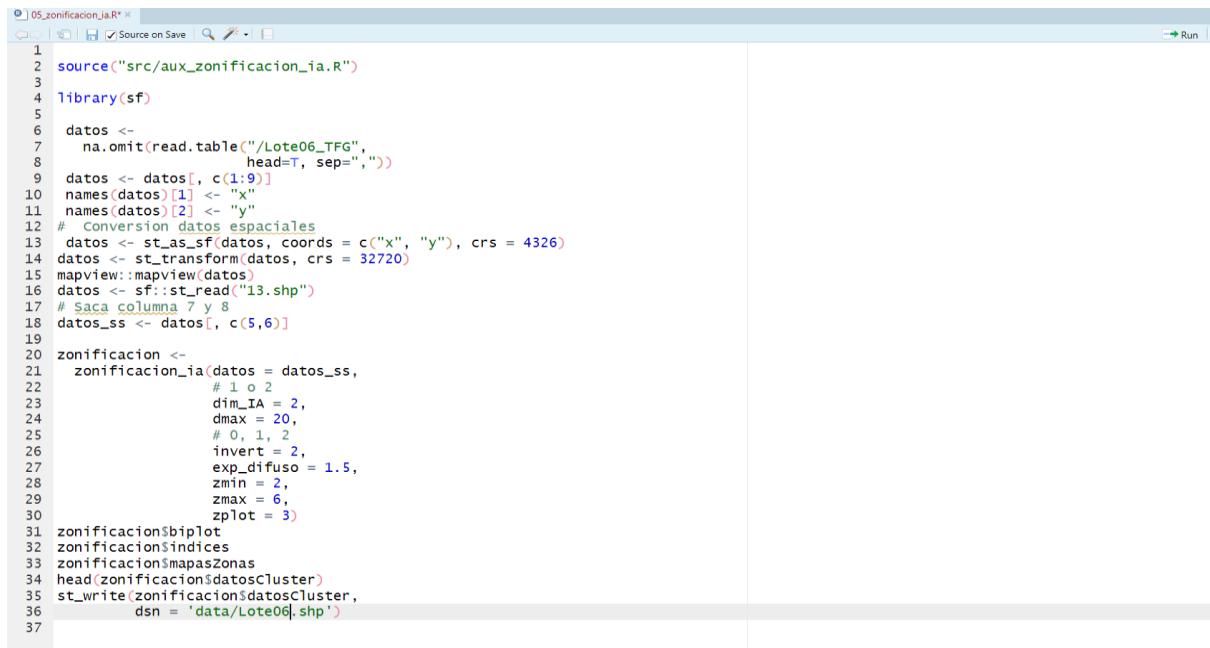
El análisis geoespacial, detallado previamente en el punto 2, constituye el paso inicial para desarrollar la ambientación del lote. Los mapas generados se utilizarán para evaluar el grado de asociación entre las variables y determinar si explican la variabilidad del lote y su relación con el rendimiento del cultivo. A partir de este análisis, el lote se interpreta como una cuadrícula de 20x20 metros, donde cada celda contiene datos de suelos, Índice Topográfico (ITC) y rendimiento.

Existen diferentes metodologías para ambientar un lote, desde las más simples, que pueden realizarse manualmente, hasta las más complejas, que involucran estadística geoespacial y la generación de Índices Relativos de Productividad (IRP). En este caso, se utilizó el análisis Multispati-PCA, que combina el análisis de componentes principales con el índice de autocorrelación espacial de Moran. Este método, disponible en el módulo de análisis espacial de Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020), fue modificado con varios parámetros en RStudio para generar los IRP, siguiendo la metodología propuesta por AGD y desarrollada en colaboración con la cátedra de estadística de la Universidad Nacional de Córdoba y CONICET en 2023.

El archivo de datos contiene 4,898 mediciones georreferenciadas. Para este lote en particular, las variables elegidas para el proceso de ambientación fueron electroconductividad (ECa 30 y 90), materia orgánica (MO) y fósforo (P). La selección de estas variables se basa en trabajos previos realizados en el establecimiento, los cuales han identificado las variables más relevantes para los procesos de ambientación. Este Trabajo Final de Graduación (TFG) no pretende explicar en detalle la selección de dichas variables.

