

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE LA GEO-NIVELACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO DE  
SOJA Y LA DINÁMICA DE AGUA Y NUTRIENTES DEL SUELO EN  
SISTEMAS REGADOS DEL ESTE**

**por**

**François Jacques ANCIAUX ESQUIROS**

**Mateo GÓMEZ BONINO**

**Andrés VERA GONZÁLEZ**

**Trabajo final de grado  
presentado como uno de los  
requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO**

**URUGUAY**

**2024**

**Página de aprobación**

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

---

Sara Magdalena RICCETTO AGUIRREZABALA

Tribunal:

---

Sara Magdalena RICCETTO AGUIRREZABALA

---

Raquel HAYASHI TSUMURA

---

Álvaro ROEL DELLAZOPPA

Fecha: 27 de diciembre de 2024

Estudiantes:

---

François Jacques ANCIAUX ESQUIROS

---

Mateo GÓMEZ BONINO

---

Andrés VERA GONZÁLEZ

## **Agradecimiento**

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de muchas personas y organizaciones, por lo que queremos agradecerles a todos ellos.

Primero, a nuestras familias y seres queridos. Gracias por apoyándonos a lo largo de todo este tiempo.

A nuestros amigos por estar presentes cuando más lo necesitábamos, por el aliento y momentos compartido que nos ayudaron a seguir adelante.

A la Facultad de Agronomía, por la formación académica y el apoyo institucional que nos brindaron durante todo este tiempo de aprendizaje.

A nuestros tutores, gracias por la guía y participación durante este proyecto, su asesoramiento y sugerencias fueron claves en todo momento.

Al personal de la empresa Galfarm S.A., por abrirnos las puertas en todo momento, su continua colaboración fue fundamental.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por el sustento económico.

Finalmente, gracias a todas las personas que, de una u otra forma, nos dieron una mano para que todo esto fuera posible. Este trabajo es el resultado de la participación de muchos.

## Tabla de Contenido

Página de aprobación .....	2
Agradecimiento.....	3
Lista de Tablas, Figuras y Ecuaciones .....	6
Resumen.....	8
Abstract .....	9
1 Introducción .....	10
1.1 Hipótesis.....	14
1.2 Objetivos Generales.....	14
1.3 Objetivos Específicos.....	14
2 Marco Teórico.....	16
2.1 Agricultura en Uruguay .....	16
2.1.1 Características de los Suelos del Este.....	18
2.1.2 Inserción del Cultivo de Soja en Suelos del Este.....	19
2.2 Geo-nivelación.....	21
2.2.1 Objetivo de la Geo-nivelación .....	21
2.2.2 ¿Como se Realiza la Geo-nivelación? .....	22
2.2.3 Generación de un Plano Altimétrico .....	24
2.2.4 Problemática de la Geo-nivelación.....	25
2.2.5 Efecto de la Geo-nivelación Sobre el Rendimiento .....	28
2.2.6 Costos de Realizar la Geo-nivelación.....	28
2.3 Cultivo de Soja ( <i>Glycine max</i> ) .....	29
2.3.1 Fenología y Factores que la Afectan .....	30
2.3.2 Componentes del Rendimiento .....	32
2.3.3 Efecto del Régimen Hídrico Sobre el Rendimiento en Soja.....	34
2.4 Métodos de Riego en el Cultivo de Soja.....	35
2.4.1 Necesidad del Riego en Base a Condiciones Climáticas.....	37
2.4.2 Dinámica del Agua en el Suelo .....	38
2.4.3 Riego Suplementario .....	40
2.4.4 Balance Hídrico.....	41
2.4.5 Gestor Inteligente de Riego (GESIR).....	42
2.4.6 Pivot Central de Riego.....	47

3	Materiales y Métodos .....	49
3.1	Características y Ubicación del Sitio Evaluado.....	49
3.2	Diseño Experimental.....	50
3.3	Manejo de la Geo-nivelación .....	51
3.4	Manejo del Cultivo .....	53
3.4.1	Material Utilizado.....	53
3.4.2	Manejo del Riego .....	53
3.5	Evaluaciones Realizadas al Cultivo .....	54
3.5.1	Recuento de Plántulas.....	54
3.5.2	Biomasa .....	54
3.5.3	Estimación Rendimiento.....	55
3.6	Evaluaciones Realizadas al Suelo.....	56
3.6.1	Descripción de Suelo .....	56
3.6.2	Propiedades Físicas del Suelo .....	56
3.6.3	Propiedades Químicas del Suelo .....	59
4	Resultados y Discusión.....	60
4.1	Caracterización del Sitio .....	60
4.1.1	Resultados de las Evaluaciones al Suelo .....	60
4.1.2	Caracterización Climática.....	62
4.1.3	Riego Aplicado.....	63
4.1.4	Balance Hídrico .....	63
4.1.5	Propiedades Físicas .....	64
4.1.6	Propiedades químicas .....	65
4.2	Resultados de las Evaluaciones al Cultivo.....	66
4.2.1	Recuento de Plántulas.....	66
4.2.2	Biomasa .....	67
4.2.3	Componentes de Rendimiento .....	68
4.2.4	Rendimiento .....	70
5	Conclusiones .....	72
6	Bibliografía .....	73
7	Anexo.....	82

## Lista de Tablas, Figuras y Ecuaciones

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
<b>Tabla 1</b> Valores de KC .....	45
<b>Tabla 2</b> Profundidad de los horizontes.....	62
<b>Tabla 3</b> Resultados promedio del análisis de suelo .....	62
<b>Tabla 4</b> Densidad aparente .....	64
<b>Tabla 5</b> Promedio de las propiedades químicas del suelo .....	66
<b>Tabla 6</b> Población promedio obtenida.....	67
<b>Tabla 7</b> Producción de materia seca promedio .....	68
<b>Tabla 8</b> Promedio de los componentes de rendimiento .....	69
<b>Tabla 9</b> Rendimiento estimado promedio .....	69
<b>Tabla 10</b> Rendimiento estimado promedio.....	70
<b>Tabla 11</b> Rendimiento promedio por tratamiento.....	71
<b>Figura</b>	<b>Página</b>
<b>Figura 1</b> Representación de la ubicación del cultivo de soja .....	17
<b>Figura 2</b> Regiones ecofisiológicas .....	18
<b>Figura 3</b> Plano altimétrico de dos chacras.....	20
<b>Figura 4</b> Labor de que realiza la Geo-nivelación .....	22
<b>Figura 5</b> Algunos implementos necesarios para la Geo-nivelación.....	23
<b>Figura 6</b> Monitor del tractor .....	24
<b>Figura 7</b> Componentes de rendimiento .....	33
<b>Figura 8</b> Contenido de agua en el suelo .....	39
<b>Figura 9</b> Contenido de agua en el suelo .....	40
<b>Figura 10</b> Coeficiente del cultivo durante su desarrollo .....	44
<b>Figura 11</b> Mapa de la chacra con grupos CONEAT.....	50

<b>Figura 12</b> Mapa de la parcela de estudio.....	51
<b>Figura 13</b> Plano de corte/relleno del proyecto de Geo-nivelación .....	52
<b>Figura 14</b> Infiltrómetro de doble anillo.....	57
<b>Figura 15</b> Piezas del calador.....	58
<b>Figura 16</b> Perfil de suelo .....	61
<b>Figura 17</b> Balance hídrico GESIR.....	64
<b>Figura 18</b> Tasa de infiltración en los bloques.....	65
<b>Figura 19</b> Mapa de rendimiento.....	70

<b>Ecuación</b>	<b>Página</b>
<b>Ecuación 1</b> Método FAO Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración de un cultivo de referencia .....	43
<b>Ecuación 2</b> Estimación de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar .....	44
<b>Ecuación 3</b> Agua disponible total .....	45
<b>Ecuación 4</b> Profundidad de raíz .....	45
<b>Ecuación 5</b> Factor de agotamiento corregido .....	45
<b>Ecuación 6</b> Agua fácilmente aprovechable .....	46
<b>Ecuación 7</b> Umbral de riego o Nivel de agotamiento permisible .....	46
<b>Ecuación 8</b> Déficit hídrico acumulado .....	46
<b>Ecuación 9</b> Balance hídrico .....	46
<b>Ecuación 10</b> Evapotranspiración del cultivo acumulada.....	47
<b>Ecuación 11</b> Evapotranspiración del cultivo ajustada al déficit hídrico acumulado .....	47
<b>Ecuación 12</b> Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) .....	58

## Resumen

Los problemas de anegamiento en el cultivo de soja afectan negativamente el correcto desarrollo de las plantas e incluso provocando la muerte de estas. Por este motivo, se emplean técnicas como la geo nivelación, con el fin de eliminar las áreas afectadas y logrando una pendiente adecuada que favorezca el correcto escurrimiento del agua. El objetivo general de este trabajo es evaluar el impacto de la geo-nivelación en situaciones de corte, relleno y neutro, analizando su efecto en las propiedades físicas y químicas del suelo, así como su influencia en el rendimiento de soja en sistemas de riego por aspersión en la región este del país. Para esto se caracterizó el ambiente de estudio mediante una descripción climática del periodo evaluado además de cuantificar la velocidad de infiltración del agua en el suelo de la chacra. Se definió un modelo estadístico con bloques a partir de la fase de la pendiente para posteriormente analizar los resultados a partir de 36 puntos de muestreo distribuidos equitativamente en los 3 bloques en las 27,24 ha de la chacra. En los mismos se realizaron evaluaciones de densidad de suelo, sobrevivencia de plántulas, biomasa del cultivo, rendimiento de grano. Además de contar con un análisis químico por punto de pH, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de bases (%SB), concentración de fósforo (P), potasio intercambiable (K int), sodio (Na), magnesio (Mg) y calcio (Ca). Todos los muestreos se tomaron en la zafra siguiente a realizar la labor de suavización. Los resultados de los análisis muestran que con un movimiento de suelo de 76,6 m<sup>3</sup>/ha y una relación de corte/relleno de 1,2, no se observaron diferencias significativas en las propiedades del suelo ni en el rendimiento del cultivo. El tratamiento de Relleno mostró variabilidad en el desarrollo de las plantas, atribuida al efecto del anegamiento, que fue parcialmente mitigado por la Geo-nivelación. En conclusión, estos resultados sugieren que un manejo adecuado de la Geo-nivelación, junto con un control óptimo de riego, puede mejorar las condiciones de producción en suelos de muy baja pendiente, favoreciendo la sostenibilidad en la producción de soja en la región.

*Palabras Clave:* Geo-nivelación, soja, anegamiento, riego, Cuenca de la Laguna Merín

### Abstract

Flooding issues in soybean cultivation negatively affect the proper development of plants and can even cause their death. For this reason, techniques such as land leveling are employed to eliminate affected areas and achieve an appropriate slope that facilitates proper water drainage. The main objective of this study is to evaluate the impact of land leveling in cut, fill, and neutral situations, analyzing its effect on the physical and chemical properties of the soil, as well as its influence on soybean yield under sprinkler irrigation systems in the eastern region of the country. To achieve this, the study environment was characterized by a climatic description of the evaluated period, along with quantifying the water infiltration rate in the soil of the field. A statistical model with blocks was defined based on the slope phase, and results were subsequently analyzed using 36 sampling points evenly distributed across the three blocks within the 27.24 hectares of the field. These evaluations included soil density, seedling survival, crop biomass, and grain yield. Additionally, a chemical analysis was conducted for each point, including pH, organic matter (OM), cation exchange capacity (CEC), base saturation (%BS), phosphorus (P) concentration, exchangeable potassium (K int), sodium (Na), magnesium (Mg), and calcium (Ca). All samples were taken during the harvest following the smoothing operation. The results of the analyses show that with a soil movement of 76.6 m<sup>3</sup>/ha and a cut/fill ratio of 1.2, no significant differences were observed in soil properties or crop yield. The fill treatment showed variability in plant development, attributed to the effect of flooding, which was partially mitigated by land leveling. In conclusion, these results suggest that proper management of land leveling, along with optimal irrigation control, can improve production conditions in soils with very low slopes, enhancing the sustainability of soybean production in the region.

*Keywords:* Geo-leveling, soybean, waterlogging, irrigation, Laguna Merín basin

## 1 Introducción

Actualmente existe una necesidad imperativa de aumentar la producción de alimentos debido a la creciente demanda de los mismos, explicado en mayor proporción debido al aumento demográfico y a la disminución de la pobreza proyectados en el futuro cercano. En el mundo, según el Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA, 2023), existen más de 8.000 millones de personas y se prevé que alcance los 9.700 millones de personas para el 2050. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2009) indica que esto, además será acompañado de un descenso en la desnutrición a causa de una disminución de la pobreza. Estas tendencias son acompañadas por un aumento en la demanda comercial de alimentos a nivel mundial. Las proyecciones muestran que la producción mundial de alimentos debe aumentar en un 70% entre el 2005 y 2050. Esto implica que la producción en los países en desarrollo, como Uruguay, deberá duplicarse. Se estima que este aumento de la producción agrícola se deba, en un 90%, a una intensificación de la producción, aumentando los rendimientos por hectárea. Para esto es necesario desarrollar técnicas y tecnologías que sean capaces de lograrlo.

Para abarcar la problemática de la intensificación agrícola en Uruguay, se consideró pertinente realizar una descripción de la importancia relativa que tiene la agricultura en nuestro país y cuáles son los principales productos agrícolas que el país produce.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023), en Uruguay en los últimos años se observó un incremento en el Producto Bruto Interno (PBI). En 2021 el PBI total fue de 59.320 millones de dólares corrientes, donde el sector agropecuario explicó el 7,1% del mismo. Es por esto que la agricultura es considerada como un pilar fundamental de la economía. Para el 2021 únicamente el sector agrícola representó el 2,2% del PBI, ubicándose por detrás de la ganadería y por delante de la forestación.

Según la Oficina de Estadística Agropecuaria (DIEA, 2023), en el país se sembraron en la zafra 2022/23 un total de 1.236.958 ha de cultivo de verano, representando el 7,6% de la superficie agropecuaria nacional; esto supone un aumento de 5,6% respecto a la superficie de la anterior zafra. En la zafra 2023 la siembra de cultivo de invierno fue de 607.246 ha, lo que representa el 3,7% de la superficie agropecuaria del país; un área 29,5% menor a la zafra anterior, explicado principalmente por los malos rendimientos de cultivos de verano obtenidos en la zafra 2022/23, debido a la falta de precipitaciones causados por el fenómeno de “La Niña”.

De acuerdo a los reportes de la DIEA (2023), la soja es el principal cultivo del Uruguay, representando en la zafra 2022/23 el 81,6% de la superficie sembrada de verano, seguido por el maíz con 15,2%, sorgo con 2,2%, y el girasol con 0,9%. Por su parte el área total cosechada de cultivos de verano para la misma zafra es de 886.374 ha, correspondiendo en un 85,9% a soja, seguido por el maíz en un 11,3%, sorgo en un 1,6% y girasol en 1,3%. La diferencia entre lo sembrado y lo cosechado para esta zafra es

explicado principalmente por el déficit hídrico ocurrido en este periodo debido a la ocurrencia del fenómeno de la Niña, que en Uruguay se caracteriza por presentar precipitaciones por debajo de las normales. El trigo es el principal cultivo de invierno para la zafra 2023, representando el 44% de la superficie sembrada, la cual disminuyó en un 11,6% respecto al año anterior. La cebada representó el 31% de la superficie sembrada, disminuyendo en un 10% respecto al año anterior. Luego se encuentra la colza y la carinata que alcanzaron en conjunto el 22% de la superficie de cultivos de invierno para esta zafra, estos cultivos presentaron una caída de en torno al 10% respecto a la intención de siembra de esa misma zafra. Por último, la avena representó el 3% de la superficie de cultivos de invierno para la zafra 2023.

En la zafra 2022/23 la soja tuvo un rendimiento promedio de 641 kg/ha sembrada según Rava (2024), siendo este el más bajo en la historia del Uruguay desde que hay registro, en contraste del rendimiento promedio de la zafra anterior el cual fue de 2.799 kg/ha. El rendimiento logrado en la zafra 2022/23 es explicado por el déficit hídrico. Se notó una marcada diferencia entre el rendimiento de la soja de primera bajo riego alcanzando un rendimiento de 1.430 kg/ha dicha campaña en comparación con los 3.818 kg/ha la campaña anterior, según DIEA (2023).

Según la Oficina de Programación y Política Agropecuaria (OPYPA, 2024) en *Estimaciones Preliminares Impacto Déficit Hídrico* fue estimada una pérdida económica en la zafra de cultivos de verano de U\$S 490 millones, y una pérdida total de U\$S 1.175 millones en conjunto para la agricultura de secano, ganadería de carne, lechería, horticultura y forestación. En contrapartida a esto, para el caso del trigo y la cebada en la zafra 2023 de cultivos de invierno, se alcanzaron los máximos rendimientos históricos para estos cultivos. Esto es debido a que las condiciones de crecimiento para el cultivo fueron adecuadas a sus necesidades.

Es así que surge la necesidad imperativa de buscar herramientas que intenten minimizar o solucionar esta dependencia que tiene el sector agropecuario de las condiciones climáticas.

El riego es una herramienta que permite suplementar las necesidades hídricas del cultivo que no son aportadas por las precipitaciones que ocurren durante el ciclo del mismo. Permite aumentar los rendimientos y estabilizarlos a lo largo de los años, mejorando la sostenibilidad del sistema productivo. En Uruguay, es usado principalmente en cultivos de verano, y es realizado por los métodos de riego por aspersión o por superficie. El riego por aspersión es practicado en cultivos extensivos como soja y maíz, aplicado principalmente por un Pivotal central de riego. Por otra parte, el riego superficial es realizado principalmente en arroz bajo el método de inundación, aunque gracias a la investigación y el desarrollo crece cada vez más su uso en otros cultivos de verano con diferentes métodos como el riego por melgas. A los efectos de esta tesis se hará referencia únicamente al riego por aspersión ya que es el más utilizado en cultivos extensivos de verano como soja y maíz.

Según Arana y Sebben (2023), existe una preocupación del sector productivo hacia el tema del riego y no únicamente por los periodos de sequía atravesados recientemente, del 2020 - 2023 por el fenómeno de La Niña, ya que previo al mismo era posible ver un incremento importante en la cantidad de empresas que empezaron a incorporar esta práctica en su sistema. La incorporación del riego sigue siendo lenta, pero una vez que las empresas lo realizan continúan expandiendo esta tecnología; esto se debe a que es una herramienta clave para aumentar la productividad, estabilidad y así la rentabilidad de estos sistemas productivos. Esta lenta incorporación se explica porque la adopción del riego presenta limitantes, siendo una de las más importantes, la necesidad de contar con una fuente de agua, ya que para poder realizar una represa de riego debe contar con la cuenca y topografía adecuadas. Es así que la posibilidad de regar es más factible en aquellas empresas que cuenten con estas características, limitando más a los pequeños productores.

Una de las soluciones a esto es la posibilidad de realizar represas multiprediales. Alineado con esto la OPYPA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, [MGAP] 2014), establece que es de interés general el uso de riego con destino agrícola, y estableció una serie de medidas para el desarrollo integral del riego entre las cuales se encontraba la promoción de riego predial y multipredial. En este sentido se buscó mejorar la capacidad del sector público realizando estudios para la identificación de proyectos a diferentes escalas, presentando dichos proyectos de inversión con el apoyo del estado. El Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (SNRCC, 2021), los modelos de gestión de embalses o represas multiprediales buscan facilitar la adopción del riego permitiendo el uso del recurso hídrico por parte de varios productores buscando disminuir la vulnerabilidad de los mismos al cambio climático.

La agricultura de secano según Rodríguez (2011), está focalizada en zonas del litoral oeste del país donde se dan las mejores condiciones ambientales para realizar esta actividad, como lo son suelos profundos, con alta fertilidad, y textura media; sin embargo, esta actividad también se realiza en el resto del país, pero con menor intensidad. Con el fuerte crecimiento del área sembrada de soja a principios de siglo, pasó a ser el principal cultivo de las rotaciones, y comenzó a realizarse más agricultura en zonas donde ya se realizaba, además de introducirse en lugares donde tradicionalmente no se practicaba agricultura secano, desplazando a otros rubros tales como la ganadería y/o a otros cultivos como el arroz.

La región del este del Uruguay, al igual que en parte del sur de Brasil, presenta como características intrínsecas suelos pesados, bajos y sin pendiente propensos al anegamiento, características favorables para la producción de arroz, pero limitantes para la producción de soja, la cual se beneficia de suelos de texturas más livianas, fértiles y bien drenados en la búsqueda de alcanzar su máximo potencial productivo, como plantea Parfitt et al. (2017). Sin embargo, existe un creciente interés en la producción de soja en esta región dado que se cuenta con estructuras del sistema de riego para el cultivo de arroz (fuentes de agua y canales), los cuales pueden ser fácilmente adaptados y aprovechados

para la producción de soja bajo riego. Además, de acuerdo a Parfitt et al. (2017), las rotaciones de soja y arroz generan un aumento en el rendimiento en comparación con los sistemas de producción de realizar monocultivos.

Estos suelos, según Dell’Onte (2021), presentan limitantes para la instalación de rotaciones agrícola ganaderas que comprenden una fase agrícola de producción de soja y arroz, seguidos de una fase de producción de pasturas; esto se debe a que estos suelos presentan un microrelieve formado por los puntos altos y los drenajes, que generan los denominados “pozos” y “coronas”. Los pozos, son depresiones en el suelo que no permiten que el agua escurra provocando anegamiento y muerte de plantas en el cultivo de soja y de la pastura, cuando se hace la rotación; por el contrario, las coronas, son elevaciones en el suelo que dificultan el riego en el arroz ya que este es realizado por inundación y no se logra que en esas zonas se logren la lámina de inundación requerida por el cultivo de arroz. Esta problemática impacta directamente en la productividad del cultivo, tanto de la fase agrícola como la pastoril, es por esto que es necesario buscar una solución para dicho problema y así eliminar limitantes con el objetivo de aumentar la productividad alcanzable de estos sistemas.

En la búsqueda de soluciones, mediante investigación y desarrollo de técnicas es que surgen planteamientos como el drenaje superficial y/o subsuperficial conduciendo el agua de escurrimiento fuera de la chacra; riego controlado disminuyendo la lámina de agua aplicada; zonificación del terreno identificando los lugares que presentan problemas y realizando un manejo diferencial; construcción de camellones para proteger al cultivo del anegamiento. Todas estas son soluciones parciales al problema debido a que no atienden a las necesidades del sistema, sino que solucionan un problema puntual en la rotación, que ocurre con mayor frecuencia en la soja. También se plantea la nivelación del terreno con el objetivo de homogeneizar las condiciones superficiales, evitando que se generen zonas donde eventualmente pueden generar condiciones de anegamiento. Esta medida representaría, por el momento, una solución más integral.

La presente tesis aborda la temática de la nivelación del terreno en suelos del Este del país para la realización de sistemas agrícolas ganaderos, con el fin de intensificar el uso de suelo en forma sostenible. Dentro de las técnicas existentes de nivelación se evaluará el efecto de la Geo-nivelación, o suavización, como una solución potencial para contrarrestar los problemas de anegamiento en sistemas del este.

La Geo-nivelación, entendida como el proceso de corte y relleno del suelo en chacras georreferenciadas, se presenta como una alternativa que puede influir en la dinámica del agua en el suelo, afectando positivamente en la productividad de los cultivos. Este proceso de nivelación se considera como una estrategia para mejorar las condiciones de drenaje del suelo y, por ende, mitigar los efectos adversos del anegamiento en el cultivo de soja, como mencionan Parfitt et al. (2017), Bueno, Roel et al. (2020), Bueno, de Campo et al. (2020), y Bueno (2022).

Este trabajo final de grado se llevó a cabo en una chacra ubicada en el departamento de Rocha, donde se sembró soja en un sistema bajo riego por Pivot central, donde previamente se había realizado Geo-nivelación del terreno. Este estudio busca contribuir al entendimiento de la Geo-nivelación como una estrategia para eliminar las limitantes de drenaje superficial de los suelos de la región, y ofrecerá información sobre los posibles cambios en la dinámica del agua y nutrientes en estos suelos luego del corte y relleno, además de un análisis descriptivo del desarrollo del cultivo. Es así que se busca que los resultados obtenidos tengan una mejora en el manejo del suelo y del agua, lo cual determina una mejora en la conservación de estos recursos naturales, pudiendo promover la sostenibilidad de la agricultura para esta región, brindando información valiosa para los agricultores y profesionales.

### **1.1 Hipótesis**

La Geo-nivelación es una técnica que se propone para dar una solución sistémica al problema del microrelieve existente en las llanuras del este del Uruguay. Si bien existen investigaciones recientes realizadas a nivel internacional sobre esta técnica en suelos similares, existiendo además información en la Cuenca de la Laguna Merín, tanto en Brasil como en Uruguay, este trabajo final de grado busca evaluar situaciones de corte y relleno mucho menores a las demás evaluaciones. La comparación se da entre los tratamientos de corte, relleno y neutro; a diferencia de todas las demás evaluaciones donde siempre fue realizada una comparación con un testigo control, en el cual no fue realizada Geo-nivelación. Las hipótesis propuestas para este trabajo de investigación son:

- a. Con estas profundidades de corte y relleno, la Geo-nivelación no genera un impacto significativo en las propiedades físicas y químicas del suelo entre los tratamientos.
- b. En estas mismas condiciones, la Geo-nivelación no provoca diferencia en la producción de biomasa y rendimiento en grano entre los diferentes tratamientos.

### **1.2 Objetivos Generales**

El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la Geo-nivelación en las situaciones de corte, relleno y neutro, analizando su efecto en las propiedades físicas y químicas del suelo, además de su efecto sobre el rendimiento de soja en sistemas bajo riego por aspersión en el este del país.

### **1.3 Objetivos Específicos**

- a. Evaluar el efecto de la Geo-nivelación sobre las propiedades físicas del suelo en la chacra de estudio tales como la densidad aparente e infiltración.
- b. Evaluar el efecto de la Geo-nivelación sobre la variabilidad espacial de componentes químicos del suelo tales como el pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), potasio (K), fósforo (P) y materia orgánica (MO).

- c. Evaluar el efecto de la Geo-nivelación sobre la sobrevivencia de las plantas de soja, producción biomasa y el rendimiento de grano en áreas de estudio, en la zafra siguiente a realizar la labor de suavización.

## 2 Marco Teórico

En este capítulo se abordaron diversos aspectos claves relacionados con la agricultura y el manejo de suelos del Uruguay enfatizado en los suelos del Este. En base a una revisión detallada sobre la agricultura en esta región, se exploraron conceptos fundamentales como la Geo-nivelación, la cual busca solucionar problemas específicos de la región; el cultivo de soja (*Glycine max*) y cómo éste se ve afectado por las condiciones productivas de la región; y el riego.

Es en base a estos conceptos, que se fundamentan los requerimientos del cultivo de soja y la necesidad de desarrollar técnicas para solucionar las limitantes productivas en los sistemas del este del Uruguay, los efectos de la Geo-nivelación y del riego en los mismos.

### 2.1 Agricultura en Uruguay

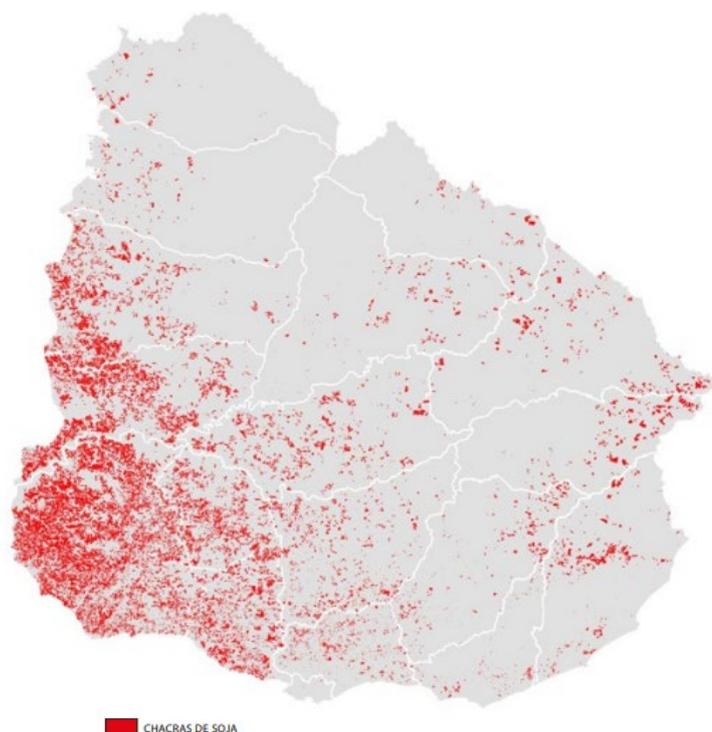
Según Uruguay XXI (2024), nuestro país está dotado de recursos naturales y factores productivos que le brindan ventajas competitivas en la producción de alimentos. Más del 90% de su superficie es apta para realizar actividades agropecuarias, además de ser un proveedor mundial confiable de alimentos y demás productos agrícolas. Dejando de lado el cultivo de arroz el cual en su totalidad se realiza bajo riego, la mayor parte de la superficie de los demás cultivos en el país es realizado en seco, lo que significa que está expuesto a circunstancias adversas derivadas de la variabilidad climática, haciendo posible que fluctúe significativamente los rendimientos y con estos los ingresos del sector.

