

MEMORIA LIBRE

“AGRICULTURA DE PRECISIÓN PARA UN MEDIO NATURAL RENTABLE Y SOSTENIBLE”

FEADER 2022/061B



RESOLUCIÓN de 30 de diciembre de 2021, por la que se establecen las bases reguladoras de la concesión, en régimen de concurrencia competitiva, de las ayudas para la ejecución de proyectos de los grupos operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI), cofinanciadas con el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (Feader) en el marco del Programa de Desarrollo Rural (PDR) de Galicia 2014-2020, y tendrá una convocatoria para el año 2022 (código de procedimiento MR331B) (DOG nº18 del 27 de enero de 2022).

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Orígenes de la patata	7
1.2. Propiedades de la patata	9
1.3. Requerimientos del cultivo de la patata	10
1.4. La principal plaga en patatas: <i>Globodera</i> spp.	12
1.5. La producción de patata en España y Galicia	13
1.6. Orígenes del trigo	15
1.7. Propiedades del trigo	17
1.8. Requerimientos del cultivo del trigo	17
1.9. La producción del trigo en España y Galicia	20
1.10. La agricultura de precisión	23
2. OBJETIVOS Y DESARROLLO DEL PROYECTO	29
2.1. Objetivos generales del proyecto	29
2.2. Objetivos específicos en los ensayos en el cultivo de patatas	32
2.3. Objetivos específicos en los ensayos del cultivo de trigo	33
2.4. Objetivos ambientales del proyecto	34
3. CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO	36
3.1. Entidad solicitante	36
3.2. Importancia de la producción de patata en A Limia	36
3.3. Variedades de patata empleadas en los ensayos: <i>Lady Anna</i> y <i>Agría</i>	38
3.4. Nuevas tecnologías en la lucha contra el nemátodo de la patata	40
3.5. Importancia del cultivo de trigo en la zona de A Limia	41
3.6. Variedad de trigo empleada en el ensayo: <i>Caaveiro</i>	43
4. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS	45
4.1. Actividades desarrolladas: metodología del proyecto	46
4.1.1. Evaluación de la comarca	46
4.1.2. Caracterización previa del suelo de las parcelas	47
4.1.3. Trabajos agronómicos	52
4.1.4. Implantación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de patata y trigo	52
4.1.4.1. Tecnología empleada para digitalización de datos	57
4.1.4.2. Aplicación diferenciada de fertilizantes	62
4.1.4.3. Siembra empleando agricultura de precisión	63
4.1.4.4. Manejo diferenciado para el tratamiento del nemátodo en patata empleando agricultura de precisión	63
4.1.4.4.1. Procedimiento de muestreo para determinación de nemátodo	65
4.1.4.4.2. Manejo convencional en el control del nemátodo	66
4.1.4.4.3. Manejo de precisión según mapeo de infestación de nemátodo	66
4.1.4.4.4. Selección de puntos de muestreo para determinación de nemátodo en las parcelas	67
4.1.4.5. Sistema de riego empleando agricultura de precisión	67
4.1.5. Estudio de la cosecha y calidad de los cultivos	77
4.1.5.1. Defectos en patatas debidos a enfermedades por bacterias	79
4.1.5.2. Defectos en patatas debidos a enfermedades por hongos	81
4.1.6. Metodología para la implantación de nuevas herramientas	82

4.1.7. Gestión del proyecto	83
4.1.7. Difusión de los resultados obtenidos	83
4.2. Fases de la planificación de las actividades y cronograma	84
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	87
5.1. Descripción de la zona de ensayo	87
5.2. Conectividad y transmisión de datos recopilados	87
5.3. Parcelas de control	89
5.4. Control local de la meteorología	89
5.5. Ensayos en 2023: Patata y trigo	90
5.5.1. Cultivo de patata 2023	90
5.5.1.1. Zona de ensayo del cultivo de patata para ensayos de fertilización en 2023	90
5.5.1.2. Zonificación de la parcela de ensayos en 2023 en función de vuelos de dron y cámaras RGB	91
5.5.1.3. Precipitación acumulada y temperatura durante el ensayo de patata en 2023	95
5.5.1.4. Reparto de horas de desarrollo de la patata 2023	97
5.5.1.5. Análisis previos de las parcelas de patata en 2023: caracterización del suelo	99
5.5.1.6. Fertilización diferenciada de la parcela de patata en función del análisis obtenido	101
5.5.1.7. Siembra, seguimiento del cultivo de patata y cosecha 2023. Evaluación de resultados 2023	102
5.5.1.8. Instalación y registro de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo	105
5.5.1.8.1. Registro de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo: sensores de suelo y transmisores	106
5.5.1.9. Resultados en el estudio del nemátodo	108
5.5.1.9.1. Parcela de ensayos para el estudio del nemátodo en patata	108
5.5.1.9.2. Estado de infestación de nemátodo. Toma de datos	108
5.5.1.9.3. Distribución de la plaga en la parcela de ensayos	111
5.5.1.9.4. Tesis de tratamiento propuestas	112
5.5.1.9.5. Producto nematicida aplicado	113
5.5.1.9.6. Resultados de cosecha de patata obtenidos en función del tratamiento nematicida	113
5.5.1.9.7. Análisis de los costes precisión vs. convencional	116
5.5.1.10. Riego diferenciado en la parcela de ensayos 2023	117
5.5.1.10.1. Viabilidad económica de la instalación del sistema de riego	117
5.5.1.10.2. Consumos de agua	119
5.5.1.10.3. Eficiencia de riego	119
5.5.1.11. Producción bruta de patatas variedad Lady Anna en la cosecha de 2023	122
5.5.1.12. Producción comercial y porcentaje de destrío en la cosecha de 2023	124
5.5.1.13. Porcentaje de materia seca y relación tubérculos por kilogramo en las patatas cosechadas en 2023	127
5.5.1.14. Optimización de insumos en el cultivo de patata 2023	130
5.5.1.14.1. Ahorro de fertilizante	130
5.5.1.14.2. Ahorro en fitosanitarios	131
5.5.2. Cultivo de trigo 2023	132
5.5.2.1. Zona de ensayo del cultivo de trigo en 2023	132
5.5.2.2. Zonificación de la parcela de ensayos en 2023 en función de vuelos de dron y cámaras RGB	133
5.5.2.3. Ensayo de producción de trigo en 2023	135
5.5.2.4. Siembra, seguimiento del cultivo de trigo y cosecha 2023. Evaluación de resultados en el ensayo	136
5.6. Ensayos en 2024: Patata y trigo	137
5.6.1. Cultivo de patata 2024	137
5.6.1.1. Zona de ensayo del cultivo de patata en 2024	137
5.6.1.2. Zonificación de la parcela de ensayos de patata en 2024 en función de vuelos de dron y cámaras RGB	138

5.6.1.3. Precipitación acumulada y temperatura durante el ensayo de patata en 2024.....	141
5.6.1.4. Reparto de horas de desarrollo de la patata 2024	142
5.6.1.5. Análisis previos de las parcelas de patata en 2024: caracterización del suelo	144
5.6.1.6. Fertilización diferenciada de la parcela de patata en función del análisis obtenido	147
5.6.1.7. Siembra, seguimiento del cultivo de patata y cosecha 2024. Evaluación de resultados 2024	149
5.6.1.8. Instalación y registro de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo	152
5.6.1.9. Riego diferenciado en la parcela de ensayos 2024 y comparativa con 2023.....	153
5.6.1.9.1. Consumos de agua	153
5.6.1.9.2. Eficiencia de riego	153
5.6.1.10. Producción bruta de patatas en la cosecha de 2024	157
5.6.1.11. Producción comercial y porcentaje de destrío en la cosecha de 2024	158
5.6.1.12. Porcentaje de materia seca y relación de tubérculos por kilogramo en las patatas cosechadas en 2024.....	161
5.6.1.13. Optimización de insumos en el cultivo de patata 2024.....	163
5.6.1.13.1. Ahorro de fertilizante	163
5.6.1.13.2. Ahorro de fitosanitarios	164
5.6.1.14. Evaluación final de los ensayos de patata de 2023 y 2024	164
5.6.2. Cultivo de trigo 2024	165
5.6.2.1. Precipitación acumulada y temperatura durante el ensayo de trigo en 2024.....	165
5.6.2.2. Fertilización diferenciada de la parcela de trigo en 2024.....	166
5.6.2.3. Ensayo de producción de trigo en 2024.....	167
5.6.2.4. Comparación de cosecha en 2023 y 2024.....	169
5.6.2.5. Siembra, seguimiento del cultivo de trigo y cosecha 2024. Evaluación de resultados en el ensayo	171
5.6.2.6. Optimización de insumos en el cultivo del trigo en 2024.....	172
5.6.2.7. Ahorro de fertilizante	172
6. CONCLUSIONES.....	173
6.1. Conclusiones del ensayo de patatas comparando agricultura de precisión vs. convencional 2023.....	173
6.2. Conclusiones del ensayo de patata comparando agricultura de precisión vs. convencional 2024.....	174
6.3. Conclusiones del ensayo de trigo comparando agricultura de precisión vs. convencional 2023-2024	175
6.4. Conclusiones finales.....	176
6.5. Beneficios que puedan derivar del proyecto: repercusión económica, medioambiental y social	179
6.6. Aspectos clave para implantar agricultura de precisión. Desafíos a los que hacer frente.....	180
7. DIFUSIÓN DEL PROYECTO.....	182
8. BIBLIOGRAFÍA.....	193
9. ANEXOS	200

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de patata es uno de los pilares más importantes de la agricultura en la comarca de A Limia, siendo la base de la economía de la zona. Por otro lado, aunque en los últimos años la producción de trigo ha experimentado altibajos, se mantiene como uno de los cultivos más importantes de nuestro país, siendo Ourense la provincia gallega con mayor superficie dedicada al cultivo, y destacando A Limia como una de las principales zonas productoras.

Tradicionalmente, el manejo de estos cultivos en la zona se ha realizado mediante prácticas convencionales, basadas en la experiencia de los agricultores y el uso generalizado de insumos como fertilizantes y pesticidas. Sin embargo, en las últimas décadas, la agricultura ha experimentado una revolución tecnológica con la incorporación de herramientas digitales, lo que ha dado lugar al desarrollo de la *agricultura de precisión*. Este enfoque moderno se basa en la recopilación y análisis de datos específicos del cultivo y del terreno para optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia en la producción.

El manejo convencional de la agricultura, tiene limitaciones claras en términos de eficiencia en el uso de insumos y su impacto ambiental. La aplicación uniforme de fertilizantes y productos fitosanitarios en todo el campo, sin tener en cuenta la variabilidad del suelo y las condiciones locales, puede resultar en un desperdicio de recursos y en un aumento innecesario de los costos de producción. Además, esta aproximación puede llevar a la degradación del suelo y a la contaminación de los recursos hídricos debido al uso excesivo de insumos.

Por otro lado, la agricultura de precisión ofrece una alternativa más eficiente y sostenible al manejo tradicional. Este enfoque utiliza tecnologías avanzadas, como sensores, sistemas de información geográfica (SIG), imágenes satelitales y drones, para monitorizar las condiciones del suelo, la salud de las plantas y otros factores clave en tiempo real. De esta manera, los agricultores pueden aplicar insumos de manera precisa y localizada, optimizando su uso y reduciendo el impacto ambiental. Esta tecnología permite gestionar de forma más efectiva la variabilidad del campo, ajustando las prácticas de manejo a las necesidades específicas de cada parcela. Esto puede resultar en un aumento significativo de los rendimientos y una reducción de los costos de producción, al mismo tiempo que se protege el medio ambiente.

Este ensayo tiene como objetivo **comparar el manejo convencional y la agricultura de precisión** en los cultivos de patatas y trigo durante dos anualidades, evaluando las ventajas e inconvenientes de cada enfoque. Se explorarán los impactos en la productividad, la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad económica de ambas técnicas. A través de este análisis, se pretende comprender cómo la adopción de la agricultura de precisión puede transformar la gestión de los cultivos, ofreciendo una **solución más eficiente y sostenible** frente a los desafíos que enfrenta la agricultura moderna.

El proyecto “*AGRICULTURA DE PRECISIÓN PARA UN MEDIO NATURAL RENTABLE Y SOSTENIBLE*” (FEADER 2022/061B) ha sido llevado a cabo por el agricultor *AVELINO SANTANA GARCÍA*, dentro de las ayudas para la ejecución de proyectos de los grupos operativos de la Asociación Europea de Innovación (AEI), cofinanciados con el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (Feader) en el marco del Programa de Desarrollo Rural (PDR) de Galicia 2014-2020.

Para la ejecución del proyecto, se contó con la colaboración del *Centro Tecnológico da Carne (CETECA)*, como centro de investigación que da apoyo a la iniciativa, con las empresas especializadas *AMODO SOLUCIONES S.L.* y *FORTOP S.L.U.*, y con la implicación directa del técnico *JOSÉ ANTONIO MARRA BOLAÑO* de *Enxeñería e Xestión Agrorural Azul e Verde S.L.*

Todos los participantes en el proyecto cuentan con amplia experiencia en la temática del mismo, y colaboraron entre sí de forma asidua a medida que éste fue avanzando.

Avelino Santana García es un agricultor profesional dedicado al cultivo de la patata, además de otros cultivos como cereales y leguminosas. Gestiona una explotación con una producción anual de patata superior al millón de kg. Posee todas las instalaciones, así como la maquinaria necesaria, para desarrollar el proyecto. Tiene una trayectoria de más de 20 años en el cultivo de patata y cereal, con diferentes variedades, sistemas de riego, fertilización, etc., además de diversas colaboraciones en proyectos de investigación.

Por otra parte, el *Centro Tecnológico da Carne (CETECA)* participó como centro de investigación. Lleva realizando trabajos de transferencia tecnológica e investigación en la comarca de A Limia desde su creación, colaborando con el impulso del medio rural. Por ello, posee una amplia experiencia en el desarrollo de proyectos agrícolas, con más de 80 actividades realizadas, que abarcan aspectos como la gestión de suelos, estudios de abonado, riego, etc., lo que les permite efectuar un asesoramiento de las tareas agronómicas a los agricultores implicados, con recomendaciones relativas a la fertilización y al tratamiento de plagas y enfermedades de los cultivos. Además, dispone de una parcela de ensayos de más de 7 ha, así como de cámaras de conservación y laboratorios para realizar todo tipo de determinaciones, tanto de caracterización de suelos como de análisis de las cosechas.

Amodo Soluciones S.L. es una empresa con un elevado conocimiento y experiencia en modernizar el trabajo agrícola. Desarrolló el todo el sistema para la puesta en marcha de las técnicas de agricultura de precisión.

Por su parte, la empresa *Fortop S.L.U.* está especializada en el manejo de drones y la captación de imágenes. Por ello, realizó la toma de imágenes y vídeos de detalle para detectar incidencias en los cultivos de patata y cereal.

Finalmente, el técnico José Antonio Marra Bolaño, posee una larga trayectoria en la instalación de sistemas de riego en la comarca de A Limia, y ha colaborado anteriormente en proyectos de investigación.

1.1. Orígenes de la patata

La patata cultivada tiene más especies silvestres afines que cualquier otro cultivo, las cuales están ampliamente distribuidas en América, desde la región Suroeste de Estados Unidos hasta el sur de la cordillera Andina (López-Mateo, 2007).

Se cree que su cultivo se inició hace 7-10 mil años en la región del lago Titicaca en Perú/Bolivia (Hawkes, 1993). Fue introducida en España hacia 1570 y se extendió rápidamente por Europa en menos de un siglo (**Fig.1**).

Las variedades cultivadas actualmente en la zona templada pertenecen a la especie *Solanum tuberosum* subsp. *tuberosum*, originaria de Chile (López-Mateo, 2007).

La patata es el cuarto cultivo alimentario más importante a nivel mundial, después del arroz, el maíz y el trigo (Saidi y Hajibarat, 2021). Existen alrededor de cinco mil variedades de patata y al menos tres mil de ellas se encuentran principalmente en Perú, Bolivia, Ecuador, Chile y Colombia (Hijmans y Spooner, 2001) (**Fig.2**).

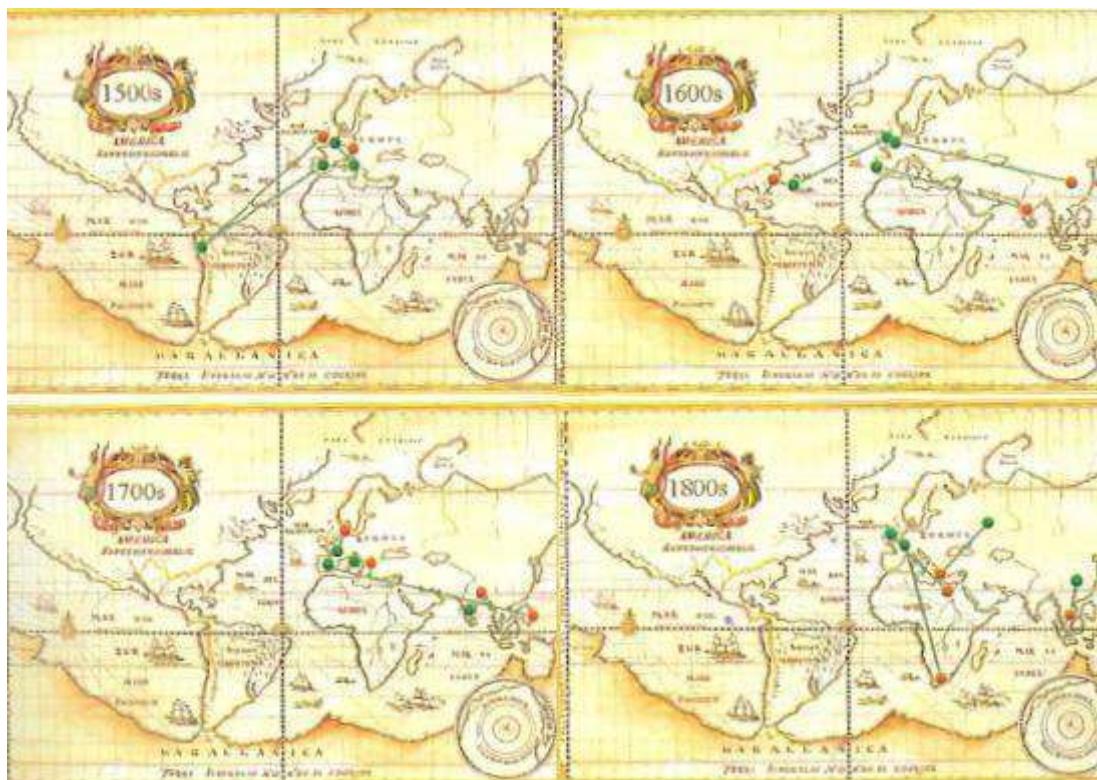


Fig.1. Expansión de la patata tras su descubrimiento desde el siglo XVI a XIX. En color rojo se muestra el origen, y en verde, el destino.