Descripción del Proceso de Ambientación:

- I. **Carga de la Biblioteca y Datos:** Se carga la biblioteca sf y se importan los datos desde un archivo CSV, eliminando valores faltantes y renombrando columnas.
- II. **Conversión a Datos Espaciales:** Los datos se convierten a un formato espacial UTM utilizando coordenadas y se transforman al sistema de referencia CRS 32720.
- III. **Zonificación:** Se aplica una función de zonificación que utiliza el Multispati-PCA para clasificar las zonas basándose en varios parámetros.
- IV. **Visualización y Exportación:** Se visualizan los resultados y se exportan los datos de zonificación a un nuevo archivo shapefile.



```

1 source("src/aux_zonificacion_ia.R")
2
3 library(sf)
4
5 datos <- 
6   na.omit(read.table("/Lote06_TFG",
7     header=TRUE, sep=","))
8   datos <- datos[, c(1:9)]
9   names(datos)[1] <- "X"
10  names(datos)[2] <- "Y"
11  # Conversion datos espaciales
12  datos <- st_as_sf(datos, coords = c("X", "Y"), crs = 4326)
13  datos <- st_transform(datos, crs = 32720)
14  mapview::mapview(datos)
15  datos <- sf::st_read("13.shp")
16  # Saca columna 7 y 8
17  datos_ss <- datos[, c(5,6)]
18
19 zonificacion <-
20   zonificacion_ia(datos = datos_ss,
21     # 1 o 2
22     dim_IA = 2,
23     dmax = 20,
24     # 0, 1, 2
25     invert = 2,
26     exp_difuso = 1.5,
27     zmin = 2,
28     zmax = 6,
29     zplot = 3)
30
31 zonificacion$biplot
32 zonificacion$indices
33 zonificacion$mapaszonas
34 head(zonificacion$datosCluster)
35 st_write(zonificacion$datosCluster,
36   dsn = 'data/Lote06.shp')
37

```

Figura 9: Entorno de ejecución del script de zonificación en RStudio.

El primer resultado del análisis MULTISPATI-PCA (ver Figura 10) permite visualizar la correlación entre las variables y estudiar la estructura de dicha correlación. El gráfico es confeccionado a partir de los dos primeros ejes (componentes principales espaciales CPs), con la CPs1 gráfica el eje vertical y con la CPs2 el eje horizontal. Además, puede adicionarse un gráfico de barras con los autovalores.

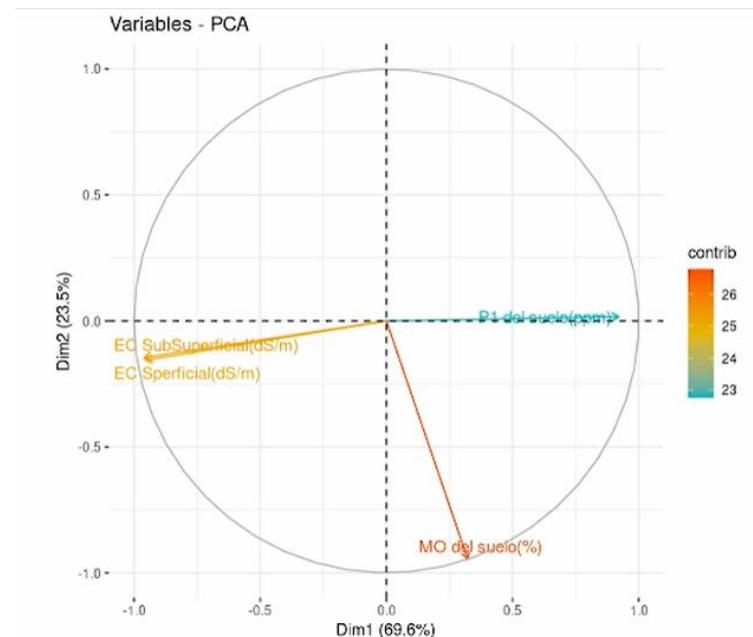


Figura 10: Gráfico obtenido a partir del análisis de componentes principales espacial (MULTISPATI-PCA) y gráfico de barras de los autovalores asociados a cada componente espacial.