El cultivo de soja es el principal cultivo a nivel nacional según la Rava (2024), para la zafra 2022/23 el rendimiento fue de 641 kg/ha al promediar toda la superficie sembrada, ya que no toda fue cosechada; siendo este el más bajo en la historia del Uruguay desde que hay registro, esto se debe en gran parte al déficit hídrico ocurrido en este periodo ya que fueron sembradas 512.888 ha de soja de primera sin riego de las cuales se perdieron más de 84 mil ha, obteniendo así un rendimiento promedio de 819 kg/ha sembrada. También se sembraron 474.257 ha de soja de segunda sin riego, de las cuales se perdieron más de 163 mil ha, obteniendo un rendimiento promedio de 422 kg/ha sembrada. Del total de la superficie de soja sembrada de primera, se regaron solamente el 3,2% y de la soja de segunda el 1,3% y se obtuvieron rendimientos de 1.430 kg/ha y 596 kg/ha respectivamente. La zafra anterior, donde el efecto año tuvo un impacto menos negativo en los cultivos de verano en general, el rendimiento promedio fue de 2.799 kg/ha sembrada, y obteniendo la soja de primera bajo riego un rendimiento promedio de 3.818 kg/ha. Este cultivo presentó para la zafra 2022/23 una producción total de 647.830 toneladas, la cual representa solamente el 23% de la producción del año anterior, en el cual la superficie sembrada fue menor. El rendimiento logrado en la zafra 2022/23 es explicado por el déficit hídrico el cual provocó escaso crecimiento vegetativo, afectando la formación de vainas. Se notó una marcada diferencia entre el rendimiento de la soja de primera con y sin riego.

URUPOV Semilla Legal (2021), quienes realizaron una teledetección satelital del área sembrada bajo cultivo de soja para la zafra 2021/22, pudieron detectar que la misma fue de 1.317.437 ha, mientras que al comparar con el área efectivamente sembrada vieron que esta era un 11,6% menor. Estos datos afirman que más del 50% del área destinada al cultivo de soja se encuentra agrupada en tres departamentos (Soriano, Colonia y Río Negro), esto puede asociarse a las buenas condiciones de crecimiento para cultivos que tienen los suelos de esta región (ver Figura 1).

### Figura 1

*Representación de la ubicación del cultivo de soja*



*Nota.* Estimación en base a imágenes satelitales de la ubicación del cultivo de soja para la zafra 2020/21. Extraído de URUPOV Semilla Legal (2021).

Uruguay es caracterizado por presentar un clima muy variable donde ocurren periodos de déficit hídrico a veces muy importantes en los meses de verano, ocasionando una gran variación en los rendimientos de los cultivos, según Sawchik y Formoso (2001); por su parte Hayashi Tsumura (2022) afirma que existe variabilidad en el rendimiento de cultivos asociado a las condiciones de disponibilidad hídrica en el suelo.

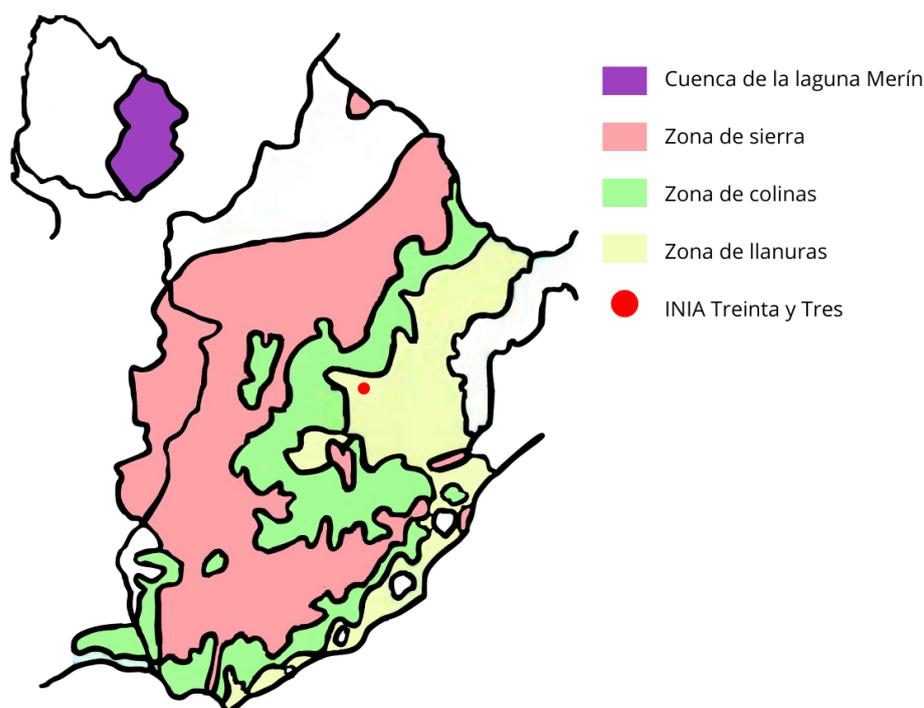
Es por estas variables que mientras en una zafra se logran los peores rendimientos históricos para los cultivos, en la zafra siguiente pueden superarse los máximos históricamente registrados. Esto es debido a la repercusión directa que tiene el efecto año en los cultivos, siendo los rendimientos muy dependientes del mismo. Es así que surgen propuestas técnicas desarrolladas para mitigar el efecto de estas variables, y así reducir las limitantes de los cultivos.

### 2.1.1 Características de los Suelos del Este

En Uruguay los suelos en los cuales puede realizarse Geo-nivelación se agrupan principalmente en la zona este, dentro de la cuenca de la laguna Merín, la cual Saravia (2005) diferencia en tres regiones que son ecológicamente diferentes (ver Figura 2), estas se ubican en forma de escalones descendentes hacia la laguna Merín pudiendo agruparse de acuerdo a características topográficas, de suelo y pasturas. La zona alta o de sierra presenta pendientes de 5 a 30% y suelos principalmente superficiales por lo que se trata de una zona netamente ganadera. La zona de colinas y lomadas presenta pendientes suaves a moderadas con suelos relativamente profundos, pudiendo realizarse sistemas agrícolas ganaderos. La zona baja o de llanuras presenta una topografía plana y suelos profundos, donde los principales rubros son la ganadería y el arroz. La denominada cuenca de la laguna Merín en Uruguay cuenta con alrededor de 4 millones de hectáreas de las cuales 2 millones son aptas para agricultura, aunque presentan limitantes. Para Thomas y Lange (2014), en esta región sobre todo en la zona de llanuras pueden verse planosoles y gleysoles, caracterizados por ser suelos hidromórficos de mal drenaje natural, como consecuencia del relieve predominantemente plano en posiciones bajas del paisaje, asociado a un perfil cuya capa superficial es poco profunda y la subsuperficial es prácticamente impermeable. La Geo-nivelación se plantea como una solución capaz de mejorar el mal drenaje superficial de estos suelos aumentando la productividad total del sistema.

**Figura 2**

*Regiones ecofisiológicas*

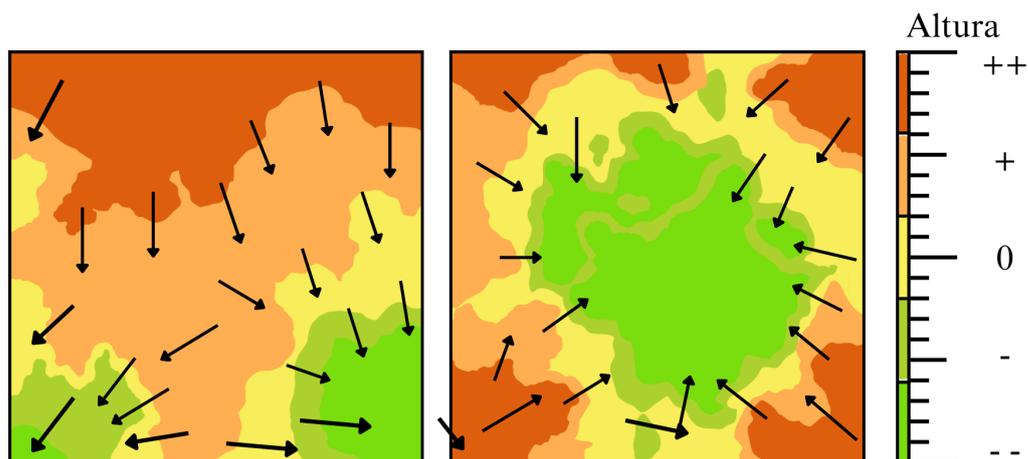


*Nota.* Representación de la ubicación dentro de la cuenca de la Laguna Merín. Modificado de Saravia (2005).

### ***2.1.2 Inserción del Cultivo de Soja en Suelos del Este***

Según Concenço et al. (2020), uno de los principales incentivos de la expansión del cultivo de soja a los sistemas arroceros es su elevado precio y la búsqueda de maximizar el uso del suelo. En esta búsqueda, distintos autores como Terra (2013), Parfitt et al. (2014) y Dell’Onte (2021), mencionan que no es viable el planteamiento de realizar una rotación de cultivos y pasturas hasta corregir los problemas de anegamiento de estos suelos. Estos problemas son característicos de las llanuras y planicies pertenecientes a la cuenca de la Laguna Merín, según Achkar et al. (2012). Estos suelos se caracterizan por presentar fertilidad natural media a baja, siendo una constante la lenta permeabilidad y el drenaje superficial imperfecto, limitantes para el desarrollo de los cultivos. También son característicos de la región los suelos alcalinos, de fertilidad natural muy baja, de permeabilidad muy lenta y drenaje muy pobre.

Es así que Concenço et al. (2020) proponen que los problemas que presentan estos suelos son derivados del anegamiento a causa del mal drenaje superficial y pobre infiltración que los caracteriza, y que una de las formas de mejorar las condiciones productivas es mediante la preparación de los suelos previo a la siembra con el objetivo de mejorar las condiciones para que el cultivo pueda desarrollarse correctamente y producir sin restricciones. Una de las prácticas propuestas que pueden utilizarse en este tipo de sistemas es la Geo-nivelación o sistematización con pendiente variada, buscando que cada punto de la chacra tenga definida una zona de escurrimiento previamente determinada para que en condiciones de lluvias más intensas el agua no quede estancada (Figura 3). La misma busca representar dos chacras hipotéticas de la región, y mostrar mediante las flechas cuál sería el comportamiento del agua en base a la topografía. Lo que se busca con la Geo-nivelación es que la chacra tenga planificados sitios de drenaje como en la Figura 3, evitando que el agua pueda quedar estancada dentro de la chacra para evitar el anegamiento.

**Figura 3***Plano altimétrico de dos chacras*

*Nota.* Vista aérea de dos chacras hipotéticas. Las flechas indican el movimiento del agua en función del drenaje. La chacra de la izquierda (A) cuenta con drenaje, mientras que la de la derecha (B) no cuenta con drenaje, ocasionando anegamiento en situaciones de precipitaciones o riego. A la derecha de la imagen se presenta una escala.

Concenço et al. (2020) consideran importante a tener en cuenta es la densidad de plantas, ya que se debe permitir una adecuada captación de radiación solar. En siembras a baja densidad hay una subutilización de la radiación provocando pérdida de productividad y aumento del enmalezamiento. Al haber una densidad de plantas demasiado alta hay pérdida de productividad por aumento de competencia intraespecífica y aumenta la incidencia de enfermedades fúngicas acompañado de una disminución de la eficiencia de control. Al establecerse la soja en un sistema previamente ajustado para el desarrollo del cultivo en cuanto al drenaje y la preparación del suelo buscando evitar que el cultivo presente pérdidas por anegamiento, acompañado de una densidad de plantas adecuada, el rendimiento potencial del cultivo es alto.

Aún así, la expresión de este potencial depende de la adecuación de los niveles de fertilización; y como fue mencionado anteriormente por Achkar et al. (2012) y por Saravia (2005) la fertilidad de estos sistemas naturalmente es baja. Concenço et al. (2020) afirman que estos niveles de fertilidad se deben a causa del proceso de reducción que ocurre en suelos bajo condiciones permanentes o semipermanentes de anegamiento. Además, esta región se caracteriza por presentar una rotación que tiene como cultivo principal el arroz, el cual es un cultivo donde los aportes de nutrientes son relativamente bajos. En conjunto estos dos factores determinan que el contenido de fósforo (P) y potasio (K), entre otros nutrientes, no se encuentren en concentraciones elevadas. Estos mismos autores proponen como una posible solución el encalado de suelos. Este proceso busca corregir el pH del suelo y eliminar el problema ocasionado por la reducción, además eliminando el aluminio (Al) y el hierro (Fe) los cuales tienen un efecto tóxico en las plantas; a su vez se da un agregado de calcio (Ca) y magnesio (Mg) los cuales quedan

disponibles para las plantas. Esta solución es una solución parcial al problema de la fertilidad, una vez aplicada debe seguirse de cerca el contenido de P y K.

## **2.2 Geo-nivelación**

Aquino et al. (2015) definen la Geo-nivelación como una práctica agrícola para corregir las irregularidades de la superficie del terreno, lo que hace que el área sea más eficiente para la gestión de insumos agronómicos. Esta técnica es aDaptada principalmente en zonas bajas utilizadas para el riego por inundación del arroz. Como resultado las capas de suelo subsuperficiales pueden quedar expuestas generando un posible impacto en la producción de los cultivos por cambios en las propiedades del suelo.

Bueno, Roel et al. (2020) afirman que antes de la introducción de cultivos de secano en los agroecosistemas del este de Uruguay es recomendable realizar una corrección del microrelieve y del drenaje superficial. Es por esto que la Geo-nivelación o suavización con pendiente variable surge como una solución ideal para lograr mejoras en estos sistemas.

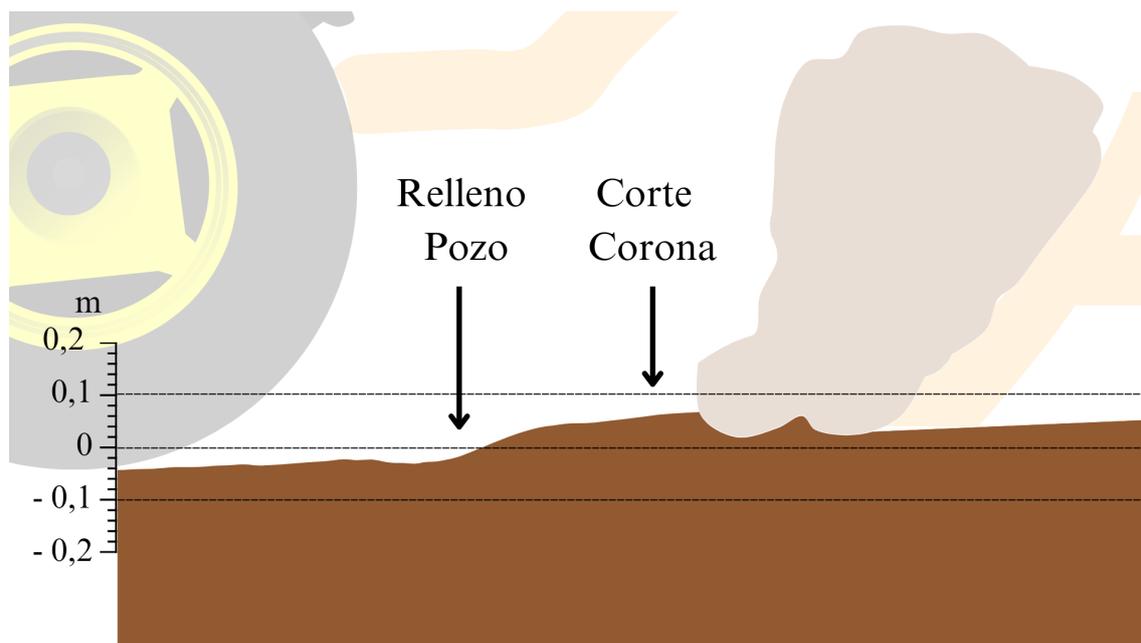
Para el cultivo de soja, se observó un aumento de en torno al 20% en el rendimiento en el área nivelada. Se vio que las zonas donde se encontraba el menor rendimiento eran aquellas donde se encontraban los pozos, como mencionó Bueno et al. (2023). Los rendimientos obtenidos en campos de arroz luego del suavizado son similares, no habiendo diferencias entre las zonas niveladas en comparación con las no niveladas, pero si existió una disminución al comparar el coeficiente de variación del riego, pudiendo afirmar que el riego en la zona nivelada es más rápido, uniforme y fácilmente sistematizable.

### **2.2.1 *Objetivo de la Geo-nivelación***

Esta práctica de nivelación, según Parfitt et al. (2014), debe ser realizada de una forma muy precisa, dando como resultado una superficie del terreno con pendiente estandarizada y mejorando las condiciones para el riego al igual que para otras prácticas de manejo agrícolas. El objetivo de este proceso es aumentar la eficiencia en el uso del agua al mejorar el drenaje, facilitar el riego en cultivos inundados como el arroz; y evitar el anegamiento de cultivos que no lo toleran como la soja, el maíz y algunas pasturas. Lo que se busca con esta práctica es poder realizar rotaciones de cultivos y pasturas en donde el mal drenaje no sea una limitante para la producción, al mismo tiempo se pueden aprovechar las condiciones topográficas para realizar riego y así aumentar el rendimiento global del sistema. Esto se logra debido a que se cortan las coronas y rellenan los pozos del terreno (Figura 4), permitiendo que el agua de riego llegue a todos los puntos de la chacra en forma uniforme y los excesos hídricos causados por las precipitaciones excesivas salgan sin quedar estancados.

**Figura 4**

*Labor que realiza la Geo-nivelación*



*Nota.* En un primer plano se presenta un corte horizontal donde puede verse el microrelieve del terreno. En un segundo plano se muestra un tractor y el palón realizando la Geo-nivelación.

### **2.2.2 ¿Como se Realiza la Geo-nivelación?**

Para realizar la Geo-nivelación es imprescindible contar con un tractor y una pala niveladora (ver Figura 5), además de los instrumentos necesarios para este trabajo, consisten en un monitor con banderillero satelital que esté integrado al sistema hidráulico del tractor y softwares necesarios para el control de la pala, para el procesamiento de un plano altimétrico del terreno y para el diseño del proyecto.

**Figura 5**

*Algunos implementos necesarios para la Geo-nivelación*



*Nota.* En un primer plano trípode que sostiene base y radio para realizar la Geo-nivelación. En segundo plano tractor con palón.

La Geo-nivelación es realizada de forma automática debido a que el proyecto diseñado es cargado al monitor del tractor (ver Figura 6) y este se encarga de controlar la pala, de esta forma se puede sistematizar el trabajo y se disminuyen las tareas realizadas por el operador del tractor facilitando su labor y disminuyendo el error humano. Su labor se reduce a conducir el tractor desde un sitio donde el monitor le indique que debe realizarse corte hacia un sitio donde debe realizarse relleno.

**Figura 6**  
*Monitor del tractor*



*Nota.* En tonos rosados sitios de corte, verde sitios neutros, azul sitios de relleno, amarillo recorrido ya realizado por el tractor.

Por su parte, el monitor de manera automática mediante el control hidráulico del tractor maneja la pala, la eleva o entierra en base a las necesidades del proyecto que se cargó. Es así que mientras el operario del tractor se encarga de dirigirse desde un sitio donde se cortan las coronas a uno donde se rellenan los pozos siguiendo las indicaciones del monitor, la pala se encarga de forma automática de realizar todos los movimientos pertinentes para el trabajo (ver Anexo A). Según Bueno et al. (2023), el trabajo de nivelación de preferencia debe realizarse el verano anterior al cultivo, para trabajar con mejores condiciones de humedad en el suelo y tener tiempo para los ajustes necesarios.

Es primordial que se tenga tanto una georreferenciación en sentido horizontal de la chacra como una en sentido vertical para disponer de un plano altimétrico detallado del terreno (ver Figura 3). Una vez generado este plano existen softwares que generan alternativas de alteración topográfica en los cuales se define el movimiento de suelo máximo que se desea realizar, y este se encarga de diseñar un proyecto en el cual ubica aquellas zonas de corte y de relleno.

### **2.2.3 Generación de un Plano Altimétrico**

El trabajo de georreferenciación para la generación de un plano altimétrico fue realizado con la tecnología conocida como Global Navigation Satellite Systems - Real Time Kinetic (GNSS - RTK), según Rímoli Kunz y Secco Basile (2017), esta tecnología utiliza el posicionamiento satelital y un conjunto de estaciones de referencia continua

conectadas en serie lo que permite obtener posiciones con alta precisión proporcionando coordenadas con errores de pocos centímetros. Esta técnica es realizada mediante la conexión en serie de numerosos satélites con dos receptores conectados, el Rover el cual es el móvil y es llevado a los puntos que se quiere georreferenciar, y el Base la cual permanece estático en un punto de la chacra con coordenadas conocidas (ver Figura 5). Esta técnica de georreferenciación es la que permite que se realice la Geo-nivelación con pendiente variable debido a que los planos altimétricos obtenidos presentan una precisión centimétrica muy necesaria para que puedan realizarse proyectos ajustados al terreno. Según Bueno, Roel et al. (2020), el aprovechamiento de esta nueva tecnología en conjunto con la Geo-nivelación permite mayor precisión en la nivelación con centímetros de margen de error en cada punto del terreno, disminuyendo el movimiento de tierra y así los costos, optimizando el uso del agua y reducción la erosión.

Previo al desarrollo del GNSS-RTK se realizaba nivelación mediante el uso de láser el cual se ubica en un punto estático de la chacra proyectando un plano en el espacio. El tractor debe contar con un receptor del láser, un monitor y una pala de nivelación. El operario a través del monitor es capaz de seguir el plano proyectado. El resultado es denominado como nivel cero, debido a que lo que busca es retener el agua dentro de la chacra para mejorar la producción y la eficiencia de uso del agua (EUA). Según Jat et al. (2009) se logró aumentar la productividad del sistema en un 7%, y el ahorro de agua en arroz aumentó en un 12% con este método.

El principal problema al realizar esta labor es que no se respetan los drenajes naturales, por lo tanto, el exceso hídrico no tiene previamente diseñados sitios para ser eliminado. Además, el movimiento de tierra para realizar prácticas de este estilo tales como fijar una pendiente o llevar un campo a pendiente cero implica un movimiento de tierra y trabajo mucho mayor, más horas para poder realizarlo y por lo tanto un costo mucho más elevado que la Geo-nivelación.

#### ***2.2.4 Problemática de la Geo-nivelación***

El principal problema que genera la Geo-nivelación, según Parfitt et al. (2017), es que el corte en suelos poco profundos, puede disminuir significativamente el espesor del horizonte A e incluso alcanzar el horizonte B en suelos poco profundos exponiendo el subsuelo. Esto provoca que la producción de los cultivos se vea afectada en las áreas de corte, este problema existe para cualquier tipo de suelo que se desea nivelar. Para Ramos (2017) la nivelación de suelos provoca, en algunos casos, que queden expuestos horizontes más profundos en la parte superior del perfil, los cuales se caracterizan por presentar propiedades más pobres. Debido a que esta práctica implica un movimiento superficial del suelo, varios autores pudieron probar que se genera un cambio en las propiedades físicas y químicas de este viéndose afectado su potencial productivo.

### **2.2.4.1 Efecto Sobre las Propiedades Físicas del Suelo**

Parfitt et al. (2014) quien investigó en suelos de Rio Grande del Sur, Brasil, indica que en suelos geo-nivelados con un máximo de corte y relleno de 21 y 17 cm respectivamente, bajo producción de soja y arroz, las propiedades físicas del suelo se vieron afectadas. Observó un aumento en forma significativa de la densidad aparente, el contenido de arcilla y arena, mientras que disminuyó el contenido de limo, el diámetro de los agregados y la porosidad total la cual es explicada por una disminución de los macro y microporos existiendo una predominancia de los últimos; lo que implica que disminuyó la capacidad de retener agua. También indica que la Geo-nivelación cambió la profundidad en la que se encuentra el horizonte B con respecto a la superficie del suelo. Además, comprobó que no existe una relación entre los valores de las propiedades físicas con las magnitudes de corte y relleno; y que las propiedades físicas se distribuyeron en toda el área de forma aleatoria, no exclusivamente en los sitios de corte y relleno.

Aquino et al. (2015) afirman que la Geo-nivelación trae consigo efectos negativos en la calidad de suelo debido a que constató un aumento de forma significativa en el contenido promedio de arcilla, arena y la densidad aparente, mientras que disminuyó de forma significativa el contenido de limo, los microporos y la profundidad del horizonte B respecto de la superficie. Este autor también pudo comprobar que disminuyó el volumen de agua necesario para alcanzar la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP), esto es debido a que aumenta la densidad de suelo y disminuyen los microporos, disminuyendo la capacidad del suelo de retener agua. Por su parte, Walker et al. (2003) comprobaron que la nivelación puede causar un aumento en la compactación del suelo.

Según Bueno (2022), al realizar Geo-nivelación con profundidades promedios y máximas de corte de 3 y 16 cm respectivamente, observó, por un lado, el aumento del contenido de arcilla mientras que el contenido de limo disminuyó, siendo relativamente constante el contenido de arena. Respecto a las propiedades físicas, éstas variaron en toda el área, no solamente en los sitios de corte y relleno. Este autor pudo probar que la productividad disminuyó en forma significativa en los sitios de corte mientras que aumentó en los sitios de relleno.

Parfitt et al. (2014) proponen que debe seguirse investigando para la evaluación de técnicas capaces de mejorar las propiedades físicas producto de la Geo-nivelación. Algunas de estas son la aplicación superficial o subsuperficial de residuos orgánicos, el uso de plantas con sistema radicular profundo y vigoroso, cultivos de servicio y mínima labranza. Este autor además propone que al momento de diseñar el proyecto debe superponerse el mapa de profundidad de corte con un mapa de profundidad del horizonte B para determinar la idoneidad de cada sitio de corte antes de que se lleve a cabo, para evitar cortes que puedan alcanzar el subsuelo. Por su parte Ramos (2017) pudo afirmar que al evaluar la mezcla de compost con suelos nivelados se mejoraron las propiedades físicas como la densidad aparente y la capacidad de retener agua.

#### **2.2.4.2 Efecto Sobre las Propiedades Químicas del Suelo**

Según Abreu Jr. et al. (2003), el pH tiene una correlación con gran cantidad de propiedades químicas como el fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC); según Öztekin (2013) una vez realizada la nivelación el pH varía tanto en superficie como en profundidad del perfil. Aquino et al. (2015) pudieron probar que en suelos nivelados el contenido promedio de la CIC y carbono orgánico (CO) disminuyó de forma significativa, mientras que aumentó su variabilidad.

Bueno (2022), al evaluar las propiedades químicas posterior a la Geo-nivelación con profundidades promedios y máximas de corte de 3 y 16 cm respectivamente, pudo ver que por un lado aumentó de forma significativa el contenido promedio de CO, pH, y P; mientras que por otro lado disminuyó también de forma significativa el contenido promedio de materia orgánica (MO), K y sodio (Na); no habiendo diferencias significativas entre el contenido promedio de Ca y Mg.

Por su parte Parfitt et al. (2013), al realizar Geo-nivelación con un máximo de corte y relleno de 21 y 17 cm respectivamente, observaron que aumentó de forma significativa el contenido promedio de CO y K, mientras que disminuyó también de forma significativa el contenido promedio de MO, P, Ca, Mg y CIC; sin encontrar diferencias significativas entre el pH promedio y contenido de Na. Este autor también indicó que el pH disminuyó en sitios de relleno, mientras que aumentó en sitios de corte; a pesar de esto Bueno (2022) afirma que algunos nutrientes como el P y Mg tuvieron un aumento en los sitios de relleno y una disminución en los sitios de corte. Winkler (2018) afirma que el mayor nivel de P, Mg y K en zonas de relleno se debe a la movilización de la capa superficial del suelo la cual provoca que en sitios de relleno la fertilidad sea mayor por la mineralización de la MO. Aquino et al. (2015) proponen que debe tenerse precaución al realizar nivelación ya que cortes superiores a los 10 cm en suelos poco profundos puede causar problemas como pérdida de la fertilidad y/o un cambio en la población microbiana del suelo.

Parfitt et al. (2013) pudieron ver como el contenido promedio de MO disminuyó de forma significativa posterior a la Geo-nivelación, mientras que aumentó de forma significativa la varianza. También observaron que el carbono proveniente de biomasa microbiana aumentó de forma significativa, lo que el autor atribuye a la descomposición de la MO, posiblemente debido a un aumento de la población de microorganismos en el suelo. Además, afirma que la Geo-nivelación provocó una disminución en el contenido de MO en torno al 20% en los primeros 20 cm del suelo debido al movimiento de este. Según Ramos (2017), la MO disminuye porque al mezclar los horizontes se acelera el proceso de mineralización de los compuestos orgánicos, aumentando el contenido de CO. Según Castro et al. (2015), la disminución de la MO tiene un efecto negativo en la capa superficial del suelo, a su vez Ramos y Martínez-Casanovas (2006) afirman que la pérdida de MO significa una pérdida sustancial de la fertilidad natural del suelo, provocando un efecto negativo en la producción de cultivos.

Según Bueno (2022), el contenido promedio de CO presenta un aumento significativo, aunque el valor medio no presentó grandes cambios, por su parte la varianza se vio afectada siendo menor posterior a la Geo-nivelación. El CO aumentó en sitios de relleno mientras que disminuyó en sitios de corte.

Aquino et al. (2015) también comprobaron que existe una disminución del contenido de CO al realizar nivelación en sitios de corte, y plantea que el uso de compost aumenta el contenido de MO y la fertilidad del suelo, observándose respuestas positivas en el rendimiento, aunque en los sitios más perturbados no es alcanzado el rendimiento original.

### ***2.2.5 Efecto de la Geo-nivelación Sobre el Rendimiento***

Varios investigadores observaron cambios en el rendimiento tanto en soja como en arroz en campos geo-nivelados como mencionan Walker et al. (2003), Ramos (2017), Winkler (2018), y Bueno (2022). Así mismo determinaron que hay una relación significativa entre la alteración del suelo y la variabilidad del rendimiento, en sitios de mayor corte es mayor la pérdida del potencial productivo, pero en sitios de relleno ocurre aumento de la productividad.

Para Bueno, de Campo et al. (2020), cuando la soja es regada por surcos en chacras donde se realizó Geo-nivelación se obtuvieron rendimientos mayores al testigo sin riego y nivelación. Por su parte Parfitt et al. (2014) dicen que los cultivos de soja, maíz y pasturas se ven favorecidos por la Geo-nivelación, ya que se busca evitar el estancamiento del agua y así el anegamiento, el cual ocasiona la muerte de estos cultivos. Esto es posible mediante el establecimiento de una pendiente continua, controlada y estandarizada para que toda la chacra tenga drenaje, permitiendo que sea posible llevar a cabo riego en la búsqueda de aumentar los rendimientos de todo el sistema.