Fuente: Ruiz de la Galarreta (2008).

<https://www.mapa.gob.es/app/MaterialVegetal/>



Fig.2. Existen numerosas variedades de patata.

Fuente: <https://opcionrural.com.ar/2022/10/21/las-variedades-de-papas-mas-conocidas/>

Del cultivo de la patata en Galicia se hace mención por primera vez en el año 1607. De acuerdo con el investigador Bouhier (1979), durante los siglos XVII-XVIII, su cultivo se redujo a pequeñas zonas en monasterios y casas nobles. En esta época, solamente en algunas parroquias de la provincia de Ourense hay constancia de ésta, en rotación con lino o cereal. Entre 1750-1765, la patata se producía en diversos lugares de Galicia, ocupando una superficie reducida. A partir de 1785, aumentan las referencias a este cultivo, dedicado principalmente a la alimentación porcina. Durante la primera mitad del siglo XIX, la patata continúa extendiéndose por Galicia, y en esta época, en el tercio norte de la actual provincia de Lugo, en las montañas orientales y en la Alta Limia, la totalidad de las parroquias cultivaban patatas (Bouhier, 1979).

A partir de 1890, la expansión de la patata fue más rápida, reemplazando al barbecho en rotación con el centeno. Esta expansión fue posible, en parte, debido a la introducción de los abonos químicos, principalmente los superfosfatos, que se aplicaban al centeno y permitían disponer de abono orgánico para aplicar a la patata. Desde 1925, el cultivo experimentó un segundo desarrollo, y diez años después, la Alta Limia ya exportaba a Portugal patatas de consumo y de semilla (López-Mateo, 2007).

1.2. Propiedades de la patata

Las patatas son uno de los alimentos más consumidos y cultivados del mundo, dada su versatilidad, precio asequible y valor nutricional. Es la base de la alimentación de millones de seres humanos y contiene numerosos nutrientes esenciales.

Este tubérculo es una fuente de energía, aunque su aporte calórico depende de la manera de prepararlas y consumirlas. En la actualidad, alrededor del 2% de la energía alimentaria mundial procede de las patatas (Zaheer y Akhtar, 2016).

La composición nutricional de la patata depende de la variedad, el clima, el suelo y otros factores ambientales. Tiene un contenido aproximado del 20-22% de materia seca, de la cual un 82% son hidratos de carbono, principalmente almidón. También aporta diversas vitaminas (vitamina C, tiamina, niacina, riboflavina, ácido fólico), minerales (potasio, hierro, magnesio...), azúcares y fibra, así como metabolitos potencialmente beneficiosos para la salud (López-Mateo, 2007; Beals, 2018; Raigond *et al.*, 2023; Singh *et al.*, 2023).

Además, las patatas poseen proteínas y aminoácidos esenciales con un alto perfil nutricional, con concentraciones relativamente elevadas de lisina. El contenido de proteínas es de aproximadamente 2% del peso fresco. Actualmente, las propiedades tecnológicas de la

proteína de patata presentan un gran interés en diversas industrias, como la alimentaria (Bhutto *et al.*, 2024).

1.3. Requerimientos del cultivo de la patata

Las necesidades nutricionales de la patata varían a lo largo del desarrollo del cultivo, siendo críticas en la fase de desarrollo de los tubérculos.

El cultivo de patata requiere determinadas características del suelo. Los suelos más favorables para el desarrollo de este cultivo son los de textura franco-arenosa, con un buen nivel de materia orgánica y buena permeabilidad. Por el contrario, la planta no se desarrollará adecuadamente en suelos muy arcillosos y compactos. Así, para que el crecimiento de las raíces, se requiere un suelo suelto, friable, bien drenado y aireado, pero con un adecuado suministro de agua. Hay que tener en cuenta que con la mecanización se produce la compactación del terreno, lo que restringe el drenaje y la profundización de las raíces, pudiendo llegar a limitarse su desarrollo a los 40-50 cm superiores (Boone *et al.*, 1985; Stevens y Hammond, 1992).

En cuanto a las propiedades químicas, deben destacarse los valores de pH, capacidad de intercambio catiónico y riqueza en nutrientes.

La patata es un cultivo que tolera un pH bajo en el suelo. Según las investigaciones de Alonso-Arce (1996), el rango de pH óptimo para el cultivo de la patata puede establecerse entre 5,5-6,5, mientras que Porta *et al.* (1994) lo sitúan entre 4,5 y 7,0.

El pH influye en la disponibilidad de macro y micronutrientes. A pH ácido, se pueden presentar síntomas de deficiencia de calcio principalmente. Por el contrario, la disponibilidad de Mn, Zn y Cu, se reduce al aumentar el pH. Elementos tóxicos como Cd y Ni están más disponibles a pH ácido (López-Mateo, 2007).

El **nitrógeno** es el nutriente que más determina la producción vegetal, y en el caso de la patata, ejerce un importante papel en la producción y mantenimiento de la cubierta vegetal y el desarrollo de los tubérculos. La riqueza del suelo en nitrógeno está muy relacionada con su contenido de materia orgánica.

El **fósforo** es el segundo nutriente limitante de la producción (Jiménez-Aguilar, 1994), estimula el desarrollo del sistema radicular de la planta de patata (Domínguez-Vivancos, 1997) y acelera la maduración, contribuyendo a la tuberización y al desarrollo temprano de la cosecha. Ejerce, por otra parte, una gran influencia sobre los rendimientos, induciendo la formación de un

mayor número de tubérculos por planta. Además, tiene una influencia favorable sobre aspectos de calidad (gusto, contenido en almidón, dureza de la piel).

Por su parte, el **potasio** juega un papel significativo en el mantenimiento del vigor de la planta de la patata, si bien las necesidades de este elemento son distintas para las diversas variedades (Kumar *et al.*, 2004). Ésta absorbe cantidades importantes de este elemento, relacionado con la síntesis de azúcares y almidón, y la translocación de estos carbohidratos (transportados por la planta a través del floema) y, por tanto, con la obtención de grandes producciones de patata (Rhue *et al.*, 1986; Westermann *et al.*, 1994b).

Al igual que el nitrógeno, la aplicación de potasio tiene efectos sobre la calidad de la patata. El aumento de la fertilización potásica incrementa el tamaño medio del tubérculo (Moinuddin *et al.*, 2004). La fertilización en potasio también influye en las concentraciones de almidón, azúcares reductores y materia seca (Westermann *et al.*, 1994b), así como la incidencia de *corazón hueco* (defecto que se manifiesta como un orificio de forma irregular en el interior de la patata, causado por una respuesta fisiológica del tubérculo ante variaciones en las condiciones ambientales) (Panique *et al.*, 1997).

En el estudio llevado a cabo por López-Mateo (2007) sobre el cultivo de la patata en una parcela en la misma zona en la que se realizó el presente proyecto, se pone de manifiesto la importancia de la fertilización nitrogenada y potásica, así como las interacciones entre estos dos nutrientes.

Por otro lado, respecto a los micronutrientes, la patata no es un cultivo muy exigente en calcio, de ahí su buena adaptación a suelos ácidos. En cambio, el magnesio es esencial para la síntesis de proteínas y como activador de sistemas enzimáticos. Tiene sensibilidad media a la deficiencia de zinc, pero es altamente sensible a la deficiencia de manganeso. La deficiencia de zinc es común en suelos arenosos y pobres en materia orgánica (Alloway, 2008).

Los suelos gallegos normalmente son pobres en nutrientes, por lo tanto, suele ser necesario suministrar fertilizantes. Debe considerarse que la aplicación de altas dosis de los mismos a los suelos, con frecuencia muy permeables, puede llevar consigo riesgos de contaminación de acuíferos (López-Mateo, 2007).

Con respecto al clima, éste es un condicionante clave a la hora de determinar el desarrollo de la planta de patata y, por consiguiente, la producción de tubérculo. Así, el rango óptimo de temperatura para el desarrollo de la patata se sitúa en torno a 15-20°C, fijándose como valor de referencia 20°C de temperatura media durante la estación de crecimiento. Según Caldiz *et al.* (2002), el desarrollo no tiene lugar cuando la temperatura mínima está por debajo de 5°C o la

máxima por encima de 30°C. El efecto de la temperatura varía con el estado de desarrollo del cultivo (Jiménez-Aguilar, 1994). En lo que se refiere a la formación y desarrollo de los tubérculos, se ven favorecidos por temperaturas moderadamente frías de noche y moderadamente cálidas de día. La iniciación de la tuberización está favorecida por temperaturas inferiores a la óptima para la fotosíntesis, citándose como umbral superior para este proceso la temperatura de 20°C. Las altas temperaturas reducen la translocación de sustancias al tubérculo y favorecen el desarrollo de los tallos de la planta.

Además de la temperatura, la cantidad de agua con la que la planta cuenta para su desarrollo tiene un efecto determinante. La falta de agua suficiente causa una reducción en la producción de materia seca y limita el desarrollo del cultivo. En cambio, un exceso provoca un desarrollo vegetativo exuberante, un retraso en la tuberización y un descenso en el porcentaje de materia seca de los tubérculos (Van der Zaag, 1987; López-Mateo, 2007).

1.4. La principal plaga en patatas: *Globodera* spp.

La producción de patata enfrenta diversos retos, siendo el **control del nemátodo** uno de los principales problemas para garantizar un rendimiento óptimo y de alta calidad. Los nemátodos *Globodera pallida* y *G. rostochiensis*, pueden causar pérdidas significativas en los cultivos de patata, afectando el desarrollo de la planta y disminuyendo tanto el volumen como la calidad del tubérculo cosechado.

Globodera spp. (**Fig.3**) es un género de nemátodos formadores de quistes, y se trata de una plaga grave en el cultivo de patata, especialmente en regiones templadas. Su distribución en el campo se caracteriza por la aparición de corros o manchas irregulares, en lugar de una dispersión uniforme. Esta distribución responde a su biología y forma de multiplicación, la cual se concentra en áreas donde las condiciones de temperatura, humedad y presencia de raíces de patata son favorables.

El ciclo de vida del nemátodo inicia cuando los **juveniles de segundo estadio (J2)** eclosionan de los quistes en respuesta a estímulos químicos liberados por las raíces de la patata. Estos juveniles son móviles y se desplazan en el suelo para localizar las raíces de la planta huésped. Una vez en las raíces, penetran el tejido radicular, estableciéndose y formando una célula nodriza, de la cual se alimentarán. A medida que se desarrollan, los juveniles se transforman en adultos, diferenciándose en machos y hembras.

Las hembras fertilizadas se hinchan en el interior de la raíz y luego emergen al exterior, quedando parcialmente expuestas. Con el tiempo, cada hembra se transforma en un quiste, una estructura protectora que contiene cientos de huevos. Los quistes quedan en el suelo, al final del

ciclo, y actúan como reservorios, protegiendo los huevos de condiciones ambientales adversas y permitiendo que el nemátodo sobreviva durante años en ausencia de una planta huésped.

En el campo, la distribución enorros es resultado de esta forma de reproducción y supervivencia. Los quistes permanecen en áreas específicas del campo y, al eclosionar, las nuevas generaciones tienden a infestar nuevamente las mismas zonas, donde encuentran las mejores condiciones para multiplicarse. Esta expansión focalizada permite que los nemátodos se concentren y sigan reproduciéndose en estas áreas, generando orros de infestación, que se expanden lentamente en el tiempo. El conocimiento de esta distribución y ciclo de vida es clave para diseñar estrategias de control basadas en agricultura de precisión, permitiendo la aplicación localizada de tratamientos y reduciendo la diseminación del nematodo en el cultivo de patata.



Fig.3. Quistes de nemátodo en las raíces de la patata
Fuente: <https://web.inia.cl/nematododorado/fotos.php?page=2>

1.5. La producción de patata en España y Galicia

Según los datos del *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA)*, España es el octavo productor de la UE de patata con casi el 5% del valor (566 millones de euros) de la producción europea en el año 2021 (MAPA, 2022).

La producción de patata fresca de consumo en España (con aproximadamente 2,15 millones de toneladas), se concentra fundamentalmente en la patata de media estación y en la tardía, representando ambas el 76% del total. El sector de la patata aporta a la producción vegetal el 1,7% y el 1% de la producción de la rama agraria (MAPA, 2022).

A pesar de que su producción en España muestra una ligera tendencia descendente en los últimos años, para la campaña 2023 aumentó levemente (un 2,4%) con respecto a la campaña anterior (**Fig.4**). El 77% de la producción nacional se concentra en cuatro Comunidades Autónomas: Castilla y León, Galicia, Andalucía y Murcia (MAPA, 2023).

Con respecto a Galicia, el sector de la patata es de gran importancia económica, siendo la superficie dedicada al cultivo de 17.770 ha en 2023, ocupando la primera posición nacional. En producción, ocupa el segundo lugar, con un 17,8% de la producción española total, aunque ésta descendió un 4,9% respecto al año anterior con 363.139 toneladas (MAPA, 2023) (**Fig.5**).

A Limia, en la provincia de Ourense, es la comarca de Galicia con más superficie dedicada al cultivo de la patata (4.000-5.000 ha) (López-Mateo, 2007).

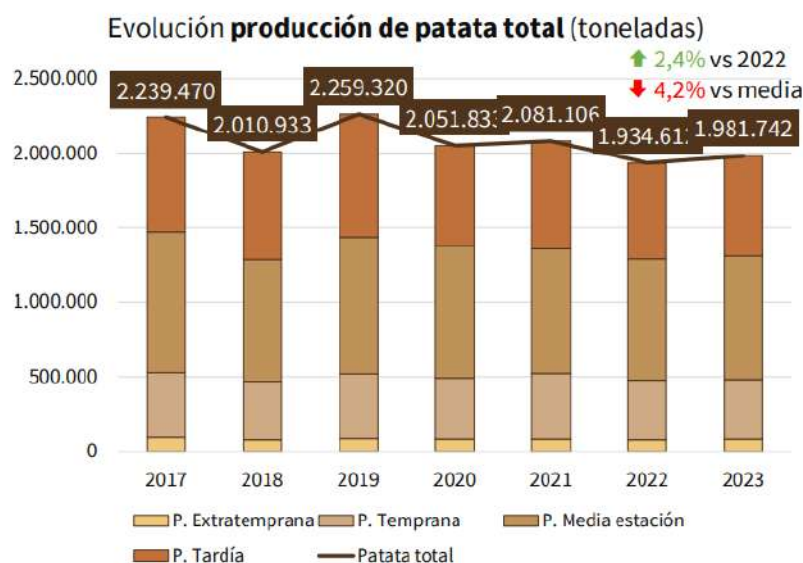


Fig.4. Evolución de la producción de patata en España (2017-2023).

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Análisis de la campaña de patata, 2023.

https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/analisisdecampanadepatata202328denoviembre2023_tcm30-667396.pdf

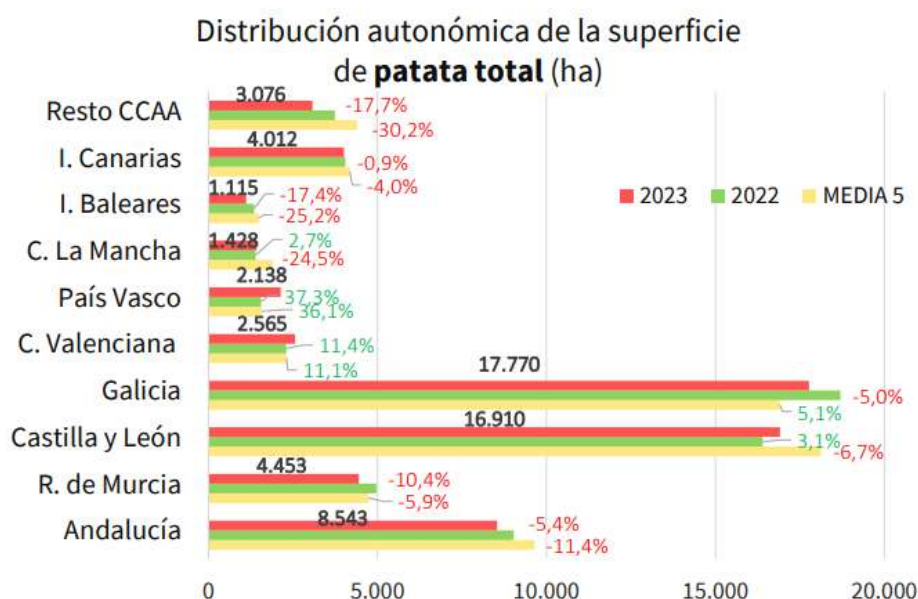


Fig.5. Distribución autonómica de la superficie dedicada al cultivo de la patata (2022 y 2023).

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). Análisis de la campaña de patata, 2023.

https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/analisisdecampanadepatata202328denoviembre2023_tcm30-667396.pdf

1.6. Orígenes del trigo

El trigo (*género Triticum*), pertenece a la familia de las gramíneas, siendo las variedades más cultivadas *Triticum durum* y *Triticum compactum*. El trigo harinero o panadero (*Triticum aestivum*) es el cereal panificable más cultivado en el mundo.

El origen del trigo cultivado se encuentra en Oriente Medio, en la región asiática comprendida entre los ríos Tigris y Éufrates, donde actualmente existen numerosas gramíneas silvestres emparentadas con el trigo. Desde Oriente Medio el cultivo del trigo se difundió en todas las direcciones. Las primeras formas de trigo recolectadas por el hombre, hace más de doce mil años, eran del tipo *Triticum monococcum* y *Triticum dicoccum*, caracterizadas fundamentalmente por tener espigas frágiles que se disgregan al madurar (Mauri Ablanque y Vergara García, 2003) (**Fig.6**).