Del análisis del grafico desprende la leyenda “contrib” que es la contribución de la variable a la componente principal, muestra que tan importante es esa variable para describir la variabilidad. Está correlacionado al largo de la flecha, es de esperar que flechas más largas tengan mayor contribución y por ende sean más rojas. Además, se puede ver en el gráfico el porcentaje en el cual cada eje explica la variabilidad en el lote, siendo el primer componente (CPs1) el que lo explica en un 69,6%, esto quiere decir que la variación de ambientes en el lote está en su mayor parte dada por la variación las EC superficial 30, EC subsuperficial 90cm y P1 del suelo. La MO es la de mayor importancia en la CP2. Las flechas de las CP1s tienen un valor del componente cercano a 1 (en valor absoluto) es más grande que el valor cercano a 0.3 de la MO.

Con esta información resultante, se construye un Índice Relativo de Productividad (IRP) en una escala que va de 0 a 100. El índice se origina ponderando los componentes principales CP1 y CP2 según la proporción acumulada individual (P_i) y la total (P_t) de los mismos, como se muestra en la Ecuación 1, siguiendo la metodología propuesta por Pérez y Granatelli (2023).

$$\text{Eq.1} \quad \text{IRP} = (\text{CP1}) * (\text{Pi}/\text{Pt}) + (\text{CP2}) * (\text{Pi}/\text{Pt})$$

Como resultado, se obtiene un mapa de IRP (Índice Relativo de Productividad) o Índice Ambiental, ver figura 8. Adicionalmente, se genera un mapa en el que al índice se le aplica una clusterización mediante el algoritmo k-means difuso, lo que permite agrupar el lote en tres zonas o ambientes distintos, si se desea trabajar de esa manera.

Es importante tener en cuenta que este proceso estadístico clasifica los ambientes en diferentes grupos basados en las características del suelo y otros parámetros medidos. Sin embargo, la interpretación agronómica es crucial para definir cuál de estos grupos corresponde a ambientes de alta, media y baja productividad. En otras palabras, aunque el análisis proporciona una clasificación inicial, la experiencia y el conocimiento agronómico son fundamentales para interpretar y aplicar estos resultados de manera efectiva en la gestión del cultivo.

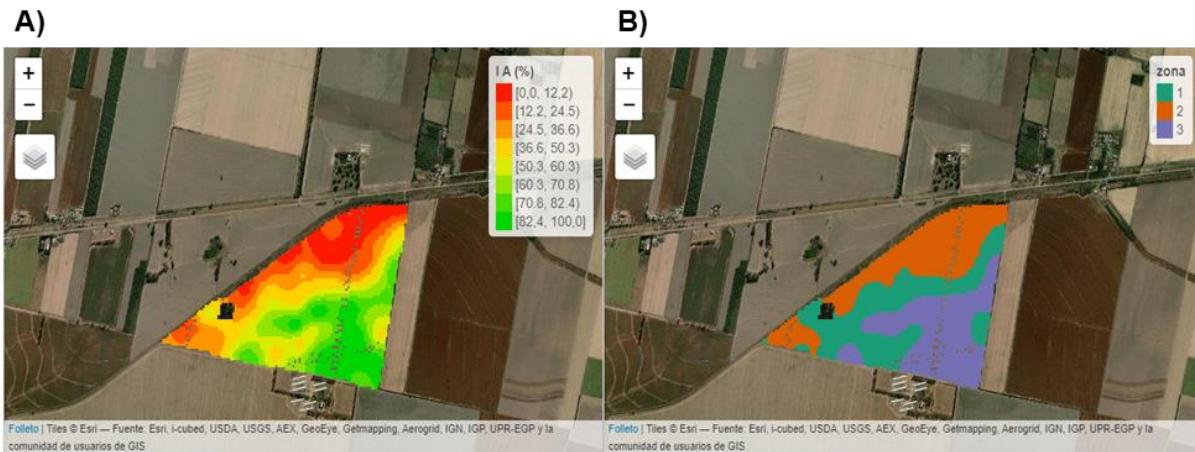


Figura 11: A) mapa de índice ambiental del lote. B) Mapa con 3 ambientes definidos por clusterización k- meas difuso.

4) Recomendación agronómica de siembra y fertilización con N

a) Prescripción de densidad de siembra

Una vez generado el archivo de ambientación el siguiente paso es generar una recomendación o dosificación variable para cada ambiente, conocida como prescripción, tanto para siembra como para fertilización.

El objetivo de la realización de estas prescripciones de siembra y fertilización y de la agricultura de precisión o “agricultura de los datos” es justamente poder tomar decisiones agronómicas en las cuales se va a asignar de la forma más eficiente los recursos o factores de producción para maximizar los beneficios y tener el menor impacto ambiental posible sobre el agroecosistema.