Según Bueno, de Campo et al. (2020), para el caso del arroz la Geo-nivelación busca cortar las coronas que dificultan el riego y así brindar una mayor eficiencia en el uso del agua, recurso de alta escasez; una vez realizada la Geo-nivelación la chacra presenta una mejor uniformidad en la lámina de riego sin presentar un efecto importante en el rendimiento, aumentando la eficiencia del uso del agua y facilitando el riego para los trabajadores. Por otro lado, Parfitt et al. (2017) afirman que la Geo-nivelación implica un aumento en la rentabilidad del arroz que se explica por un aumento en el rendimiento y una disminución en los costos de producción. Este autor también dice que en general los terrenos nivelados conducen al aumento en el rendimiento del sistema promovido por el riego superficial, generando un uso más eficiente de recursos hídricos.

### ***2.2.6 Costos de Realizar la Geo-nivelación***

Según Bueno et al. (2023), son recomendados valores máximos de movimiento de tierra en torno a 80 - 100 m<sup>3</sup>/ha por el costo que implica realizar esta labor, y para evitar que haya un efecto negativo en las propiedades físicas y químicas que pueda

perjudicar la producción. Con estos valores también se busca que el costo de realizar la Geo-nivelación sea cubierto en la siguiente zafra. Según Lima et al. (2023) al incluir los costos del relevamiento topográfico, el diseño del proyecto y el realizar el mismo el costo de la Geo-nivelación presenta un costo entre 120 a 180 U\$S/ha.

En la zafra 2022/23, aun teniendo en cuenta el déficit hídrico ocurrido a nivel nacional, la producción obtenida fue suficiente para cubrir los costos de la inversión.

### **2.3 Cultivo de Soja (*Glycine max*)**

La soja (*Glycine max*) pertenece a la familia de las leguminosas y es una planta anual de temporada estival. Según establece Vignesh et al. (2023), la ubicación óptima para el crecimiento de este cultivo es en áreas tropicales o subtropicales. Este cultivo se caracteriza por presentar una notable cantidad en grano tanto de proteína vegetal como de contenido de aceite, lo que genera una demanda considerable de esta materia prima. A diferencia de otros alimentos el grano de soja es apreciado por su bajo costo de producción en relación con su alto contenido de proteína, siendo utilizada tanto para consumo humano como animal. Además, existe una amplia gama de productos alternativos debido a su alto contenido de aceite, incluyendo la producción de biodiésel, tapicería, velas, crayones y lubricantes. Estos productos por el origen de su materia prima son por lo tanto renovables y respetuosos con el medio ambiente. Por su parte Wani et al. (2012) afirma que, en la actualidad, en su mayoría este cultivo es utilizado en la producción de aceites (para alimentación e industriales) y como alimento. También comenta que existen variedades disponibles para usos forrajeros (con abundancia de tallos y hojas), y como verdura (de semilla grande, variedades de colores diversos). Este mismo autor comenta que la soja se cultiva principalmente bajo condiciones de secano, de fines de primavera a inicio de verano. Las siembras tardías no logran la producción de biomasa que sí pueden lograr siembras óptimas.

Como fue planteado por Guarino et al. (1976), el cultivo de soja presenta pocas limitantes, pero entre ellas plantea la acidez, compactación de suelos, el pobre drenaje de los mismos o su requerimiento de alta fertilidad.

Siguiendo la misma línea, Terra (2013) plantea que existen dos tipos de limitantes para la producción de soja en sistemas arroceros, integrado a una rotación de arroz y pasturas. Las ambientales, las cuales presentan mayor importancia tales como el pobre drenaje, reducida exploración radicular, baja capacidad de almacenamiento de agua disponible y pobre fertilidad natural, siendo todas estas características intrínsecas comunes para dichos suelos; y por otro lado también tiene en cuenta que existen limitantes estructurales y culturales tales como el régimen de tenencia y la asimetría en el conocimiento y manejo de los cultivos. Para que el cultivo de soja sea viable en estos ambientes es considerado primordial mitigar las restricciones del drenaje de estos suelos los cuales limitan el crecimiento y desarrollo del cultivo, sobrevivencia de rizobios, dinámica de los nutrientes, el efecto de la maquinaria en el suelo y el desarrollo de enfermedades.

Wani et al. (2012) proponen que, en sitios de exceso hídrico la siembra puede realizarse en camellones, o diseñar surcos para drenar el exceso de agua, buscando lograr una buena aireación de la zona radicular. Como fue mencionado anteriormente la Geonivelación se presenta como solución a la problemática del pobre drenaje del suelo.

Terra (2013) afirma que, el efecto de la modificación de la rotación por el agregado de soja en sistemas arroceros también implica una oportunidad de incorporar un nuevo rubro en la rotación, aumentando la diversificación e intensificación de la rotación, teniendo la oportunidad de realizar controles de malezas y enfermedades de forma más intensiva, disminuyendo problemas de persistencia, estabilidad y productividad en las pasturas.

Como mencionan Macedo y Terra (2014), los suelos del Este del país pertenecientes a la cuenca de la Laguna Merín tienen grandes limitantes de drenaje, siendo esto favorable para la producción arrocera, pero limitando los demás cultivos debido a su poca adaptación al exceso hídrico. Estos suelos además de tener mayor riesgo de sequía por su baja capacidad de almacenamiento de agua disponible, también tienen alto riesgo de anegamiento por sus restricciones de drenaje interno y superficial.

### ***2.3.1 Fenología y Factores que la Afectan***

La fenología es una ciencia que estudia etapas de desarrollo de las plantas en su ciclo de vida, pudiendo desarrollar así modelos de crecimiento. Es en este sentido que es creada la escala de desarrollo para el cultivo de soja por Fehr y Caviness (1977), siendo la más utilizada a nivel mundial. Esta propone una descripción morfológica del ciclo del cultivo a lo largo del tiempo, dividiendo el mismo en 2 etapas principales, una vegetativa y otra reproductiva. Los autores plantean que la fecha de siembra, variedad de cultivo, ubicación geográfica y el clima influyen tanto el desarrollo como el crecimiento vegetal.

Kantolic et al. (2004) plantean que la duración de estas etapas es regulada mediante la temperatura y el fotoperíodo simultáneamente, existiendo interacción entre estos factores. También afirman que existe variabilidad entre genotipos en cuanto a la respuesta térmica y fotoperiódica, y una forma de identificar el tipo de respuesta de cada genotipo a estas variables es mediante los grupos de madurez los cuales están compuestos por variedades de similares respuestas.

Otro aspecto que genera diferencias en el desarrollo de la planta es si se está frente a una variedad indeterminada o determinada, como proponen Fehr y Caviness (1977). Las variedades indeterminadas continúan su crecimiento post-floración, produciendo más hojas y presentan un desarrollo desigual de las vainas y semillas en la planta. Por otro lado, las variedades determinadas casi no presentan crecimiento post-floración, su desarrollo de vainas y semillas es uniforme y tienen un tallo floral con un nudo terminal.

La escala se encuentra dividida en dos etapas, lo que permite que la clasificación sea consistente independientemente del tipo de desarrollo que presente el cultivar, Fehr y Caviness (1977).

Los mismos autores definen que el estado vegetativo (V...) comienza con la emergencia (VE), seguido de que aparecen las dos hojas conocidas como cotiledones en el tallo sobre el suelo (VC). Mientras crece el tallo principal, se contabilizan los nudos del mismo cuando están completamente desarrollados como determinante del estadio de la planta. Al desarrollarse el primer nudo (V1) termina la fase juvenil. A diferencia de las demás hojas que son trifoliadas, las primeras son unifoliadas y el nudo está compuesto por dos de ellas, una a cada lado del tallo. El modelo propuesto por estos autores describe la cantidad de nudos totalmente desarrollados al momento de la evaluación como puede verse en Anexo B.

En cambio, los estados reproductivos están basados en la floración, el desarrollo de las vainas y semillas. Las etapas reproductivas (R...) reciben una descripción y abreviación al igual que las vegetativas. A su vez, también se utiliza el tallo principal para identificar la etapa en la que se encuentra la planta. Las etapas son inicio de floración (R1), floración completa (R2), estas pueden ocurrir simultáneamente o algunos días después; la floración comienza desde la base del tallo y es ascendente. Lo siguiente es la formación de las vainas con el inicio de formación de las vainas (R3), y fin de formación de vainas (R4), comenzando el desarrollo de la semilla. El inicio del desarrollo de las semillas (R5), y una vez finalizado el desarrollo de la semilla (R6). Por último, las etapas de madurez, iniciando la madurez (R7), y una vez finalizada la madurez con un 90% de madurez fisiológica de todo el cultivo (R8); todo esto es definido según Fehr y Caviness (1977) puede verse en los Anexo C.

El fotoperíodo es uno de los factores que regula la mayor parte de los eventos reproductivos del cultivo de soja a lo largo de la mayor parte de su ciclo, influyendo en el inicio y final de la floración, formación de vainas y el llenado de grano, también la tasa de crecimiento de las mismas; solamente quedando fuera la etapa juvenil, la cual termina en V1, según Kantolic et al. (2004). Se clasifica como un cultivo sensible al fotoperíodo con respuesta cuantitativa a los días cortos, debido a que a medida que los días se acortan es que hay mayor respuesta. Por su parte Toledo (s.f.), clasifican la respuesta de este cultivo como cualitativa ya que se debe superar el umbral crítico para que se induzca la floración, y cuantitativa donde el grado de respuesta es dependiendo de la sensibilidad del mismo al fotoperíodo que tenga la variedad. En base a la capacidad de respuesta es que se clasifican las variedades en los diferentes grupos de madurez, los cuales reúnen variedades con similares respuestas.

Según Toledo (s.f.), el fotoperíodo comienza su regulación cuando termina la fase juvenil o pre-inductiva, es decir, la inducción floral puede ocurrir en cualquier estadio después de V1. También afirma que la respuesta al fotoperíodo varía dependiendo de la etapa de desarrollo, y cuanto más avanzada se encuentra es mayor la sensibilidad. Toledo (s.f.) indica que los cultivares son clasificados en grupos de madurez (GM). Los cuales

cuanto más bajo el grupo, menor sensibilidad al fotoperiodo, y tienen mayor respuesta a la temperatura, por su ciclo más corto, afirmando que cuanto más bajo el GM mayor productividad. Por otro lado, cuanto más alto el GM más sensible al fotoperiodo y el efecto de la temperatura se ve atenuado a lo largo de los ciclos. En base a lo anterior es que cuanto más alto el GM afirma que presenta mayor estabilidad.

Por otro lado, Kantolic et al. (2004), plantean que la temperatura regula el desarrollo durante todo el ciclo del cultivo de soja. También define los requerimientos térmicos y las temperaturas cardinales, las cuales son las temperaturas en donde ocurre crecimiento y desarrollo a tasas óptimas, base y máxima; varían a lo largo de las fases de desarrollo. Según Farias et al. (2007), el cultivo de soja presenta una adaptación a regiones con temperatura entre 25 °C a 30 °C, regiones con temperaturas inferiores a 10°C o superiores a 40°C no son recomendables para el cultivo por un efecto negativo en la tasa de crecimiento, provocan daños en la floración y disminuye la capacidad de retención de vainas. Kantolic (2008) determinó las temperaturas cardinales para el cultivo de soja, y plantea que la temperatura base se encuentra en un rango entre los 6 a 10°C, mientras que la temperatura óptima diurna está en el rango de 30 a 35°C y la nocturna se encuentra en el rango de 21 a 27°C. Por su parte Toledo (s.f.), determinó que la formación de las vainas se ve retrasada con temperaturas menores a 22°C y es nula a temperaturas menores de 14°C. También observó que las temperaturas por encima de los 30°C aceleran el desarrollo en concordancia con estudios previamente mencionados. Este mismo autor concluyó que la temperatura óptima para el desarrollo normal vegetativo y reproductivo del cultivo de soja se encuentra en un rango entre los 25 a 30 °C. Alineado con los demás autores Wani et al. (2012), proponen que el cultivo de soja tiene un crecimiento exitoso en condiciones de temperatura media de 20 a 30 °C, y que el crecimiento se detiene a temperaturas inferiores a 2 o 3 °C, además de que cerca de 40 °C la asimilación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) se ve afectada.

En base a la clasificación climática mundial de Köppen (1884), el clima de Uruguay pertenece al grupo de regiones templadas. Este grupo se caracteriza por tener temperaturas medias en el mes más frío en torno a los -3°C a 18°C; mientras que el mes más cálido se caracteriza por presentar temperaturas superiores a los 10°C. Puntualmente Uruguay este mismo autor lo definió como perteneciente al grupo subtropical húmedo, debido a que además de lo anterior se caracteriza por no ser posible definir una estación seca, siendo los veranos calurosos superando los 22°C de media en el mes más cálido. La temperatura media supera los 10°C al menos en cuatro meses del año. Este grupo presenta inviernos que son de fríos a templados, y veranos más bien húmedos y cálidos.

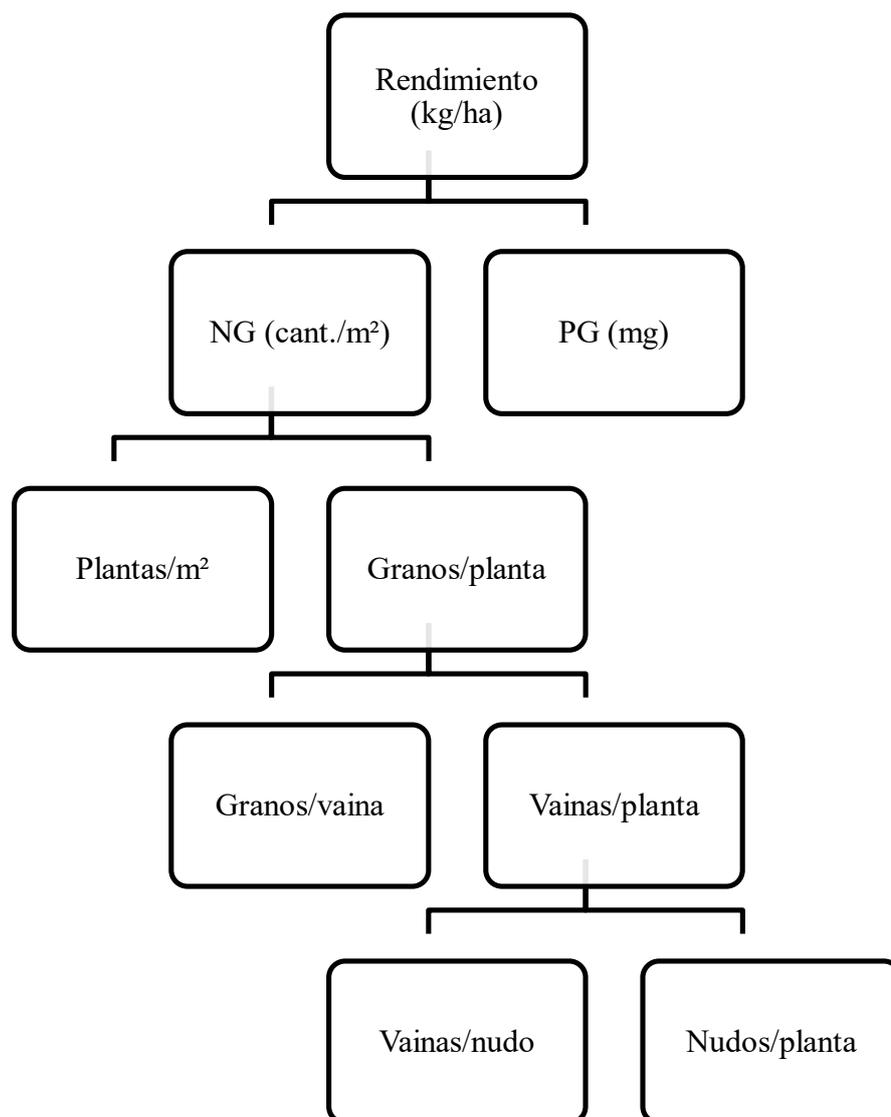
### **2.3.2 Componentes del Rendimiento**

El rendimiento del cultivo de soja se encuentra determinado por dos componentes numéricos principales, el número de granos (NG) por unidad de superficie y el peso de grano (PG), como lo definen Kantolic et al. (2004). El NG se subdivide en varios subcomponentes del rendimiento (ver Figura 7), buscando representar la cantidad potencial de sitios para que se establezcan los granos y la fertilidad de los mismos. Estos

componentes tienen una gran dependencia tanto genética como ambiental. Las variaciones en el NG provocadas por variaciones ambientales están estrechamente relacionadas con cambios en el rendimiento, por lo contrario, la variación en el PG no está tan estrictamente relacionada a dichas condiciones. Establecen que los componentes que explican el rendimiento se definen durante todo el ciclo del cultivo, pero que existen momentos del ciclo que representan mayor importancia en su definición. Las condiciones ambientales adversas durante las etapas tempranas pueden ser compensadas si las condiciones ambientales mejoran, sin verse afectado el NG. Esto se debe a la gran cantidad de sitios potenciales donde pueden diferenciarse las flores, acompañado de la extensión de la floración que otorgan al cultivo una considerable tolerancia.

**Figura 7**

*Componentes de rendimiento*



*Nota.* Número de grano (NG); Peso de mil granos (PMG). Extraído de Kantolic et al. (2004).

Giménez (2014), al evaluar tratamientos bajo riego y secano, pudo observar diferencias significativas en los componentes de rendimiento, y estableció que las condiciones hídricas para el cultivo, sobre todo en el período crítico (PC) tienen un efecto en los componentes de rendimiento. Esto en base a que al comparar tratamientos en secano que recibieron precipitaciones suficientes en el PC el rendimiento no tuvo diferencias significativas con tratamientos bajo riego.

### ***2.3.3 Efecto del Régimen Hídrico Sobre el Rendimiento en Soja***

Según la Wani et al. (2012), afirman que mientras el agua disponible en la zona radicular se mantenga por encima de 60% el cultivo no se verá afectado. Establece que el estrés hídrico afecta el crecimiento y desarrollo potencial del cultivo de soja.

Estos autores también destacan que el crecimiento vegetativo es muy sensible al déficit, y que si este ocurre a partir de floración el rendimiento tendrá un impacto negativo aún mayor.

También Giménez (2012) estableció que el período crítico (PC) para los cultivos es aquel en el cual el estrés ambiental tiene mayor impacto negativo en el rendimiento del cultivo, esto se explica porque en este período se está definiendo el principal componente del rendimiento el cual es el número de granos por metro cuadrado. Para la soja definió este período entre R4 - R6, cuantificando pérdidas por déficit hídrico de entre el 44 al 50% del rendimiento potencial.

Kantolic et al. (2004) en la búsqueda de la definición del PC vieron que el NG no se vio afectado por algún tipo de estrés previo a la floración; es a partir de este momento que puede verse afectado negativamente el rendimiento a causa del estrés ambiental. Es así que estos autores afirman que en condiciones de déficit hídrico el PC se encuentra de R1 a R6, aunque comentan que las restricciones en la tasa de crecimiento durante la primera parte del período reproductivo pueden ser compensadas; por lo que definen como aún más crítico el período de R4 a R6, ya que no existen compensaciones en el crecimiento a partir de R4.

A la hora de evaluar cómo se ven afectados los componentes del rendimiento por el anegamiento, Linkemer et al. (1998), concluyeron que si ocurre al inicio del período vegetativo afecta el número de nudos, por otro lado, si se da en inicio del estado reproductivo lo que se ve afectado es el número de vainas, y si se da a finales del estado reproductivo es afectado el tamaño del grano.

Por otro lado, Wani et al. (2012), proponen que el exceso hídrico afecta al cultivo desde la germinación, siendo capaz de resistir en este estado un encharcamiento de 7 días. Por otro lado, si un anegamiento prolongado ocurre a partir del inicio de floración el rendimiento podría verse afectado en hasta un 40%. Esto es debido a la muerte radicular y de los nódulos por anoxia. Si el anegamiento se prolonga a más de 8 días el cultivo

comienza a producir raíces adventicias y tejido aerenquimático, en la búsqueda de promover la difusión de oxígeno a la parte apical de las raíces.

Rhine et al. (2009) establecen que el anegamiento provoca daños fisiológicos en la planta que no lo tolera como la soja, y en mayor o menor medida determinan pérdidas en su rendimiento. Por su parte Sullivan et al. (2001), afirman que la duración y estado fenológico en el que ocurre el anegamiento son determinantes en la cuantificación del daño.

Los síntomas más comunes vistos en chacras de soja bajo condiciones de anegamiento son, reducción en el crecimiento de las raíces, amarillamiento de hojas, defoliación, reducciones en el rendimiento y muerte de plantas, como fue establecido por Linkemer et al. (1998). Según Sullivan et al. (2001), el amarillamiento de hojas es causado por la falta de nitrógeno, debido a que períodos de anegamiento presentan una correlación negativa con el contenido de este nutriente en el suelo.

Sallam y Scott (1987) afirman que, las inundaciones en V1 inhiben completamente la nodulación. Por otra parte, Sullivan et al. (2001) definen qué, períodos de anegamiento superior a tres días en el estadio V2-V3 provocaron reducciones del 20% en el rendimiento de chacras, lo que se explica por una reducción de la población, altura y número de chauchas. En este contexto Oosterhuis et al. (1990) establecieron que períodos de 48 horas bajo condiciones de anegamiento entre V4 y R2 provocan reducciones en el rendimiento entre el 40 y 55%. Además, pudieron verificar además que existe una correlación entre el largo del período de anegamiento y la pérdida de rendimiento, esto muestra la precoz necesidad de poder drenar el agua fuera de la chacra.

Linkemer et al. (1998) concluyeron que, si se tiene en cuenta períodos iguales de anegamiento, la reducción es mayor en suelos con mayor contenido de arcilla que en suelos con mayor contenido de arena, debido a la capacidad de retención de agua por parte de cada suelo.

Macedo y Terra (2014) establecen que, la sistematización de chacras en la búsqueda de evacuar el agua en menos de 48 horas es una práctica de manejo que disminuye el riesgo en esta región. El conocimiento de la composición de los suelos también es importante, ya que la textura de los mismos hace tiempos de respuestas diferentes. Si se tienen en cuenta las limitantes mencionadas y con prácticas de manejo adecuadas pueden obtenerse rendimientos aceptables del cultivo de soja.

## **2.4 Métodos de Riego en el Cultivo de Soja**

Un abastecimiento hídrico más estable y/o regular es considerado un requisito previo a cualquier aumento en la productividad de alimentos, de igual forma que es conveniente contar con un buen sistema de drenaje para eliminar los excesos hídricos (FAO, 1966). Estos autores consideran el desarrollo del riego y drenaje como las

principales limitantes para la evolución de los sistemas agrícolas en los países en desarrollo.

Wani et al. (2012) afirman que uno de los principales problemas venideros es la gestión del agua para riego agrícola, debido a su escasez en distintas partes del mundo. Es necesaria la regulación de este recurso y la búsqueda de aumentar su eficiencia para lograr los aumentos en la productividad. De igual forma establece que aquellos lugares en el mundo donde el apoyo político, investigación y desarrollo, al igual que la motivación de inversiones se han estancado puede verse un incremento en la pobreza.

Según Parfitt et al. (2017), debería existir una constante mejora de las técnicas de uso de agua por parte de todos los sectores para que contribuyan a un uso más eficiente de este recurso renovable pero finito, ya que esta es la única alternativa para que las diversas actividades sigan teniendo su lugar, entre ellas el riego.

Según el informe presentado por el Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social (CERES, 2023) el desarrollo en materia económica en Uruguay depende en buena parte del desempeño de la actividad agropecuaria, determinado por múltiples factores entre ellos la alta dependencia del clima que atenta tanto contra la obtención de mayores rendimientos, así como su estabilidad en el tiempo. La introducción del riego generó un aumento del rendimiento de más de 40% para el cultivo de soja, alcanzando en años de escasas precipitaciones, duplicar el rendimiento promedio anual; esto se debe a que el déficit hídrico es la principal limitante para este cultivo en Uruguay, como fue mencionado anteriormente por Giménez (2014).

El informe del CERES (2023) establece que la implementación del riego reduce el riesgo entre temporadas, explicada por la dependencia de los cultivos de secano de las precipitaciones, las cuales presentan alta variabilidad interanual, lo que provoca que no siempre se tenga el agua disponible en el suelo para lograr cubrir los requerimientos de dichos cultivos. Es así que el riego asegura un piso de producción que permite llevar adelante la actividad en un escenario de menor incertidumbre, mejorando la rentabilidad del sistema productivo al disminuir los riesgos productivos.

En el mencionado informe se afirma que los costos de regar una hectárea se ha abaratado ya que en 2002 con el costo de regar una hectárea se podrían adquirir 1,3 hectáreas agrícolas, mientras que en 2022 el costo de regar una hectárea es aproximadamente un tercio del valor de la misma. A su vez, el déficit hídrico que sufrió el país en los últimos tres años dejó en evidencia la existente falta de infraestructura de abastecimiento hídrico. Según Arana y Sebben (2023), los sistemas agrícolas bajo riego representan en torno a 35 mil hectáreas, siendo solamente alrededor de un 3% del área total de cultivos de verano para esta zafra, y los sistemas de soja bajo riego alcanzan un total de 20 mil hectáreas.

Sebben et al. (2018) pudieron encontrar diferencias significativas en rendimiento según los momentos y métodos de aplicación del riego. Klocke et al. (1989) afirma que

la soja indeterminada debe ser regada según sus estadios de crecimiento, atendiendo la capacidad de retención de agua por parte del suelo, los factores climáticos y el sistema de riego. Para García Petillo (2012) regar bien es proporcionar a las plantas la cantidad de agua necesaria en el momento oportuno, antes que ocurra un estrés que disminuya su rendimiento. La cantidad adecuada de agua debe aplicarse de forma uniforme en toda la parcela, ya que cuanto más heterogéneo sea la aplicación, mayor será el volumen de agua necesario para que toda la parcela quede bien regada, disminuyendo así la eficiencia en el uso del agua. Sawchik y Ceretta (2005) calcularon una la eficiencia del uso del agua para la soja en el litoral del país que oscila entre 5 - 9 kg/mm, es en base a estos valores que puede estimarse el rendimiento en base a las precipitaciones obtenidas.

De acuerdo con Giménez (2012), la información sobre cultivos de verano bajo riego es escasa, ya que mayoritariamente se realizan en secano. Además, establece que conocer el comportamiento de los cultivos a diferentes disponibilidades hídricas es un aspecto relevante para definir estrategias de manejo óptimas para cada sistema.

En el cultivo de soja, Wani et al. (2012) establece que la eficiencia del uso del agua es mayor cuando el riego es realizado en la etapa reproductiva. En la formación de vainas detiene la senescencia, aumentando el rendimiento. El autor propone que al igual que todos los cultivos, el riego en soja depende de las precipitaciones, el clima, la capacidad del suelo de almacenar agua y la profundidad que puedan alcanzar las raíces. Para estos autores, el calendario de riego óptimo debe fijar un agotamiento de agua disponible de 60%, y el máximo de riegos se establece en torno a ocho.

Según Arana y Sebben (2023), en Uruguay se busca promover los sistemas de riego para los cultivos extensivos como práctica tecnológica en sistemas agrícolas ganaderos de todo el país, para que se mejore la producción y la estabilidad anual de los sistemas. Existen diferentes estrategias y métodos de riego que permiten que sea posible diseñar múltiples sistemas ajustados a los diferentes sistemas productivos. En base a esto García Petillo (2012) establece que los productores demandan sistemas de riego cuyo diseño implique fácil operación para la implementación en sistemas productivos. Un buen diseño es aquel que logra todos sus objetivos de la manera más económica.

#### ***2.4.1 Necesidad del Riego en Base a Condiciones Climáticas***

Köppen (1884) realizó una clasificación climática mundial en la cual define a Uruguay dentro de una región templada, subtropical húmeda. Además de las características ya mencionadas que se centraban en la temperatura, este mismo autor describe que las precipitaciones en esta región se encuentran bien repartidas a lo largo del año sin presentar una estación seca.

Según Corsi (1994), el régimen de precipitaciones en Uruguay presenta períodos de déficit y exceso hídrico no siendo capaz de suministrar agua de forma ininterrumpida para la producción agrícola en base a sus necesidades si lo que se busca es alcanzar rendimientos potenciales y estables. En consecuencia, a esto los procesos de reserva de

agua de lluvia, y su uso para riego deben alternarse en la búsqueda de aumentar la productividad. Acompañando esto, Sawchik y Formoso (2001), determinaron que Uruguay se caracteriza por presentar un clima de alta variabilidad donde pueden alterarse períodos de déficit hídrico a veces muy importantes, durante los meses de verano donde el agua disponible para los cultivos depende de las características intrínsecas de disponibilidad del suelo. Esto trae como consecuencia una gran variación en los rendimientos del cultivo.

Giménez (2014) cuantificó pérdidas en torno al 50% del rendimiento potencial dependiendo del momento de desarrollo del cultivo en el cual ocurre el déficit hídrico. Existe abundante literatura capaz de afirmar que la principal limitante ambiental que tiene la soja en Uruguay es el déficit hídrico, disminuyendo el rendimiento ya que provoca una menor capacidad de acumular materia seca, lo que implica menor intercepción de radiación, efectos negativos sobre el crecimiento y expansión celular, y disminución de la fijación biológica de nitrógeno. Según este autor está claro que en efecto el déficit disminuye el rendimiento, no estando tan claro de qué forma lo hace dependiendo de en cuál etapa de desarrollo se encuentre el cultivo. Este aspecto es fundamental para definir estrategias de riego en condiciones de disponibilidad de agua limitante. Por otro lado, Giménez (2012) estableció que los años con exceso de precipitaciones también afectan de forma negativa los rendimientos de soja.