Fig.6. Egipcios cultivando trigo.

Fuente: <https://www.lavanguardia.com/cultura/20191104/471310966081/egipcios-modificaban-geneticamente-trigo-3-000-anos.html>

En la actualidad, el trigo que se consume no es el mismo que el que cultivaron los primeros agricultores hace miles de años, ya que ha sufrido numerosas transformaciones a lo largo de la historia, fruto de la intervención humana y la adaptación al medio ambiente.

La evolución del trigo ha sido modelada por la selección, desde las especies más antiguas conocidas, hasta las modernas (*T. durum* y *T. aestivum*). Los primeros agricultores aprendieron a elegir las semillas con características deseables, como espigas más grandes y productivas o granos más voluminosos.

El trigo ha formado parte del desarrollo económico y cultural del hombre, siendo el cereal más cultivado. Es considerado un alimento para consumo humano, aunque gran parte se destina a la alimentación animal, así como a subproductos de la transformación industrial para la producción de piensos (Mauri Ablanque y Vergara García, 2003).

Actualmente, este cereal se cultiva en todo el mundo, siendo la principal área de cultivo la zona templada del hemisferio norte. Su rendimiento ha aumentado de manera exponencial a nivel mundial en los últimos años, debido a la mejora genética de las variedades y a los progresos en el manejo del cultivo. Este rendimiento se basa en tres parámetros fundamentales: número de plantas por unidad de superficie (que se regula por la densidad de siembra), número de granos por planta y peso del grano (dependientes de la variedad y la mejora genética), y cuyo producto daría como resultado el rendimiento total del cultivo.

La selección genética ha sido determinante en las mejoras morfológicas (altura de la planta, robustez del tallo...), resistencia a enfermedades, contenido en proteínas del grano y poder de cocción de la harina (Mauri Ablanque y Vergara García, 2003).

1.7. Propiedades del trigo

La propiedad más importante del trigo es la capacidad de cocción de la harina, debido a la elasticidad del gluten que contiene. Esta característica permite la panificación, constituyendo un alimento básico para el hombre (Mauri Ablanque y Vergara García, 2003).

El trigo es una fuente importante de carbohidratos y energía. También es rico en fibra, especialmente en su forma integral, y contiene proteínas de alto valor nutricional. Sus granos tienen una *envoltura o cáscara* (episperma), formada por diferentes capas, las cuales son ricas en celulosa, hierro, fósforo, calcio, magnesio, zinc y vitaminas del grupo B. En su interior, se encuentra el *germen o embrión* que contiene proteínas, fibra, vitamina E y B. El aporte de minerales es mayor en las variedades integrales e incluye zinc, selenio, yodo, potasio y pequeñas cantidades de magnesio, hierro, calcio y sodio.

Considerando la composición nutricional, son las proteínas las que determinan la calidad del trigo. Éstas se encuentran en el gluten, que es un complejo insoluble. La riqueza en proteínas se mantiene constante en los últimos estados de maduración, en cambio, el incremento de los azúcares es constante hasta el proceso de desecación del grano.

La calidad del trigo es dependiente de la variedad, y está influenciada por el clima, obteniéndose la mejor calidad en zonas áridas en comparación con las húmedas.

1.8. Requerimientos del cultivo del trigo

La siembra del trigo se realiza a finales de otoño (trigo de invierno) o primavera (trigo de primavera). La recolección suele realizarse desde mediados de mayo a finales de otoño, según la zona. El momento más conveniente para realizar la siega es cuando los tallos han perdido por completo su color verde y el grano tiene suficiente consistencia.

Existe una gran diversidad de variedades. Actualmente se comercializan las de paja corta y alto rendimiento, así como variedades de verano e invierno. Los trigos de invierno suelen cultivarse en zonas templadas, y los de invierno en zonas con inviernos fríos (latitudes altas) o inviernos suaves (latitudes bajas). En general, pueden distinguirse las variedades en función de su ciclo: variedades de otoño o de ciclo largo y variedades de primavera o ciclo corto (Mauri Ablanque y Vergara García, 2003).

La temperatura ideal para el crecimiento y desarrollo del cultivo de trigo está entre 10-24°C, pero lo más importante es la cantidad de días que transcurren para alcanzar una cantidad de temperatura denominada *integral térmica*. Este valor es variable según la variedad de que se trate. La temperatura no debe ser demasiado fría en invierno ni demasiado elevada en primavera, ni durante la maduración (Urbano-Terrón, 2015).

El periodo de germinación y arraigo del trigo es muy importante para la futura cosecha de grano, ya que necesita para germinar humedad, temperatura adecuada y aire a su alrededor. La temperatura óptima es de 20-25°C, pero puede germinar desde los 3-4°C hasta los 30-32°C. El aire es necesario para activar este proceso, por tanto, la capa superficial del suelo debe estar mullida. La humedad del trigo no debe sobrepasar el 11%, ya que, cuando se supera este porcentaje, la conservación del grano se hace difícil.

Si la cantidad total de lluvia caída durante el ciclo de cultivo ha sido escasa y es especialmente intensa en primavera, se puede producir el *asurado* (también denominado *golpe de calor*). Esto se produce cuando coinciden vientos secos acompañados de temperaturas elevadas, lo cual acelera la transpiración de la planta, de forma que las raíces son incapaces de suministrar el agua necesaria para compensar la evapotranspiración. Así, el grano que se está formando sufre una detención en el proceso y se vuelve rugoso. De todas formas, en años secos el trigo puede desarrollarse bien con 300-400 mm de lluvia, siempre que la distribución de ésta sea escasa en invierno y abundante en primavera (Urbano-Terrón, 2015).

En el proceso de *encañado* (crecimiento del tallo por alargamiento de los entrenudos), comienza un periodo de intensa asimilación de agua y de sustancias nutritivas, por tanto, es preciso que el suelo contenga bastante humedad. Puede ser necesario aplicar riego en esta fase. Durante el espigado, y posteriormente en plena madurez de las espigas, la humedad del suelo también es importante, ya que la planta está en plena actividad de asimilación y el agua es consumida rápidamente, empleada principalmente en trasladar el almidón y demás reservas desde las hojas al grano.

Teniendo en cuenta las **necesidades edáficas**, el trigo requiere de suelos profundos, para el buen desarrollo del sistema radicular. Los suelos arcillosos, al ser poco permeables, conservan demasiada humedad durante los inviernos lluviosos. El suelo arenoso requiere, en cambio, abundante lluvia durante la primavera, dada su escasa capacidad de retención. En general, se recomienda que las tierras de secano dispongan de un buen drenaje. Por otro lado, el trigo no se desarrolla adecuadamente en suelos demasiado ácidos; prefiere suelos de pH neutro o algo alcalino (Mauri Ablanque y Vergara García, 2003).

Este cereal necesita desarrollarse en un suelo asentado, sin malas hierbas y bien desmenuzado. La naturaleza de las labores, el modo de ejecutarlas y la época oportuna para su realización, varía con el cultivo que precedió al trigo, con la naturaleza del suelo y con el clima. Así, si anteriormente el suelo no ha sido cultivado, será necesario arar el suelo antes de la siembra y seguir con un barbecho labrado al menos un año. Antes de sembrar, será necesario un gradeo para deshacer los terrones. Si se cultiva a continuación de una leguminosa, se realizará una labor profunda antes del verano, pues las leguminosas poseen las raíces gruesas, y éstas dejan huecos en el suelo que son perjudiciales para el trigo. Después bastará con una labor superficial y un gradeo antes de la siembra. Si al trigo le precede un barbecho, antes de sembrar se realizará una labor superficial (si el terreno es suelto) o profunda (si es compacto), seguida de un gradeo. De forma general, antes de la siembra, si el terreno es muy suelto, conviene dar un pase de rodillo para comprimir el suelo y, después de la siembra, otro para que el suelo se adhiera bien a la semilla.

Con respecto a los requerimientos de macronutrientes como el **nitrógeno**, la absorción de éste depende de su disponibilidad en forma asimilable, y como consecuencia, puede dar lugar a una absorción excesiva, debido a condiciones adversas, como puede ser: la prolongación de la fase vegetativa, retraso de la maduración, disminución de la resistencia al frío y al encamado y mayor sensibilidad a las enfermedades.

Los mayores rendimientos se logran cuando se aporta una mayor cantidad de nitrógeno al comienzo del *macollado* (formación de la *macolla*, esto es, conjunto de tallos o espigas que nacen del mismo pie de una planta) y una mayor cantidad durante el crecimiento de los tallos. El aporte de nitrógeno demasiado temprano produce un exceso de espigas de reducido tamaño y estériles. Por otro lado, el abonado tardío reduce la fertilidad de las espigas. El balance de nitrógeno en el suelo se ve afectado por las condiciones climatológicas en invierno, en particular por la temperatura en el horizonte más superior del suelo y por las precipitaciones.

Otro elemento importante para el desarrollo del cultivo es el **fósforo**, el cual es adsorbido por la fracción coloidal del suelo, y por ello, debe ser aportado en cantidad suficiente al mismo. Este elemento favorece y anticipa la madurez de la semilla: una abundancia de fósforo puede adelantar hasta una semana la cosecha de trigo. El fósforo endurece los tejidos, dando más rigidez a la planta, mejorando la resistencia a las heladas, al encamado y al asurado.

El **potasio**, por su parte, interviene en la formación de almidón y en el desarrollo de las raíces. Reduce la transpiración, por lo que aumenta la resistencia a la sequía. Contribuye a la formación de un buen sistema radicular, proporcionando al cultivo una mayor resistencia al frío. La absorción de potasio es máxima durante el periodo del *encañado*.

Otros elementos importantes en el cultivo del trigo son el calcio y el magnesio. El calcio es determinante para el desarrollo de este cereal, pues influye en la formación y madurez de los granos (aunque no influye tanto en la producción como el nitrógeno, fósforo y potasio). Se encuentra en mayor cantidad en las hojas y cañas que en el grano.

Finalmente, la importancia de la **materia orgánica** del suelo radica en su efecto como correctora de los defectos que se puedan presentar: aumenta la retención del nitrógeno amoniacal, fósforo y potasio; hace más compactos los suelos arenosos y aporta soltura a los arcillosos (poco permeables y difíciles de arar) y aumenta las reservas hídricas del suelo.

1.9. La producción del trigo en España y Galicia

El sector de los cereales es un sector estratégico para nuestro país, con gran importancia por su conexión con el medio natural, y que además está ampliamente distribuido por toda nuestra geografía (MAPA, 2024).

Su relevancia radica en su valor económico, y por ser soporte fundamental de la alimentación humana y animal, al ser el sustento de una importante industria agroalimentaria y de elaboración de piensos.

Desde el punto de vista socioeconómico, debido a su aprovechamiento industrial, para la fabricación de piensos y harinas principalmente, los cereales favorecen el progreso del sector productivo y a generar mano de obra ligada al medio rural, contribuyendo a fijar población.

Actualmente, el sector del cereal abarca una superficie de aproximadamente 5,4 millones de ha, aunque debe destacarse el descenso paulatino que se está experimentado en los últimos años hacia otros cultivos o usos de suelo (MAPA, 2024).

La producción nacional media de cereales se sitúa en el entorno de los 20 millones de Tm, siendo los cultivos más relevantes, en términos productivos, la cebada, seguida del trigo, y en tercer lugar el maíz.

En nuestro país, según los datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), en el año 2021, el cultivo del trigo ocupaba 2.121.900 ha, con una producción de 8.220.100 Tm, la más elevada de los últimos 10 años (MAPA, 2022) (**Fig.7**).

De la superficie dedicada a este cereal, 1.865.800 ha correspondieron a trigo semiduro o blando (con una producción de 7.449.700 Tm), en el cual se incluyen variedades utilizables en la fabricación de pastas alimenticias. Además, 1.833.442 ha fueron de secano, con un rendimiento de 3.615 kg/ha, en comparación con los 5.465 kg/ha obtenidos en regadío.

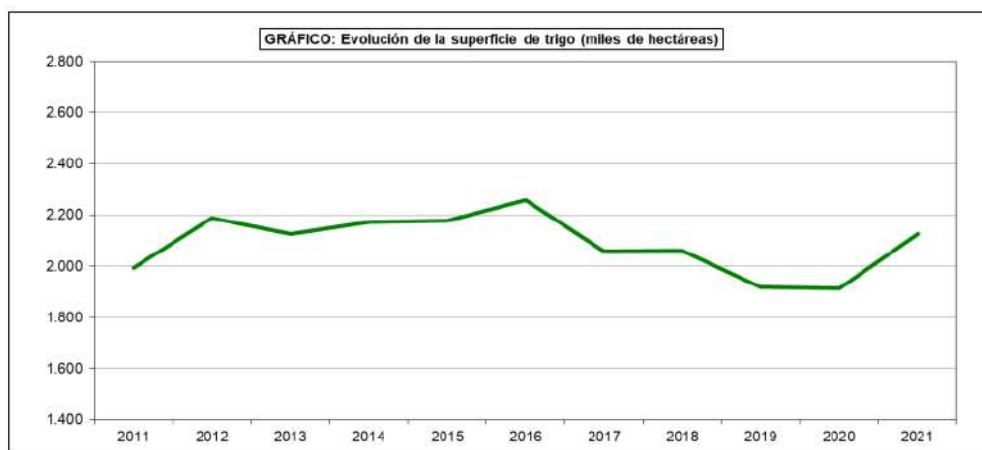


Fig.7. Evolución de la superficie dedicada al trigo en España (2011-2021).

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2022). Superficie y producciones de cultivos. <https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2022/FORMATO%20PDF/AE22-C07/CAP%C3%8DTULO%2007.pdf>

Además, España es uno de los principales exportadores de trigo en Europa, con una cuota de exportación del 12%. Los principales destinos de la exportación de trigo español son países de la Unión Europea, como Portugal, Italia y Francia.

Por comunidades, en el año 2021 Castilla y León fue la principal productora de este cereal, con 907.852 ha dedicadas a este cultivo (dando lugar a una producción de 3.883.335 Tm de grano), seguida de Andalucía, con 308.558 ha de cultivo, Castilla la Mancha (279.829 ha) y Aragón (259.293 ha). Galicia, por su parte, sembró 12.598 ha en ese mismo año, principalmente en secano, y obteniéndose un rendimiento de 2.817 kg/ha y una producción en grano de 35.492 Tm. Ourense es la provincia gallega con mayor superficie dedicada al cultivo del trigo, con 7.773 ha (MAPA, 2022) (**Tabla 1**).

Tabla 1. Análisis provincial de superficie, rendimiento y producción (2021) de trigo en Galicia.

Fuente: MAPA, 2022. Superficie y producciones de cultivos.

<https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2022/FORMATO%20PDF/AE22-C07/CAP%C3%8DTULO%2007.pdf>

7.1.2.3. CEREALES GRANO-TRIGO: Análisis provincial de superficie, rendimiento y producción, 2021

Provincias y Comunidades Autónomas	Superficie (hectáreas)			Rendimiento (kg/ha)		Producción de grano (toneladas)	Paja cosechada (toneladas)
	Secano	Regadío	Total	Secano	Regadío		
A Coruña	1.734	–	1.734	3.110	–	5.392	2.800
Lugo	2.942	–	2.942	2.650	–	7.796	631
Ourense	7.773	–	7.773	2.825	–	21.959	10.976
Pontevedra	149	–	149	2.315	–	345	200
GALICIA	12.598	–	12.598	2.817	–	35.492	14.607

Con respecto a los últimos años, según la publicación más reciente del *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación* (MAPA), sobre los *Avances de superficies y producciones de cultivos* del año 2024, la superficie dedicada al trigo en nuestra Comunidad ha aumentado levemente en los últimos años, estimándose una producción de 38.713 Tm para este último año (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis provincial de superficie, rendimiento y producción (2022-2024) de trigo en Galicia.

Fuente: MAPA, 2024. Avances de superficies y producciones de cultivos.

https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/cuaderno_julio2024_tcm30-693595.pdf

AVANCES DE SUPERFICIE Y PRODUCCIÓN							
TRIGO TOTAL				2024 JULIO			
PROVINCIA Y CC-AA	SUPERFICIES (HA)				PRODUCCIONES (1000 TM)		
	2022	2023	2024	2024	2022	2023	2024
	DEFINITIVO	PROVISIONAL	3	2023=100	DEFINITIVO	PROVISIONAL	7 2023=100
15 A Coruña	1.635	1.392	1.759		5,158	5,496	5,293
27 Lugo	3.498	2.050	3.345		9,532	5,485	10,071
32 Ourense	8.140	9.123	7.501		24,339	20,201	22,503
36 Pontevedra	175	241	285		0,406	0,425	0,846
GALICIA	13.448	12.806	12.890	100,7	39,435	31,607	38,713 122,5

Actualmente, la producción de trigo enfrenta múltiples retos, como la variabilidad climática, la degradación del suelo, el manejo ineficiente de insumos agrícolas y las plagas. Tradicionalmente, el manejo de cultivos se ha basado en prácticas uniformes, donde las decisiones se toman para grandes áreas, ignorando las particularidades de cada parcela. Este

método puede resultar en un uso excesivo o insuficiente de recursos, con impactos negativos tanto en el rendimiento como en el medio ambiente.

1.10. La agricultura de precisión

En los últimos años ha aumentado el interés hacia prácticas agrícolas como la **agricultura de precisión**, debido al reto que supone alimentar a una población que continúa creciendo, el incremento de los requisitos ambientales ante la conciencia sobre la sostenibilidad, la subida de los costes de producción y el aumento de los fenómenos climáticos debidos al cambio climático.

Según las estimaciones de la *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*, la producción de alimentos deberá aumentar más de un 50% en 2050, debido al incremento de la población mundial, que alcanzará los 10.000 millones de habitantes. Por ello, los agricultores deberán satisfacer la demanda mediante una **producción agrícola sostenible y rentable** que maximice el rendimiento de los cultivos. En este contexto, juegan un papel fundamental las innovaciones tecnológicas que se han desarrollado en el ámbito agrícola, que ha llevado a la entrada de la agricultura de precisión en las explotaciones agrarias de toda Europa.