En este lote se realizará la siembra del híbrido DK 7210 VTP3, con el cual históricamente se utilizaba una densidad de 57.000 semillas/ha (información generada en ensayos previos por el Ing. Pérez, com. personal) con una fecha de siembra del 27 de diciembre. Acompañada a la siembra se realizará una fertilización de Nitrocomplex 80 kg. ha⁻¹. Y una fertilización al voleo de Nitrodoble con una dosis promedio presupuestada de 100 kg. ha⁻¹.

Como se va a utilizar un híbrido de la empresa Dekalb, y a fines de entrenamiento de este TFG se utilizó la plataforma <https://cultivio.com.ar/> que es una herramienta que permite explorar los máximos potenciales de rinde que tiene la genética y aportan seguridad a la hora de tomar decisiones.

El primer paso es buscar y delimitar el lote en la plataforma, luego seleccionar la opción “recomendación de maíz” y elegir la fecha de siembra (27 de diciembre), tipo de año (neutral), perfil de agua del suelo (60%), tipo de suelo (en este caso un hapludol típico), rendimiento esperado (9 ton. ha⁻¹) e híbrido a utilizar.

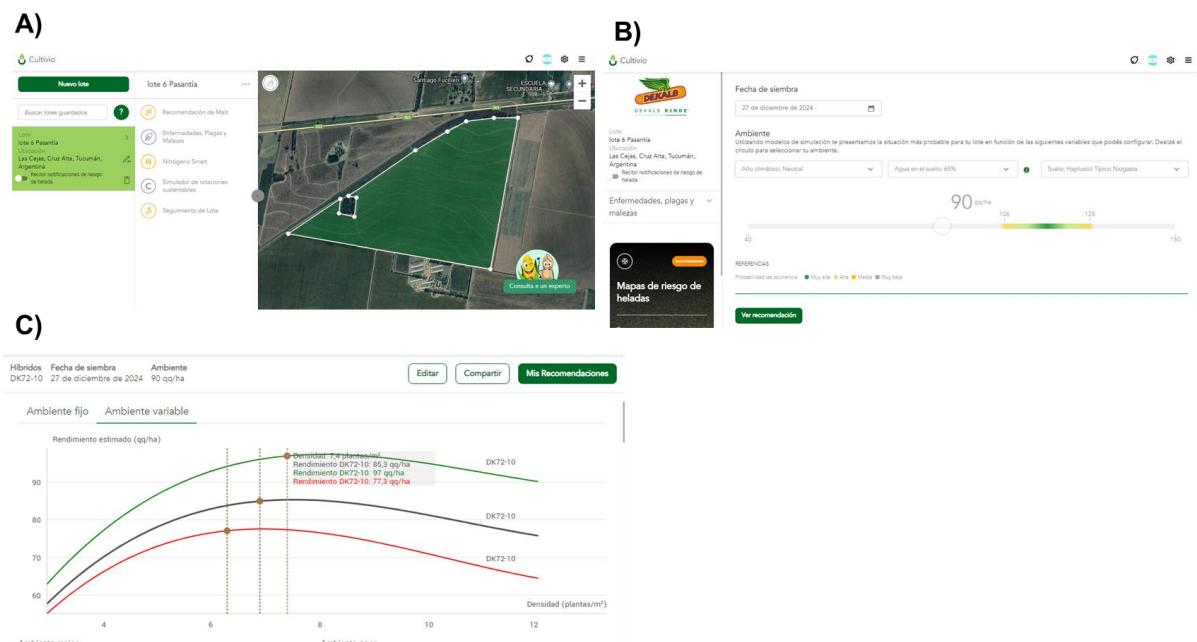


Figura 12: A) Definir la ubicación geográfica del lote. B) Seleccionar parámetros de suelo y clima y potencial esperado de rendimiento. C) Curva de densidad óptima agronómica (DOA) para cada ambiente.

Teniendo en cuenta los datos previamente cargados y usando datos de rendimientos obtenidos por ensayos realizados en diferentes ambientes e híbridos, arroja una recomendación de densidad óptima agronómica (DOA) por hectárea para ese lote.