#### ***2.4.2 Dinámica del Agua en el Suelo***

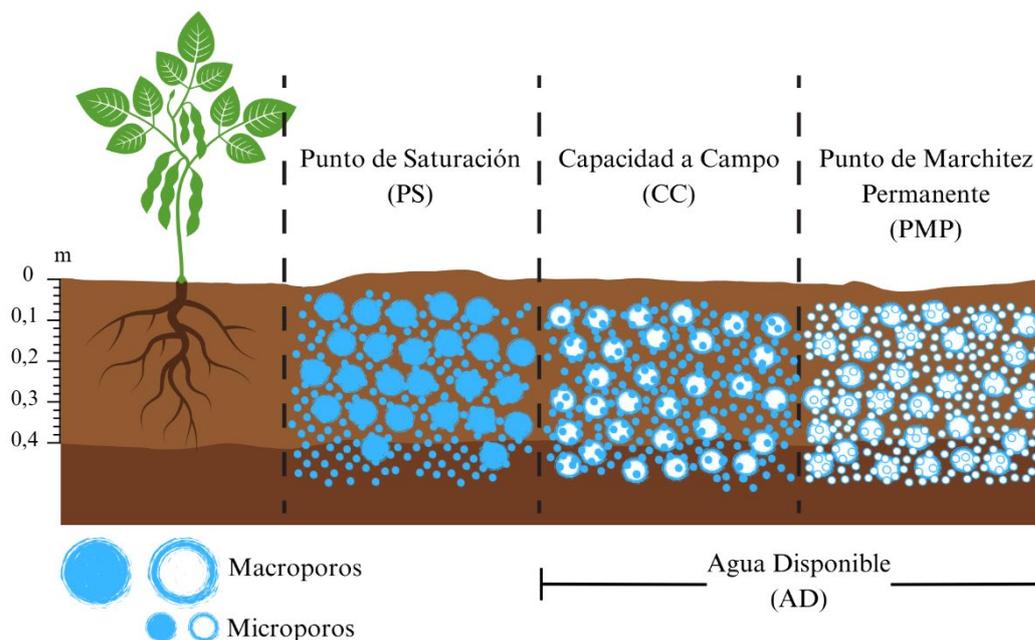
Según García Petillo (2012), la cantidad de agua que debe recibir un cultivo depende de la demanda atmosférica. A los efectos del riego, debe tenerse en cuenta las características intrínsecas del suelo, pero no todo el perfil de suelo sino aquella porción que es ocupada por la masa radicular. Para el caso de la soja la profundidad radicular máxima se encuentra entre 0,6 a 1,3 m, y en nuestro país, la mayor proporción de raíz se encuentra en torno a 0,4 m de profundidad

Para entender cómo es el comportamiento del agua en el suelo debe entenderse que existen diferentes momentos desde que el suelo está lleno hasta que se vacía, y que la forma en la que afectan al cultivo es diferente, como mencionan Allen et al. (2006). Una vez que el suelo se satura posterior a un gran evento de precipitaciones o riego, los macroporos y microporos se encuentran llenos de agua (ver Figura 8). Se define esta condición como Punto de Saturación (PS), en esta situación las raíces son incapaces de absorber agua por la falta de oxígeno. El suelo tiene muy baja capacidad de retención del agua que se encuentra en los macroporos, por lo que, si no es retenida mediante algún otro impedimento físico, estos se vacían luego de 24 a 72 hs, dependiendo de la textura y estructura del suelo. Es así que solamente quedan los microporos llenos de agua, los cuales, si son capaces de retenerla, esta condición de suelo es conocida como Capacidad de Campo (CC) y es el momento ideal para que el cultivo absorba agua. Posterior a esto, mientras el agua es extraída por el cultivo la matriz del suelo la retiene cada vez más fuerte, hasta alcanzar un punto en que el cultivo no es capaz de extraer más agua del suelo conocido como Punto de Marchitez Permanente (PMP). Aún en esta condición el suelo

retiene pequeñas cantidades de agua, las cuales el cultivo no es capaz de extraer. El agua que efectivamente puede absorber el cultivo es aquella que se encuentra entre el CC y PMP, conocida como Agua Disponible (AD).

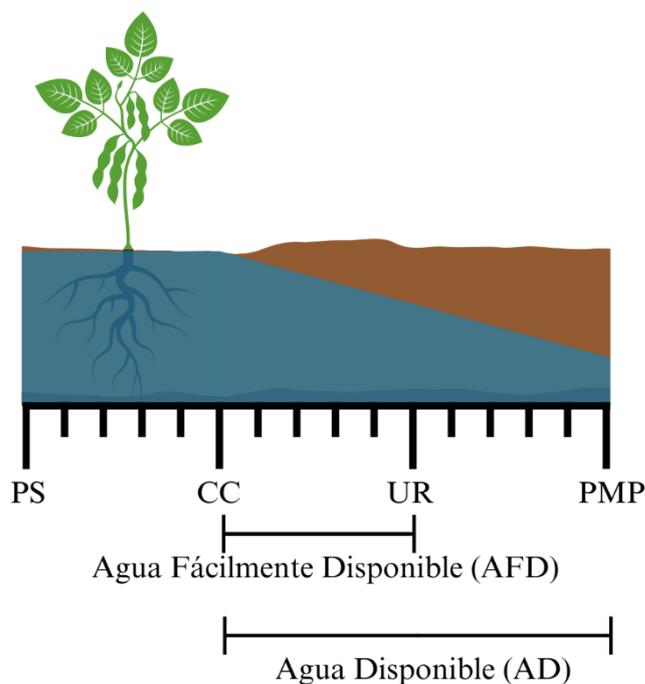
### Figura 8

*Contenido de agua en el suelo*



Allen et al. (2006) establecen que a medida que el suelo se va secando, y debido a la capacidad que tienen los microporos de retener cada vez con más fuerza el agua el cultivo va extrayendo menor cantidad. Existe un punto a partir del cual, si bien las raíces se encuentran absorbiendo agua, no pueden hacerlo a un ritmo que cumpla con la demanda atmosférica, la planta comienza a sufrir estrés hídrico aún mientras hay AD en el suelo, disminuyendo el rendimiento final. Este punto es conocido como Umbral de Riego (UR), y es determinado por el porcentaje máximo del AD que puede agotarse antes de que comience a sufrir estrés hídrico, conocido como factor  $p\%$ , el cual es afectado por el tipo de suelo, la demanda atmosférica y su etapa de desarrollo. Estos autores también plantean que este valor varía de un cultivo a otro, de forma que cultivos de raíces poco profundas y con tasas altas de evapotranspiración (ET) presentan un factor  $p\%$  igual a 0,3, mientras que cultivos con raíces profundas y tasas bajas de ET presentan un valor de 0,7. Es correcto utilizar un factor  $p\%$  de 0,5 para el cultivo de soja por sus demandas de ET moderadas.

Allen et al. (2006) también establece que, el agua retenida entre la CC y el UR es conocida como Agua Fácilmente Disponible (AFD) o agua fácilmente aprovechable (AFA). Es así que, un riego adecuado es aquel que se maneja entre la CC y el UR (ver Figura 9), debido a que si es manejado por encima de la CC el suelo no tiene capacidad de retenerlo y disminuye la eficiencia en el uso del agua (EUA), pudiendo generar estrés por anegamiento; en caso de que se encuentre por debajo del UR el cultivo sufre estrés hídrico.

**Figura 9***Contenido de agua en el suelo*

### 2.4.3 Riego Suplementario

Según Fereres y Soriano (2006), el riego suplementario es una estrategia de riego usada para suplementar las lluvias como una medida táctica durante los momentos en los cuales las precipitaciones no cubren la demanda del cultivo para estabilizar la producción, utilizando cantidades de agua en función de los niveles relativos de lluvia, con la meta de maximizar el rendimiento y eliminar las fluctuaciones causadas por las deficiencias hídricas. Por su parte, Otero et al. (2015) proponen que el riego suplementario permite reducir el déficit hídrico en períodos particulares del cultivo, aumentando el rendimiento y la estabilidad.

Garside et al. (1992) en la Universidad de Kununurra (Australia), reportaron que con riego más frecuente aumenta la tasa de crecimiento de todos los componentes de rendimiento, el índice de área foliar se mantiene en niveles elevados, y se retrasa la senescencia. Estos mismos autores señalan que la mayor variación en el rendimiento era explicada por la cantidad total de agua, siendo esta la suma de la lluvia y el riego que el cultivo recibe. A partir de los resultados de este estudio se pudo concluir que, para la soja, el riego es un tema de interés en las regiones húmedas. Se encontró que había diferencias genotípicas con respecto a la EUA, y resalta la importancia de la elección del cultivar como una llave para alcanzar rendimientos óptimos con un menor uso de agua.

Sweeney y Granade (2002) reportaron cerca de Parsons (Kansas), un incremento en el rendimiento en soja explicado por un aumento en el número de granos al aplicar

riego durante las primeras etapas del desarrollo reproductivo del cultivo, mientras que, si se aplica finalizando el desarrollo reproductivo, el riego tiene un efecto positivo en el peso de los granos.

Grasso González y Montero Pinczak (2011) en su evaluación realizada en la Estación Experimental "Dr. Mario A. Cassinoni" (EEMAC), en Paysandú, afirman que la principal diferencia en el rendimiento con y sin riego, es explicada por el número de granos entre tratamientos. Esto debido a una reducción de los componentes de rendimiento durante períodos de deficiencias hídricas.

#### **2.4.4 Balance Hídrico**

Corsi (1994) define al balance hídrico como el resultado de los ingresos y egresos de agua en el suelo. Para la planificación y elaboración de un calendario de riego se recomienda realizar un balance hídrico de paso diario (Allen et al., 2006). Este tipo de balance cuantifica de forma diaria la humedad presente en el suelo.

Hayashi Tsumura (2022) define que es esencial conocer el tipo de suelo debido a que este es un componente fundamental a la hora de realizar un balance hídrico, y determina los rendimientos alcanzables.

Allen et al. (2006) también asume que, el agua puede ser almacenada en la zona radical después de lluvias o riegos intensos hasta alcanzar CC, de seguir aumentando ocurre percolación o escurrimiento superficial o subsuperficial ya que el suelo no es capaz de retener agua; si estos procesos no ocurren es porque existe algún impedimento físico que no lo permite. Posterior a esto el contenido de humedad comenzará a disminuir gradualmente debido a la ET, hasta alcanzar el valor mínimo en el PMP donde no existe agua disponible para la planta en la zona radical para poder realizar ET.

Mediante la estimación del balance hídrico en la zona radicular es posible determinar el AD para poder determinar la necesidad de aplicar una lámina de riego en el momento y cantidad adecuados, como mencionan Allen et al. (2006). Esta práctica es preventiva y debe ser realizada en la búsqueda de evitar el estrés hídrico, por lo que esta debe aplicarse antes de agotarse el AFD. Por otro lado, la lámina de riego deberá ser menor o igual al agua requerida para alcanzar CC para evitar pérdidas por percolación o escurrimiento, disminución en la EUA, y lavado de nutrientes.

##### **2.4.4.1 Evapotranspiración**

Según Allen et al. (2006), la Evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos de pérdida de agua por volatilización. A través de la superficie del cultivo ocurre la transpiración, y a través de la superficie de los demás cuerpos ocurre la evaporación.

Estos mismos autores establecen que la volatilización es el proceso mediante el cual el agua líquida pasa a estado gaseoso. Es denominada evaporación cuando este proceso ocurre en superficies como cuerpos de agua, suelo y objetos húmedos, como

vegetación mojada. Para dar lugar a este proceso se requiere de energía la cual en mayor medida es proveniente de la radiación solar directa y además en menor medida de la temperatura ambiente. La fuerza que impulsa este proceso es el gradiente o diferencia de presión de vapor entre la superficie húmeda y la atmósfera. Factores como la radiación, la temperatura del aire y la velocidad del viento deben ser considerados al evaluar este proceso. Por otro lado, la transpiración es el proceso mediante el cual el agua líquida contenida dentro del tejido vegetal pasa a estado gaseoso por volatilización, y luego se dirige a la atmósfera. La salida del vapor de agua ocurre mayormente en los estomas, los cuales son aberturas celulares en el tejido vegetal que permiten el traspaso de gases entre la planta y la atmósfera. Al igual que el anterior, este proceso depende del aporte de energía, del gradiente de presión de vapor y la velocidad del viento, pero debe agregarse como determinante el contenido de agua en el suelo, la capacidad del suelo de aportar agua, al igual que el cultivo y su sanidad debido a que todos estos factores determinan la transpiración.

Los autores consideran que estos dos procesos ocurren en simultáneo y no hay una manera sencilla de distinguirlos. En las primeras etapas del cultivo el agua se pierde mayormente por evaporación directa del suelo, pero a medida que se desarrolla el cultivo y cubre el suelo la transpiración se convierte en el proceso principal.

Allen et al. (2006) establecieron que la ET presenta diferentes componentes, los cuales es necesario determinar para que sea posible estimar los requerimientos hídricos del cultivo, estos son la Evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>), la Evapotranspiración del cultivo sin limitantes hídricas (ET<sub>c</sub>) y la Evapotranspiración de un cultivo ajustado a las limitantes hídricas (ET<sub>a</sub>).

#### **2.4.5 Gestor Inteligente de Riego (GESIR)**

Para el balance hídrico de paso diario, se utilizó el Gestor Inteligente de Riego, un software desarrollado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) el cual se basa en el balance hídrico propuesto por Allen et al. (2006). Para el uso de este software es necesario el ingreso de parámetros como la ubicación geográfica del cultivo, el coeficiente del cultivo (K<sub>c</sub>), factor de agotamiento (p%), CC, PMP, ADT, ET<sub>o</sub>, fracción de agotamiento del agua en el suelo (p<sub>fa</sub>), precipitaciones (PP), y riegos registrados (R<sub>neto</sub>). En base a esto es que se estiman los demás indicadores.

##### **2.4.5.1 Indicadores del Balance Hídrico.**

Como fue mencionado por Allen et al. (2006), para lograr estimar los requerimientos hídricos de un cultivo, primero debe conocerse la ET<sub>o</sub>, la cual es un parámetro proporcionado por las estaciones meteorológicas. Esta es la ET de una superficie de referencia que corresponde a una pastura hipotética de 0,12 m de altura, sombreando totalmente el suelo, en óptimo estado sanitario, sin limitantes nutricionales ni hídricas. La ET<sub>o</sub> es la ET en una localidad con sus condiciones climáticas propias, ya que es independiente del suelo, de las prácticas de manejo, al igual que del tipo y estado

de desarrollo del cultivo. La ETo provee un valor estándar el cual puede ser comparado en el tiempo y el espacio tanto para climas áridos como húmedos. Por estas razones es reconocido como el parámetro más ajustado para la predicción de la ET.

El método FAO Penman-Monteith (Ecuación 1) es el más recomendado para la determinación de la ETo debido a que utiliza datos climáticos estándar, los cuales pueden ser fácilmente medidos por estaciones meteorológicas o derivados de datos que comúnmente son medidos, existiendo procedimientos para estimarlos, según afirmaron Allen et al. (2006).

### **Ecuación 1**

*Método FAO Penman-Monteith para la estimación de la evapotranspiración de un cultivo de referencia*

$$ET_o = \frac{0,408\Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_{2m} * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma * (1 + 0.34u_{2m})}$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006). ETo - Evapotranspiración de referencia (mm día<sup>-1</sup>). Rn - Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>). Ra - Radiación extraterrestre (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>). G - Flujo del calor del suelo (MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>). T - Temperatura media del aire a 2 m de altura (°C). u<sub>2m</sub> - Velocidad del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>). e<sub>s</sub> - Presión de vapor de saturación (kPa). e<sub>a</sub> - Presión real de vapor (kPa). (e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>) - Déficit de presión de vapor (kPa). Δ - Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>). γ - Constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>).

Por otro lado, Allen et al. (2006) definen que en segunda instancia debe estimarse la evapotranspiración de un cultivo específico bajo condiciones estándar (ETc), siendo aquella que se da cuando el cultivo se encuentra libre de enfermedades, con buenos niveles de fertilización, limpio de malezas, bajo condiciones de suelo y requerimientos hídricos adecuados, logrando la máxima tasa de crecimiento, en condiciones ambientales determinadas. La ETc es la cantidad de agua que el cultivo por evapotranspiración en condiciones no limitantes.

La ETc puede estimarse a partir de datos climáticos, integrando además factores propios del cultivo, su estado de desarrollo y condiciones del suelo, mediante el uso del método FAO Penman-Monteith. Debido a la falta de información descriptiva en cada sistema productivo, este método no es muy empleado. También puede estimarse la ETc mediante el uso del Coeficiente del Cultivo (Kc), el cual relaciona de forma experimental los diferentes cultivos (Ecuación 2), como establecieron Allen et al. (2006). El Kc es un coeficiente que varía en función de las características particulares de cada cultivo para cada etapa de desarrollo. Es por esto que puede darse la transformación entre los diferentes sistemas productivos en las condiciones ambientales que se encuentren. El uso éste parámetro es muy aceptado por la comunidad científica internacional ya que los resultados se ajustan a la realidad de cada sitio y cultivo.

## Ecuación 2

*Estimación de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar*

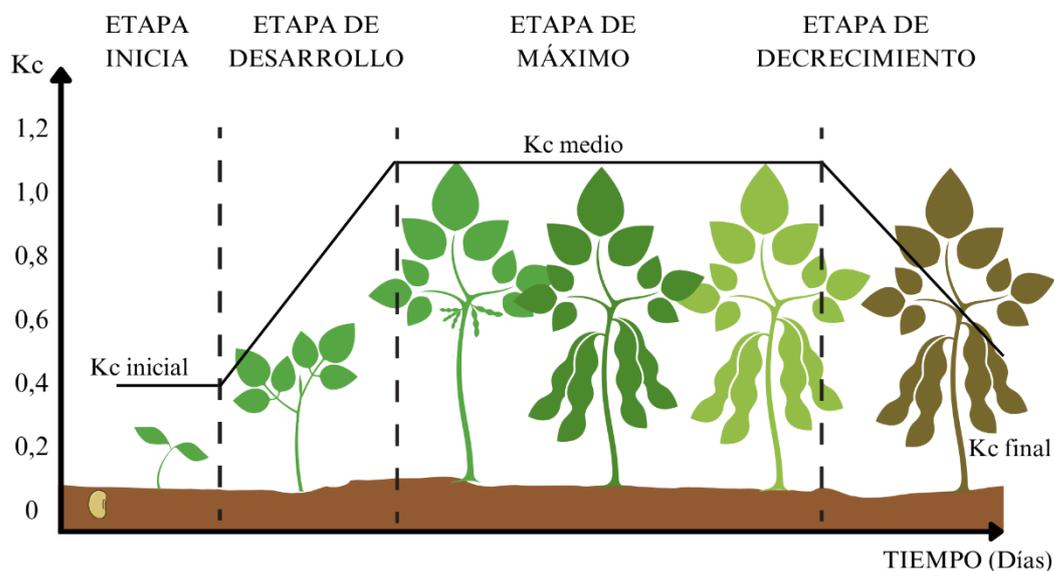
$$ET_c = ET_o * K_c$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).  $ET_c$  = Evapotranspiración del cultivo (mm/día).  $ET_o$  = Evapotranspiración de cultivo de referencia (mm/día).  $K_c$  = Coeficiente de cultivo.

Es importante recalcar que Allen et al. (2006) consideran que la ET varía de forma diaria ya que es afectada por la variabilidad climática, pero el  $K_c$  lo hace según etapas de desarrollo (ver Figura 10). La etapa inicial va desde la siembra hasta que el cultivo emerge y tiene las primeras hojas, la etapa de desarrollo es hasta que el cultivo cubre todo el espacio asignado, la etapa de mediados del cultivo hasta que las hojas comienzan a sufrir senescencia, y por último etapa de finales de cultivo que es hasta madurez fisiológica. Las fechas en que se cumplen estas etapas deben fijarse por técnicos con conocimiento en el comportamiento del cultivo y cultivar para determinado sitio y clima.

## Figura 10

*Coeficiente del cultivo durante su desarrollo*



*Nota.* Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Modificado de Allen et al. (2006).

Se presentan valores de referencia para cada cultivo (ver Tabla 1), proporcionando valores de  $K_c$  inicial, medio y final. El valor propuesto de  $K_c$  inicial es igual para toda la etapa inicial, el  $K_c$  medio es igual para toda la etapa de máximo y el  $K_c$  final es un valor a madurez fisiológica.

**Tabla 1***Valores de KC*

Etapa	Inicial	Medio	Final
Kc	0,40	1,15	0,50

*Nota.* Valores extraídos de Allen et al. (2006).

Una vez que se tiene la  $ET_c$  es posible estimar la Evapotranspiración de un cultivo ajustado a las limitantes hídricas ( $ET_a$ ), la cual es la ET más precisa a las condiciones reales en las que se encuentra el cultivo ya que se tiene en cuenta la cantidad de agua en el suelo.

Allen et al. (2006) proponen que, para definir la cantidad de agua disponible para el cultivo, es necesario conocer ciertas características intrínsecas del suelo, como la CC y el PMP, lo que permite calcular el Agua Disponible Total (ADT). Este parámetro representa el agua accesible para las raíces (ver Ecuación 3), y varía en función de la profundidad radicular (ver Ecuación 4) y de la profundidad de riego ( $pr$ ).

La profundidad de riego se iguala a la profundidad radicular cuando esta se encuentra entre 0,2 y 0,4 m. Si no es así, se utilizan los valores límite. Tanto la CC, el PMP y el ADT, presentan un comportamiento que varía en función de la profundidad de riego.

**Ecuación 3***Agua disponible total*

$$ADT_t(mm) = CC_t - PMP_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

**Ecuación 4***Profundidad de raíz*

$$Prof.raíz_t(m) = Prof.raíz_{t-1} + (Prof.raíz_{máxima}/días\ crecimiento)$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

Para poder estimar la cantidad de agua con la que el cultivo cuenta, debe definirse previamente el Factor de Agotamiento ( $p\%$ ), y posterior a esto el Factor de Agotamiento Corregido ( $p\%$  corr o  $p.f.a$ ), el cual varía en función de la  $ET_o$  (ver Ecuación 5).

**Ecuación 5***Factor de agotamiento corregido*

$$p.f.a_t = p\% + 0,04 * (5 - ET_o_t)$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

Una vez que se cuenta con el ADT y p.f.a, es posible calcular el Agua Fácilmente Disponible (AFD) o Agua Fácilmente Aprovechable (AFA), y es en base a esta puede estimarse el Umbral de Riego (UR) o Nivel de Agotamiento Permisible (NAP). El método puede verse en las Ecuaciones 6 y 7, respectivamente.

### **Ecuación 6**

*Agua fácilmente aprovechable*

$$AFA_t(mm) = AD_t * p.f.a_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

### **Ecuación 7**

*Umbral de riego o Nivel de agotamiento permisible*

$$UR_t(mm) = CC_t - AFA_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

La ocurrencia de PP y Rneto representan los ingresos de agua al suelo, mientras que los egresos son cuantificados en la ETa y la Percolación (Perc), ésta solamente ocurre en momentos donde el suelo supera la CC. Esto se determina mediante el cálculo del déficit hídrico acumulado (D), para el cual se requiere tener en cuenta tanto los ingresos como los egresos (ver Ecuación 8).

### **Ecuación 8**

*Déficit hídrico acumulado*

$$D_t(mm) = D_{t-1} + ETa_t - PP_t - Rneto_t$$

$$si : D_t \geq 0 \rightarrow D_t$$

$$si : D_t < 0 \rightarrow Perc_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

A partir del D puede estimarse el balance hídrico de paso diario, ya que el mismo es calculado como el contenido de agua en CC y el D (ver Ecuación 9).

### **Ecuación 9**

*Balance hídrico*

$$Balance_t(mm) = CC_t - D_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

Una vez realizado el balance hídrico de paso diario, es posible calcular ciertos indicadores de estrés hídrico los cuales muestran la situación del cultivo. Estos

indicadores se calculan en base a la relación entre ETa y la ETc, lo que indica si el cultivo cumple o no con sus requerimientos diarios. Por otro lado, se requiere el cálculo de la ETa y ETc acumulada en el tiempo para realizar la misma relación la cual indica si el cultivo pudo cumplir sus requerimientos a lo largo del ciclo y de qué forma el estrés hídrico afectó al cultivo (ver Ecuación 10).

### **Ecuación 10**

*Evapotranspiración del cultivo acumulada*

$$ETcm_t (mm) = ETcm_{t-1} + ETc_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

### **Ecuación 11**

*Evapotranspiración del cultivo ajustada al déficit hídrico acumulado*

$$ETam_t (mm) = ETam_{t-1} + ETa_t$$

*Nota.* Extraído de Allen et al. (2006).

#### **2.4.6 Pivot Central de Riego**

Según Morales Molina et al. (2022), los Pivots centrales son equipos capaces de alcanzar alta uniformidad de riego y EUA, de vital importancia para maximizar el uso de este recurso. En Uruguay estos equipos están siendo los más utilizados para la producción extensiva tanto de cultivos y como pasturas. Dentro de este método de riego existen diferentes estrategias de cómo llevarlo a cabo donde la principal diferencia es la cantidad de agua utilizada, y por lo tanto la EUA.

García Petillo (2012) remarca que este método de riego está formado por una tubería rígida, comúnmente de aluminio, pudiendo alcanzar 600 metros de longitud, con boquillas aspersoras que funcionan a baja presión, las cuales están distribuidas a lo largo de la misma. Esta tubería se encuentra montada sobre torres con ruedas automotrices, y toda la estructura en conjunto gira alrededor de una torre central, regando un círculo que puede alcanzar algo más de 100 hectáreas. Este sistema es capaz de aDaptarse para regar grandes superficies destacándose por su relativa facilidad en el automatismo, bajo requerimiento de mano de obra, y alta uniformidad de riego (Grasso González & Montero Pinczak, 2011). Por otro lado, como desventaja este sistema tiene un elevado costo de inversión, y si está mal diseñado y/u operado puede tener una baja EUA.

Hayashi Tsumura (2022) afirma que la adopción del riego en Uruguay es baja y se debe a los costos asociados. Para determinar los costos totales que implica el riego debe considerarse la fuente de agua (represas, tajamares y tomas directas), obras de toma de agua, equipos para el bombeo, electrificación necesaria, automatismo del sistema, acondicionamiento de la chacra, adquisición y mantenimiento del Pivot, y los costos variables. Este último es el más importante de los costos debido a que dentro de los costos

variables debe tenerse en cuenta la electricidad necesaria para el uso del Pivotal. En la medida que disminuye la lámina de riego, el gasto energético también disminuye, ya que la energía utilizada para el bombeo varía en función del caudal de riego el cual es afectado directamente por la lámina aplicada. Otra variable que afecta en gran medida el costo energético es el número de riegos realizados en el periodo.

Los Pivots de riego avanzan en su diseño para ser eficiente en el consumo de energía eléctrica ya que como fue mencionado por Hayashi Tsumura (2022), esta es la principal limitante para la inserción de esta tecnología en Uruguay por su elevado costo. En la búsqueda de disminuir el consumo energético el desarrollo de nuevas tecnologías busca presentar, en los trenes de rodaje, motores de baja potencia para mover el Pivotal, ya que el movimiento es lento y constante, minimizando los picos de consumo. En este sentido la posibilidad de controlar la velocidad de riego es interesante, ya que disminuyendo la velocidad disminuye el costo energético de riego. Las torres utilizan ruedas de alta flotación buscando reducir la resistencia que existe entre estas y el suelo, esto para disminuir el esfuerzo requerido del motor.

Una característica primordial es la capacidad de aplicar una lámina de riego uniforme. Esto es posible gracias a la configuración de las boquillas, la existencia de controladores de presión y controladores de velocidad. Estas innovaciones permiten una distribución precisa y homogénea del agua. Esto reduce costos operativos e impactos ambientales, mejorando la productividad agrícola y promoviendo la sostenibilidad. La uniformidad en la distribución mejora la EUA, maximizando el aprovechamiento de este recurso, el cual, como menciona Parfitt et al. (2017) es un recurso renovable pero finito, por lo que es pertinente la búsqueda constante de aumentar su eficiencia de uso.

Según Fereres y Soriano (2006), reducir el agua disponible implica una disminución en la asimilación de carbono por parte del cultivo, lo cual se traduce en una menor biomasa y un menor rendimiento. Este enfoque es cuestionado debido a que la agricultura bajo riego es la principal consumidora de agua a nivel mundial, es debido a esto que se debe realizar una correcta gestión de este recurso, sobre todo en momentos de escasez, de manera que se alcance la mayor EUA con el objetivo de ahorrar agua y maximizar la productividad.

### 3 Materiales y Métodos

En este capítulo se describen detalladamente los materiales y métodos utilizados para la evaluación de la Geo-nivelación sobre el cultivo de soja bajo riego en suelos de la cuenca de la Laguna Merín. Se aborda el diseño planteado para realizar una evaluación con fundamentos estadísticos, además de todos los manejos realizados al suelo y al cultivo, de igual forma que las evaluaciones realizadas a los mismos.

#### 3.1 Características y Ubicación del Sitio Evaluado

Esta evaluación fue realizada en una chacra de 27,24 ha, ubicada dentro del padrón C-20197 del departamento de Rocha, en la estancia “El Monasterio”, propiedad de la empresa Galfarm S.A., la cual se encuentra en el kilómetro 462 de la ruta nacional N° 14; coordenadas del punto de acceso a la chacra 33°50'27,35"S 53°58'4,31"O; y se encuentra a unos 2,7 km al suroeste de la entrada al establecimiento. Esta tesis fue realizada bajo condiciones de producción reales, y la empresa estuvo a cargo de todas las medidas de manejo del cultivo.