De esta forma, la agricultura de precisión se plantea como una solución a los efectos derivados del cambio climático y a las exigencias ambientales ante una población en constante crecimiento. A través de la innovación, se busca alcanzar una producción agrícola viable a largo plazo. La combinación de rentabilidad y sostenibilidad es clave para asegurar la seguridad alimentaria, así como el presente y futuro de las comunidades rurales.

La *International Society of Precision Agriculture (ISPA)* define la **agricultura de precisión** como una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales, espaciales e individuales de cultivos y animales.

Por tanto, es una práctica agrícola que se basa en el uso de tecnología e información para monitorear y gestionar los cultivos y el suelo de manera óptima. Se caracteriza por la **aplicación precisa de insumos** como agua, fertilizantes y pesticidas, en el lugar y momento adecuados, utilizando dispositivos tecnológicos como sensores, sistemas de posicionamiento global (GPS) y drones.

Tiene su origen en EEUU, entre las décadas 70 y 80, donde se crearon los primeros sensores digitales, y se utilizaron en el monitoreo de parcelas. En esta tecnología **se consideró el suelo como una unidad heterogénea**, dando importancia al concepto de “variabilidad del suelo”, y creando una nueva perspectiva donde ya no se considera al campo cultivado una

sola área de terreno, trazando su división por segmentos. Sin embargo, la implementación de estos dispositivos no fue suficiente para lograr mayores adelantos en la época, y no fue hasta la década de los 90 cuando, con la liberación de uso del GPS, se creó maquinaria que disponía de herramientas de geolocalización, como cosechadoras y sembradoras.

Los **beneficios** de adoptar esta innovadora forma de agricultura incluyen la **reducción de costes** por el menor uso de insumos, el **incremento en la producción** debido a la aplicación eficiente de recursos, la **mejora en la sostenibilidad** ambiental por la reducción en el empleo de químicos y uso más eficiente del agua, y la **precisión en la aplicación** de recursos, minimizando los residuos liberados al medioambiente.

Esto permite un mayor control por parte del agricultor de las unidades de producción y un mejor seguimiento de las condiciones de campo, lo que permite detectar a tiempo cualquier eventualidad. Además, la aplicación de estas tecnologías favorece la obtención de mayor rendimiento, lo que se traduce en una elevada rentabilidad, al disminuir los insumos y el nivel de inversión en ellos, además de un uso más eficiente de los recursos, así como procesos de producción más simplificados.

Por otro lado, **también presenta desafíos**, como que implica una elevada inversión inicial, precisa de mano de obra especializada en las *Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)* y exige una formación específica en los ámbitos tecnológico, ambiental y administrativo.

La adopción de prácticas de agricultura de precisión tiene un gran potencial para reducir el impacto ambiental de la agricultura. Dentro de la optimización de la gestión de los cultivos y de los recursos agrícolas, existen **diferentes herramientas o técnicas para la agricultura de precisión**. Entre las más utilizadas se encuentran los *Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)*, los drones, los mapas de rendimiento, los sensores, los *Sistemas de Información Geográficos (SIG)* y modelos de ayuda para la toma de decisiones (*Sistemas de Soporte a la Decisión-DSS*) (**Fig.8**).

Los **sistemas de GPS**, empleados en maquinaria como tractores y cosechadoras, se utilizan para crear mapas detallados, que facilitan el seguimiento de las actividades que se llevan a cabo en la explotación. Permiten realizar acciones de laboreo, siembra y cosecha precisas, así como la aplicación de insumos y la detención de plagas y enfermedades, reduciendo la compactación del suelo y mejorando la salud de los cultivos.

Los **sensores** son otra de las herramientas empleadas en la agricultura de precisión. Pueden monitorear la situación de los cultivos con el objetivo de maximizar la producción, desde la humedad y la temperatura del suelo, hasta el estado de las plantas. La utilización de sensores

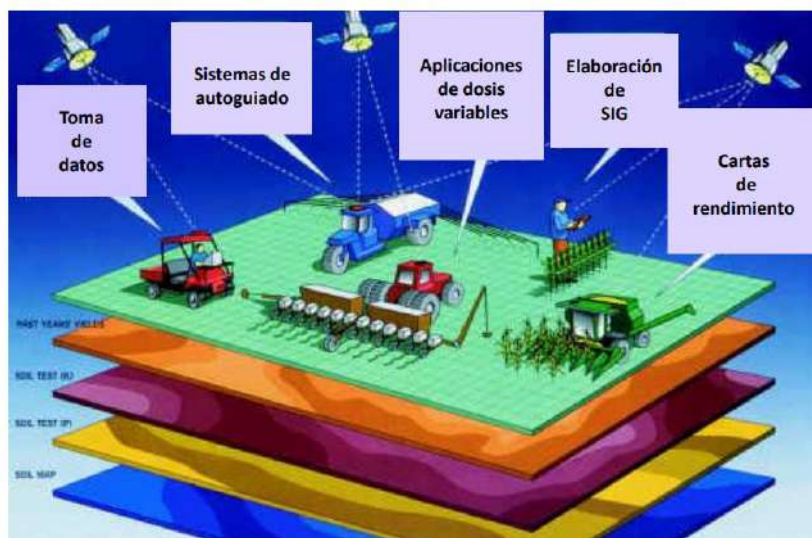
de humedad del suelo y **sistemas de riego automatizados** facilitan una mayor optimización del riego, minimizando el uso excesivo de agua.

Los **drones** equipados con cámaras de alta resolución permiten mapear la variabilidad dentro de las parcelas, lo cual facilita la identificación de zonas con diferentes necesidades de riego y fertilización, obteniendo imágenes detalladas del estado de los cultivos. Además, su uso resulta útil para medir la salud de las plantas, tratar malas hierbas, predecir su rendimiento y detener a tiempo cualquier adversidad que surja (**Fig.9 y 10**).

Otra de las herramientas empleadas son los **mapas de rendimiento**, que permiten evaluar cuál es la variabilidad productiva de los cultivos en una parcela. Esta información permite a los agricultores establecer estrategias de siembra y aplicación de insumos, incrementando la precisión agrícola y, en consecuencia, la producción.

Los **Sistemas de Información Geográfica (SIG)** posibilitan la **creación de mapas interactivos con capas** que muestran información detallada sobre las áreas de la parcela que interesen específicamente. De esta manera, puede identificar, monitorear y corregir adversidades, estimar el rendimiento de los cultivos, y planificar la fertilización o la gestión del riego, a través de la evaluación del estrés hídrico de los cultivos (**Fig. 11**).

Los **Sistemas de Soporte a la Decisión (DSS)** son **herramientas y servicios de apoyo para la toma de decisiones**, que recopilan datos agronómicos y meteorológicos, y ofrecen recomendaciones de manejo basadas en su análisis. Con ellos, los agricultores son capaces de evaluar diferentes opciones y tomar decisiones más efectivas a partir de la información de la que disponen.



Tecnologías de agricultura de precisión

Adquisición de datos



SENSORES
Captadores de rendimiento



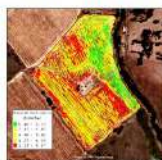
SENSORES
Captadores de adquisición de datos



Sistemas de localización
GPS

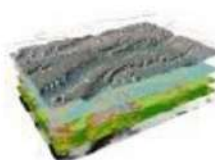
Tratamiento de la Información

MAPAS
Mapas de rendimiento



MAPAS
Mapa de información

Sistemas de información geográficos
SIG



Toma de decisiones

Modelos de ayuda para la toma de decisiones
DSS



Modelos de producción de cultivos

Acciones en el campo



Sistemas de Autoguiado



Sistemas para modular las dosis durante la operación
ACTUADORES O VRT



Fig.8. Tecnologías existentes en agricultura de precisión.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018). Jornada Técnica sobre el cultivo sostenible de la lavanda e innovaciones en agricultura de precisión.

https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/marianosuarezapc Fuentes_tcm30-483044.pdf



Fig.9. Dron empleado en los ensayos de agricultura de precisión.

VUELO



ANALISIS

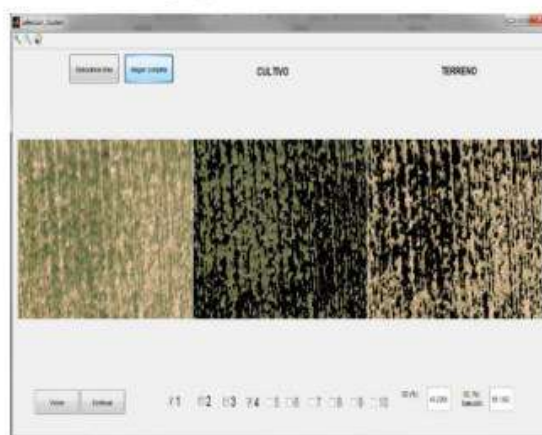


Fig.10. Aplicación de los drones en agricultura de precisión.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018). Aplicación de los drones en la agricultura de precisión.

https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/josefernandoortegacifuentes_12092018_tcm30-483045.pdf

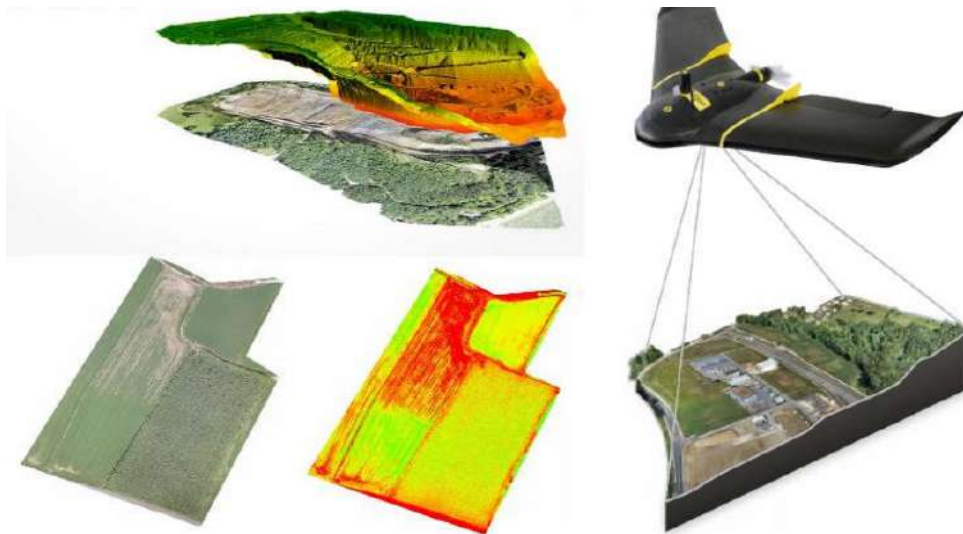


Fig.11. Empleo de drones en agricultura de precisión.

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018). Jornada Técnica sobre el cultivo sostenible de la lavanda e innovaciones en agricultura de precisión.

https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/marianosuarezapcifuentes_tcm30-483044.pdf

2. OBJETIVOS Y DESARROLLO DEL PROYECTO

2.1. Objetivos generales del proyecto

La **sostenibilidad** y la **competitividad** en la producción agronómica son temas de creciente relevancia en el contexto actual, marcado por el cambio climático, el aumento de la población mundial y la presión sobre los recursos naturales. En este marco, el presente proyecto tiene como objetivo central la aplicación de estos dos conceptos en los sistemas de producción agronómica gallegos, en regiones agrícolas extensivas de gran importancia como la zona de A Limia.

Para lograr este propósito, se propone el **desarrollo e implementación de nuevas tecnologías** que integren herramientas de programación y equipamientos de **Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC)**, lo que permitirá la adopción de prácticas de agricultura de precisión. Así, se implantaron técnicas modernas de agricultura de precisión para lograr un ahorro significativo de los costes, minimizar el uso de agua de riego y reducir el uso de fertilizantes y fitosanitarios. Estas técnicas consistieron en la sensorización de las parcelas de ensayo, la determinación de parámetros de fertilidad, el diseño de un panel de control de dichas parcelas, la obtención de datos estadísticos, el montaje de vídeos de la zona con secuencias detalladas de los puntos de control y la puesta a punto de sistemas automáticos de gestión de las necesidades hídricas.

La **agricultura de precisión** es un enfoque innovador que busca **optimizar la producción agrícola** a través de la observación minuciosa y el análisis detallado de los cultivos y el suelo. Este método no solo contribuye a aumentar la eficiencia de los sistemas agrícolas, sino que también incide de manera directa en la mitigación de los impactos ambientales asociados a las prácticas agrícolas tradicionales. A través del **uso de drones** para la monitorización de campos y la incorporación de vehículos y equipos auxiliares, se busca trabajar con precisión centimétrica, permitiendo así una gestión más efectiva y responsable de los recursos.

Uno de los aspectos más destacados de este proyecto es la atención a la **variabilidad espacial y temporal de los cultivos y suelos**. Esto se traduce en un enfoque más personalizado en la siembra y aplicación de insumos, teniendo en cuenta las particularidades de cada terreno.

En este sentido, se planea poner en marcha **técnicas de agricultura de precisión** en dos de los **cultivos más relevantes del sur de Galicia**: la **patata** y el **trigo**. Para ello, se desarrollará un mapa tridimensional que recoja datos geográficos, climatológicos, edáficos y de análisis de suelos, los cuales serán georreferenciados para proceder a la zonificación de los terrenos en función de su productividad potencial.

El proyecto no se limitará a la mera observación y análisis, sino que también se enfocará en la **automatización de las labores de siembra y la aplicación de agroquímicos**. Esto permitirá trasladar el conocimiento previo al campo de manera eficaz, garantizando que las variaciones necesarias se realicen en función de la fertilidad de cada zona o de incidencias detectadas en la ubicación de los cultivos. La modernización de las técnicas agrícolas que se implementará en este proyecto tiene como fin **lograr un significativo ahorro de costes, así como minimizar el uso de agua de riego, nematicidas, fertilizantes y fitosanitarios**.

Estos productos fitosanitarios pueden ser contaminantes si se aplican en exceso, por lo que este proyecto no solo busca mejorar la competitividad de los sistemas de producción agrícola en Galicia, sino también garantizar que esta mejora se realice de una manera sostenible, beneficiando tanto a los agricultores como al medio ambiente. Al integrar tecnologías avanzadas y prácticas agrícolas modernas, se espera no solo aumentar la producción, sino hacerlo de manera que respete y preserve los recursos naturales para las futuras generaciones.

Por otro lado, en general, en la agricultura convencional existe una falta de criterio en el uso del agua de riego, así como una nula automatización de los sistemas de riego. Esta situación, junto con la diversidad en los tipos de suelo en Galicia, y más concretamente en la zona de estudio, nos llevó a plantearnos la instalación de un sistema de riego el uso eficiente.

En resumen, el **objetivo principal** del proyecto ha sido la **implantación de una agricultura de precisión como una estrategia para el manejo de los cultivos de patata y trigo en la comarca de A Limia**, proporcionando a los agricultores los medios necesarios para modernizar los actuales sistemas agrarios de producción. De esta forma, se pretendió conseguir explotaciones agrícolas más tecnificadas, eficientes y medioambientalmente sostenibles.

Para lograr este objetivo general, se plantearon los siguientes **objetivos parciales**:

- 1) **Identificar las necesidades específicas** de los suelos de las parcelas, implantando la geolocalización y aplicando tecnologías de precisión, para su posterior **manejo en secciones**. De esta forma, pudieron realizarse tratamientos diferenciados por unidades homogéneas de terreno, con la intención de maximizar el rendimiento de los cultivos y logrando una reducción de los costes.
- 2) Diseñar e **implantar paneles de control en la maquinaria agrícola**, lo que permitió visualizar los datos recabados de forma sencilla, y favoreciendo la retroalimentación de los sistemas de manejo, en función de los datos extraídos en el análisis previo de las parcelas. Con esto, se obtuvo la información necesaria para programar la maquinaria,

automatizando las labores de siembra y la aplicación de agroquímicos, en función de la variabilidad de la fertilidad por la zona o según las incidencias detectadas.

El resultado de este objetivo fue la ejecución de tratamientos diferenciados, poniendo en uso la maquinaria de los agricultores, además de la transferencia de información de los mapas suelo y de rendimiento.

- 3) Desarrollar un **sistema de análisis de imágenes**, tomadas **con drones**, para el control de cultivos, obteniendo así mejoras cuantificables (en rendimiento, calidad y homogeneidad de las cosechas) y una **reducción en el consumo de insumos agrícolas**. Asimismo, en este estudio pudieron contrastarse los resultados obtenidos en parcelas en las que se emplearon técnicas de precisión frente a otras trabajadas de forma convencional, tanto para patata como para trigo, considerando los costes y la calidad de las cosechas.

Esto permitió cuantificar el ahorro de los costes de producción, y pudo comprobarse que se redujo el impacto ambiental de las labores en los cultivos, mediante el ahorro de insumos (semillas, fertilizantes, herbicidas, nematicidas, fungicidas...) de hasta un 20%.

- 4) Diseñar un **sistema de riego automático**, que permitió conocer en tiempo real el estado de humedad del suelo, y en base a esto, dosificar el agua de acuerdo a las necesidades del cultivo. En este caso, se evaluó **en patata**, procurando optimizar el uso en el agua de riego por aspersión, poniendo a punto un sistema de control remoto y tele-gestión en tiempo real, que facilitó el funcionamiento más eficiente del riego, reduciendo los requerimientos de mano de obra.
- 5) **Generar el conocimiento** necesario para evaluar los beneficios económicos y medioambientales de la aplicación de prácticas precisas, alentando así a otros agricultores de la zona a la implantación de estas nuevas técnicas de manejo sostenible, fomentando la transferencia al sector primario. Esto facilitó a los agricultores el control y la actualización de los cuadernos de campo, para un seguimiento más detallado de cada parcela, y cuyo contenido digitalizado permitirá optimizar y planificar futuros trabajos.

2.2. Objetivos específicos en los ensayos en el cultivo de patatas

El **objetivo principal** del ensayo fue **comparar el rendimiento y la sostenibilidad del cultivo de patata** bajo dos sistemas de manejo agrícola: **agricultura convencional** y **agricultura de precisión**, dentro de una misma parcela, dividida en dos áreas de manejo diferenciado, y durante dos anualidades. La variedad seleccionada para el estudio es *Lady Anna*, cultivada en la comarca de A Limia.