El resultado de Cultivio fue de 68.000 plantas/ha en ambientes de mediana productividad y a eso se le suma un 15% para ambientes de alta productividad quedando 74.000 plantas/ha y restando un 15% en ambientes de baja productividad dando 63.000 plantas/ha en estos. El criterio de 15% es muy variable y depende de la curva ecofisiología del híbrido a la respuesta de la densidad. En este caso puntual se toma como referencia ese porcentaje ya que estudios previos confirmaron la respuesta agronómica ($p<0.005$). Una vez definida la cantidad de plantas por hectárea se debe conocer el poder germinativo del material que vamos a utilizar y agregarle la cantidad de semillas demás para lograr esa densidad deseada.

A partir del IRP que se generó previamente en una escala de 0 a 100, donde 0 es el límite inferior y 100 el límite superior, se crea un modelo cuadrático, según lo propuesto por Pérez y Granatelli (2023), de prescripción variable (Eq.2), que contendrá una cuadrícula de 20x20

metros, y en cada celda el valor de semilla que la sembradora deberá ejecutar mediante los cuerpos de siembra.

$$\text{Eq.2 Prescripción de semilla} = [a] * ([IA] * [IA]) + [b] * [IA] + [c]$$

$$a = (((\text{[Dosis mínima]} - \text{[Densidad máxima]}) / 2.000) + (\text{[Densidad media]} - \text{[Dosis mínima]})) / (-0.250)$$

$$b = (\text{[Densidad máxima]} - \text{[Dosis mínima]}) - (a)$$

$$C = \text{[Dosis mínima]}$$

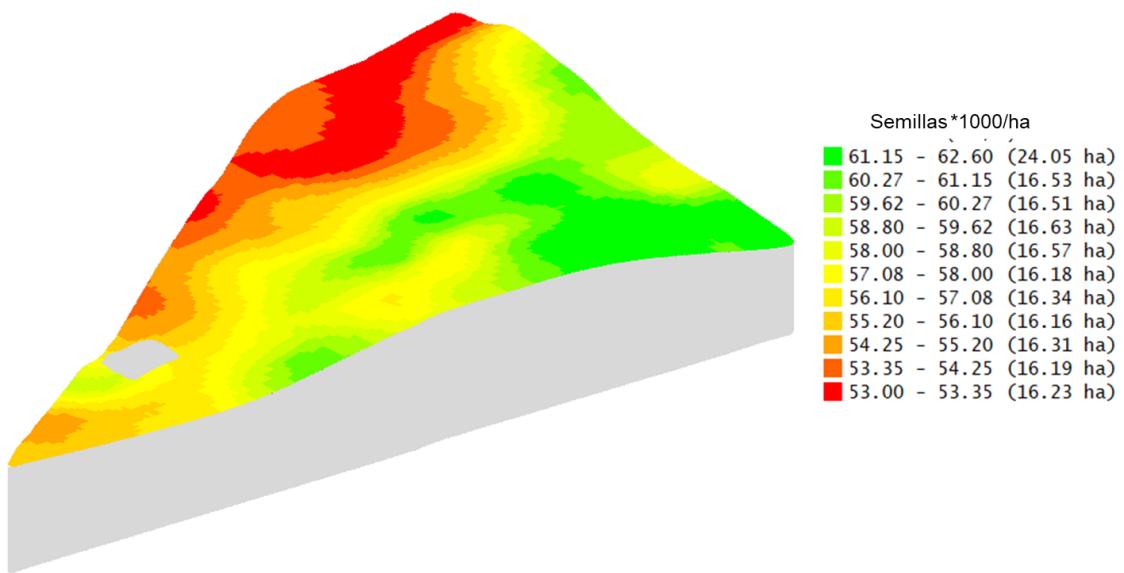


Figura 13: Prescripción de siembra variable para el cultivo de maíz.

El último paso es exportar este archivo en un formato compatible con el monitor de siembra, en este caso un Gen 3 de precision planting en formato “shape” (*.shp).

b) Prescripción de fertilización con N al voleo

Para el caso del nitrógeno (nitrodoble), se realiza una prescripción utilizando la Eq.2, si bien el cálculo de los límites inferiores y superiores de las dosis fue más complejo, en este trabajo no se pretende comentar los cálculos anexos, ya que requiero muestreo de nitratos, eficiencia de uso de nitrógeno del híbrido y condiciones de humedad de suelo.