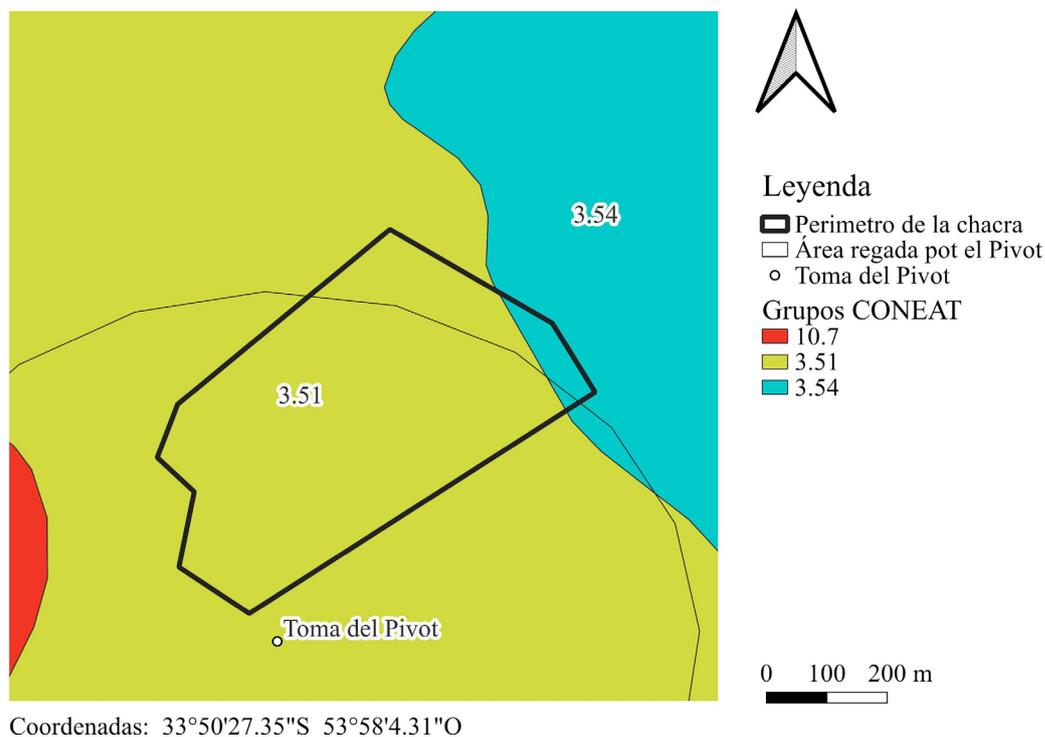
En esta región, según Altamirano et al. (1976), son dominantes los suelos pertenecientes a la unidad de suelos Alférez, los cuales se caracterizan por ser planos, de pendiente menor a 2%, predominantemente Argisol Subéutrico Melánico Abrúptico.

Por su parte Saravia (2005), define esta región como llanuras de pendiente plana; y Thomas y Lange (2014) establece que en estas llanuras predominan los planosoles y gleysoles.

Por otro lado, según la Dirección General de Recursos Naturales (DGRN, s.f.), fueron encontrados en la chacra los grupos 3.51 y 3.54 (ver Figura 11), los grupos se caracterizan por presentar planicies con meso y microrelieve, pendiente muy baja, lo que genera problemas de drenaje y fertilidad baja. Predominan los Planosoles Subeutricos Melánicos, el cual es el tipo de suelo donde se encuentra la chacra evaluada.

**Figura 11**

Mapa de la chacra con grupos CONEAT



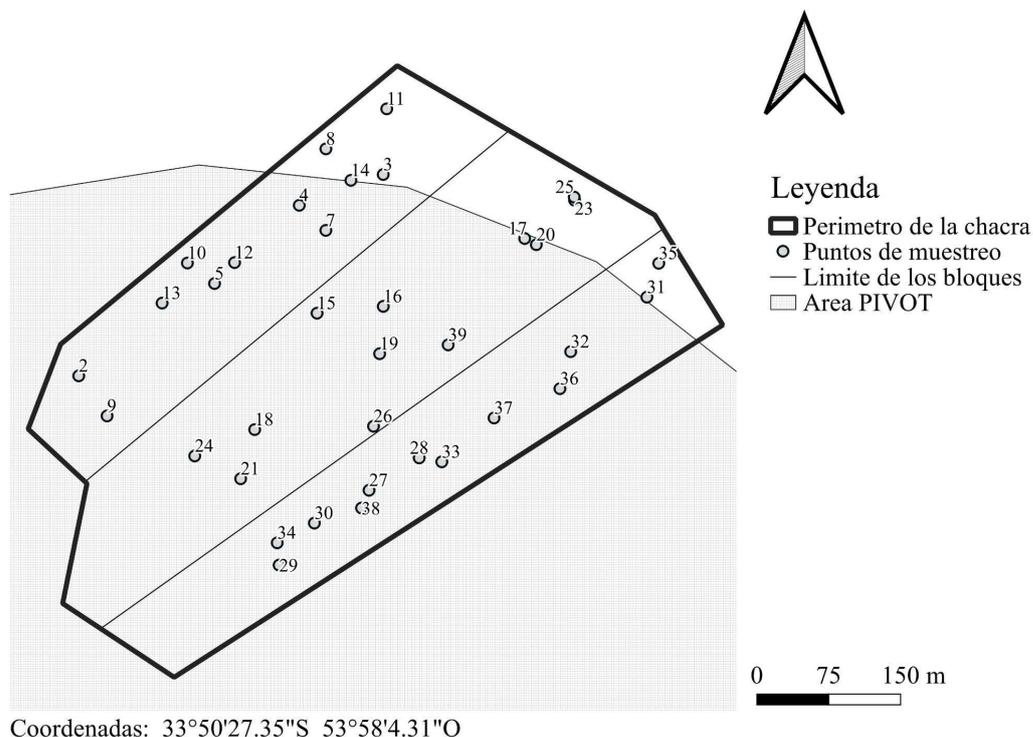
*Nota.* Mapa con coordenadas que ubican la chacra. Se definen los grupos CONEAT que se encuentran en las inmediaciones del mismo. Realizado en base a DGRN (s.f.).

### 3.2 Diseño Experimental

Las evaluaciones realizadas para este trabajo se realizaron en condiciones de campo, en un predio comercial, pero buscando respetar una lógica estadística. Es en base a esto que se realizó la determinación de tres bloques buscando controlar la variabilidad generada por las diferentes ubicaciones con respecto a la pendiente de los muestreos en el terreno, por lo tanto, los mismos se establecieron en el alto, medio y bajo dentro de la parcela de estudio, pudiendo encontrar el alto hacia el noreste y el bajo hacia el suroeste (ver Figura 12). Dentro de cada bloque se marcaron cuatro puntos que representan cada uno de los tratamientos, ubicando situaciones lo más contrastantes posible.

Cada bloque está formado entonces por 12 puntos de muestreo, en total 36 puntos de muestreo si se tiene en cuenta los tres bloques. Para las variables donde existe una influencia del riego, fueron excluidos del análisis estadístico, 6 puntos posterior al primer riego debido a que se encuentran fuera del área regada por el pivó (ver Figura 12).

Por último, se analizó las tendencias de las variables que se analizaron mediante la regresión de las mismas en función de la profundidad de corte y relleno.

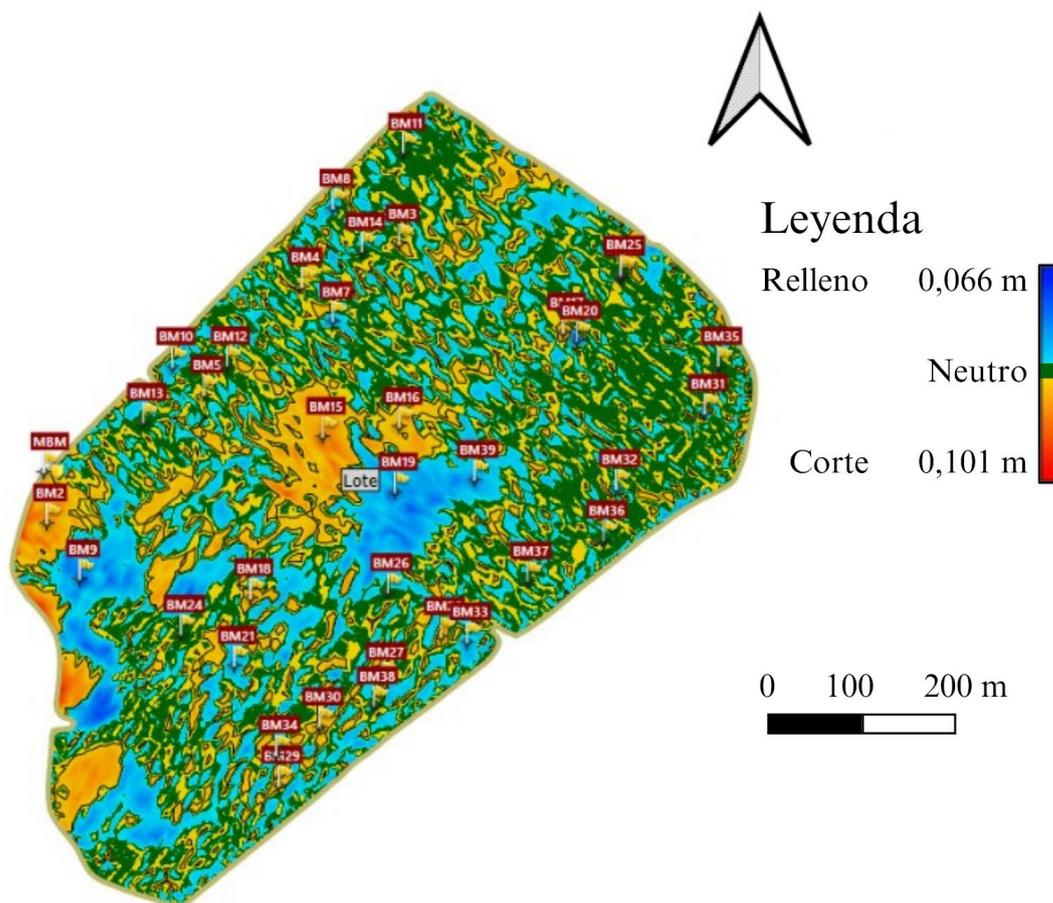
**Figura 12***Mapa de la parcela de estudio*

*Nota.* Mapa con coordenadas que ubican la chacra. Se muestran los puntos de muestreo y los límites de cada bloque. Además, puede verse el área bajo riego.

### 3.3 Manejo de la Geo-nivelación

Previo a realizar la Geo-nivelación se realizó un relevamiento altimétrico para establecer el plano altimétrico. Para realizar el relevamiento fue utilizado un vehículo al cual se le incorporó un controlador, el denominado Rover, marca Trimble, modelo TSC3, el cual es llevado a los puntos que se quiere geo-referenciar. Las mediciones se toman cada 5 m, y las pasadas se realizan cada 7 - 8 m entre ellas. Este controlador envía la información al receptor denominado Base, conectados mediante una radio; estos instrumentos fueron marca Trimble. Gracias al uso de estos es posible realizar las correcciones por GNSS - RTK.

Una vez que se obtuvo el relevamiento, se procedió a procesarlo con el software WM-Form, desarrollado por Trimble, el cual permite diseñar superficies agrícolas aprovechando la topografía existente y creando sistemas de riego y drenaje con una nivelación de alta precisión, optimizando la distribución del agua. Este programa permite realizar presupuestaciones de proyectos deseados en base a los parámetros ingresados como el sentido de la pendiente al igual que los valores máximos y mínimos deseados, el máximo corte y relleno permitidos, entre otras variables que determinan el proyecto resultante (ver Figura 13).

**Figura 13***Plano de corte/relleno del proyecto de Geo-nivelación*

*Nota.* Mapa de la chacra. Muestra el proyecto de Geo-nivelación en base a los resultados del GNSS-RTK.

La Geo-nivelación fue realizada el invierno previo a la siembra del cultivo. Se movieron en toda la chacra  $2.087,8 \text{ m}^3$ , en promedio  $76,6 \text{ m}^3/\text{ha}$ , con una relación resultante entre el corte/relleno de 1,2. La pendiente promedio resultante estimada es de 0,05%. Como puede verse en la Figura 13, los puntos de muestreo se encuentran ubicados en lugares donde se dio el máximo corte y relleno, esto fue realizado para poder analizar situaciones que fueran lo más contrastantes posibles a la hora de comparar los tratamientos de corte, neutro y relleno, y realizar el análisis estadístico. Al observar los sitios de muestreo pudo verse que el máximo corte fue de 10,1 cm, mientras que el máximo relleno fue de 6,6 cm.

Para la misma fue utilizado un palón K-TEC, movido por una tractor marca New Holland 9.505, el cual cuenta con 480 HP. Este tractor cuenta con un monitor Trimble, el cual realiza el control de la pala automáticamente mediante sistemas de control integrado manejando los componentes hidráulicos del tractor. Al monitor previamente se le cargó el proyecto diseñado para la chacra.

### 3.4 Manejo del Cultivo

El cultivo fue sembrado el 13 de octubre del 2023, a una densidad de 430 mil semillas/ha, una distancia entre filas de 0,38 m dando como resultado una población objetivo de 42,9 semillas/m<sup>2</sup>. Previo a la siembra fue realizada una fertilización de 132 kg/ha de Superconcentrado Nitrogenado y 139 kg/ha de Cloruro de Potasio.

#### 3.4.1 Material Utilizado

La variedad de soja utilizada en este cultivo fue Don Mario 60i62 (ver Anexo D), la cual según DONMARIO Semillas (2021) presenta una alta adaptación a diferentes ambientes y un potencial de producción elevado; este cultivar se caracteriza según Castro et al. (2021) en la *Evaluación Nacional de Cultivares* (2020), por presentar un ciclo medio, por su parte la ficha técnica del cultivar lo define como un ciclo corto. Tiene incorporada la tecnología INTACTA RR2 PRO (ver Anexo D) la que otorga elevados rendimientos, además de reducción de costos de producción y simplifica el manejo del cultivo.

#### 3.4.2 Manejo del Riego

El manejo del riego fue realizado por la empresa, este se basó en los principios propuestos por Allen et al. (2006).

Este cultivo fue regado con un Pivot central, donde se realizaron 6 riegos entre el 24 de enero, y el 22 de febrero, entre R4 y R6. La lámina aplicada fue de 16 mm en las primeras cuatro ocasiones, y de 15 mm en las siguientes dos.

Para el riego de este cultivo fue utilizado un Pivot de riego Valley, modelo 8120 (ver Anexo E), el cual está formado por 14 torres, distanciadas a 49,13 m, incluyendo un alero que extiende su longitud total a aproximadamente 700 m. Presenta en el extremo un cañón (Nelson R55 VT) con un alcance de 13 m. En total riega una superficie de 160 ha, aproximadamente. El caudal máximo del sistema es de 158 l/s. En función de la velocidad de avance puede aplicar una lámina de 6,27 mm/día (al 100% de velocidad), o 12,4 mm/día (al 50% de velocidad).

Según Valley (2024), los reguladores PSR-2 son utilizados para mantener presiones de 10 a 15 PSI en todo el largo. Estos mantienen una presión constante en los aspersores, evitando el consumo adicional de energía para compensar fluctuaciones de presión.

Las boquillas de riego son un componente importante en la búsqueda de una lámina de riego uniforme. Este Pivot cuenta con 270 aspersores con una combinación de boquillas adaptadas para las diferentes secciones del Pivot en función de la distancia a la torre central, al controlador de presión y el caudal requerido, aspectos que definen la presión en cada uno de los aspersores y por lo tanto definen la boquilla. En total se utilizan tres tipos de boquillas, donde dos de ellas fueron alternadas durante todo el largo del

pívot, la Senninger I-Wob2 y LDN, mientras que la tercera, que es la R55 VT, únicamente es la se encuentra en los últimos dos aspersores.

### **3.5 Evaluaciones Realizadas al Cultivo**

En este apartado se describen las evaluaciones realizadas con el objetivo de analizar el desarrollo y crecimiento del cultivo de soja a lo largo de su ciclo productivo, bajo el manejo anteriormente mencionado. Estas evaluaciones fueron la clave para identificar si existieron diferencias bajo los tratamientos realizados.

#### **3.5.1 Recuento de Plántulas**

Se realizó un recuento de plántulas a los 14 días de la siembra para determinar la densidad final de plantas obtenidas, con el fin de evaluar la implantación y sobrevivencia de las mismas.

El recuento consistió en ir a cada punto de evaluación y en un área de 5 m de radio se realizaron tres conteos de plántulas por metro lineal. El resultado obtenido en cada sitio es el promedio de los conteos. Además, se registró el estado fenológico del cultivo en base a la escala de desarrollo realizada por Fehr y Caviness (1977). Al encontrarse las plantas en distinto estado de desarrollo fue registrado el dominante.

Para el recuento de plántulas se incluyeron los valores de los 36 puntos de muestreo debido a que se cuantificó el 27 de octubre, hasta la fecha no se había realizado riego.

#### **3.5.2 Biomasa**

Con la finalidad de evaluar el efecto de la Geo-nivelación sobre el crecimiento del cultivo se midió la producción de materia seca (MS) en tres períodos fenológicos, de inicio a fin de floración (R1-R2), de inicio a fin de formación de vainas (R3-R4) y en inicio de formación de grano (R5).

Se realizó la obtención de las muestras en los puntos de muestreo a campo, y posteriormente se secaron en el laboratorio.

Para obtener las muestras se realizó en cada punto de muestreo, el conteo de un metro lineal de plantas seguido del corte al ras del suelo de las mismas. Estas muestras fueron pesadas en fresco inmediatamente, y posterior a esto guardadas en bolsas de papel para su posterior procesamiento.

El laboratorio cuenta con una estufa Memmert, modelo UN30m (ver Anexo F), la cual según Memmert (2024) puede ser utilizada para calentar y mantener caliente muestras dentro de envoltorios tales como las bolsas de papel en las que se guardaron las muestras. Al llegar al laboratorio las muestras fueron pesadas para determinando así el peso fresco (PF). El secado constó de la introducción de las muestras en la estufa a 60 °C

y con la ventilación al 60%, hasta que se logró peso constante. Posterior al secado en cada estado de desarrollo fueron retiradas varias muestras, pesadas nuevamente e introducidas en la estufa por una hora más para constatar que el peso logrado a las 24 hs fuera constante. En los tres momentos de muestreo se determinó que con 24 hs de secado se lograba peso constante. Una vez retiradas las muestras de la estufa se pesaron nuevamente para determinar el peso seco (PS).

Este procesamiento fue realizado para evaluar el PS de las muestras, y así poder realizar una evaluación del crecimiento del cultivo en términos de biomasa. Con los datos de PF y PS también fue posible determinar el contenido de humedad que presentaba el cultivo en cada punto de muestreo.

Si bien se extrajeron y procesaron muestras de los 36 puntos de muestreo para todos los estados de desarrollo, para R5 no se incluyeron las muestras que se encontraban fuera del área bajo riego en el análisis estadístico.

### **3.5.3 Estimación Rendimiento**

Se contabilizaron los componentes del rendimiento para definir el número de granos promedio (NG) y el peso promedio de 1000 granos promedio (PMG), de forma tal que se pueda realizar una estimación del rendimiento (ver Figura 7). Para realizarlo en cada punto de muestreo se procedió a cortar todas las plantas en dos metros lineales para poder estimar el número de Plantas/m<sup>2</sup>. Posterior a esto fueron llevadas al laboratorio para su procesamiento.

El procesamiento consistió en realizar el conteo del número de nudos por planta (Nudos/Planta), vainas por nudo (Vainas/Nudo), vainas por planta (Vaina/Planta) y granos por vaina (Granos/Vaina); con estos valores fue posible estimar el número de granos por metro cuadrado (Granos/m<sup>2</sup>).

Se hicieron grupos cada 1000 granos y fueron secados hasta alcanzar 14% de humedad. Esto se realiza con el fin de conocer el PMG. El proceso de secado se realizó en la misma estufa anteriormente mencionada (ver Anexo F).

Debido a la influencia del riego en el rendimiento del cultivo, no se incluyeron las muestras que se encontraban fuera del área bajo del mismo en el análisis estadístico.

#### **3.5.3.1 Mapa de Rendimiento Estimado**

En base al mapa de rendimiento de la cosechadora, se realizó un mapa para interpretar el comportamiento del rendimiento, ello fue posible mediante el uso de un software de sistema de información geográfica (SIG), específicamente QGIS. Los datos de rendimiento fueron recolectados por la cosechadora durante la cosecha, generando puntos georreferenciados en el campo. A estos datos se les realizó una limpieza de datos con la ayuda de herramientas estadísticas, en este caso box-plot. A partir de dichos datos, se generó un mapa de rendimiento, donde el valor de cada punto fue ajustado utilizando

una técnica de interpolación basada en los puntos circundantes dentro de un radio de 5 metros. Este enfoque permitió amortiguar las posibles variaciones puntuales y generar una representación más continua y precisa del rendimiento en toda la superficie evaluada.

### **3.6 Evaluaciones Realizadas al Suelo**

Se buscó presentar en este apartado cuáles fueron las evaluaciones realizadas al suelo para poder determinar sus características, además se realizó un análisis de las propiedades físicas y químicas una vez finalizada la Geo-nivelación. Es así que se buscó caracterizar el suelo y su capacidad para llevar adelante el cultivo de soja.

#### **3.6.1 Descripción de Suelo**

En la zona de estudio fueron realizadas dos calicatas. La primera, dentro de la chacra con el cultivo en crecimiento, hecha con una pala de mano, hasta alcanzar una profundidad de 0,4 m. El contenido de arcilla del suelo no permitió seguir avanzando, por lo que se optó por hacer una segunda calicata. Esta fue realizada en las inmediaciones de la chacra con una excavadora donde se logró superar una profundidad de 0,9 m. Al realizar una comparación entre ambas calicatas analizando los dos perfiles, fue posible identificar que las características del suelo eran las mismas.

#### **3.6.2 Propiedades Físicas del Suelo**

Para determinar cómo se vieron afectadas las propiedades físicas del suelo al realizar Geo-nivelación, se evaluó infiltración y la densidad aparente del suelo en las distintas zonas de la chacra, comparando los tratamientos.

##### **3.6.2.1 Velocidad de Infiltración del Suelo.**

Para medir la velocidad de infiltración en la chacra se utilizó el método del doble anillo infiltrómetro (ver Figura 14). Esta técnica permitió cuantificar la tasa de infiltración en función del tiempo, como mencionan García Petillo (2012). Este método sencillo consiste de dos anillos, uno menor, de 0,29 m y otro mayor de 0,44 m, enterrados aproximadamente a una profundidad de 0,20 m; es importante que estos se encuentren nivelados y que se eviten sitios que puedan afectar la evaluación, tales como sitios con alto contenido de humedad en el suelo o que presente grietas por donde el agua pueda escapar fácilmente.

**Figura 14**  
*Infiltrómetro de doble anillo*



El anillo menor se ubicó centrado dentro del mayor. Al anillo menor primero se le colocó en el fondo un nylon con el fin de evitar en primera instancia la infiltración. Posterior a esto se procedió a llenar ambos anillos de agua. El anillo menor cuenta con una regla que en la punta tiene una boya, la cual flota al nivel del agua para que sea posible cuantificar la infiltración mediante el movimiento vertical del agua. El anillo mayor se llena de agua con el objetivo de que la infiltración medida en el anillo interno solamente sea la que ocurre en sentido vertical.

Para dar inicio a esta evaluación se retiró el nylon. Antes de comenzar se registró el valor inicial en de la regla, y una vez que comenzó se realizaron registros periódicos de la evolución del movimiento vertical de la regla, el cual corresponde a la infiltración.

La evaluación de infiltración fue medida en tres puntos de la chacra los cuales representaron los tres bloques propuestos. Esta variable fue medida el 23 de octubre, previo al riego del cultivo.

### **3.6.2.2 Densidad Aparente.**

Para realizar la determinación de la densidad aparente (DAp) se realizaron muestreos de suelo con un calador de volumen conocido en los puntos de evaluación.

Las muestras se tomaron con un taladro de muestras imperturbadas, compuesto por un cabezal de acero inoxidable el cual dentro contenía tres anillos para facilitar la extracción de la muestra. El diámetro total de la muestra es de 0,054 m, y un largo de

0,101 m. Los anillos utilizados fueron dos de 0,01 m de alto y uno de 0,03 m de alto. El cabezal a su vez presentaba un borde en forma de filo de 0,007 m de alto, este borde es para evitar que la muestra dentro del taladro sufra compactación y altere la DAp; y un fondo de 0,044 m (ver Figura 15). Cada muestra tomada fue de 231,3 cm<sup>3</sup>.

**Figura 15**  
*Piezas del calador*



*Nota.* A la izquierda se presenta el cabezal del calador, al centro los anillos y a la derecha el calador

En cada punto de muestreo se tomaron dos muestras, cada una formada por dos muestreos. De esta forma se definió que de 0 a 0,182 m corresponde a la muestra A, y de 0,182 a 0,36 m la muestra B.

Una vez obtenidas, fueron llevadas al laboratorio para ser procesadas, puestas en bandejas de aluminio secadas en la estufa (ver Anexo F) a una temperatura de 105°C y 60% de ventilación, hasta alcanzar peso constante. Fueron retiradas algunas muestras a las 48 hs, pesarlas y se dejaron 1 hora más en la estufa para comprobar que este es tiempo suficiente para lograr peso constante. Una vez retiradas y pesadas las muestras se procedió al cálculo de la DAp (Ecuación 10).

### **Ecuación 12**

*Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)*

$$D_{Ap} \text{ (g cm}^3\text{)} = \text{masa suelo seco/volumen total del suelo}$$

La medición de la DAp fue realizada posterior al primer riego, por lo que se considera que los puntos dentro del área de riego son influenciados por el mismo. Es por esto que para realizar el análisis estadístico se dejaron fuera los 6 puntos que se encuentran afuera del área del Pivot.

### **3.6.3 *Propiedades Químicas del Suelo***

A la hora de evaluar las propiedades químicas en la chacra posterior a la Geonivelación se realizó análisis químico de suelo en los puntos de muestreo, y se enviaron analizar en el Laboratorio Analítico Agro Industrial (LAAI). Las variables analizadas en cada punto de muestreo fueron la materia orgánica (MO), el porcentaje de saturación de bases (%SB), capacidad de intercambio catiónico (CIC), sodio (Na), potasio intercambiable (K inter), magnesio (Mg), calcio (Ca), fósforo (P) y pH.

En total se tomaron 36 muestras, cada una compuesta por 8 submuestras tomados a 0,15 m de profundidad. Cada submuestra fue tomada en un radio de aproximadamente 2 m.

El muestreo de suelos fue realizado días antes de la siembra del cultivo y previo a la fertilización basal del cultivo, por lo que no hay influencia del riego en los puntos de muestreo.

## 4 Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación, enfocándose en las variables evaluadas. Se considera esencial un análisis del sitio, del tipo de suelo y de las condiciones climáticas que permitirá interpretar los resultados y comprender los efectos de la Geo-nivelación en las llanuras del este de Uruguay. A través de esta investigación, se busca explicar el rendimiento obtenido en función de las variables consideradas.

### 4.1 Caracterización del Sitio

La historia puntual de la chacra se desconoce, pero la región entera tuvo un pasado netamente arrocero - ganadero. Posterior a esto el establecimiento se dedicó a la lechería, y en los últimos años se destinó a la agricultura de secano.

Esta chacra se encuentra en un área con gran capacidad de manejo de los recursos hídricos, ya que por su historial arrocero la región presenta varios ramales de canales de riego, al igual que numerosos desagües que facilitan la rápida evacuación del agua (ver Anexo G). La misma se encuentra en una región extensa de llanuras, la cual presenta un meso y microrelieve que provoca limitantes para la producción agrícola de secano, especialmente por el anegamiento de suelos característico. En la búsqueda de eliminar estas limitantes es que se derivó en nuevas técnicas, como la Geo-nivelación.

#### 4.1.1 Resultados de las Evaluaciones al Suelo

Se determinó que la chacra se encuentra dentro de las denominadas llanuras del este, ya que presenta una pendiente inferior al 1%, lo que permite la ocurrencia de anegamiento. Los grupos CONEAT encontrados en la chacra son el 3.51 y 3.54. Pudo confirmarse la presencia de meso y micro relieve, lo que genera problemas de drenaje y fertilidad baja. Se comprobó además que estos suelos se encuentran dentro de la unidad de suelo Alférez al realizar las calicatas y evaluar el perfil (ver Figura 16). Se confirmó la presencia de gran cantidad de arcillas las cuales no lograban su grado máximo de lixiviación, al igual que la carencia de un horizonte Álbico. Esta información se alinea con lo mencionado por los autores Altamirano et al. (1976), MGAP (2020), Saravia (2005), Terra (2013), Thomas y Lange (2014), Parfitt et al. (2014).

**Figura 16**  
*Perfil de suelo*



Fue definido el largo de los horizontes en base al cambio de texturas y colores en sentido vertical, el cambio ocurre de forma medianamente abrupta con un largo de transición no mayor a los 0,10 m, es por esto que no se definieron horizontes transicionales (ver Tabla 2).

El horizonte A se encontraba perturbado luego de muchos años de agricultura, de textura franco limosa, pardo oscuro a grisáceo; pudo observarse la presencia de algunas

concreciones de hierro en baja proporción por lo que no se consideró relevante. Por debajo de este se encuentra el horizonte Bt1, el cual es franco arcillo limoso a franco arcilloso con películas de arcilla traslocadas, y negro oscuro. Seguido aparece un Bt2, franco arcilloso a arcilloso, negro grisáceo, el cual se diferenciaba por presentar aún mayor proporción de arcilla que el anterior. Por último, fue definido un horizonte Ck, franco arcillo limoso, pardo, con gran presencia de carbonato de calcio.

**Tabla 2**

*Profundidad de los horizontes*

<u>Horizonte</u>	<u>Profundidad (m)</u>	<u>Espesor (m)</u>
A	0 - 0,10	0,10
Bt1	0,10 - 0,32	0,22
Bt2	0,32 - 0,59	0,27
Ck	0,59 - +	

En base a esto y a los análisis de suelo presentados (ver Tabla 3), se definió un horizonte Subéutrico porque la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en promedio estaba por encima de 20 meq./100 g, y la saturación en bases (SB) era superior al 60%. Estos análisis definen además un horizonte Melánico debido a que la materia orgánica (MO) fue superior al 2%. En base a esto y a las características anteriormente mencionadas, se definió que el tipo de suelo predominante en la chacra y sus inmediaciones eran los Planosoles Subéutricos Melánicos.