Para ello, los **objetivos específicos** que se han planteado han sido:

- ✓ **Comparación de la productividad:** evaluar la diferencia en el **rendimiento** de la patata bajo ambos sistemas. Con esta finalidad se midió la cantidad total de patatas cosechadas, el tamaño de los tubérculos y la calidad del producto final (peso, forma y presencia de defectos). El sistema de agricultura de precisión buscó optimizar la producción mediante la siembra, fertilización y control fitosanitario sectorizados, en contraste con la homogeneidad del manejo convencional.
- ✓ **Evaluación del uso de insumos:** comparar el consumo de agua de riego, fertilizantes, nematicidas y fitosanitarios en ambos sistemas. La agricultura de precisión aplicó insumos solo donde era necesario, mientras que en la agricultura convencional se aplicaron de manera uniforme en toda la parcela.
- ✓ **Análisis del impacto ambiental:** cuantificar la reducción en el uso de insumos químicos (fertilizantes y fitosanitarios) y el ahorro de agua en el sistema de agricultura de precisión, comparado con el sistema convencional. Este análisis evaluó su capacidad para mitigar el impacto ambiental, especialmente en términos de menor contaminación de suelos y aguas.
- ✓ **Evaluación de los beneficios:** el ensayo buscó determinar si la agricultura de precisión presenta diferencias significativas en función de la **productividad, sostenibilidad y eficiencia**, en comparación con la agricultura convencional, en la producción de patata en A Limia.

2.3. Objetivos específicos en los ensayos del cultivo de trigo

Como en el caso del cultivo de la patata, la finalidad de este estudio fue **contrastar el rendimiento y la sostenibilidad del cultivo de trigo** empleando técnicas de **agricultura convencional y agricultura de precisión**, dentro de una misma parcela, en la comarca de A Limia, dividida en dos áreas de manejo diferenciado.

Más concretamente, los **objetivos específicos** fueron:

- ✓ **Comparación de la productividad:** estudiar los rendimientos de este cereal utilizando agricultura tradicional y de precisión. El sistema de agricultura de precisión pretendió optimizar la producción mediante la siembra, fertilización y control fitosanitario sectorizados.
- ✓ **Optimizar el uso de insumos agrícolas:** comparar el consumo de fertilizantes y fitosanitarios empleando ambos sistemas.
 - Cuantificar la disminución en el uso de agroquímicos mediante la aplicación de dosis variables.
 - Analizar la eficiencia del uso de recursos, maximizando los beneficios económicos y minimizando el desperdicio.
- ✓ **Minimizar el impacto ambiental:** determinación de la reducción en el uso de fertilizantes y fitosanitarios, en el sistema de agricultura de precisión, comparado con el sistema convencional. También se pretendió valorar la contribución de estas prácticas en la conservación del suelo y el agua.
- ✓ **Evaluación de los beneficios (viabilidad económica):** El ensayo buscó determinar si la agricultura de precisión ofrece **ventajas** significativas en **productividad, sostenibilidad y eficiencia**, en comparación con la agricultura convencional, en la producción de trigo en la zona.
- ✓ **Generar conocimiento aplicable a la región de A Limia:** Identificar las tecnologías más efectivas para la gestión del trigo *Caaveiro* en las condiciones locales y proveer recomendaciones prácticas para los agricultores interesados en adoptar la agricultura de precisión.

2.4. Objetivos ambientales del proyecto

Debemos destacar que la puesta a punto de estas técnicas influyó en **mejoras medioambientales directas**, debido al ahorro de recursos como el agua y productos agroquímicos, favoreciendo una mejor gestión ambiental de los cultivos. Además, se realizó un manejo adecuado de los planes de fertilización de los cultivos, con pequeñas modificaciones en relación a los tratamientos tradicionales. No obstante, tuvieron siempre en cuenta las recomendaciones agronómicas que permitan preservar los recursos naturales de la zona de cultivo.

Por tanto, estos ensayos **no causaron perjuicio** significativo alguno a los siguientes **objetivos ambientales** (Reglamento UE 2020/850):

1. Mitigación del cambio climático. Esta actividad no causó ningún daño significativo en este aspecto, ya que no produjo importantes emisiones de gases de efecto invernadero.
2. Adaptación al cambio climático. En nuestro caso, los ensayos llevados a cabo no tuvieron un impacto adverso del clima actual y futuro, sobre la propia actividad, las personas o la naturaleza.
3. Uso sostenible y protección de los recursos hídricos. Esta actividad no fue perjudicial para el buen estado de las masas de agua.
4. Transición a la economía circular. Los experimentos realizados no produjeron ningún daño significativo a la economía circular, incluyendo la prevención y el reciclaje de residuos, el uso ineficiente de materiales o de recursos naturales, ni aumentó la generación, incineración o eliminación de residuos, así como daños ambientales importantes.
5. Prevención y control de la contaminación a la atmósfera, el agua o el suelo. La actividad desarrollada no fue perjudicial en este aspecto.
6. Protección y restauración de la biodiversidad y el ecosistema. Los estudios realizados en este proyecto no fueron nocivos para el buen estado de los ecosistemas, o para el estado de conservación de los hábitats y especies.

De esta forma, este estudio contribuye a un objetivo medioambiental, de conformidad con el **Reglamento de Taxonomía de la UE** (Reglamento UE 2020/850) (artículos 10 a 16). Dicho Reglamento tiene como finalidad alcanzar una sostenibilidad que sea medible y comprobable.

El **Reglamento de Taxonomía de la UE** establece un marco claro para establecer si una organización o entidad es realmente sostenible y sustentable en términos de su Gestión Ambiental y sus esfuerzos de Responsabilidad Social. Se deberá cumplir con el principio de “no causar perjuicio significativo al medioambiente” (en inglés, *Do No Significant Harm-DNSH*).

En nuestro caso, se considera que cumple con dicho principio, en lo que respecta a los diferentes objetivos en cuestión. El cumplimiento del *principio DNSH obliga a realizar una autoevaluación* que asegure que la inversión o reforma no afecta negativamente a uno, o varios, de los objetivos medioambientales citados previamente (*Guía técnica sobre la aplicación del principio de “no causar un perjuicio significativo” en virtud del Reglamento relativo al Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (2021/C 58/01)*).

3. CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS ACTIVIDADES DEL PROYECTO

3.1. Entidad solicitante

Avelino Santana García es un agricultor profesional dedicado principalmente al cultivo de la patata, además de otros cultivos como cereales y leguminosas. Posee una explotación con una producción anual de patata superior al millón de kg. Ha participado como socio líder y entidad solicitante del proyecto debido a que dispone de parcelas y de todas las instalaciones (almacén, invernadero...), así como la maquinaria necesaria, para su correcto desarrollo. Además, tiene una trayectoria de más de 20 años en el cultivo de la patata, realizando ensayos con diferentes variedades, sistemas de riego, fertilización, etc., además de su participación en varios proyectos de investigación.

Este productor primario asumió las funciones de responsable del proyecto e interlocutor con la administración, así como la coordinación de los socios. Puso a disposición del proyecto cuatro de sus parcelas en la comarca de A Limia, y la maquinaria necesaria para su manejo (abonado, aplicación de fitosanitarios y riego). Fue el encargado de realizar las labores agrícolas en las parcelas, participando en los ensayos planificados en campo, así como del seguimiento de los cultivos.

3.2. Importancia de la producción de patata en A Limia

Como ya hemos mencionado, el **sector de la patata en Galicia** tiene una gran relevancia económica, siendo la Comunidad española con mayor producción. Dentro de ésta, se encuentra la comarca de **A Limia**, en la provincia de Ourense, es la comarca con **más superficie dedicada al cultivo de la patata** (4.000-5.000 ha). Aunque en algunos casos es para autoconsumo, hay zonas que tienen una dependencia total de este cultivo. Se estima que alrededor de 350 familias viven exclusivamente de la agricultura, y otras 500 participan en ella como segunda actividad.

La patata ocupa alrededor de un 27-28% del espacio agrario de A Limia. Esto es debido a alta rentabilidad del cultivo, que permite realizar inversiones importantes no sólo en maquinaria, sino también en fertilizantes y productos fitosanitarios (López-Mateo, 2007).

De esta forma, el cultivo de la patata representa la **base socioeconómica de la zona**, centrada en la producción, principalmente para comercialización de consumo en fresco (**Fig.12**).

Según datos del *Instituto Galego de Estatística*, en el año 2023 se obtuvo un rendimiento de patatas en la provincia de Ourense de 47,7 Tm/ha (25,6 Tm/ha de patata de media estación y 22,1 Tm/ha de tardía).

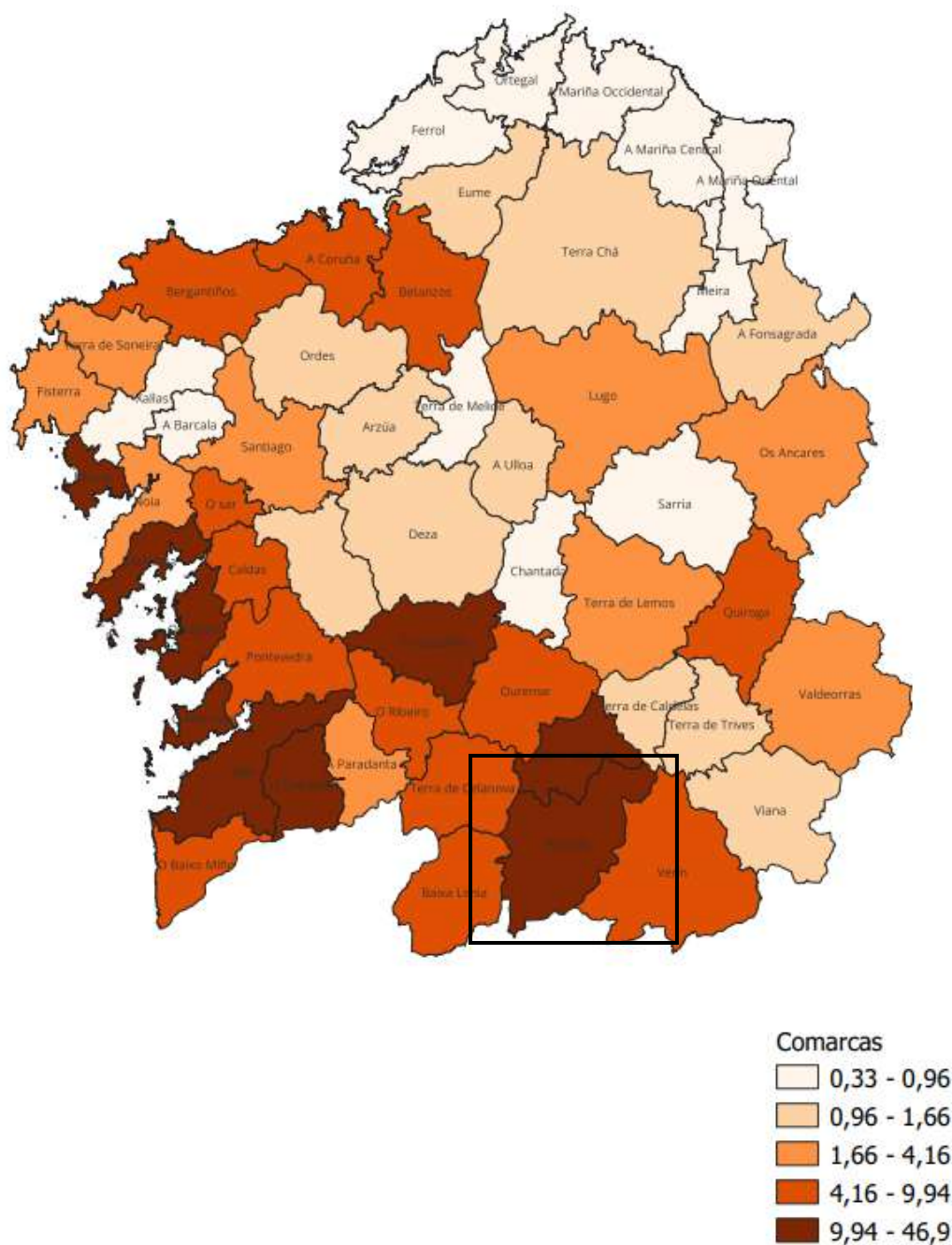


Fig.12. Mapa del porcentaje sobre la superficie agraria útil (SAU) de la superficie dedicada al cultivo de tubérculos en las distintas comarcas gallegas.

Fuente: Instituto Gallego de Estadística. Anuario de Estadística Agraria 2023.

<https://agacal.xunta.gal/es/estadistica-y-publicaciones/estadisticas>

En esta zona, es habitual encontrar unidades de parcela de entre 10 y 20 hectáreas, que presentan diferencias importantes con respecto a la composición del suelo. Con estas dimensiones, parece evidente que la división en subparcelas para la aplicación de tratamientos diferenciados para cada cultivo. Es frecuente que en una parcela se distingan varios tipos de suelo con diferente composición y estructura, así como distintos niveles de materia orgánica y textura (más o menos arenosas), que presentarán diversas necesidades de fertilización, riego y siembra.

3.3. Variedades de patata empleadas en los ensayos: *Lady Anna* y *Agria*

Al tratarse de un cultivo muy extendido, existen numerosas variedades de patata con características diversas, capaces de adaptarse a distintas condiciones climatológicas (López-Mateo, 2007).

Entre las variedades de patata, podemos observar numerosas diferencias en el área foliar, el tamaño del sistema radicular, la época de inicio de la tuberización o el grado en el que los nutrientes de la planta son transportados al crecimiento del tubérculo, bajo diferentes condiciones de fotoperíodo y temperatura. Todo esto conlleva que la producción y el porcentaje de materia seca en los tubérculos varíen, de unas variedades a otras, en respuesta a unas condiciones exteriores determinadas (Burton, 1989).

La clasificación varietal se puede realizar según los siguientes caracteres: color y textura de la piel, color de la carne, forma del tubérculo, características de los brotes y de la parte aérea, productividad, precocidad de la brotación, tuberización y cosecha, resistencia a plagas y enfermedades, aptitudes culinarias, etc., aunque el criterio agronómico más empleado en la clasificación de variedades es el ciclo de cultivo.

Las variedades *Kennebec* y *Agria* son las más cultivadas en Galicia y en particular en la comarca de A Limia. De la superficie dedicada al cultivo de este tubérculo en A Limia, aproximadamente un 40% se destina a producción de *Kennebec*, 50% a *Agria* y el 10% restante a otras variedades.

Dentro de otras variedades cultivadas, se encuentra ***Lady Anna*** (Fig.13), una patata con forma alargada y color interior amarillo claro que, gracias a su alto rendimiento de procesamiento, es muy adecuada para la industria de las patatas fritas.

Tiene como principales características un rendimiento alto, un porcentaje de materia seca medio de 23%, resistencia a golpes y a enfermedades como la sarna, y, además, es una variedad resistente a los nemátodos de la patata.

Con respecto a los requerimientos de esta variedad, necesita una buena temperatura del suelo para que brote bien, y no se debe sembrar a mucha profundidad.



Fig.13. Patatas variedad Lady Anna.

Fuente: <https://www.meijerpotato.com/es/variedades/variedades-de-patatas-fritas/lady-anna/>

Tanto en la **parcela de ensayo del nemátodo**, como en la **parcela de implantación de un sistema de riego**, comparando agricultura de precisión con tradicional, se ha seleccionado la variedad de patata **Agria**, una variedad ampliamente cultivada en la zona, pero reconocida por su **susceptibilidad al nemátodo *Globodera pallida***. Esta susceptibilidad significa que esta variedad es especialmente vulnerable a la infestación de quistes, lo que no solo puede disminuir significativamente el rendimiento y la calidad de la cosecha, sino que también facilita la multiplicación del nemátodo en el suelo, aumentando su presencia en las siguientes temporadas.

La **variedad Agria** es semi-temprana (ciclo de cultivo entre 90 y 120 días), y se destina preferentemente a la industria de patata frita. Los tubérculos obtenidos son de piel y carne amarillenta (**Fig.14**).



Fig.14. Cosecha de patatas de variedad Agria.

Fuente: <https://patatadesiembra.es/en-2021-la-variedad-agria-recupera-protagonismo>

3.4. Nuevas tecnologías en la lucha contra el nemátodo de la patata

Tradicionalmente, el manejo de nemátodos en patata (*G. pallida* y *G. rostochiensis*) se ha basado en técnicas convencionales, que incluyen la rotación de cultivos, el uso de nematicidas químicos y la selección de variedades resistentes. Sin embargo, estos métodos pueden resultar ineficientes a largo plazo, además de generar impactos ambientales negativos y un alto costo de producción para los agricultores.

Con los avances en la agricultura de precisión, se han desarrollado **nuevas estrategias para mejorar el control de plagas de manera más eficiente y sostenible**. Estas técnicas incluyen el monitoreo detallado de las poblaciones de nemátodos y la aplicación localizada de tratamientos, lo que permite una optimización de los recursos y una reducción en el uso de productos químicos.

La agricultura de precisión, mediante tecnologías como sensores de suelo, drones y *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*, permite identificar áreas específicas del campo afectadas por nematodos y aplicar tratamientos de forma selectiva. Esto reduce el impacto ambiental y potencialmente mejora la efectividad del control de plagas al atacar directamente las zonas con mayor presencia de nemátodos.

Por ello, en este proyecto, se analizó y comparó la efectividad del manejo convencional frente a los tratamientos basados en agricultura de precisión para el control de nemátodos en patata. Se exploraron las ventajas y limitaciones de cada enfoque, así como su impacto en la

salud del suelo, la eficiencia en el uso de recursos y el rendimiento del cultivo. Con esta comparación, se buscó determinar si el uso de herramientas de agricultura de precisión puede ser una alternativa más sostenible y rentable para los agricultores frente a los métodos tradicionales, contribuyendo a una producción de patata más amigable con el medio ambiente y eficiente en el control de nemátodos.

3.5. Importancia del cultivo de trigo en la zona de A Limia

El trigo es un cultivo fundamental en la alimentación de la población española, y su producción es esencial para la economía del país (**Fig.15**). Además, cuenta con una gran tradición en su cultivo, siendo una actividad presente en casi todas las regiones del territorio. La diversidad geográfica y climática de España permiten que se cultiven diferentes variedades de trigo, adaptadas a cada zona y necesidad.