La lógica de la fertilización sigue al aumento o disminución de la semilla, es decir si aumentamos densidad de siembra se aumenta la dosis de fertilización con N, esto se debe al concepto de fertilización de potenciación, muy utilizado para el nitrógeno.

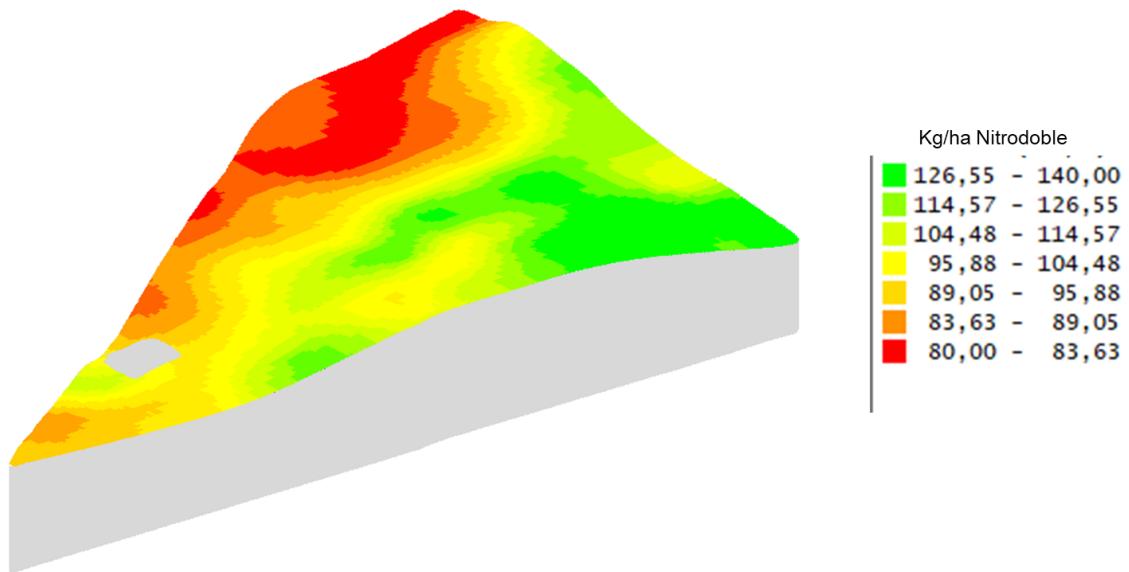


Figura 14: Prescripción de fertilización variable para el cultivo de maíz.

El mapa de prescripción de fertilización también se exporta de la misma forma que el de prescripción de siembra y eligiendo el formato (sea Shape u otro) en base a la compatibilidad del mismo con el tipo de monitor que tenga la fertilizadora a utilizar. Para este caso se exportó en shp, para un monitor topper de la fertilizadora Stara Hércules 6.0.

5) Máquinas de siembra y fertilización

Una vez completado todo el proceso computacional y estadístico, es fundamental llevar a cabo la implementación de las prescripciones en el lote utilizando las máquinas de siembra y fertilización. La efectividad de esta implementación depende de diversos factores que pueden conducir al éxito o al fracaso.

Estos factores incluyen la integración de componentes mecánicos y electrónicos en la maquinaria, así como el conocimiento y habilidades operativas del personal encargado. Es esencial que el equipo de trabajo esté bien capacitado para manejar las tecnologías y procedimientos necesarios para aplicar las prescripciones de manera precisa y eficiente. De esta manera, se asegura que las recomendaciones de siembra y fertilización se realicen

correctamente, optimizando los recursos y maximizando los beneficios agronómicos y ambientales.