**Tabla 3**

*Resultados promedio del análisis de suelo*

<u>Evaluación</u>	<u>MO</u>	<u>CIC</u>	<u>SB</u>
Promedio	3,46	21,04	76,51

*Nota.* Materia Orgánica (MO) medida como porcentaje. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) medido como meq/100 g. Saturación de Bases medido como porcentaje.

#### **4.1.2 Caracterización Climática**

Los datos meteorológicos para esta evaluación fueron proporcionados por Galfarm S.A., ya que cuenta con una estación meteorológica.

Se registraron entre el 13 de octubre de 2023 (siembra) y el 11 de abril del 2024 (madurez fisiológica), una temperatura promedio de 27,8 °C (ver Anexo H). Pudo concluirse que el cultivo se desarrolló en un rango de temperaturas cercano al óptimo en base a lo que comprobaron autores como Farias et al. (2007), Kantolic et al. (2004), Kantolic (2008) y Wani et al. (2012); por lo que este factor no fue limitante.

Por su parte, se registró en el ciclo de este cultivo un total de precipitaciones acumuladas de 576,7 mm. Las mismas no se distribuyeron de forma homogénea lo que pudo afectar el normal desarrollo del cultivo (ver Anexo I).

La distribución fue de 282,1 mm en periodo vegetativo, y 294,6 mm en estado reproductivo. Se reportó que 193 mm fueron entre R7 y R8. Solamente llovieron 101,6 mm desde R1 a R6 el cual, como fue definido por Giménez (2014), es el periodo donde el rendimiento se ve más afectado por el déficit hídrico.

#### **4.1.3 Riego Aplicado**

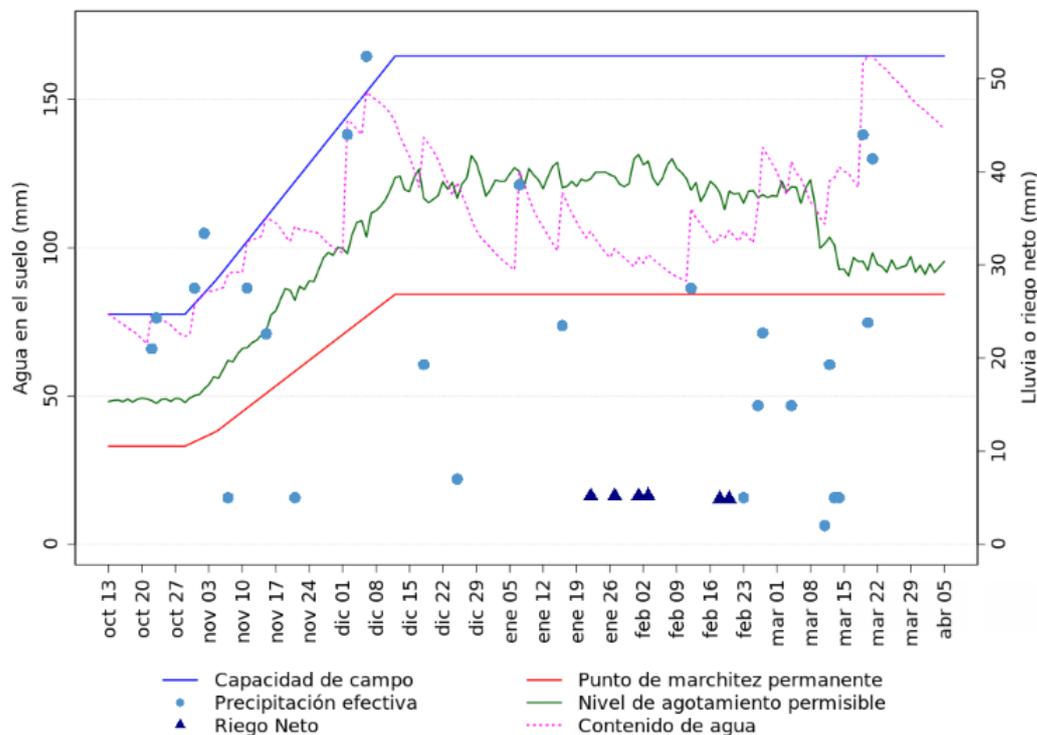
Durante todo el ciclo del cultivo se realizaron seis riegos, efectuados entre R4 y R6. En cuatro de estas ocasiones, se aplicó una lámina neta de 16 mm, mientras que en las dos últimas se redujo a 15 mm (ver Anexo J).

#### **4.1.4 Balance Hídrico**

Como puede verse (ver Figura 17), el contenido de agua disponible para el desarrollo del cultivo se encontró por debajo del nivel de agotamiento permisible para el desarrollo sin limitantes desde el 25 de diciembre (en torno al inicio de R1), hasta el 23 de febrero (fin de R6), lo que significa que cultivo transitó todo el periodo crítico bajo déficit hídrico. En base a lo mencionado por Giménez (2014), esto implica una pérdida del rendimiento final, la cual se explica por la disminución de todos los componentes de rendimiento.

Al observar el comportamiento de  $ET_a/ET_c$  pudo verse cómo a lo largo del ciclo del cultivo este se encuentra gran parte del tiempo sin que el cultivo pueda realizar ET sin limitantes hídricas. Al observar la fecha en la que comienza el déficit puede verse que es desde inicios a fines del período crítico, Giménez (2014), establece que por estas razones el cultivo puede presentar una pérdida en el rendimiento final de hasta el 50% del potencial. Por otro lado, el comportamiento de  $ET_{am}/ET_{cm}$  comienza a descender a partir de que el cultivo comienza el déficit hídrico y luego tiende a subir, pero puede verse que el comportamiento de este indicador refleja el déficit a lo largo de todo el ciclo del cultivo (ver Anexo K).

**Figura 17**  
*Balace hidrico GESIR*



#### 4.1.5 Propiedades Físicas

Se presentan los resultados obtenidos de las evaluaciones realizadas al suelo para determinar sus propiedades físicas con el fin de evaluar como la Geo-nivelación realizada afectó las mismas.

##### 4.1.5.1 Densidad Aparente.

En los análisis de densidad aparente (Dap) para las muestras A y B, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (ver Tabla 4). El coeficiente de variación fue inferior a 10% en ambos casos sugiriendo una variabilidad moderada. Esto explica porque los diferentes tratamientos no generaron diferencias significativas en la densidad aparente.

**Tabla 4**

*Densidad aparente promedio (g/cm<sup>3</sup>)*

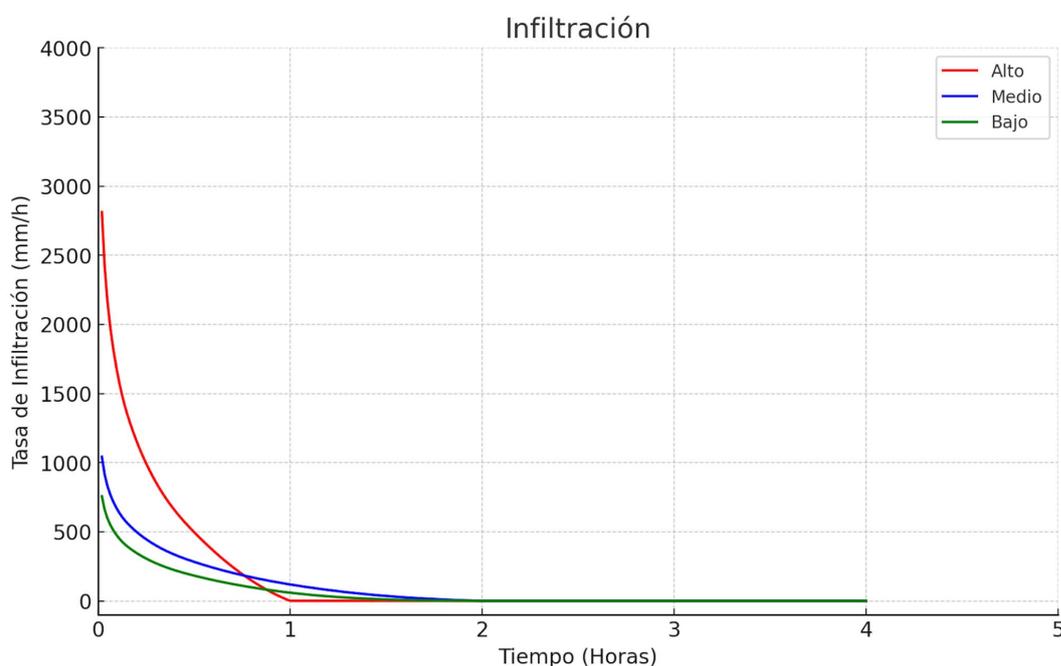
Muestra	Dap (g/cm <sup>3</sup> )
0-0,18 m	0,99
0,18 - 0,36 m	1,11

#### 4.1.5.2 Infiltración.

Los resultados mostraron que todos los bloques presentaron una tasa de infiltración con un comportamiento logarítmico negativo. Las tasas iniciales fueron muy altas en los primeros minutos, pero disminuyeron a menos de 0,1 mm/h después de dos horas de evaluación (ver Figura 18), lo cual es esperado para estos suelos.

#### Figura 18

Tasa de infiltración en los bloques



*Nota.* Los resultados obtenidos representan el comportamiento de la tasa de infiltración en cada uno de los bloques.

Según autores como Altamirano et al. (1976), Bueno, Roel et al. (2020), Bueno, de Campos et al. (2020) y Bueno (2022) estos suelos se caracterizan por tener horizontes superficiales y subsuperficiales con altos contenidos de arcilla, lo que retiene el agua en la superficie y retrasa la infiltración.

Esta propiedad, junto con el meso y microrelieve del terreno, contribuye al anegamiento, lo que representa una limitación para la producción agrícola. Por ello, surge la necesidad de implementar técnicas como la Geo-nivelación para mitigar estos problemas, mejorando los drenajes en el terreno.

#### 4.1.6 Propiedades químicas

En base a los análisis químicos realizados, no se encontraron diferencias significativas en ninguna de las propiedades evaluadas una vez realizada la Geo-nivelación (ver Tabla 5). El análisis de varianza mostró que bajo las condiciones de

estudio esta práctica no tuvo un impacto en la composición química del suelo para los diferentes tratamientos. Los parámetros evaluados no fueron alterados sustancialmente.

**Tabla 5**

*Promedio de las propiedades químicas del suelo*

	<b>Corte</b>	<b>Neutro</b>	<b>Relleno</b>	<b>Promedio</b>	<b>Significancia</b>
<b>pH</b>	6,14	5,78	5,93	5,95	NS
<b>%MO</b>	3,35	3,56	3,48	3,46	NS
<b>CIC</b>	21,83	20,81	20,48	21,04	NS
<b>P</b>	16,83	9,58	13,00	13,14	NS
<b>K int</b>	0,31	0,31	0,31	0,31	NS
<b>Na</b>	1,70	0,56	0,92	1,06	NS
<b>Mg</b>	5,44	4,93	5,08	5,15	NS
<b>Ca</b>	9,80	9,83	9,36	9,66	NS
<b>%SB</b>	78,18	74,92	76,43	76,51	NS

*Nota.* Potencial contenido de hidrógeno (pH), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), fósforo (P), potasio intercambiable (K int), sodio (Na), magnesio (Mg), calcio (Ca) y saturación de bases (%SB). NS indica que las diferencias entre tratamientos no son significativas ( $\alpha = 0,10$ ).

Lo observado en esta evaluación es contrario a lo que afirman autores como Abreu Jr. et al. (2003), Aquino et al. (2015), Öztekin (2013), Bueno (2022), Parfitt et al. (2013), Winkler (2018); ya que todos estos autores establecen que posterior a la nivelación se observan cambios en las propiedades químicas del suelo, y que las zonas de relleno se caracterizan por presentar mayor fertilidad. Estos autores se basan en un experimento en el que se movieron más de 500 m<sup>3</sup> de suelo para realizar la sistematización, esto puede justificar la diferencia.

Por otro lado, Aquino et al. (2015), también establece que la profundidad de corte provoca un efecto en la fertilidad del suelo, en base a esto se establece que la poca profundidad de corte y relleno en esta evaluación son la causa de que no exista diferencias entre los tratamientos.

## **4.2 Resultados de las Evaluaciones al Cultivo**

Este apartado muestra los resultados obtenidos de las evaluaciones realizadas al cultivo, con el fin de evaluar el efecto de la Geo-nivelación realizada sobre el crecimiento y desarrollo del cultivo bajo el manejo mencionado.

### **4.2.1 Recuento de Plántulas**

El conteo de plántulas se llevó a cabo el 27 de octubre de 2023, a los 14 días de la siembra. Cabe mencionar que entre el 22 y 23 de octubre de 2023, durante la fase de emergencia del cultivo, se registraron precipitaciones acumuladas de 45 mm, lo que

provocó encharcamiento en algunas zonas (ver Anexo L). Aunque el terreno fue sometido a un proceso de Geo-nivelación precisamente para mitigar los problemas de drenaje, la acumulación de agua sugiere que la nivelación no logró evitar completamente este fenómeno.

A pesar de estas condiciones de anegamiento el recuento de plántulas realizado no mostró diferencias significativas frente a los tratamientos (ver Tabla 6). Al comparar estos resultados con la densidad de siembra objetivo (42,9 semillas/m<sup>2</sup>), la tasa de sobrevivencia alcanzó el 38,85%.

En base a los resultados obtenidos, puede suponerse que se logró atenuar el anegamiento, mejorando las condiciones de emergencia, ya que no se observaron diferencias significativas.

A pesar de esto el coeficiente de variación para el relleno fue de 63,23% lo que indica una alta variabilidad entre puntos de muestreo. Esto sugiere que, aunque no se alcanzó una Geo-nivelación completa, ya que en algunos sitios hubo mayor pérdida de plántulas, en algunos puntos de relleno si se mejoraron las condiciones de la chacra.

**Tabla 6**

*Población promedio obtenida*

<u>Evaluación</u>	<u>Corte</u>	<u>Neutro</u>	<u>Relleno</u>
Plántulas/m <sup>2</sup>	16,37a	16,80a	16,55a

*Nota.* Las diferentes letras indican diferencias significativas, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,10$ .

#### **4.2.2 Biomasa**

En el análisis de la biomasa realizado en las diferentes etapas del experimento, se puede observar que los tratamientos aplicados no presentan diferencias significativas en la producción de materia seca para las etapas evaluadas (ver Tabla 7). Se analizó la posible existencia de una regresión que se ajuste a los resultados obtenidos (ver Anexo M), sin embargo, la dispersión tiene un ajuste ( $R^2$ ) menor a 0,01. Esto implica que no existe una tendencia marcada entre la cantidad de biomasa y los tratamientos para ninguna de las etapas.

**Tabla 7**

*Producción de materia seca promedio por etapa fenológica y CV (%)*

Etapa	Corte	Neutro	Relleno	CV (%)
R1 - R2	2.162 a	1.967 a	2.178 a	61,40
R3 - R4	4.374 a	3926 a	3.019 a	75,05
R5	7.358 a	8.936 a	6.403 a	57,30

*Nota.* Resultados en kgMS/ha. Las diferentes letras indican diferencias significativas, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,10$ .

#### **4.2.3 Componentes de Rendimiento**

Los únicos componentes de rendimiento que no se vieron afectados por los tratamientos fueron Granos/Vaina y Granos/m<sup>2</sup>. Precisamente, el Relleno presentó diferencias con el Corte y el Neutro. El tratamiento de Relleno presentó un aumento para la mayoría de los componentes, y una disminución para Plantas/m<sup>2</sup>. Esto se explica por la ocurrencia de períodos de anegamiento debido a problemas de drenaje que no fueron solucionados con la Geo-nivelación en algunos puntos de muestreo, lo que implicó una pérdida de plantas dejando puntos con cero plantas. Al evaluar Plantas/m<sup>2</sup> solamente para el Relleno se obtuvo un coeficiente de variación de 91,71%, esto implica una variabilidad en el conteo de plantas.

El aumento para los demás componentes en sitios de Relleno, se explica por la menor competencia entre plantas, y por la capacidad plástica de la soja la cual logra un aumento en los componentes de rendimiento (ver Tabla 8).

La compensación de los componentes de rendimiento en este caso pudo compensar Granos/m<sup>2</sup>, no existiendo diferencias significativas entre los tratamientos. Tampoco existieron diferencias para Granos/Vaina.

Es importante resaltar que tanto Plantas/m<sup>2</sup> como Granos/m<sup>2</sup> sus respectivos análisis consideraron aquellos puntos de muestreo donde fueron registradas cero plantas. Para el caso de los demás parámetros fueron excluidos los puntos donde se registraron cero plantas, para evitar la doble cuantificación de la pérdida total de los componentes. El Relleno compensó la disminución en Plantas/m<sup>2</sup> con mayor cantidad de Granos/Planta, explicado por un aumento en Vainas/Planta. Para Nudos/Plantas y Vainas/Nudo se vio que el Relleno presentó el mayor promedio.

**Tabla 8***Promedio de los componentes de rendimiento*

<u>Evaluaciones</u>	<u>Corte</u>	<u>Neutro</u>	<u>Relleno</u>	<u>CV (%)</u>
Nudos/Planta	49,16 b	51,43 ab	61,26 a	21,01
Vainas/Nudo	1,82 ab	1,78 b	1,90 a	5,77
Vainas/Planta	90,24 b	90,78 b	117,47 a	23,78
Granos/Vaina	2,15 a	2,21 a	2,07 a	10,92
Granos/Planta	194,39 b	200,04 b	266,56 a	25,29
Plantas/m <sup>2</sup>	18,77 a	18,81 a	8,66 b	56,64
Granos/m <sup>2</sup>	3.454 a	3.651 a	2.250 a	56,75

*Nota.* Las diferentes letras indican diferencias significativas, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,10$ . Se excluyen puntos de muestreo donde el número de plantas fue cero.

A su vez al observar las regresiones de cada uno de los componentes en base a la profundidad de corte o cantidad de relleno presentaron un bajo grado de ajuste siendo todos menores a 0,5 (ver Anexo N).

Al evaluarse el peso de mil granos (PMG) obtenido a partir del muestreo fue de 0,151 kg lo que coincide con la ficha técnica para esta variedad (ver Anexo D).

Fue posible estimar los rendimientos promedio en base a sus componentes para los diferentes tratamientos, no existiendo diferencias significativas entre los mismos (ver Tabla 9).

**Tabla 9***Rendimiento estimado promedio*

<u>Tratamiento</u>	<u>Corte</u>	<u>Neutro</u>	<u>Relleno</u>	<u>CV%</u>
Rendimiento	5.217 a	5.513 a	3.397 a	56,75

*Nota.* Resultados en kg/ha. En esta tabla se incluyen valores donde el número de plantas/m<sup>2</sup> fue 0. Las diferentes letras indican diferencias significativas, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,10$ .

Por otro lado, al excluir los puntos donde a causa del anegamiento el número de Plantas/m<sup>2</sup> fue cero, y volver a estimar el rendimiento promedio en base a sus componentes, pudo observarse que disminuyó la variabilidad de los datos (ver Tabla 10), y que para todos los tratamientos el rendimiento estimado fue superior a 5.500 kg/ha. Esto refleja como en aquellos sitios donde la Geo-nivelación pudo mitigar el anegamiento, los resultados fueron ampliamente mejores.

**Tabla 10***Rendimiento estimado promedio*

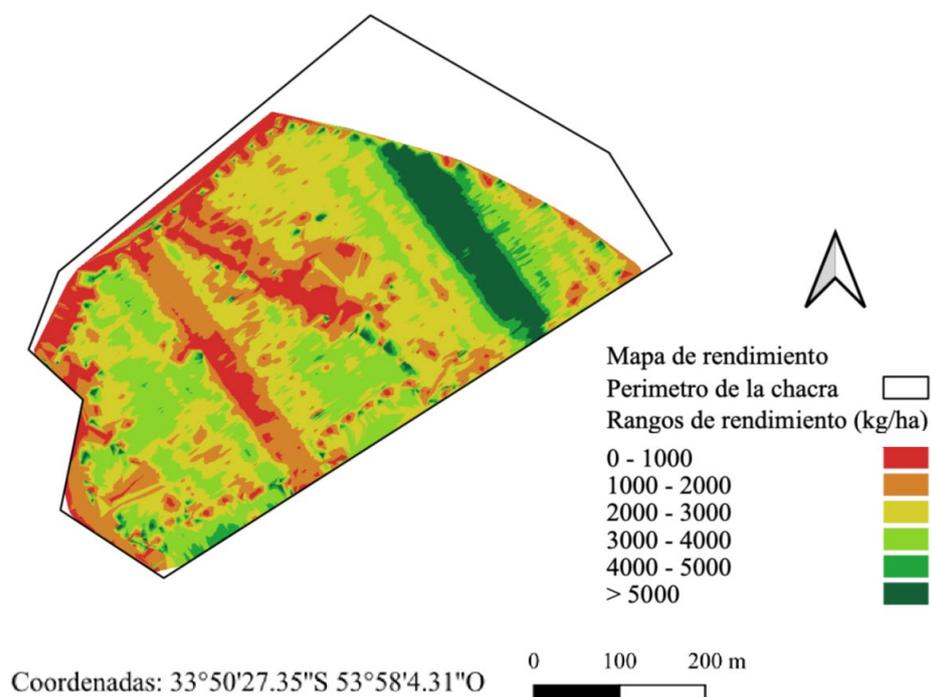
Evaluación	Corte	Neutro	Relleno	CV (%)
Rendimiento	5.806a	6.182a	5,791a	16,49

*Nota.* Resultados en kg/ha. En esta tabla no se incluyen valores cero. Las diferentes letras indican diferencias significativas, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,10$ .

#### 4.2.4 Rendimiento

Se elaboró un mapa de rendimiento en base al monitor de la cosechadora (ver Figura 19), donde puede verse gran heterogeneidad dentro de la chacra. El rendimiento promedio del cultivo fue de 2.606 kg/ha. Este rendimiento es similar al que puede lograrse en secano en años donde se registran precipitaciones normales, siendo en torno a 4.500 kg/ha el rendimiento promedio para soja regada en años normales.

El rendimiento obtenido no se explica por el balance hídrico, el cual debería ser mucho menor teniendo en cuenta el déficit hídrico. En base al balance hídrico realizado y a los resultados obtenidos es evidente que el cultivo estuvo obteniendo agua de algún sitio. Una posible explicación es que la profundidad de raíz fue mayor a 0,40 m, esto difícilmente sea posible debido a lo arcilloso de los horizontes subsuperficiales; otra opción es que la chacra cuente con una napa freática la cual esté suministrando agua al cultivo. Es posible que la misma se alimente de la infiltración que ocurre en los canales de riego que se encuentran en las inmediaciones de la chacra (ver Anexo G).

**Figura 19***Mapa de rendimiento*

Al realizarse una comparación pudo verse que existen diferencias significativas entre el rendimiento obtenido en cada uno de los tratamientos (ver Tabla 11). Esto se explica por lo poco representativos que pueden ser estos datos a que se obtuvieron partir del monitor de la cosechadora.

**Tabla 11**

*Rendimiento promedio por tratamiento*

Tratamiento	Corte	Neutro	Relleno	CV%
Rendimiento	2.046 b	3.382 a	2.338 b	36,72

*Nota.* Rendimiento en kg/ha. Las diferentes letras indican diferencias significativas, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0,10$ .

El monitor de cosecha homogeniza la chacra debido a que la amplitud del cabezal de la cosechadora, en general supera el reducido tamaño de los parches de tratamiento, como pudo verse en la Figura 13. De igual forma que en aquellos puntos donde previamente se registró que no había plantas, el rendimiento debe ser cero, y por su parte los resultados del monitor de cosecha registraron valores superiores, lo que no concuerda con lo anteriormente visto. Esto disminuye el coeficiente de variación, alterando el análisis estadístico.

Fue considerado que estos datos están sesgados ya que para esta chacra en particular donde los parches eran tan reducidos, los rendimientos fueron sub o sobreestimados por la cosechadora.

## 5 Conclusiones

La Geo-nivelación con un movimiento de suelo de 76,6 m<sup>3</sup>/ha y una relación de corte/relleno de 1,2 no generó un impacto significativo en las propiedades físicas y químicas evaluadas.

Para esta chacra, no se encontraron diferencias significativas al evaluar emergencia de plántulas, la producción de biomasa para las diferentes etapas fenológicas del cultivo y el rendimiento estimado a campo. Para el Relleno hubo una disminución en el número de Plantas/m<sup>2</sup>, acompañado de un aumento en los demás componentes de rendimiento, explicado por la plasticidad del cultivo. Se observó un aumento en el coeficiente de variación para este tratamiento, lo que se explica porque a pesar de haber realizado la Geo-nivelación no pudo evitarse completamente el anegamiento. Esto provocó la muerte de las plantas en algunos puntos de muestreo, aumentando así la variabilidad de los resultados. Al excluirse dichos puntos de muestreo pudo verse una mejora del rendimiento en el Relleno.

Al realizar una evaluación del balance hídrico en el ciclo del cultivo, se observó que el riego aplicado no logró satisfacer las necesidades hídricas del cultivo. De acuerdo al balance, durante todo el periodo crítico del cultivo, el contenido de agua en el suelo estuvo por debajo del nivel de agotamiento permisible para que no haya estrés hídrico, y en más de una ocasión estuvo cerca de alcanzar el PMP. Un muestreo de humedad gravimétrica durante el período crítico del cultivo hubiera sido de utilidad para determinar el contenido real de humedad en el suelo y corroborar las simulaciones del balance hídrico.

El correcto uso de tecnologías de geo-nivelación ajustadas al manejo óptimo de la chacra mejora las condiciones intrínsecas de las Llanuras del Este para la producción de soja y tiene un efecto directo en el rendimiento. Para este proyecto los niveles de Corte y Relleno fueron bajos en comparación con otras evaluaciones realizadas, lo que explica que no haya un efecto en las propiedades del suelo y los rendimientos obtenidos, aunque sí provocó un aumento en la variabilidad del cultivo, resultando en una chacra poco homogénea.

Es recomendable realizar la Geo-nivelación el verano previo a la siembra del cultivo, de manera de darle tiempo al suelo para asentarse y realizar un segundo relevamiento que permita evaluar como fue el resultado de la Geo-nivelación.

## 6 Bibliografía

- Abreu Jr, C., Muraoka, T., & Lavorante, A. F. (2003). Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. *Scientia Agricola*, 60(2), 337-343.  
<https://doi.org/10.1590/s0103-90162003000200019>
- Achkar, M., Domínguez, A., & Pesce, F. (2012). *Cuenca de la Laguna Merín*. Redes.  
<https://www.redes.org.uy/2012/12/18/cuenca-de-la-laguna-merin-uruguay-aportes-para-la-discusion-ciudadana/>
- Allen, R., Pereira, L., Reas, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. FAO. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Altamirano, A., da Silva, H., Durán, A., Echevarría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Vol. 1. Clasificación de suelos del Uruguay*. MAP.  
[https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/carta\\_de\\_reconocimiento\\_de\\_suelos\\_Tomo\\_I.pdf](https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/carta_de_reconocimiento_de_suelos_Tomo_I.pdf)
- Aquino, L. S., Timm, L. C., Reichardt, K., Barbosa, E. P., Parfitt, J. M. B., Nebel, A. L. C., & Penning, L. H. (2015). State-space approach to evaluate effects of land levelling on the spatial relationships of soil properties of a lowland area. *Soil and Tillage Research*, 145(1), 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.007>
- Arana, S., & Sebben, G. (2023). El riego en los sistemas productivos puede cambiar la matriz productiva en Uruguay. *Revista Verde*, 15(109).  
<https://revistaverde.com.uy/agricultura/el-riego-puede-cambiar-la-matriz-productiva/>
- Bueno, M. V. (2022). *Sistematização com declividade variada como ferramenta para diversificação de sistemas produtivos em terras baixas* [Disertación doctoral, Universidade Federal de Pelotas]. Guaiaca.  
<http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/8554>
- Bueno, M. V., de Campos, A. D., da Silva, J. T., Massey, J., Timm, L. C., Faria, L. C., & Parfitt, J. M. (2020). Improving the drainage and irrigation efficiency of lowland soils: Land-forming options for southern Brazil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(8), Artículo e04020019.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001483](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001483)
- Bueno, M. V., Roel, Á., Farias, L., Massey, J., & Parfitt, J. M. (2023). Land-forming for irrigation (LFI) on a lowland soil protects rice yields while improving irrigation distribution uniformity. *Precision Agriculture*, 24(1), 310-325.  
<https://doi.org/10.1007/s11119-022-09946-8>

- Bueno, M. V., Roel, Á., Parfitt, J. M., & Oxley, M. (2020). Geonivelación con pendiente variable: La llave para incluir pasturas y otros cultivos en el sistema. En J. Terra, S. Martínez, H. Saravia, B. Mesones, & O. Álvarez (Eds.), *Arroz 2020* (pp. 85-88). INIA.  
<https://inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/ST-257-p85-88.pdf>
- Castro, G. S. A., Crusciol, C. A. C., Calonego, J. C., & Rosolem, C. A. (2015). Management impacts on soil organic matter of tropical soils. *Vadose Zone Journal*, 14(1), 1-8. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.07.0093>
- Castro, M., Cutiño, M. J., Manasliski, S., Morales, G. X., Cardozo, V., Castro, B., Vázquez, D., Ramallo, D., García, M. E., González, P., Steart, S., Bentos, D., Restaino, E., Bogliacino, S., Bayce, D., Olivieri, V., Boschi, F., Moure, S., Tarán, C., Giribaldi, G., & Tardáguila, A. (2021). *Resultados experimentales de la evaluación nacional de cultivares de soja: Período 2020*. ENC.  
<https://v.calameo.com/?bkcode=002993183e425b0be1d4c>
- Centro de Estudio de la Realidad Económica y Social. (2023). *Riego y productividad: Potenciales beneficios de la expansión del riego en Uruguay*.  
[https://ceres.uy/index.php/estudios/ficha\\_estudio/50](https://ceres.uy/index.php/estudios/ficha_estudio/50)
- Concenço, G., Heiffg del Aguila, L. S., Parfitt, J. M. B., & Bueno Scivittaro, W. (2020). *Manejo da soja em terras baixas para alta produtividade*. Embrapa.  
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1126892/1/CIRCULAR-207.pdf>
- Corsi, W. (1994). Programación del riego con informes de evaporación. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Manejo de la información agroclimática para apoyo a la toma de decisiones en riego* (pp. 1-4).  
<http://www.ainfo.inia.uy/consulta/busca?b=pc&id=7090&biblioteca=vazio&busca=assunto:RIEGO&qFacets=assunto:RIEGO&sort=&paginacao=t&paginaAtual=10>
- Dell’Onte, H. (2021, 3 de setiembre). Geonivelación en arroz y soja para un mejor desarrollo de los cultivos. *La mañana.uy*. <https://www.xn--lamaana-7za.uy/agro/geonivelacion-en-arroz-y-soja-para-un-mejor-desarrollo-de-los-cultivos/>
- Dirección General de Recursos Naturales. (s.f.). *Visor de Grupos CONEAT*. MGAP.  
<https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>
- DONMARIO Semillas. (2021). *Soja: DM 60i62 IPRO*.  
<https://www.donmario.com/uruguay/soja/dm-60i62-ipro/>
- Farias, J. R. B., Nepomuceno, A., & Neumaire, N. (2007). *Ecofisiología da soja*. Embrapa.