Fig.15. Cultivo de trigo

Fuente: <https://www.ambientum.com/ambientum/medio-natural/variedades-de-trigo-espanolas-claves-para-los-cultivos.asp>

Actualmente, el cultivo de trigo en España ocupa alrededor de 2,1 millones de ha y la producción anual promedio supera los 8 millones de Tm, según los últimos datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2022).

Entre las regiones que destacan por su producción de trigo en España se encuentran Castilla y León, Castilla-La Mancha, Aragón y Andalucía, aunque también hay otras regiones que se suman a esta actividad. En estas zonas, el clima y las condiciones del suelo son propicias para el cultivo de este cereal. La producción de trigo ha experimentado altibajos en los últimos

años, pero se mantiene como **uno de los cultivos más importantes de nuestro país** y una fuente de ingresos significativa para los agricultores.

Galicia, por su parte, ocupa una superficie de trigo de aproximadamente 12.600 ha, y con un rendimiento próximo a 3.000 kg/ha y una producción en grano de 35.500 Tm. **Ourense** es la provincia gallega con **mayor superficie dedicada al cultivo del trigo**, con 7.773 ha (MAPA, 2022).

El **cultivo de trigo ha disminuido en Galicia en las últimas décadas**, desapareciendo prácticamente de los montes y aldeas. Esto se debe, por un lado, a que la agricultura fue reduciéndose (al mismo tiempo que la tradición de cocer el pan en casa también se iba perdiendo); por otro, la orientación hacia la ganadería de producción lechera implicó el aumento de superficie dedicada a pastos y a maíz, alimentos básicos para el ganado vacuno.

Así, el cultivo de trigo, cebada o centeno se ha reducido de forma significativa, hasta el punto de que, en la actualidad, los cereales, al igual que la fruta o las verduras, son las principales producciones de las que es deficitaria nuestra comunidad y que hay que importar.

Podemos decir que el trigo fue un cultivo muy característico de muchas comarcas, y en algunas zonas, como A Limia (Ourense), todavía se mantiene. Las **principales zonas productoras en Galicia** son Laracha, Carballo, Ferrol y Carral en A Coruña; Xinzo de Limia en Ourense, y A Terra Chá y Val de Lemos en Lugo. En los últimos años, **se está intentando recuperar y potenciar su cultivo**, mediante el empleo del *trigo del país*, clave para la nueva **IXP de Pan Gallego**.

Existen estudios actualmente en el **Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo (CIAM)** en los que se trata de **eleva el rendimiento por hectárea**, consiguiendo que la paja sea más pequeña. Así, hay motivos para considerar que este cereal puede cultivarse más y con mejores perspectivas que en la actualidad. La creación de la *IXP Pan Galego* parece una forma para alcanzar este objetivo y lograr un incremento en el cultivo de este cereal.

Cereales como el trigo podrían ser una alternativa en Galicia, donde las panaderías importan miles de toneladas de harina. Por ello, en los últimos años se ha fomentado el aumento progresivo en las hectáreas sembradas de trigo, a medida que las panaderías han ido apostando por el cereal autóctono como señal distintiva para la diferenciación de su producto en el mercado.

Una de las claves para que la superficie dedicada al trigo se incremente en los próximos años, está en el aumento de la demanda y en el reparto del incremento de valor del producto. El precio para el trigo del país es mayor que para el trigo de variedades foráneas, y puede llegar a ser el doble que lo que se paga por un trigo cosechado para hacer pienso para alimentación del

ganado. Ese aumento en el precio y en la rentabilidad en origen es la clave para que Galicia vuelva a producir trigo, un hecho importante que serviría para recuperar tierras hoy improductivas, dar uso a zonas de matorral para el cultivo de cereal (y de esta forma evitar los incendios forestales) y, al mismo tiempo, aumentar el autoabastecimiento alimentario de Galicia en un producto en el que somos deficitarios.

Hay dos variedades de trigo autóctonas, *Callobre* y *Caaveiro*, que están registradas en la *Oficina Española de Variedades Vegetales*, dependiente del *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. En una hectárea de terreno en la que se cultiven estas variedades, puede lograrse una producción algo menor que la obtenida con otras variedades, procedentes del resto de España o de otros países, que permiten cosechas de 5.000 o de 6.000 kg.

3.6. Variedad de trigo empleada en el ensayo: *Caaveiro*

El trigo variedad *Caaveiro* es un candidato ideal para ensayos que integren tecnologías innovadoras, como la agricultura de precisión, debido a su capacidad de respuesta a diferentes manejos agronómicos. Al combinar esta variedad con herramientas como el monitoreo remoto, el análisis de suelo en tiempo real y la fertilización variable, se puede maximizar su potencial, incrementando rendimientos y minimizando costos e impactos ambientales.

En A Limia, una región clave para el cultivo de cereales en Galicia, trabajar con trigo *Caaveiro* no solo contribuye a la producción agrícola sostenible, sino que también fomenta la conservación y uso de una variedad local con alto valor estratégico.

El trigo *Caaveiro* es una variedad desarrollada específicamente para adaptarse a las condiciones agroclimáticas del noroeste de España, en particular a las de Galicia. Este trigo se ha convertido en una opción importante para los agricultores de la región, debido a sus características agronómicas y su buen desempeño en condiciones locales. Su origen se basa en un programa de mejora genética que busca variedades resistentes, productivas y adaptadas al clima húmedo y templado de la zona.

Agronómicamente, esta variedad se distingue por su resistencia a enfermedades comunes en Galicia, como el mildiu y el *Fusarium*, lo que reduce la necesidad de fungicidas. Además, presenta una buena tolerancia a las condiciones de alta humedad típicas de la región, lo que lo protege de pérdidas significativas de rendimiento debido a factores climáticos adversos. Es una variedad de altura media, lo que disminuye el riesgo de encamado, facilitando las labores de cosecha mecanizada.

En cuanto a la producción, el trigo *Caaveiro* es una variedad de ciclo medio, que ofrece un rendimiento estable en diferentes sistemas de cultivo, tanto en secano como en regadío. Además, puede optimizarse aún más con prácticas avanzadas, como la agricultura de precisión, que permite un manejo eficiente de insumos como el agua y los fertilizantes. Esta tecnología resulta especialmente útil en áreas agrícolas como A Limia, donde las condiciones del terreno y del clima varían significativamente dentro de una misma parcela.

El grano del trigo de esta variedad es de alta calidad, ideal para la industria harinera y la producción de pan, ya que combina un buen nivel de proteínas con un contenido adecuado de gluten. Esto lo convierte en una opción competitiva tanto para el mercado local como para la exportación, destacando su versatilidad y su contribución al sector agroalimentario.

Asimismo, el trigo *Caaveiro* tiene un fuerte componente de sostenibilidad. Al ser una variedad autóctona mejorada, ayuda a preservar la biodiversidad agrícola y a reducir la dependencia de insumos externos. Esto no solo beneficia a los productores desde el punto de vista económico, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al minimizar el impacto de las prácticas agrícolas en los recursos naturales.

4. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS

El proyecto fue liderado por un agricultor de la zona (*Avelino Santana García*), en colaboración con otro agricultor especializado en montaje de sistemas de riego (*José Antonio Marra Bolaño*), empresas especializadas (*Amodo Soluciones S.L.* y *Fortop S.L.U.*) y un centro tecnológico (*CETECA*). Desde el punto de vista agronómico, todos los participantes en el proyecto cuentan con experiencia en la temática del proyecto.

Se planificaron las actividades principales del proyecto en distintas reuniones iniciales.

Así, el agricultor *Avelino Santana García* fue el solicitante de esta iniciativa de investigación y principal interesado. Asumió las funciones de responsable del proyecto e interlocutor con la administración, así como la coordinación de los socios. Puso a disposición del proyecto 4 parcelas en la comarca de A Limia, y la maquinaria necesaria para su manejo (abonado, aplicación de fitosanitarios y riego). Fue el encargado de realizar las labores agrícolas en las parcelas, participando en los ensayos planificados en campo, así como del seguimiento de los cultivos.

El *Centro Tecnológico da Carne (CETECA)*, es un organismo cuyo departamento agronómico tiene amplia experiencia en proyectos I+D+i y acciones de transferencia al sector primario. Proporcionó asesoramiento técnico a los agricultores implicados, con recomendaciones relativas al tratamiento de plagas y enfermedades de los cultivos, así como fertilización. Realizó la toma de muestras de suelo para análisis (realizando una caracterización general de los mismos) previos a la siembra de los cultivos. Se ocupó de la evaluación económica final, y del estudio de impacto ambiental derivado de la aplicación de las nuevas técnicas de agricultura de precisión. También fue el responsable del análisis de calidad de cosechas. Asimismo, colaboró en la redacción de la documentación justificativa (informes de resultados y memorias parciales y finales) durante el desarrollo del proyecto.

El *CETECA* dispone, además, de cámaras de conservación y cuenta con laboratorios dotados de los equipos y el personal necesarios para el análisis de las muestras de suelo y cosecha. Asimismo, colaboró en las acciones de difusión de los resultados del proyecto desde su oficina de proyectos.

Por otro lado, *Amodo Soluciones S.L.* es una empresa con un alto conocimiento en el desarrollo de proyectos a medida, y cuenta con experiencia en modernizar el trabajo en el rural. Se encargó del desarrollo del sistema para la puesta en marcha de las técnicas de agricultura de precisión. Realizó las tareas de configuración de sensores y manipulación de datos, así como la monitorización de las áreas definidas por el *CETECA* y la digitalización de datos en plataforma.

La empresa *Fortop S.L.U.* está especializada en el manejo de drones. Se encargó de la monitorización de las parcelas de cultivo y la captación de imágenes. Coordinó los trabajos con drones para tareas de geolocalización, y la toma de imágenes y vídeos de las incidencias en cultivos (plagas, enfermedades...).

Finalmente, el técnico y agricultor *José Antonio Marra Bolaño*, cuenta con numerosos trabajos realizados de instalación de distintos tipos de riego en la comarca de A Limia, así como colaboración en proyectos anteriores. Fue el responsable de la instalación de un sistema de riego mediante sensores.

4.1. Actividades desarrolladas: metodología del proyecto

A continuación, vamos a describir la metodología y las **tareas llevadas** a cabo en el presente proyecto, desde el estudio de la zona, hasta la implantación de un sistema de agricultura de precisión, pasando por el análisis de las cosechas. Las tareas de investigación y desarrollo tecnológico llevadas a cabo se desarrollaron a lo largo de tres anualidades, y se engloban dentro de los siguientes puntos:

4.1.1. Evaluación de la comarca

Para ello, se hizo un **estudio de la zona**, que incluyó una caracterización edafoclimática, la definición de los cultivos característicos de la región, sus necesidades nutricionales e hídricas, la descripción de las malas hierbas, plagas y enfermedades frecuentes, y la caracterización de los distintos tipos de explotaciones en función de parámetros como: la extensión de cultivos, técnicas culturales, tipo de abonado, sistemas de riego, maquinaria e instalaciones disponibles.

El estudio se llevó a cabo en parcelas agrícolas ubicadas en la comarca de A Limia, una región conocida por su producción de patata. Para el ensayo de cultivo de patata, la variedad seleccionada fue *Lady Anna*, caracterizada por su alta productividad y calidad de tubérculo. Las parcelas experimentales se dividieron en subparcelas georreferenciadas para facilitar la monitorización y sectorización durante el proceso de cultivo.

El agricultor y líder del proyecto, *Avelino Santana García*, disponía de diferentes ubicaciones en las que realizar los estudios, por lo que se hicieron prospecciones en cada una de ellas para optar por la más adecuada según el fin del ensayo.

Se utilizaron **parcelas de aproximadamente 3 ha** para realizar **cuatro ensayos**:

- Tratamiento de nemátodo
- Evolución de plagas y enfermedades
- Tipos de fertilización
- Parcelas control

En cada una de las parcelas, se aplicaron, de forma comparativa, **técnicas de agricultura tradicional y de precisión**.

4.1.2. Caracterización previa del suelo de las parcelas

Antes de la siembra, se tomaron muestras de suelo, en puntos georreferenciados, para obtener una representación precisa de las características del terreno. Los puntos de muestreo se seleccionaron en base en la variabilidad espacial del terreno y cubrieron toda la parcela experimental. Se analizaron los siguientes parámetros:

- **Propiedades físico-químicas:** pH en agua, la materia orgánica, humedad y nutrientes disponibles (N, P, Ca, Mg, Na y K).
- **Presencia de nemátodo de la patata (*Globodera* spp.):** estudio de presencia/ausencia, e identificación y cuantificación de quistes/huevos.

El **CETECA** llevó a cabo la toma de muestra y los análisis de caracterización de suelo. Previamente al cultivo de la patata y el cereal, se realizó un **análisis de las condiciones iniciales del suelo**, para evaluar las necesidades nutricionales del mismo. Todos estos análisis se hicieron en los laboratorios del mismo centro, y los resultados se utilizaron para la planificación y sectorización de las labores agrícolas.

De esta forma, se analizó el **pH en agua** con un pH-metro, empleando una relación suelo-disolución de 1:2,5, y con un tiempo de equilibrio de 10 minutos, agitando repetidas veces durante este tiempo y durante la medición (Gutián y Carballas, 1976).

La **materia orgánica** se calculó como pérdida por ignición. Para ello 10 g de suelo se calcinaron en horno de mufla a 450°C durante un mínimo de 4 h.

Para la determinación de **fósforo asimilable**, se siguió el *método Olsen* (Olsen y Sommers, 1982), en el que se extrae el fósforo con NaHCO_3 0,5M, a pH 8,5, y a continuación se midió el fósforo extraído mediante espectrofotometría visible.

Finalmente, los **cationes de cambio** (calcio, magnesio, sodio y potasio) se desplazaron con una disolución no tamponada de NH_4Cl 1M (Peech *et al.*, 1947), y en el extracto se determinaron por espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, por sus siglas en inglés), empleando el equipo *Perkin Avio 220 Max ICP-OES*. Esta es una de las técnicas más usadas para determinar trazas de elementos en una gran variedad de matrices (**Fig.16**).



Fig.16. Equipo *Perkin Avio 220 Max ICP-OES*, empleado para la determinación de elementos (Ca, Mg, Na, K), situado en un laboratorio del *Centro Tecnolóxico da Carne (CETECA)*.

Fuente: <https://www.perkinelmer.com/es/product/avio-220-max-scott-cross-flow-system-n0790004>

Por otro lado, el estudio del **nemátodo de la patata** (*Globodera* spp.) incluye el empleo de técnicas de **identificación de los quistes** (**Fig.17**) para poder implementar alternativas de control, que permitan reducir o mantener al nemátodo en el nivel de daño económico. En este sentido, su reconocimiento es indispensable para un diagnóstico sobre su presencia o ausencia en un campo de cultivo.

Para reconocer la **presencia del nemátodo** en quiste y/o su distribución, la **toma de muestra** se puede realizar en el suelo o en el tejido vegetal en la planta. En nuestro caso, esto se hizo en el suelo de cultivo, antes de sembrar las patatas.

El éxito de la determinación depende directamente del muestreo del suelo que se realice y de los métodos de extracción que se utilicen. Normalmente los nemátodos se presentan agrupados y su distribución es irregular. Por ello, es necesario realizar un muestreo representativo, para la determinación cualitativa y cuantitativa de sus poblaciones.

Para ello, en la parcela se tomaron diferentes submuestras de suelo, para que fuera representativa, recorriéndola diagonalmente, de los primeros 20 cm de profundidad de la capa

arable, en puntos distribuidos de manera uniforme, para capturar la variabilidad de infestación en cada área, utilizando un muestreador de suelo estandarizado.

Asimismo, son de suma importancia los conocimientos de técnicas de laboratorio para determinar el nivel de presencia en las muestras, para poder analizar e interpretar los resultados.

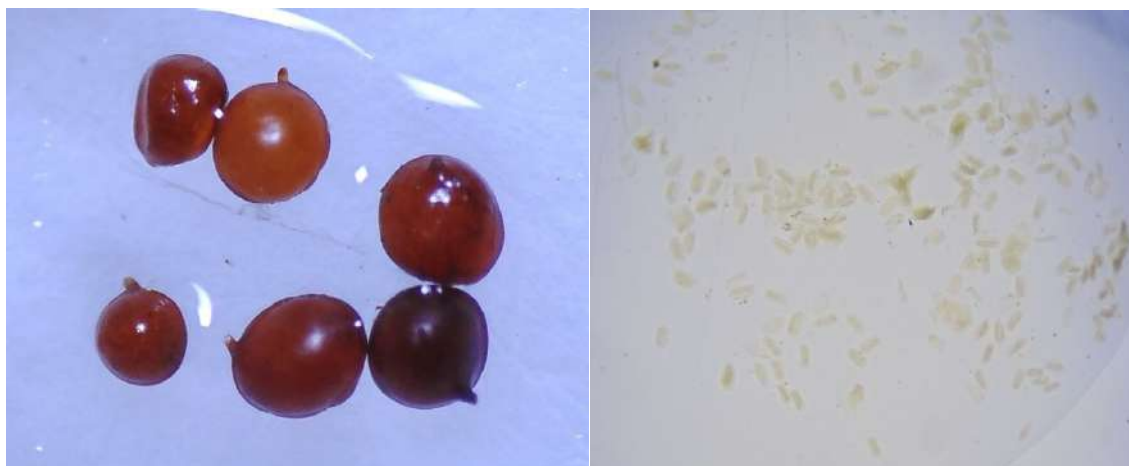


Fig.17. Quistes (izquierda) y huevos (derecha) de *Globodera rostochiensis* observados en microscopio estereoscópico

Fuente: <https://web.inia.cl/nematododorado/fotos.php?page=2>



Fig.18. Larvas de *Globodera rostochiensis* observados en microscopio estereoscópico

Existen varios **métodos para extraer los nemátodos** formadores de quistes del suelo, pero el más habitual es el *Método de Fenwick* (**Fig.19**). Consiste en hacer pasar la muestra de suelo (que previamente hemos secado) a través de un tamiz de 1 mm de abertura, consiguiendo que los quistes y demás partículas que logren atravesar la malla, bajen a través del tubo y lleguen al fondo, donde las partículas más pesadas (como arenas y arcillas) se depositan en la parte inferior del aparato, y las menos densas (quistes y materia orgánica), flotan hacia la superficie, donde serán conducidas hacia el collar del *aparato de Fenwick* (**Fig.20**). El material flotante es capturado sobre tamices, de mayor a menor tamaño de malla (0,85 mm, 0,250 mm y 0,150 mm). Lo retenido sobre el tamiz de 0,85 mm fue descartado, y el material del tamiz 0,250 mm se vertió sobre el de 0,150 mm. Este proceso de lavado se realizó hasta que el agua estuvo limpia. A continuación, se colocó papel de filtro absorbente en un vaso de precipitados, y se echó el material de retenido en el tamiz de 0,150 mm, agregando agua destilada para arrastrar. Se doblaron los bordes del papel para guardar y después de 2-3 días de secado, la muestra estuvo lista para ser revisada bajo microscopio estereoscópico (Rosas-Hernández, 2018) (**Fig.17 y 18**).