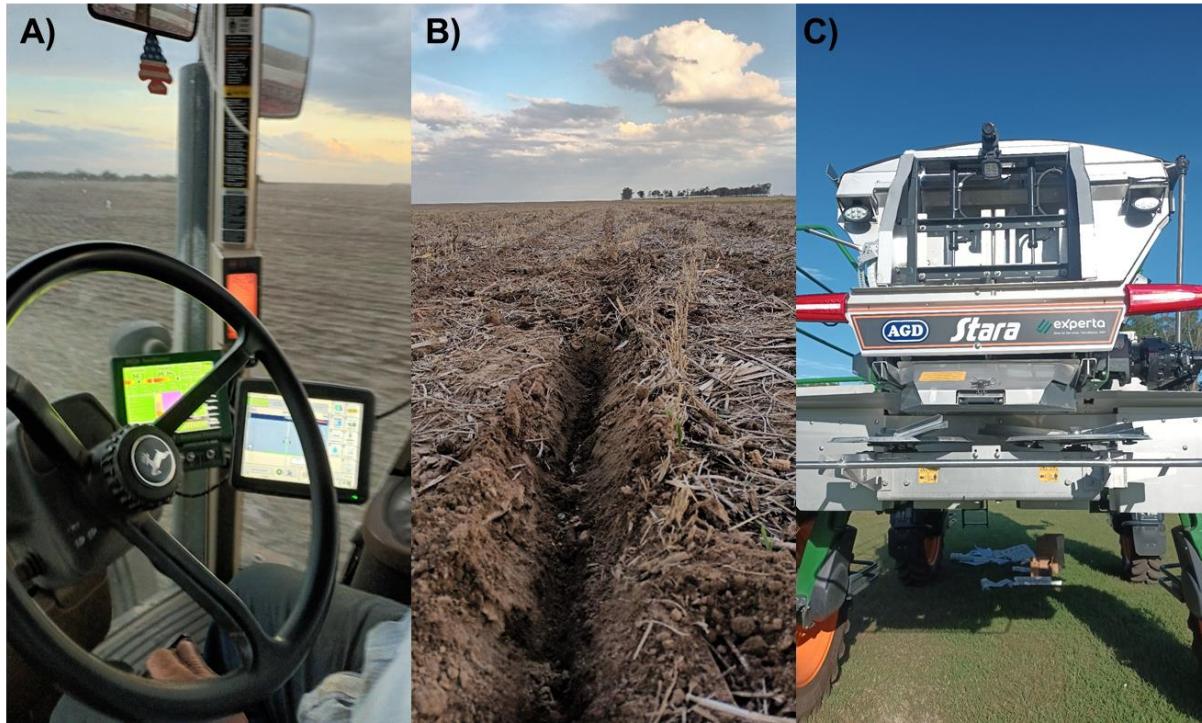


Figura 15: Fotos de los equipos. A) Sembradora Crucianelli con Precision Planting. B) Evaluación de semillas por metro lineal. C) Máquina fertilizadora calibrando para la correcta distribución del producto.

5) Análisis productivo y económico

A los fines de este trabajo y por el tiempo de crecimiento del cultivo no se realizará un análisis de rendimiento por ambientes o margen neto. Pero en el proceso de prescripción de siembra del cultivo se dejaron ensayos en diferentes ambientes de productividad para evaluar la respuesta al rendimiento de las combinaciones de nitrógeno y densidad ($N \times D$), el diseño estuvo a cargo del Ing. Agr. Daniel Pérez, quien comentó que utiliza un diseño de parcelas divididas para luego analizar los datos mediante un modelo de regresión espacial que contempla una estructura anidada de datos.

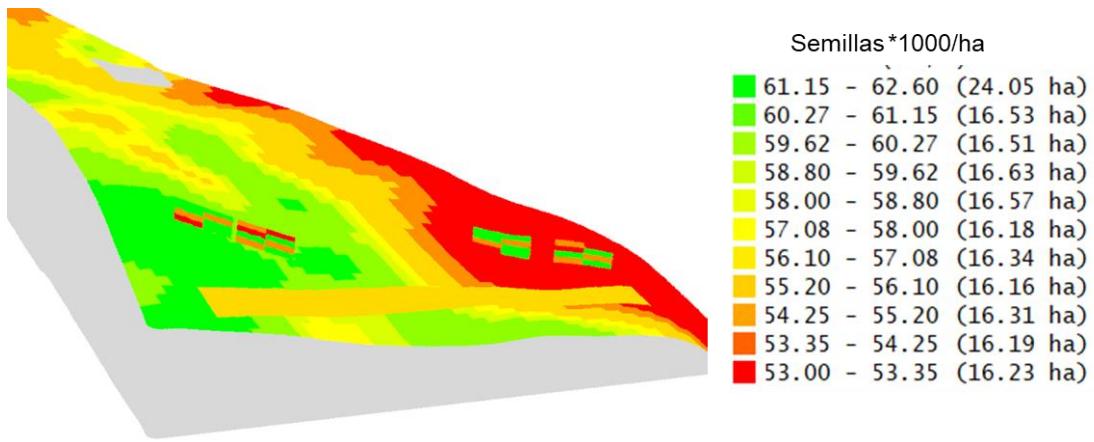


Figura 16: Prescripción de densidad con los ensayos de NxN, diseño de parcelas divididas en 2 ambientes contrastantes de productividad.