<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=470308&biblioteca=vazio&busca=470308&qFacets=470308&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>

Fehr, W., & Caviness, C. (1977). *Stages of soybean development*. Iowa State University. <https://dr.lib.iastate.edu/bitstreams/13bd0d8f-66ff-4d0e-a0e3-a70c2c47f6f3/download>

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2006). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147-159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>

Fondo de Población de las Naciones Unidas. (2023). *Estado de la población mundial: 8.000 millones de vidas, infinitas posibilidades-argumentos a favor de los derechos y libertades*. Reliefweb. <https://reliefweb.int/report/world/estado-de-la-poblacion-mundial-8000-millones-de-vidas-infinitas-posibilidades-argumentos-favor-de-los-derechos-y-libertades>

García Petillo, M. (2012). Conceptos básicos para el diseño y manejo del riego. En Grupo de Desarrollo de Riego (Ed.), *Riego en cultivos y pasturas* (pp. 22-32). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1807/1/18429080413094411.pdf>

Garside, A. L., Lawn, R. J., & Byth, D. E. (1992). Irrigation management of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) in a semi-arid tropical environment: I. Effect of irrigation frequency on growth, development and yield. *Australian Journal of Agriculture Research*, 43(5), 1003-1017. <https://doi.org/10.1071/AR9921003>

Giménez, L. (2012). ¿Cuánto estamos perdiendo por no regar cultivos en Uruguay? En Grupo de Desarrollo de Riego (Ed.), *Riego en cultivos y pasturas* (pp. 33-42). INIA. <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1807/1/18429080413094411.pdf>

Giménez, L. (2014). Efecto de las diferencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento en soja. *Agrociencia (Uruguay)*, 18(1), 53-64. <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v18n1/v18n1a06.pdf>

Grasso González, J., & Montero Pinzack, J. (2011.). *Efecto de diferentes disponibilidades hídricas sobre el rendimiento de soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la Republica]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/9730>

Guarino, T., Larre Borges, T., Blanco Demarco, G., Vairoletti, G., Chifflet, J., & Moldes, F. (1976). Soja. *Agro I*, 49-56. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/42248>

- Hayashi Tsumura, R. M. (2022). *Riego deficitario en maíz y soja: Estrategias para el dimensionamiento de equipos de riego para mejorar la productividad del agua en condiciones de clima templado* [Disertación doctoral, Universidad de la Republica]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/35703>
- Instituto Nacional de Estadística. (2023). *Anuario Estadístico 2022*. <https://www5.ine.gub.uy/documents/SEN/Anuario%20Estad%20Nacional/Anuario%20Estad%20Nacional%202022.pdf>
- Jat, M. L., Gathala, M. K., Ladha, J. K., Saharawat, Y. S., Jat, A. S., Kumar, V., Sharma, S. K., Kumar, V., & Gupta, R. (2009). Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice-wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 105(1), 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.06.003>
- Kantolic, A. (2008). Control ambiental y genético de la fenología del cultivo de soja: Impactos sobre el rendimiento y la adaptación de genotipos. *Revista de Facultad de Agronomía*, 28(1), 63-88. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/revista/facultadagronomia/2008Kantolic.pdf>
- Kantolic, A., Giménez, P., & de la Fuente, E. (2004). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En E. H. Satorre, R. L. Benech Arnold, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 166-201). Facultad de Agronomía. <https://www.calameo.com/read/005884792717a5e52c083>
- Klocke, N., Eisenhauer, D., Specht, J., Elmore, R., & Hergert, G. (1989). Irrigation soybean by growth stages in Nebraska. *Applied Engineering in Agriculture*, 5(3), 361-366. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26528>
- Köppen, W. P. (1884). *Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet*. Wikimedia Commons. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Die\\_W%C3%A4rmezonen\\_der\\_Erde\\_\(1884\).pdf](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Die_W%C3%A4rmezonen_der_Erde_(1884).pdf)
- Lima, R., Gonnet, D., Roel, Á., Terra, J., Oxley, M., Gigena, F., García, A., & Zorrilla, G. (2023). Potenciando la adopción del riego en zonas planas: Más allá del arroz. En A., Lago, E. Ensslin, S. Ferrés, & M. E. Bica (Eds.), *Arroz* (pp. 36-39). ACA. <https://www.aca.com.uy/wp-content/uploads/2024/01/Potenciando-la-opcion.pdf>
- Linkemer, G., Board, J. E., & Musgrave, M. E. (1998). Waterlogging effect on growth and yield components of late-planted soybean. *Crop Science*, 38(6), 1576-1584. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800060028x>

- Macedo, M., & Terra, J. P. (2014). Respuestas del cultivo de soja al anegamiento. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Arroz-soja: Resultados experimentales 2013-2014* (pp. 4-6).  
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3980/1/Ad-735-9Soja-4-6.pdf>
- Memmert. (2024). *UN30m*. <https://www.memmert.com/es/el-producto/dispositivos-medicos/estufa-universal-um/un30m>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2014). *Agenda de política para el desarrollo integral del riego: Hacia un Uruguay agroateligente*. En *Anuario OPYPA 2014* (pp. 255-268).  
<https://www2.mgap.gub.uy/OpypaPublicaciones/ANUARIOS/Anuario2014/pdf/politica/MGAP%20-%20Agenda%20de%20politica%20para%20el%20desarrollo%20integral%20del%20riego%20hacia%20un%20Uruguay%20agroateligente.pdf>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2020, 3 de octubre). *Descripción de los grupos CONEAT*. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat>
- Morales Molina, P., Beretta Blanco, A., García Prechac, F., García Gallareta C., & Tarjuelo Benito, J. M. (2022). Avaliação do desenho e funcionamento dos pivôs centrais instalados no Uruguai. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 279-294. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-025>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2023). *Anuario estadístico agropecuario 2023*. MGAP.  
<https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2023/ANUARIO2023WEB.pdf>
- Oficina de Programación y Política Agropecuaria. (2024). *Estimaciones preeliminares: Impacto déficit hídrico 2022-2023*. MGAP. [https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/\\_Estimaciones%20perdidas%20deficit%20hidrico%202022-.pdf](https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/_Estimaciones%20perdidas%20deficit%20hidrico%202022-.pdf)
- Oosterhuis, D. M., Scott, H. D., Hampton, R. E., & Wullschleger, S. D. (1990). Physiological responses of two soybean [*Glycine max* (L.) Merr] cultivars to short-term flooding. *Environmental and Experimental Botany*, 30(1), 85-92.  
[https://doi.org/10.1016/0098-8472\(90\)90012-S](https://doi.org/10.1016/0098-8472(90)90012-S)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1966). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación 1966*.  
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8c09c50b-ee0b-4b2f-bab0-d1f2a64cfda7/content>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*.  
[https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues\\_papers/Issues\\_papers\\_SP/La\\_agricultura\\_mundial.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf)
- Otero, A., Montoya, F., Ferreira, A., & Canepa, P. (2015). Irrigation water effect in soybean crop in Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 19(3), 37.  
<https://doi.org/10.31285/AGRO.19.262>
- Öztekin, T. (2013). Short-term effects of land leveling on irrigation-related some soil properties in a clay loam soil. *The Scientific World Journal*, 2013(1), Artículo e187490. <https://doi.org/10.1155/2013/187490>
- Parfitt, J. M., Concenço, G., Scivittaro, W., Andres, A., Trombeta da Silva, J., & Brito Pino, M. (2017). Soil and water management of sprinkler irrigated rice in southern Brazil. En J. Li (Ed.), *Advances in international rice research* (pp. 3-18). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/66024>
- Parfitt, J. M., Timm, L. C., Reichardt, K., & Pauletto, E. A. (2014). Impacts of land leveling on lowland soil physical properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(1), 315-326. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100032>
- Parfitt, J. M., Timm, L. C., Reichardt, K., Spinelli, L. F., Pauletto, E. A., & Dufech, D. (2013). Chemical and biological attributes of a lowland soil affected by land leveling. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 48(11), 1489-1497.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001100010>
- Ramos, M. C. (2017). Effects of compost amendment on the available soil water and grape yield in vineyards planted after land leveling. *Agricultural Water Management*, 191, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.013>
- Ramos, M. C., & Martinez-Casanovas, J. A. (2006). Impacts of land leveling on soil moisture and runoff variability in vineyard under different rainfall distributions in Mediterranean climate and its influence on a crop productivity. *Journal of Hydrology*, 321(1-4), 131-146. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.055>
- Rava, C. (2024). Soja y derivados: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2023* (pp. 2-41). MGAP.  
<https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2023/CP/8/CP8web/CP8sojayderivados.pdf>
- Rhine, M. D., Stevens, G., Shannon, G., Wrather, A., & Sleper, D. (2009). Yield and nutritional responses to waterlogging of soybean cultivars. *Irrigation Science*, 28(2), 135-142. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0168-x>

- Rímoli Kunz, N., & Secco Basile, P. (2017). *Estudio de las exactitudes obtenidas en relevamientos GNSS-RTK mediante VRS y DGNSS* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/22876>
- Rodríguez, N. (2011). Agricultura de secano. En M. Vasallo (Ed.), *Dinámica y competencia intrasectorial en el agro: Uruguay 2000-2010* (pp. 73-90). Universidad de la República.  
[https://www.csic.edu.uy/sites/csic/files/fagro\\_vasallo\\_2012-03-13\\_webo.pdf](https://www.csic.edu.uy/sites/csic/files/fagro_vasallo_2012-03-13_webo.pdf)
- Sallam, A., & Scott, H. D. (1987). Effects of prolonged flooding on soybean during early vegetative growth. *Soil Science*, 144(1), 61-66.  
[https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1987/07000/effects\\_of\\_prolonged\\_flooding\\_on\\_soybeans\\_during.10.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/abstract/1987/07000/effects_of_prolonged_flooding_on_soybeans_during.10.aspx)
- Saravia, H. (2005). 1970 - 2005: 35 años de tecnología para el agro de la región este. *Revista INIA*, (4), 35-36.  
<https://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/revista/2005/108.pdf>
- Sawchik, J., & Ceretta, S. (2005). Consumo de agua por sojas de distintos grupos de madurez en diferentes ambientes de producción (CALMER-AUSDIN-INIA). En Instituto Nacional de investigación Agropecuaria (Ed.), *Jornada técnica de cultivos de verano* (pp. 40-51).  
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/439/1/111219230807174556.pdf>
- Sawchik, J., & Formoso, F. (2001). *Inserción del riego en rotaciones de cultivos y pasturas*. INIA.  
[https://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/rec\\_nat/riego\\_sistemas\\_produccion.pdf](https://www.inia.org.uy/disciplinas/agroclima/publicaciones/rec_nat/riego_sistemas_produccion.pdf)
- Sebben, G., Friza, S., & Tejera, M. (2018). *Efecto de distintas estrategias de riego deficitario sobre el rendimiento y el uso del agua en soja* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/20915/1/SebbenFontanaGastónFrancisco.pdf>
- Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático. (2021). *Embalses y represas multiprediales*. Ministerio de Ambiente. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2021-04/88-FT-Embalses%20y%20represas%20multiprediales.pdf>
- Sullivan, M., VanToai, T., Fausey, N., Beuerlein, J., Parkinson, R., & Soboyejo, A. (2001). Evaluating on farm flooding impacts on soybean. *Crop Science*, 41(1), 93-100. <https://doi.org/10.2135/cropsci2001.41193x>

- Sweeney, D., & Granade, G. (2002). Effect of a single irrigation at different reproductive growth stages on soybean planted in early and late June. *Irrigation Science*, 21(2), 69-73. <https://doi.org/10.1007/s00271-001-0051-x>
- Terra, J. (2013). *Oportunidades y desafíos para la soja en las rotaciones arroceras*. INIA. <https://www.inia.org.uy/estaciones/ttres/actividades/2013/01Desafios%20Soja%20en%20Rotaciones%20Arroz.pdf>
- Thomas, A. L., & Lange, C. E. (Orgs.). (2014). *Soja em solos de várzea do sul do Brasil*. Evangraf. <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/271012/000932089.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Toledo, R. (s.f.). *Ecofisiología y rendimiento de Soja (Glycine max)*. Universidad Nacional de Córdoba. <https://ansenuza.ffyh.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086.1/1383/Ecofisiología%20de%20cultivo%20de%20soja.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Uruguay XXI. (2024). *Sector agrícola en Uruguay*. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-agricola-2024/>
- URUPOV Semilla Legal. (2021). *Teledetección y caracterización del cultivo de soja en Uruguay*. <https://www.urupov.org.uy/wp-content/uploads/2022/05/Teledeteccion-y-caracterizacion-del-cultivo-de-soja-URUPOV-2021.pdf>
- Valley. (2024). *Modelo 8120 Pivote Central*. <https://latam.valleyirrigation.com/8120>
- Vignesh, K., Thamarai Selvi, M., Meera, T., Kalaivansan, R., & Ramarasu, N. (2023). *Encyclopedia of agriculture and allied sciences*. Royal Book Publishing. [https://www.researchgate.net/publication/386243143\\_ENCYCLOPEDIA\\_OF\\_AGRICULTURE\\_AND\\_ALLIED\\_SCIENCES](https://www.researchgate.net/publication/386243143_ENCYCLOPEDIA_OF_AGRICULTURE_AND_ALLIED_SCIENCES)
- Walker, T. W., Kingery, W. L., Street, J. E., Cox, M. S., Oldham, L., Gerard, P. D., & Han, X. F. (2003). Rice yield and soil chemical properties as affected by precision land leveling in alluvial soils. *Agronomy Journal*, 95(6), 1483-1488. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.1483>
- Wani, S. P., Heng, L. K., & Vajja, N. R. (2012). Soya o soja. En P. Steduto, T. C. Hsiao, E. Fereres, & D. Reas (Eds.), *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (pp. 130-138). FAO. <https://www.fao.org/4/i2800e/i2800e00.htm>
- Winkler, A. S. (2018). *Variabilidade espaço-temporal de atributos do solo e da produtividade de arroz irrigado em área sistematizada de terras baixas*

[Disertación doctoral, Universidade Federal de Pelotas]. Guaiaca.  
<http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/5002>

## 7 Anexo

### Anexo A. Video ilustrativo de Geo-nivelación



## Anexo B. Estados fenológico del cultivo de soja en estado vegetativo

Título	Etapas	Descripción
Emergencia	VE	Cotiledones sobre el suelo.
Cotiledón	VC	Hojas unifoliadas desarrolladas lo suficiente como para que no se toquen sus bordes.
Primer nudo	V1	Hojas completamente desarrolladas del nudo unifoliado.
Segundo nudo	V2	Hoja trifoliada completamente desarrollada en el nudo superior al nudo unifoliado.
Tercer nudo	V3	Tres nudos en el tallo principal con sus hojas completamente desarrolladas.
n Nudos	V(n)	n número de nudos en el tallo principal con sus hojas completamente desarrolladas.

*Nota.* Extraído de Kantolic et al. (2004).

### Referencia bibliográfica

Kantolic, A., Giménez, P., & de la Fuente, E. (2004). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En E. H. Satorre, R. L. Benech Arnold, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 166-201). Facultad de Agronomía.  
<https://www.calameo.com/read/005884792717a5e52c083>

## Anexo C. Estados fenológico del cultivo de soja en estado reproductivo

Título	Etapa	Descripción
Inicio floración	R1	Una flor abierta en cualquier nudo del tallo.
Floración completa	R2	Flor abierta en uno de los dos nudos superiores con una hoja completamente desarrollada.
Formación de vaina	R3	Vaina de 5 mm de longitud en uno de los cuatro nudos mas superiores del tallo principal.
Vaina completa	R4	Vaina de 2 cm de longitud en uno de los cuatro nudos mas superiores del tallo principal.
Formación semilla	R5	Semilla de 3 mm de longitud en una vaina en uno de los cuatro nudos mas superiores del tallo principal.
Semilla completa	R6	Vaina con una semilla verde que llena la cavidad de la vaina en uno de los 4 nudos superiores del tallo principal.
Comienza madurez	R7	Una vaina normal en el tallo principal que ha alcanzado su color de vaina madura.
Madurez completa	R8	el noventa y cinco por ciento de las vainas que han alcanzado el color de vaina madura.

*Nota.* Extraído de Kantolic et al. (2004).

### Referencia bibliográfica

Kantolic, A., Giménez, P., & de la Fuente, E. (2004). Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. En E. H. Satorre, R. L. Benech Arnold, G. A. Slafer, E. B. de la Fuente, D. J. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales para su manejo* (pp. 166-201). Facultad de Agronomía.  
<https://www.calameo.com/read/005884792717a5e52c083>

## Anexo D. Ficha técnica Don Mario 60i62

**DM 60i62 IPRO**

INTACTA RR2 PRO

**REFERENCIAS**

Destacada por su altísimo rendimiento, alta estabilidad y adaptabilidad a todos los ambientes del país. Muy buen porte agronómico.

**CARACTERÍSTICAS**

**CICLO / HÁBITO DE CRECIMIENTO**  
VI Corto / Indeterminado

**DÍAS DESDE EMERGENCIA A R8 <sup>(1)</sup>**  
141

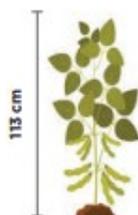
**ALTURA DE PLANTA (CM)**  
113

**POTENCIAL DE RAMIFICACIÓN**  
Alto

**SUSCEPTIBILIDAD AL VUELCO (1 A 5) <sup>(2)</sup>**  
2

**PESO PROMEDIO DE 1000 SEMILLAS (G) <sup>(3)</sup>**  
162

**COLOR DE PUBESCENCIA / COLOR DE FLOR**  
Gris / Púrpura

**PERFIL SANITARIO**

**CANCRO DEL TALLO <sup>(4)</sup>**  
Resistente

**PHYTOPHTHORA <sup>(5)</sup>**  
Susceptible a raza 1

**MANCHA OJO DE RANA (MOR)**  
Moderadamente Susceptible

*Nota.* Para más información consultar DONMARIO Semillas (2016) que contiene la cartilla técnica de la semilla utilizada.

**Referencia bibliográfica**

DONMARIO Semillas. (2021). *Soja: DM 60i62 IPRO.*

<https://www.donmario.com/uruguay/soja/dm-60i62-ipro/>

## Anexo E. Pivot utilizado



*Nota.* Para más información consultar Valley (2024).

### **Referencia bibliográfica**

Valley. (2024). *Modelo 8120 Pivote Central*. <https://latam.valleyirrigation.com/8120>

## Anexo F. Estufa utilizada

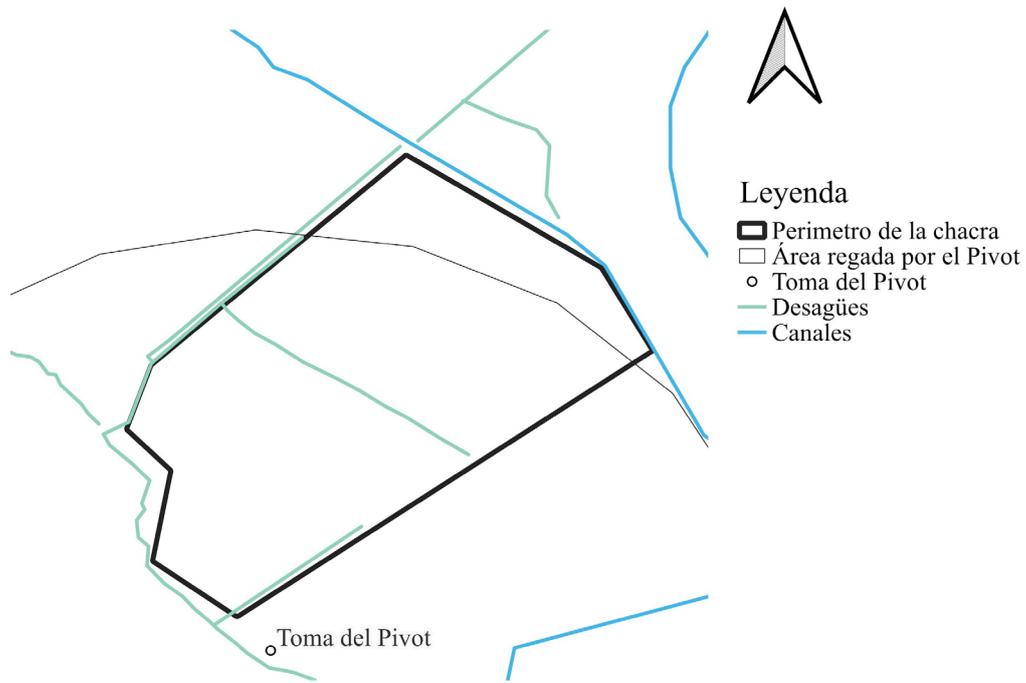


*Nota.* Para más información consultar el Memmert (2024) que contiene la cartilla técnica de la estufa.

**Referencia bibliográfica**

Memmert. (2024). UN30m. <https://www.memmert.com/es/el-producto/dispositivos-medicos/estufa-universal-um/un30m>

## Anexo G. Mapa de canales y desagües



Coordenadas: 33°50'27.35"S 53°58'4.31"O

## Anexo H. Temperatura promedio mensual para el periodo del cultivo

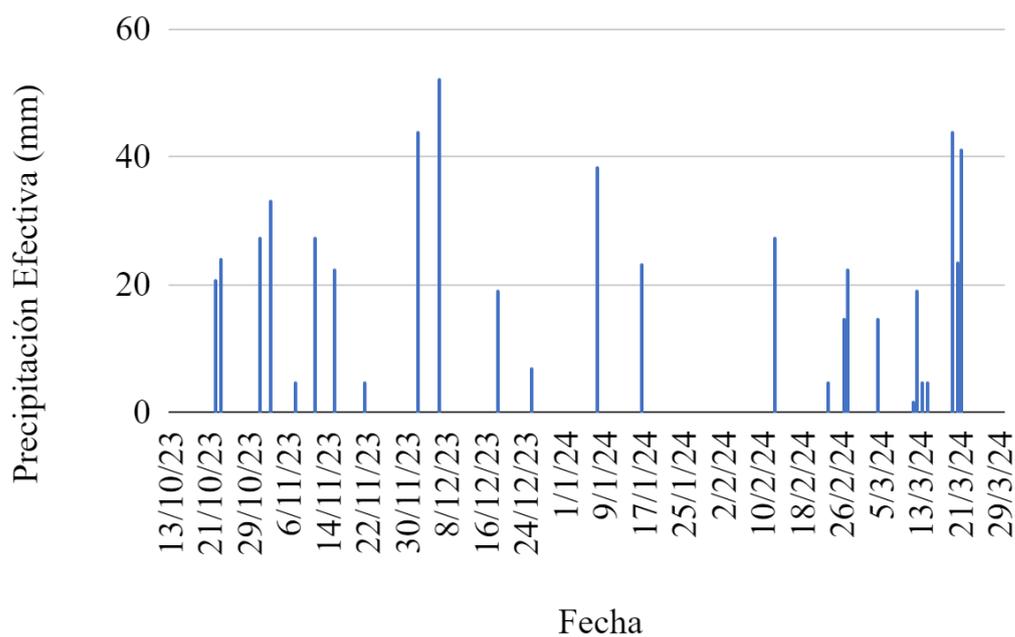
Evaluación	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
Temp. (°C)	23,3	25,8	27,2	29,7	31,3	28,0

## Anexo I. Precipitaciones acumuladas mensuales

**Figura I1***Evolución de las precipitaciones en el ciclo del cultivo*

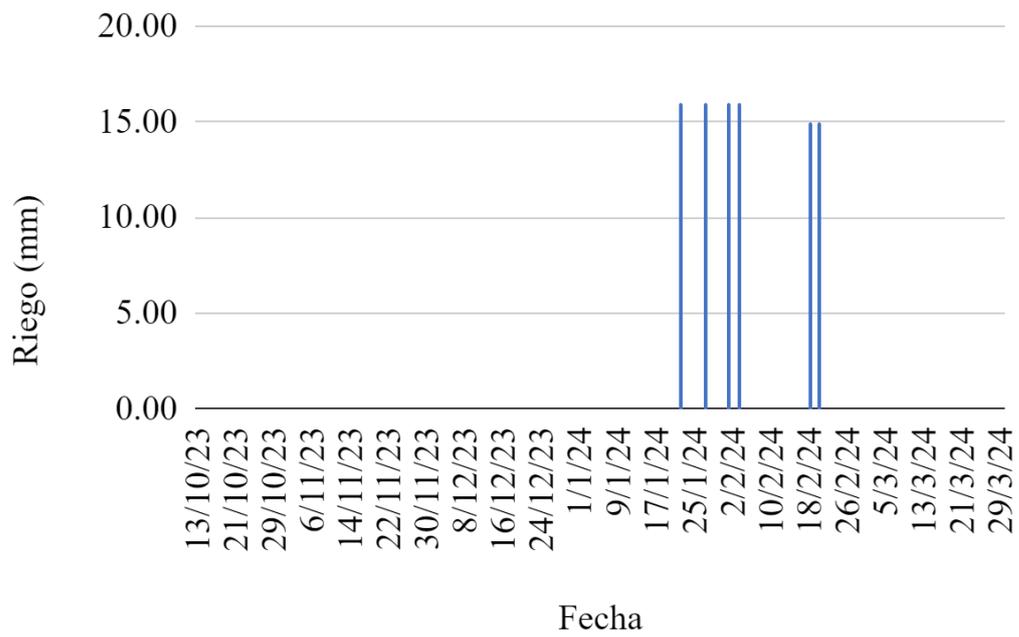
Evaluación	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
Precipit. (mm)	72,8	93,6	122,7	62,1	70,2	155,4

*Nota.* Precipitaciones proporcionadas por Galfarm S.A.

**Figura I2***Evolución de las precipitaciones en el ciclo del cultivo*

*Nota.* Precipitaciones proporcionadas por Galfarm S.A.

## Anexo J. Riego aplicado



*Nota.* Riego proporcionadas por Galfarm S.A.