Fig.19. Procedimiento para la extracción de quiste de la patata (*Método de Fenwick*).

Fuente: <https://web.inia.cl/nematododorado/fotos.php?page=2>



Fig.20. Aparato de Fenwick.

Fuente: <https://web.inia.cl/nematododorado/fotos.php?page=2>

Si las muestras de suelo están infestadas por el nemátodo quiste de la patata, se procede a contar el **número de quistes por muestra** y a determinar el **índice de infestación del suelo**, que a su vez corresponde a la densidad de población de nemátodos.

Para ello es necesario considerar los siguientes conceptos:

$$\text{Viabilidad total (VT)} = \text{Viabilidad infectiva (VI)} + \text{Viabilidad residual (VR)}$$

donde:

VT = Número de huevos + estados juveniles por quiste. Se entiende como *viabilidad total* a la cantidad de huevos que se hallan en un quiste. Esto corresponde al 100% del contenido.

VI = Número de estados juveniles que han emergido por quiste.

VR = Número de huevos + estados juveniles remanentes por quiste.

La generación de áreas de infestación en función de los quistes de *Globodera* spp. es un paso crucial para planificar un manejo eficiente y dirigido de la plaga. Este proceso se basa en los datos obtenidos del muestreo de suelo previo, en el que se cuantifican los quistes en distintas zonas de la parcela. Con esta información, es posible crear un **mapa de densidad de infestación** que revele los focos de alta, media y baja concentración de nemátodos, permitiendo así una aplicación precisa de tratamientos.

4.1.3. Trabajos agronómicos

Avelino Santana García fue el responsable de las tareas de **selección y preparación de las parcelas experimentales** (arado, abonado), para el estudio de plagas y enfermedades, fertilización y tratamiento del nemátodo, con el objetivo de que estuvieran en condiciones óptimas antes de la siembra de patata.

Además, el agricultor, en colaboración con el *CETECA*, realizó las labores de **sectorización de las parcelas**, la siembra de patata y trigo, el seguimiento de los cultivos y la recolección de las cosechas (**Fig.21**).



Fig.21. Preparación de las parcelas.

4.1.4. Implantación de técnicas de agricultura de precisión en el cultivo de patata y trigo

Las **nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura**, proporcionan una gran cantidad de información de precisión que puede ser consultada en tiempo real, facilitando, de este modo, la toma de decisiones en la gestión de los cultivos (**Fig.22 y 23**).

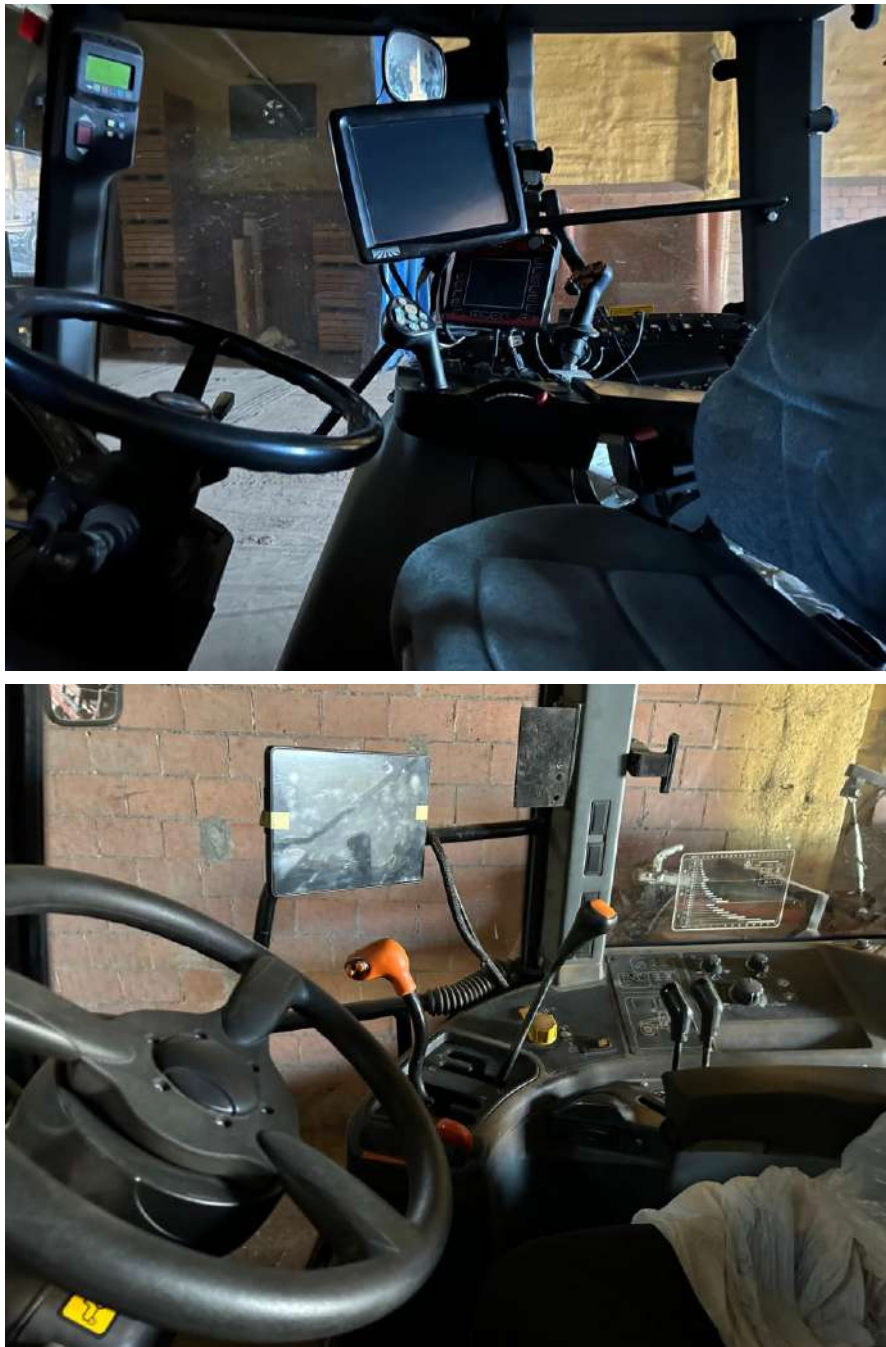


Fig.22. Tecnología de agricultura de precisión en los tractores empleados para las labores agrícolas.



Fig.23. Tractores empleados para las labores agrícolas.

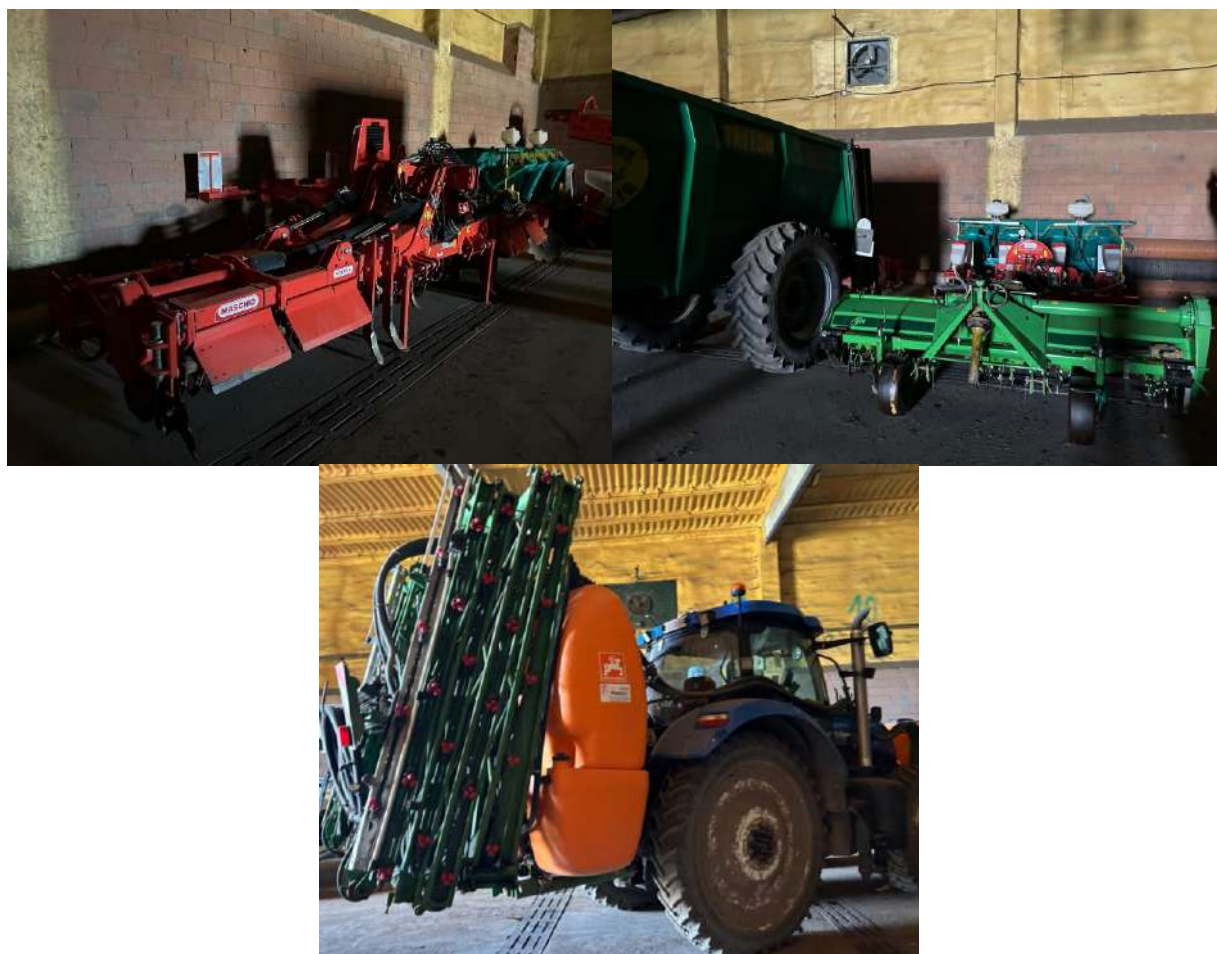


Fig.24. Aperos de labranza empleados acoplados a los tractores.

El resultado final de un cultivo, en cuanto a beneficio obtenido, depende en gran parte de las decisiones de manejo adoptadas durante su desarrollo. Las decisiones comienzan ya en el laboreo (intenso, superficial...) y la siembra (**Fig. 25**), y continúan con la estimación de la dosis de abonado (de fondo, de cobertera...), de herbicida, de riego, etc.



Fig.25. Sembradoras de patata y cereal.

Para ello, los agricultores implicados en este proyecto disponían de la tecnología necesaria para **implantar una distribución GPS**, con el fin de variar la dosis de fertilizante y nematicida desde el tractor, adaptándola a las necesidades de los diferentes rodales. También contaban con máquinas sulfatadoras que permitían la aplicación de productos fitosanitarios por tramos. De todas formas, fue necesario inspeccionar regularmente las parcelas, para detectar ataques de plagas o enfermedades. Cuando el cultivo estuvo muy desarrollado, este recorrido presentó dificultades, por lo que el uso de drones provistos de cámara, ayudaron a visualizar mejor las distintas fisiopatías de los cultivos.

Se **seleccionaron las parcelas experimentales donde se sembraron trigo y patata**, y con los datos obtenidos, se realizaron las siguientes actividades:

- a) **Sectorización para siembra** en función del potencial de la parcela, los nutrientes y los recursos hídricos. En este caso, la sembradora conectada al GPS fue variando la dosis y profundidad de siembra según en función de estos parámetros.
- b) **Sectorización de la fertilización**, para una distribución de los fertilizantes con máquinas abonadoras con capacidad de aplicar varios productos simultáneamente. Esto se hizo de forma que la tolva de cada uno de ellos estaba unida a un sensor que regulaba la cantidad, que, según el programa de abonado, correspondía a un punto identificado por el GPS.
- c) **Sectorización de la aplicación de fitosanitarios** para el control de nemátodos de la patata. Esto se hizo igual que para los fertilizantes, es decir, los nematicidas se aplicaron exclusivamente en las zonas en las que fueron detectados. Cabe destacar que el nemátodo en los suelos es la principal plaga presente en patata. Para su detección, se analizó una muestra por parcela. Generalmente, el método tradicional implica la aplicación del correspondiente tratamiento a toda la parcela, siendo habitual que en los rodales afectados la dosis resulte escasa, y que en el resto de la parcela se aplique producto de forma innecesaria. Esto genera un gasto de insumos con alto contenido en sustancias químicas de forma descontrolada.
- d) **Cultivo de trigo y patata en la parcela control**, donde se realizó la siembra, el riego, la fertilización y el control de nemátodos homogéneamente a toda la parcela, para comparar con las técnicas de agricultura de precisión.

4.1.4.1. Tecnología empleada para digitalización de datos

Avelino Santana García, en colaboración con *Amodo Soluciones S.L.*, llevaron a cabo la **selección de sensores comerciales** para la medición de parámetros ambientales como la humedad, temperaturas, etc. (es decir, elección de las tecnologías más adecuadas). Además, también configuraron, colocaron y desarrollaron todo el **sistema con sensores** para la obtención, digitalización y manipulación de datos.

Para el desarrollo de este proyecto, se evaluaron diversas opciones de materiales y equipos que pudieran cumplir con los objetivos planteados. Durante este proceso, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de varios proveedores para identificar la opción más adecuada en términos de calidad, funcionalidad y coste.

Por tanto, en la selección de materiales y dispositivos para este proyecto ha considerado cuidadosamente el balance entre costo y beneficio, especialmente en un contexto agrícola donde la rentabilidad es clave. Tras una evaluación exhaustiva de varios proveedores, se ha optado por equipos que no solo cumplen con los requerimientos técnicos, sino que también presentan una excelente relación precio-calidad. Este enfoque permitió maximizar el impacto del proyecto, manteniendo los costes bajo control, lo que hace que la solución sea económicamente viable a corto y largo plazo. Además, la elección de estos proveedores también ha sido estratégica para reducir tiempos de espera y asegurar que los dispositivos estén operativos dentro del tiempo estipulado.

El material seleccionado e implementado en el proyecto incluyó:

- **Transmisor con conectividad a internet LINK V2.3:** Este dispositivo permitió la comunicación remota de los datos registrados, facilitando el monitoreo en tiempo real desde cualquier ubicación.
- **Sensor de suelo AT32:** Este sensor multifuncional realizó mediciones precisas de tres parámetros clave para el monitoreo de suelos: humedad, conductividad y temperatura. La integración de estas funciones en un solo dispositivo redujo los costes de instalación y mantenimiento, y aumentó la eficiencia del sistema de monitoreo.

Estos componentes fueron elegidos por su confiabilidad, facilidad de uso e interoperabilidad con otros sistemas de monitoreo y control empleados en el proyecto.



Fig.26. Equipo empleado por Amodo Soluciones S.L. (transmisor y sensor).

El proyecto requiere una infraestructura de monitoreo de suelo resistente y autónoma, capaz de operar en condiciones variables de campo y proporcionar datos precisos sin necesidad de intervención frecuente. Los equipos seleccionados, han sido diseñados específicamente para entornos agrícolas, lo que garantiza su compatibilidad con las necesidades específicas de monitoreo del suelo. Además, el transmisor y los sensores de suelo están alineados con el objetivo del proyecto, de obtener datos críticos para la toma de decisiones de manejo agronómico, lo que los convierte en una elección óptima en términos de adecuación.

En el marco del proyecto, se ha implementado el *PRISMAB Link*, una herramienta diseñada para la conectividad de datos de sensores a internet de manera directa. Este dispositivo permite la conexión de hasta tres sensores en simultáneo, los cuales comienzan a transmitir datos de manera automática en intervalos de una hora desde el momento en que son conectados.

El *PRISMAB Link* ofrece una ventaja significativa en cuanto a control y autonomía, permitiendo gestionar de manera independiente la instalación y el mantenimiento de sus sensores. Esto implica la posibilidad de añadir, cambiar, reubicar o retirar el transmisor y los sensores de forma sencilla, adaptándose a las necesidades en cualquier momento.

Este equipo se basa en la tecnología de la red de telecomunicaciones *IoT SigFox*, la cual garantiza una comunicación eficiente y permite a los usuarios expandir su red de sensores sin incurrir en costes adicionales de telecomunicaciones. Dado que no requiere de concentradores adicionales, *PRISMAB Link* resulta particularmente ventajoso en instalaciones de gran extensión o en terrenos fragmentados, brindando flexibilidad y escalabilidad sin afectar la eficiencia de los datos recolectados.

Además, el dispositivo conecta automáticamente los datos de los sensores a *PRISMAB App*, una aplicación de gestión en la nube accesible desde cualquier navegador, facilitando el **acceso remoto y en tiempo real a los datos** desde diferentes tipos de dispositivos. Esta plataforma permite la visualización histórica de datos y la configuración de alertas, notificando cuando un sensor registra un parámetro crítico previamente establecido. Asimismo, la información puede integrarse con otros sistemas, como programadores de riego, mejorando la capacidad de respuesta ante condiciones cambiantes en el entorno. Es importante destacar que *PRISMAB Link* ha sido diseñado para un consumo de energía optimizado, que prolonga su operatividad en campo hasta cuatro años sin necesidad de conexión eléctrica constante, permitiendo desarrollar una red de sensores funcional y de bajo mantenimiento, que se ajusta a las necesidades de monitoreo de forma flexible y económica.