En la recorrida de los lotes luego de la siembra y fertilización al voleo, se pudo captar con imágenes de drones los ensayos de NxN que están en los ambientes. A medida que avanza el cultivo se observa la respuesta agronómica del cultivo a cada combinación, ejemplo: deficiencias de nitrógeno, reabsorción de N, ingreso de luz en el canopeo, etc.



Figura 17: Fotos con DRONE, en los ensayos de parcelas divididas ubicados en el lote. En diferentes ambientes de productividad. Estado fenológico del cultivo, V6.

Comentarios finales

Durante esta pasantía, he tenido la oportunidad de aplicar los conocimientos teóricos adquiridos en mi carrera a situaciones prácticas del campo agrícola. Ya que la tecnología nos aporta una cantidad enorme de información para la toma de decisiones, que siempre están validadas por el criterio agronómico que fui formando a lo largo de la carrera.

Esta experiencia me ha permitido comprender la importancia de la agricultura de precisión en la mejora de la productividad agrícola, la reducción de costos y el cuidado del medio ambiente. He sido testigo de cómo la aplicación de tecnologías innovadoras puede contribuir a la toma de decisiones más informadas.

Además de ser una experiencia muy enriquecedora en lo personal y profesional, tuve la grata posibilidad de trabajar con profesionales en el tema y pude aprender una infinidad de cosas que aún no están disponibles en cursos, libros o publicaciones, ya que al ser una rama tan nueva en la agronomía y caracterizada por su modificación y mejora continua se va haciendo camino al andar. siendo la mejor forma de aprender es trabajando con personas que están a la vanguardia de la información.

Estoy agradecido por haber tenido la oportunidad de colaborar con un equipo multidisciplinario de profesionales en el campo de la agricultura de precisión. Su experiencia y dedicación han sido una fuente constante de inspiración y aprendizaje. Esta pasantía ha reafirmado mi pasión por la agronomía y mi compromiso con la aplicación de tecnologías innovadoras para mejorar la producción agrícola

Referencias citadas y consultadas

- Aceitera General Deheza. (2024). Inicio - Agricultura Expert | Tecnología AGD. Retrieved March 14, 2024, from <https://agriculturaexperta.com/>
- Aceitera General Deheza. (2023). Manual de agricultura de precisión [Publicación interna].
- Andrade, F. (2020). Los desafíos de la agricultura global. Ediciones INTA. Retrieved February 16, 2024, from <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/9137>.
- Andrade, F.H., Otegui M.H., Cirilo, H., Uhart, S. (2023). Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. ISBN: 978-987-88-8326-7
- Andrade, F., y Satorre, E. (2021). Cambios productivos y tecnológicos de la agricultura extensiva argentina en los últimos quince años.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., Robledo, C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Duester, H. (2007). SRTM Downloader (Version 3.2.2) [Computer software]. hdus. <https://github.com/hdus/SRTM-Downloader/wiki>
- FAOSTAT. (2021). FAOSTAT. Retrieved February 16, 2024, from <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QI>
- García, E., y Flego, F. (2024) Agricultura de Precisión. <https://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>
- Mainardi Grellet, V. (2013). Regiones fitogeográficas de Argentina y de Tucumán. Retrieved from <https://dasonomia.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/regiones-fitogeograficas-del-mundo-y-argentina.pdf>
- INTA. (2024). Suelos de la República Argentina. Retrieved May 3, 2024, from <https://geo.inta.gob.ar/es#12.66/-26.87202/-64.79679>
- Pérez, D., y Granatelli, C. (2023). Proceso de ambientación espacial en agricultura de precisión. Boletín técnico N° 4. Aceitera General Deheza.
- SAGyP - INTA - Proyecto PNUD ARG/85/019. (2024). Con la participación del Instituto de Suelos y EEAs del INTA. Retrieved from <http://geointa.inta.gov.ar/web>
- SMS Farming Software. (n.d.). Ag Leader. Retrieved March 14, 2024, from <https://www.agleader.com/farm-management/sms-software/>