## Anexo K. Balance hídrico GESIR

**Tabla K1***Balance hídrico de paso diario*

Fecha	Balance	ETa/ETc	ETcm	ETam	ETam/ETcm
13/10/2023	77,63	1,00	0,95	0,95	1,00
14/10/2023	76,48	1,00	2,10	2,10	1,00
15/10/2023	75,23	1,00	3,35	3,35	1,00
16/10/2023	74,28	1,00	4,30	4,30	1,00
17/10/2023	72,88	1,00	5,70	5,70	1,00
18/10/2023	72,03	1,00	6,55	6,55	1,00
19/10/2023	70,68	1,00	7,90	7,90	1,00
20/10/2023	69,08	1,00	9,50	9,50	1,00
21/10/2023	67,63	1,00	10,95	10,95	1,00
22/10/2023	77,63	1,00	12,10	12,10	1,00
23/10/2023	77,63	1,00	12,70	12,70	1,00
24/10/2023	76,33	1,00	14,00	14,00	1,00
25/10/2023	74,88	1,00	15,45	15,45	1,00
26/10/2023	73,88	1,00	16,45	16,45	1,00
27/10/2023	72,33	1,00	18,00	18,00	1,00
28/10/2023	70,88	1,00	19,45	19,45	1,00
29/10/2023	70,08	1,00	20,25	20,25	1,00
30/10/2023	70,81	1,01	21,27	21,28	1,00
31/10/2023	81,15	1,00	22,12	22,13	1,00
01/11/2023	82,43	1,01	22,60	22,62	1,00
02/11/2023	84,68	1,00	23,50	23,51	1,00
03/11/2023	85,36	1,01	24,58	24,60	1,00
04/11/2023	85,30	1,00	26,41	26,42	1,00
05/11/2023	86,20	1,01	27,37	27,39	1,00
06/11/2023	86,55	1,00	29,05	29,06	1,00
07/11/2023	91,15	1,01	31,44	31,47	1,00
08/11/2023	91,74	1,00	32,87	32,89	1,00
09/11/2023	91,76	1,01	34,85	34,88	1,00
10/11/2023	91,69	0,99	36,96	36,97	1,00
11/11/2023	102,16	1,00	38,48	38,49	1,00
12/11/2023	102,55	1,00	40,11	40,12	1,00
13/11/2023	103,26	1,00	41,41	41,42	1,00
14/11/2023	103,88	1,00	42,81	42,82	1,00
15/11/2023	110,22	1,00	44,09	44,09	1,00
16/11/2023	109,25	0,99	47,09	47,08	1,00
17/11/2023	108,38	1,00	49,98	49,97	1,00
18/11/2023	106,57	0,99	53,82	53,79	1,00

**Tabla K2***Balance hídrico de paso diario*

Fecha	Balance	ETa/ETc	ETcm	ETam	ETam/ETcm
19/11/2023	103,90	1,00	58,51	58,48	1,00
20/11/2023	102,12	1,00	62,29	62,27	1,00
21/11/2023	107,21	1,00	64,22	64,20	1,00
22/11/2023	106,15	1,00	67,28	67,27	1,00
23/11/2023	106,09	1,00	69,37	69,35	1,00
24/11/2023	105,45	1,00	72,01	72,00	1,00
25/11/2023	105,59	0,99	73,90	73,88	1,00
26/11/2023	104,77	1,00	76,72	76,71	1,00
27/11/2023	103,08	1,00	80,44	80,42	1,00
28/11/2023	101,32	1,00	84,20	84,19	1,00
29/11/2023	100,46	1,00	87,08	87,06	1,00
30/11/2023	99,18	1,00	90,37	90,36	1,00
01/12/2023	98,53	1,00	93,05	93,02	1,00
02/12/2023	143,08	1,00	94,55	94,52	1,00
03/12/2023	141,94	1,00	97,71	97,67	1,00
04/12/2023	139,94	1,00	101,73	101,69	1,00
05/12/2023	138,29	1,00	105,40	105,35	1,00
06/12/2023	152,54	1,00	106,78	106,73	1,00
07/12/2023	151,11	1,00	110,24	110,17	1,00
08/12/2023	149,86	1,00	113,51	113,44	1,00
09/12/2023	148,67	0,99	116,72	116,64	1,00
10/12/2023	147,22	1,00	120,20	120,11	1,00
11/12/2023	145,26	0,99	124,19	124,08	1,00
12/12/2023	142,56	1,00	128,90	128,79	1,00
13/12/2023	137,61	1,00	133,85	133,74	1,00
14/12/2023	134,16	1,00	137,30	137,19	1,00
15/12/2023	130,83	1,00	140,63	140,52	1,00
16/12/2023	126,00	1,00	145,46	145,35	1,00
17/12/2023	120,36	1,00	151,10	150,99	1,00
18/12/2023	137,09	1,00	153,63	153,52	1,00
19/12/2023	134,91	1,00	155,81	155,70	1,00
20/12/2023	132,49	1,00	158,23	158,12	1,00
21/12/2023	129,62	1,00	161,10	160,99	1,00
22/12/2023	125,25	1,00	165,47	165,36	1,00
23/12/2023	121,68	1,00	169,04	168,93	1,00
24/12/2023	117,46	0,99	173,29	173,15	1,00
25/12/2023	121,93	1,00	175,82	175,68	1,00

**Tabla K3***Balance hídrico de paso diario*

Fecha	Balance	ETa/ETc	ETcm	ETam	ETam/ETcm
26/12/2023	117,91	1,00	179,85	179,70	1,00
27/12/2023	113,87	0,86	184,56	183,74	1,00
28/12/2023	109,41	0,64	191,58	188,20	0,98
29/12/2023	105,83	0,57	197,90	191,78	0,97
30/12/2023	103,24	0,55	202,62	194,37	0,96
31/12/2023	101,65	0,58	205,38	195,96	0,95
01/01/2024	99,94	0,50	208,83	197,67	0,95
02/01/2024	98,11	0,41	213,31	199,50	0,94
03/01/2024	96,52	0,36	217,68	201,09	0,92
04/01/2024	95,11	0,32	222,05	202,50	0,91
05/01/2024	93,75	0,27	227,11	203,86	0,90
06/01/2024	92,47	0,22	232,86	205,14	0,88
07/01/2024	125,66	1,00	238,27	210,54	0,88
08/01/2024	122,00	1,00	241,91	214,20	0,89
09/01/2024	116,93	0,89	247,61	219,27	0,89
10/01/2024	112,87	0,82	252,59	223,33	0,88
11/01/2024	109,53	0,75	257,07	226,67	0,88
12/01/2024	106,99	0,71	260,65	229,21	0,88
13/01/2024	104,20	0,57	265,53	232,00	0,87
14/01/2024	101,45	0,46	271,53	234,75	0,86
15/01/2024	98,99	0,39	277,91	237,21	0,85
16/01/2024	118,74	1,00	281,61	240,93	0,86
17/01/2024	115,12	0,95	285,43	244,55	0,86
18/01/2024	111,61	0,81	289,75	248,06	0,86
19/01/2024	108,71	0,75	293,60	250,96	0,85
20/01/2024	105,82	0,63	298,20	253,85	0,85
21/01/2024	103,35	0,57	302,55	256,32	0,85
22/01/2024	113,76	0,86	307,17	260,31	0,85
23/01/2024	109,94	0,71	312,52	264,13	0,85
24/01/2024	106,62	0,63	317,83	267,45	0,84
25/01/2024	103,71	0,54	323,24	270,36	0,84
26/01/2024	101,27	0,48	328,28	272,80	0,83
27/01/2024	111,80	0,79	333,18	276,67	0,83
28/01/2024	108,78	0,74	337,26	279,69	0,83
29/01/2024	106,19	0,67	341,10	282,28	0,83
30/01/2024	103,77	0,59	345,20	284,70	0,82
31/01/2024	100,90	0,43	351,90	287,57	0,82

**Tabla K4***Balance hídrico de paso diario*

Fecha	Balance	ETa/ETc	ETcm	ETam	ETam/ETcm
01/02/2024	110,58	0,66	359,02	292,29	0,81
02/02/2024	106,90	0,61	365,10	295,97	0,81
03/02/2024	115,96	0,83	371,57	301,31	0,81
04/02/2024	112,17	0,81	376,22	305,10	0,81
05/02/2024	109,16	0,76	380,20	308,11	0,81
06/02/2024	106,17	0,64	384,91	311,10	0,81
07/02/2024	103,11	0,50	390,99	314,16	0,80
08/02/2024	100,33	0,41	397,73	316,94	0,80
09/02/2024	98,16	0,38	403,46	319,11	0,79
10/02/2024	96,36	0,34	408,77	320,91	0,79
11/02/2024	94,92	0,31	413,42	322,35	0,78
12/02/2024	119,05	1,00	416,82	325,76	0,78
13/02/2024	115,15	0,92	421,05	329,66	0,78
14/02/2024	112,91	0,98	423,33	331,90	0,78
15/02/2024	110,27	0,84	426,48	334,54	0,78
16/02/2024	107,28	0,68	430,89	337,53	0,78
17/02/2024	104,82	0,63	434,80	339,99	0,78
18/02/2024	115,14	1,00	437,97	343,17	0,78
19/02/2024	113,74	0,99	439,38	344,57	0,78
20/02/2024	123,93	1,00	442,68	347,88	0,79
21/02/2024	120,90	1,01	445,69	350,91	0,79
22/02/2024	117,81	1,00	448,79	354,00	0,79
23/02/2024	120,77	1,00	450,83	356,04	0,79
24/02/2024	117,47	1,00	454,15	359,34	0,79
25/02/2024	114,11	1,00	457,51	362,70	0,79
26/02/2024	126,38	1,00	460,16	365,36	0,79
27/02/2024	146,13	0,99	463,15	368,33	0,80
28/02/2024	143,43	1,00	465,86	371,03	0,80
29/02/2024	140,58	1,01	468,69	373,88	0,80
01/03/2024	137,84	0,99	471,44	376,62	0,80
02/03/2024	133,44	1,00	475,84	381,02	0,80
03/03/2024	130,18	1,01	479,08	384,28	0,80
04/03/2024	141,33	1,00	482,88	388,06	0,80
05/03/2024	137,58	1,00	486,62	391,81	0,81
06/03/2024	135,49	0,99	488,73	393,90	0,81
07/03/2024	131,80	1,00	492,42	397,59	0,81
08/03/2024	127,30	1,00	496,91	402,09	0,81

**Tabla K5***Balance hídrico de paso diario*

Fecha	Balance	ETa/ETc	ETcm	ETam	ETam/ETcm
09/03/2024	125,56	1,00	498,65	403,83	0,81
10/03/2024	121,96	1,00	502,25	407,43	0,81
11/03/2024	119,91	1,00	506,30	411,48	0,81
12/03/2024	134,44	1,00	511,03	416,21	0,81
13/03/2024	135,46	1,00	515,00	420,19	0,82
14/03/2024	139,11	1,00	516,35	421,54	0,82
15/03/2024	137,68	1,00	517,78	422,97	0,82
16/03/2024	137,00	1,01	518,45	423,65	0,82
17/03/2024	134,37	1,00	521,08	426,28	0,82
18/03/2024	132,19	1,00	523,25	428,46	0,82
19/03/2024	164,62	1,00	524,75	430,64	0,82
20/03/2024	164,62	1,00	526,03	432,02	0,82
21/03/2024	164,62	1,00	529,10	435,10	0,82
22/03/2024	162,74	1,00	530,98	436,98	0,82
23/03/2024	161,09	1,00	532,63	438,63	0,82
24/03/2024	160,04	1,00	533,68	439,68	0,82
25/03/2024	157,64	1,00	536,08	442,08	0,82
26/03/2024	156,21	1,00	537,50	443,51	0,83
27/03/2024	154,63	1,00	539,08	445,09	0,83
28/03/2024	152,90	1,00	540,80	446,82	0,83
29/03/2024	150,20	1,00	543,50	449,52	0,83
30/03/2024	149,15	1,00	544,55	450,57	0,83
31/03/2024	147,35	1,00	546,35	452,37	0,83
01/04/2024	146,53	0,99	547,18	453,19	0,83
02/04/2024	144,58	1,00	549,13	455,14	0,83
03/04/2024	143,53	1,00	550,18	456,19	0,83
04/04/2024	141,95	1,00	551,75	457,77	0,83
05/04/2024	139,77	1,00	553,93	459,95	0,83

Anexo L. Encharcamiento en los diferentes estados del cultivo

**Figura L1**

*Encharcamiento de pozos post siembra*



*Nota.* Esto muestra como los problemas de microrelieve no fueron resueltos.

**Figura L2**

*Encharcamiento de pozos en V5*



**Figura L3**  
*Encharcamiento de V5*



**Figura L4**  
*Encharcamiento de R1*



**Figura L5**  
*Encharcamiento de R1*



**Figura L6**  
*Encharcamiento de R3*



**Figura L7**  
*Encharcamiento de R5*



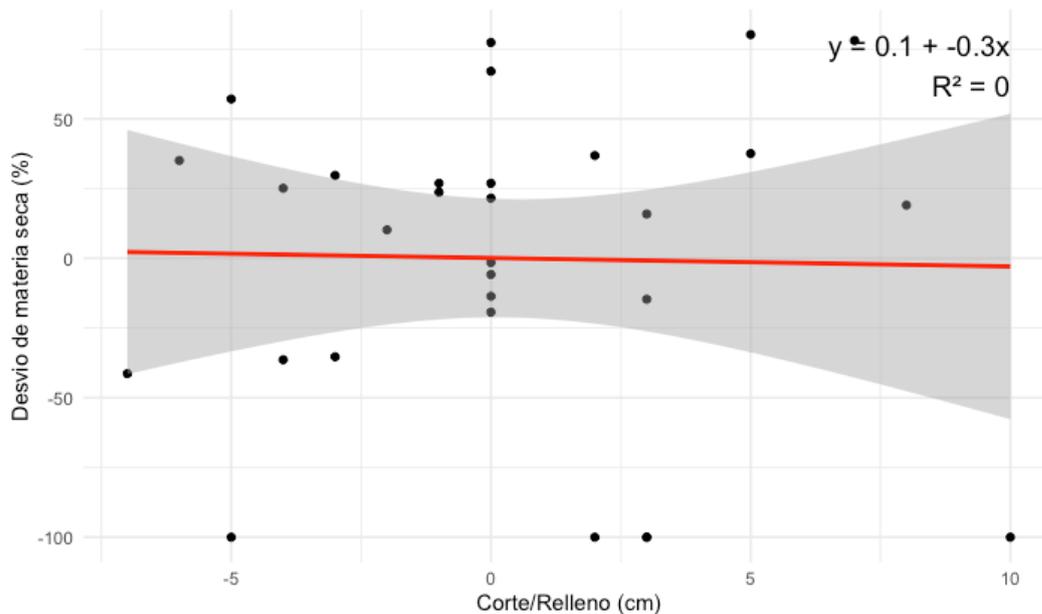
**Figura L8**  
*Encharcamiento de R5*



Anexo M. Regresión de biomasa en función de cantidad de corte y relleno en R1-R2, R3-R4 y R5

### Figura M1

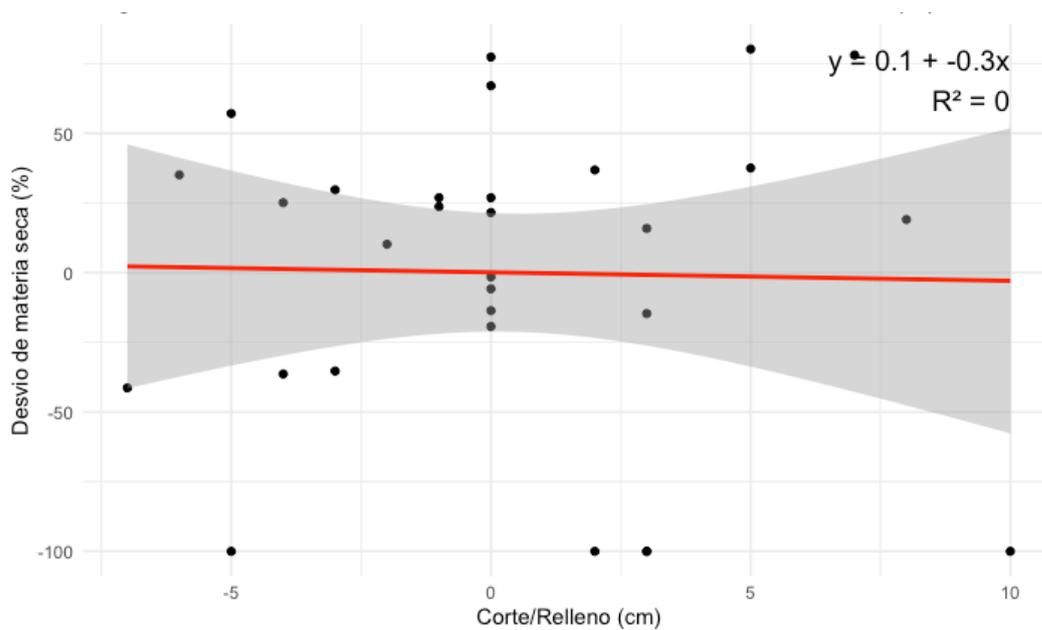
*Cantidad de corte/relleno y desvío de materia seca en la etapa fenológica R1-R2*



*Nota.* La media de la producción de materia seca (kg MS/ha) fue de 2.102 kg.

### Figura M2

*Cantidad de corte/relleno y desvío de materia seca en la etapa fenológica R3-R4*



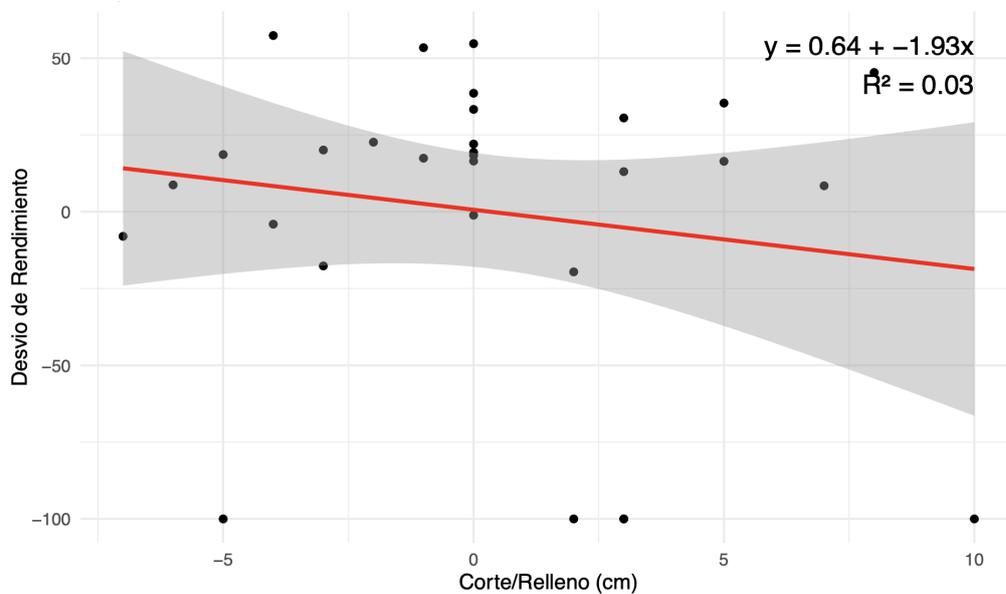
*Nota.* La media de la producción de materia seca (kg MS/ha) fue de 3.773 kg.



Anexo N. Regresión de rendimiento y sus componentes en función de cantidad de corte y relleno.

**Figura N1**

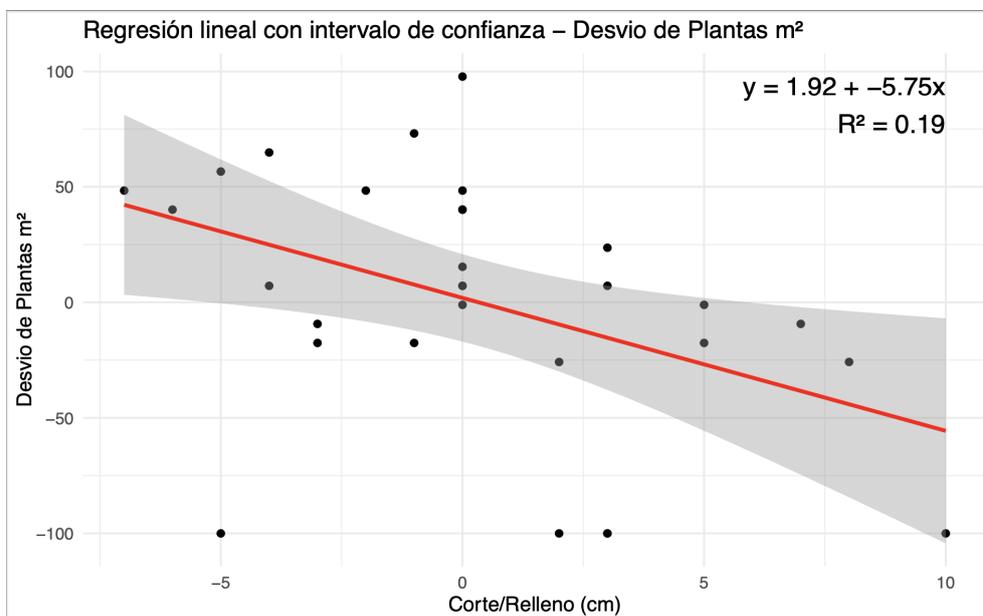
*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de rendimiento estimado (%)*



*Nota.* El rendimiento de grano promedio estimado a campo en base a los puntos de muestreo es de 4606 kg/ha.

**Figura N2**

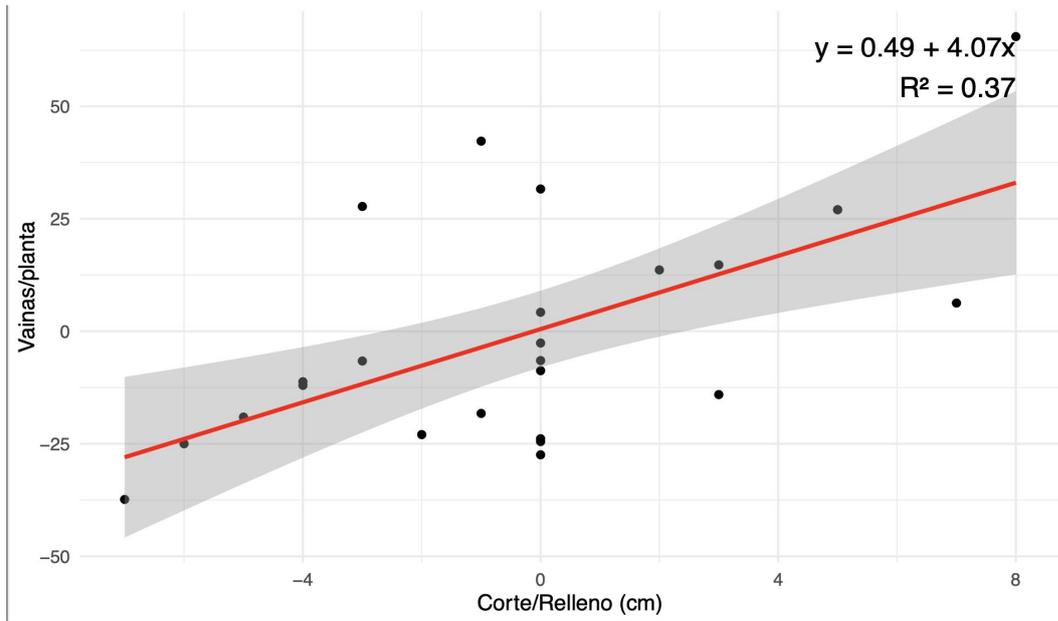
*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de plantas/m<sup>2</sup>*



*Nota.* La media de plantas por metro cuadrado es de 12,13.

**Figura N3**

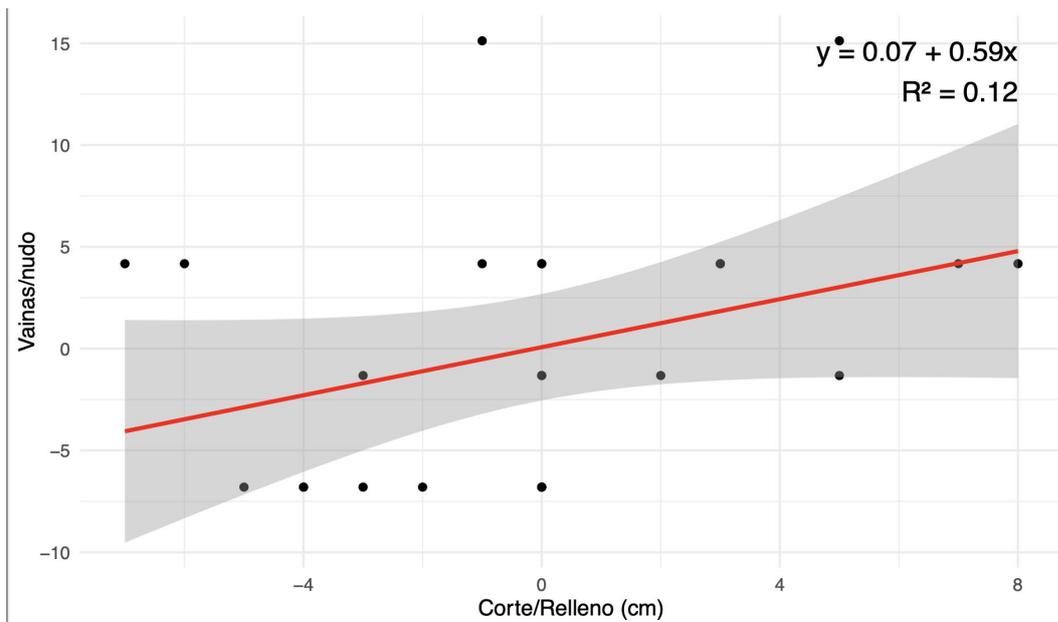
*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de vainas/planta*



*Nota.* La media de vainas por planta es de 97,86.

**Figura N4**

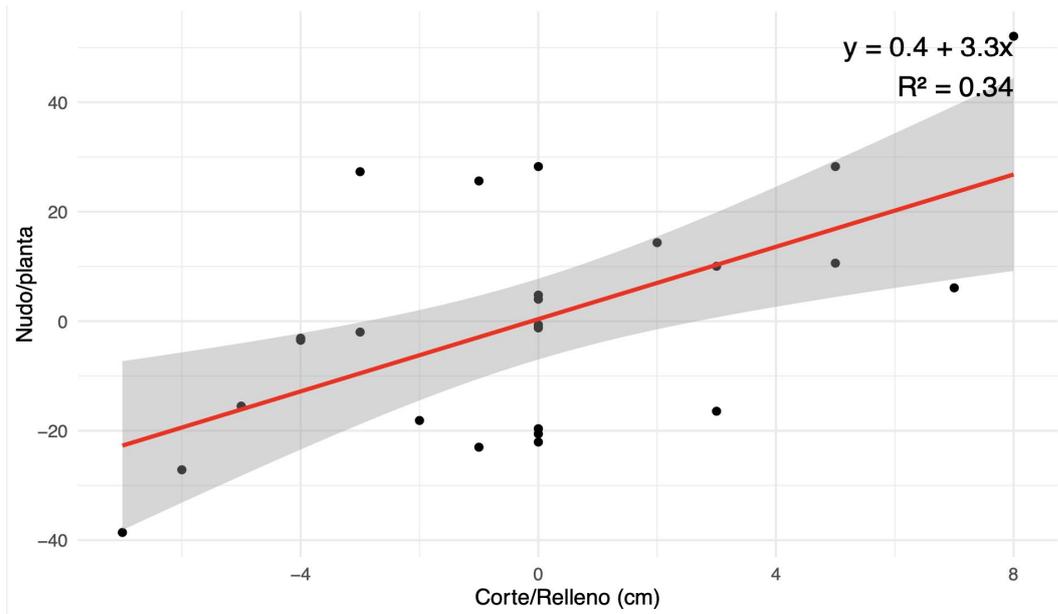
*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de vainas/nudo (%)*



*Nota.* La media de vainas por nudo es de 1,82.

**Figura N5**

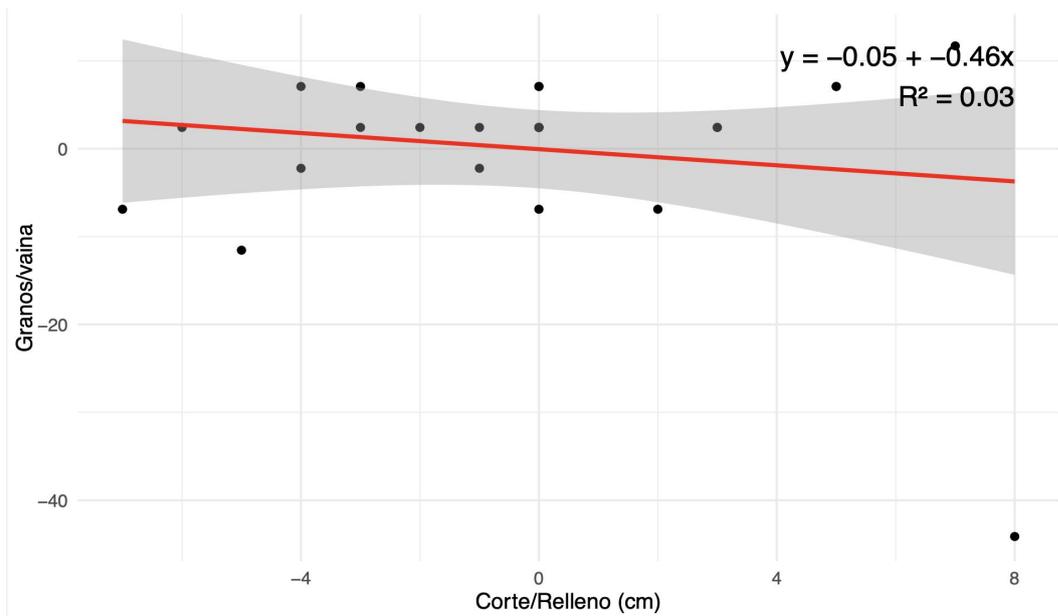
*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de nudos/planta (%)*



*Nota.* La media de nudos por planta es de 53,25.

**Figura N6**

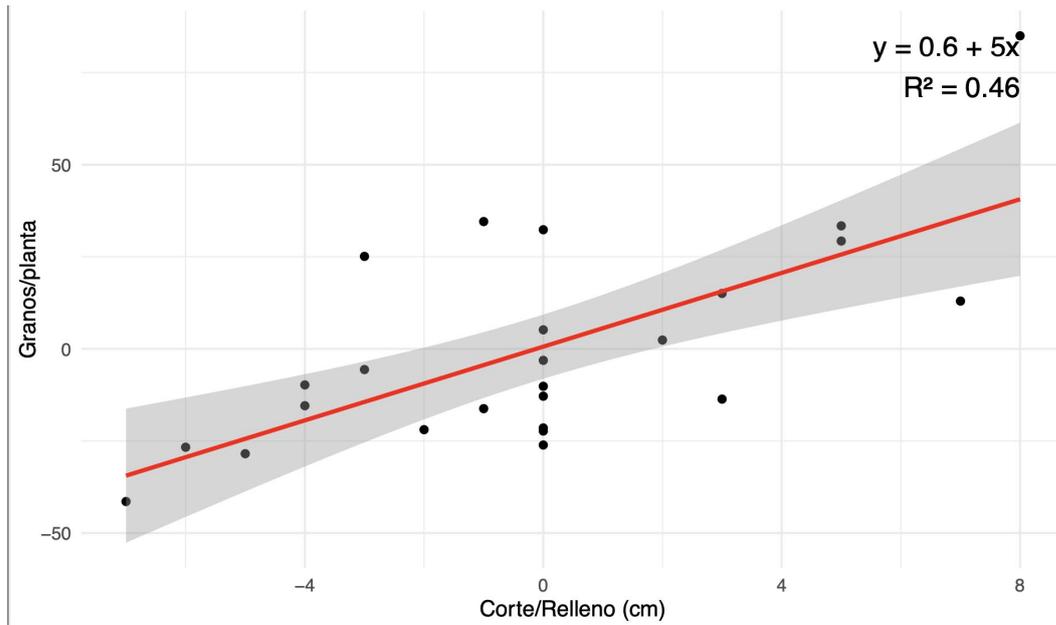
*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de granos/vaina (%)*



*Nota.* La media de granos por vaina es de 2,15 granos.

**Figura N7**

*Relación entre la cantidad de corte/relleno y desvío de granos/planta*



*Nota.* La media de granos por planta es de 215,83 granos.