Por otro lado, el **sensor PRISMAB AT32** representa una solución avanzada para medir los parámetros fundamentales del suelo, dirigidos específicamente a satisfacer las demandas del sector agrícola. Este dispositivo es capaz de monitorear el contenido volumétrico de agua (VWC), la conductividad eléctrica (indicativa de la salinidad) y la temperatura del suelo, permitiendo a los agricultores obtener información detallada sobre estos elementos que resultan críticos para el desarrollo y rendimiento de los cultivos. La utilización de este tipo de sensores permitió obtener una ventaja técnica respecto a métodos tradicionales, proporcionando datos esenciales que inciden directamente en la toma de decisiones.

Diseñado para entornos agrícolas y condiciones de campo, este sensor ha sido desarrollado para una durabilidad de más de 8 años, soportando factores como las inclemencias del tiempo, actividades de cultivo intensivo y el desgaste físico-químico y biológico del suelo. Esto reduce la necesidad de reemplazos frecuentes y permite una inversión más rentable a largo plazo, optimizando el control y monitoreo de los parámetros de suelo con una red de sensores robusta, simple y accesible.

En términos de precisión, el sensor *PRISMAB AT32* incorpora tecnología *FDR*, que permite una medición electromagnética precisa de la humedad, generando datos más consistentes y detallados. Este método, con un volumen de control de 700 mL alrededor del sensor, minimiza errores habituales en la instalación, como burbujas de aire o la presencia de sólidos. Este alcance de medición, superior al de otros sensores agrícolas que solo abarcan aproximadamente 200 mL, reduce significativamente las imprecisiones y ofrece una visualización real del estado del suelo. Por tanto, este dispositivo se seleccionó para un monitoreo agrícola de alto rendimiento, con una combinación de durabilidad, precisión y facilidad de instalación. Su diseño y tecnología se alinean con las exigencias de quienes planean implementar redes de sensores confiables y sostenibles a largo plazo, asegurando datos exactos y coherentes.

La capacidad de estos equipos para operar con baterías de larga duración es un factor clave, ya que asegura el monitoreo continuo de los parámetros del suelo sin interrupciones. Los dispositivos seleccionados están equipados con baterías de bajo consumo y alta duración, permitiendo que operen de manera autónoma en el campo por períodos extendidos (hasta 4 años, en el caso del transmisor). Esto reduce significativamente la necesidad de mantenimiento y reemplazo de baterías, contribuyendo a la eficiencia y sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Por otra banda, la instalación de los dispositivos seleccionados no requiere de infraestructura compleja ni intervención de técnicos especializados. Los sensores y el transmisor han sido diseñados para una configuración sencilla y adaptable, permitiendo que cualquier miembro del equipo o el agricultor mismo puedan instalar y mover los dispositivos según sea necesario. Esta facilidad de instalación reduce costes adicionales y permite la flexibilidad de

ajustar la disposición de la red de sensores en función de las necesidades de monitoreo en diferentes etapas del cultivo.

A continuación, a partir de los resultados obtenidos de estos dispositivos, el *CETECA* y *Amodo Soluciones S.L.*, en colaboración con *Fortop S.L.U.*, también llevaron a cabo los trabajos de visualización con **drones (Fig.27)**, incluyendo las siguientes tareas: la zonificación de cada parcela, la geolocalización de puntos críticos, la selección y configuración de drones, objetivos y cámaras para la realización de los vuelos sobre el terreno y los cultivos (por *Amodo Soluciones S.L.* y *Fortop S.L.U.*), la realización de vuelos sobre los puntos geolocalizados definidos anteriormente para la grabación de vídeos de las parcelas (*Fortop S.L.U.*) y la digitalización de datos en plataforma (*Amodo Soluciones S.L.*).



Fig.27. Dron empleando en los ensayos de patata y cereal.

En las parcelas, se hicieron 3 vuelos anuales, un vuelo de levantamiento en desnudo para el estudio del tipo de suelos y dos levantamientos con los cultivos, tomando imágenes y realizando vídeos con zoom sobre incidencias concretas remarcables (carencias del cultivo, presencia de plaga...).

Finalmente, *José Antonio Marra Bolaño* realizó la instalación de un **sistema de riego inteligente**. En éste, los sensores estaban conectados a través de módulos inalámbricos a un programador de riego, que además de recoger los datos de los sensores, se encargó de poner en práctica las decisiones de aplicación de riego en función del análisis de datos recopilados.

También se establecieron parcelas control donde las prácticas agrícolas (siembra, riego, fertilización y aplicación de fitosanitarios) se realizaron de manera convencional, sin sectorización ni ajustes basados en las variaciones del terreno. Estas parcelas sirvieron para comparar los resultados con el sistema de agricultura de precisión implementado en el resto de la parcela.

4.1.4.2. Aplicación diferenciada de fertilizantes

La fertilización es esencial para aumentar el rendimiento agrícola, pero su uso excesivo o inadecuado puede dañar el medio ambiente y aumentar los costos. Optimizar la fertilización consiste en aportar los nutrientes necesarios de acuerdo con la capacidad productiva del suelo. Esto se logra a través de un diagnóstico preciso del suelo, que incluye análisis de nutrientes y pH, lo que permite conocer las deficiencias y ajustarse a las necesidades específicas de cada cultivo.

El uso de tecnologías de precisión, facilitó la aplicación exacta de fertilizantes, evitando el exceso y la contaminación. Además, la fertilización debe adaptarse a las diferentes etapas del ciclo del cultivo para ser más eficiente. Esta estrategia no solo aumenta la productividad, sino que también reduce los impactos ambientales, como la lixiviación de nutrientes y la emisión de gases de efecto invernadero, promoviendo una agricultura más sostenible y rentable a largo plazo.

La **fertilización diferenciada** en el ensayo de cultivo de patata y cereal se llevó a cabo mediante una **estrategia de precisión**, que combina el uso de vuelos con drones equipados con cámaras multiespectrales y análisis de suelo georreferenciados. Esta metodología permitió ajustar la aplicación de fertilizantes en función de las necesidades específicas de cada sector de la parcela, maximizando la eficiencia en el uso de nutrientes y minimizando el impacto ambiental. Para ello, se realizaron vuelos sobre la parcela utilizando drones equipados con cámaras multiespectrales. Las imágenes capturadas por el dron proporcionaron datos valiosos sobre el estado del suelo para tomar decisiones sobre su posterior manejo.

Los vuelos con drones se complementaron con análisis de suelo realizados en puntos estratégicos de la parcela, previamente georreferenciados. Los datos obtenidos de los análisis de suelo permitieron corroborar la información captada por los drones y ajustar la fertilización en función de las reservas nutricionales del suelo.

Así, con los mapas generados a partir de los vuelos con drones y los análisis de suelo, se procedió a una **fertilización sectorizada**. Se utilizaron abonadoras con tolvas múltiples y control automatizado, equipadas con sistemas de GPS y sensores, que ajustaron la cantidad de fertilizante aplicado en cada sector de la parcela.

Este sistema permitió:

- **Distribuir varios fertilizantes simultáneamente:** cada tolva de fertilizante estaba conectada a un sensor que regulaba la dosis exacta según las necesidades del suelo, regulando la dosis para cada sector de acuerdo con un plan de abonado previamente programado.
- **Optimizar la dosis de fertilizantes en función de las carencias nutricionales detectadas** por el dron y los análisis de suelo, evitando la aplicación de productos en zonas que no lo requieran.

De esta manera, la fertilización diferenciada redujo el uso de insumos, mejoró la eficiencia de los nutrientes aplicados y garantizó un crecimiento uniforme y saludable de los cultivos de patata y cereal, promoviendo una producción sostenible.

Los fertilizantes aplicados fueron Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), y otros micronutrientes según fue necesario.

4.1.4.3. Siembra empleando agricultura de precisión

Se utilizó una **sembradora de precisión equipada con GPS y sistemas de control automatizado de dosis y profundidad de siembra**. Los parámetros de siembra (densidad, dosis de semilla y profundidad) se ajustaron en función de los datos de fertilidad del suelo, textura y riesgos potenciales (como la pérdida de plántulas en emergencia), obtenidos del análisis de suelo. El diseño experimental incluyó diferentes sectores dentro de la parcela con variación en las condiciones edáficas.

La fecha de siembra se determinó según las condiciones climatológicas de la zona y la dosis de semilla se ajustó por sectores, en función de la capacidad productiva del suelo y las necesidades específicas para cada cultivo o variedad.

4.1.4.4. Manejo diferenciado para el tratamiento del nemátodo en patata empleando agricultura de precisión

En este proyecto se comparó la **efectividad de dos enfoques de manejo para el control de nemátodos de quiste** (*Globodera* spp.) en cultivos de patata: el **manejo convencional** y el **manejo apoyado en herramientas de agricultura de precisión**. La hipótesis de este estudio

fue que el uso de tecnologías de agricultura de precisión, que permiten una aplicación localizada y controlada de tratamientos, resultará más eficiente y sostenible que los métodos convencionales de aplicación homogénea en toda la parcela.

El objetivo de este proyecto fue determinar si el **manejo de precisión puede reducir el uso de productos químicos, aumentar la efectividad en el control del nemátodo, y mejorar la sostenibilidad y rentabilidad del cultivo** en comparación con el manejo convencional. Este enfoque podría ofrecer un modelo más eficiente para el manejo de *Globodera* spp. en parcelas de patata, optimizando los recursos y reduciendo el impacto ambiental.

El ensayo se desarrolló en una parcela infectada con *Globodera pallida* y *rostochiensis*, donde previamente se había mapeado la distribución de infestación mediante técnicas de muestreo de suelo y lavado de muestras en dos franjas. La parcela se dividió en **dos áreas de tratamiento**: en una se aplicaron técnicas de manejo convencional, y en la otra, técnicas de manejo basadas en agricultura de precisión.

- **Manejo convencional:** en esta área, se aplicó el tratamiento nematicida de manera uniforme en toda la superficie, siguiendo las prácticas tradicionales, que buscan cubrir el área completa, sin considerar la distribución espacial de los nemátodos.
- **Manejo de precisión:** en la segunda área, se utilizaron herramientas de agricultura de precisión, como sensores de suelo y drones con cámaras de detección multiespectral, para identificar y mapear con exactitud los puntos de mayor infestación. Sobre estos puntos específicos, se aplicaron los tratamientos nematicidas, evitando intervenir las áreas no infectadas.

Para **evaluar la efectividad** de ambos métodos, se determinó:

- Densidad de población de nemátodos antes y después de los tratamientos, en cada zona de ensayo.
- Rendimiento del cultivo de patata en ambas áreas, evaluando la calidad y cantidad de tubérculos.
- Impacto ambiental y económico, analizando la cantidad de producto nematicida utilizado, y el costo de cada estrategia.

Como ya se ha descrito, en el ensayo se realizó un muestreo sistemático de suelo para cuantificar los niveles de infestación de *Globodera* spp. en cada área de tratamiento (convencional y agricultura de precisión) en la parcela de patata. Este muestreo permitió obtener una visión detallada de la distribución de los quistes, y así optimizar las estrategias de control.

Con el **mapa de áreas de infestación** de nemátodo, se pudieron planificar las aplicaciones de tratamientos de manera selectiva. Así, en las zonas de alta infestación, se aplicaron dosis completas de nematicidas para reducir significativamente la población de quistes; en las zonas de media infestación, se aplicaron dosis ajustadas, y en las zonas de baja o nula infestación, se minimizó u omitió la aplicación de nematicidas, reduciendo costes y el impacto ambiental.

A continuación, en el ensayo propuesto se implementaron dos estrategias de manejo diferenciadas para el control del nemátodo en un cultivo de patata: un manejo convencional y un manejo de precisión basado en un mapa de infestación. Estas dos estrategias permitieron comparar la efectividad y eficiencia del uso de nematicidas, así como su impacto en la productividad del cultivo y la sostenibilidad.

4.1.4.4.1. Procedimiento de muestreo para determinación de nemátodo

Para evitar interferencias con el ensayo de fertilización diferenciada, se llevó a cabo un **ensayo de determinación de nemátodo y tratamiento del mismo**, de forma independiente en otra parcela distinta, también ubicado en la comarca de A Limia, con condiciones similares de suelo y clima.

Para ello, se dividió la parcela en dos franjas representativas, una destinada al manejo convencional y la otra al manejo de precisión. En cada franja, se tomaron muestras de suelo, desde la cabecera hasta el fondo de la parcela. Estas muestras, se extrajeron a profundidad de cultivo y en puntos distribuidos de manera uniforme, para capturar la variabilidad de infestación en cada área.

Las muestras de suelo se recogieron utilizando un muestreador de suelo estandarizado. Se empleó una cuadrícula que permitió extraer muestras en puntos específicos y de manera sistemática en ambas franjas. Esto aseguró que los datos fueran representativos y comparables entre el tratamiento convencional y el de precisión.

Cada muestra de suelo se llevó al laboratorio, donde se secó y se realizó un lavado de suelo para extraer los quistes y su posterior conteo, siguiendo el *Método de Fenwick* descrito anteriormente. Este proceso de lavado es fundamental para aislar y cuantificar los quistes presentes en cada muestra de suelo. Una vez realizado el conteo, se hizo en microscopio la lectura de los J2 presentes. Estos datos se registraron cuidadosamente, generando un mapa de densidad de infestación de cada franja.

4.1.4.4.2. Manejo convencional en el control del nemátodo

En esta franja, se aplicó un tratamiento uniforme de nematicida en toda la parcela, sin considerar las variaciones en la densidad de quistes. La dosis de nematicida fue la misma en toda el área, siguiendo la práctica convencional de cobertura total. Esta estrategia suele ser la más utilizada, aunque puede resultar en un uso innecesario de nematicida en áreas con baja o nula infestación, aumentando los costos y el impacto ambiental.

4.1.4.4.3. Manejo de precisión según mapeo de infestación de nemátodo

En la segunda franja de la parcela, se aplicaron **tratamientos diferenciados en función del mapa de infestación generado a partir del muestreo de quistes**. El mapa clasifica la parcela en tres niveles de infestación: alta, media y baja, y se asignaron dosis de nematicida correspondientes a cada nivel:

- Alta infestación: dosis completa de nematicida para reducir significativamente la población de quistes y minimizar el riesgo de daño severo en las zonas más afectadas.
- Media infestación: dosis intermedia de nematicida, ajustada para controlar la plaga sin incurrir en un exceso de insumos.
- Baja infestación o áreas libres: dosis mínima o nula de nematicida en áreas donde los quistes son escasos o inexistentes, evitando el uso innecesario del producto.

Posteriormente, se realizó una **evaluación de la cosecha obtenida**, la cual es fundamental para analizar el impacto directo de la infestación de *Globodera* y la efectividad de los tratamientos aplicados (convencional y de precisión) en el rendimiento y la calidad del cultivo de patata. Esta evaluación complementó los datos de población de quistes post-cosecha, proporcionando una visión integral sobre cómo la plaga afectó a la producción, y si los tratamientos lograron proteger adecuadamente la cosecha.

Para obtener una evaluación exhaustiva del impacto del nemátodo en la cosecha y la efectividad de los tratamientos aplicados, se tomó una muestra representativa de tubérculos a lo largo de ambas franjas (manejo convencional y manejo de precisión) en la parcela. Además, se puso especial énfasis en las zonas clasificadas como de baja, media y alta infestación dentro de la franja de manejo de precisión. Este enfoque permitió observar, no solo la eficacia global de cada tratamiento, sino también cómo cada nivel de infestación afectó la calidad y el rendimiento de la cosecha.

4.1.4.4. Selección de puntos de muestreo para determinación de nemátodo en las parcelas de agricultura de precisión y convencional

En la franja de manejo convencional, se tomaron muestras de tubérculos en puntos distribuidos de manera uniforme a lo largo de toda la parcela, de cabecera a fondo, ya que el tratamiento fue homogéneo.

En la franja de manejo de precisión, el muestreo se hizo en áreas con diferentes niveles de infestación de quistes: baja, media y alta, tal como fueron identificadas en el mapa de densidad de infestación pre-cosecha. Esto permitió evaluar cómo la aplicación de dosis diferenciadas de nematicida afectó la salud y productividad de los tubérculos en cada zona.

Una vez obtenidos los datos de rendimiento y calidad de cada muestra, se analizaron en función de los niveles de infestación y el tipo de manejo:

- **Comparación entre franjas:** se comparó el rendimiento total y la calidad de los tubérculos en la franja de manejo convencional con respecto a la de manejo de precisión, para evaluar cuál estrategia protegió mejor la cosecha.
- **Eficacia de las dosis diferenciadas:** en la franja de precisión, se analizó si las dosis elevadas de nematicida en áreas de alta infestación y las dosis intermedias y bajas en zonas de media y baja infestación fueron suficientes para reducir la incidencia de *Globodera* y sus efectos en la calidad de los tubérculos.

Los quistes extraídos de las muestras lavadas post-cosecha permitieron cuantificar la multiplicación del nemátodo y comparar la efectividad de ambos tratamientos en la reducción de su población. Estos datos fueron fundamentales para evaluar cómo el manejo de precisión puede contribuir a mitigar la propagación de *Globodera pallida* en suelos con cultivos de patata Agria, permitiendo así una estrategia de manejo más sostenible y adaptada a las particularidades de esta variedad susceptible.

4.1.4.5. Sistema de riego empleando agricultura de precisión

Para evitar interferencias con el ensayo de fertilización diferenciada, se llevó a cabo un **ensayo de riego** independiente en otra parcela distinta, también ubicado en la comarca de A Limia, con condiciones similares de suelo y clima.

De este estudio se encargó el técnico *José Antonio Marra Bolaño*, en el que se evaluó la **eficiencia del uso del agua en el cultivo de patata**, optimizando el riego mediante la aplicación

de tecnologías avanzadas como sensores de humedad y sistemas de control automatizado de riego.

Para ello, en la parcela considerada en cada anualidad, se instaló un **sistema telecontrol** en tiempo real, con conexión directa a las electro-válvulas, contadores y sensores, formado por:

- Un **programador de riego GPRS** para la gestión de la parcela, mediante el registro de las lecturas y de los tiempos, conectado a la nube, y con posibilidades para conectar con módulos externos vía radio (**Fig.28**).
- Una antena omnidireccional para comunicación radio, para conectar con módulos externos (**Fig.29**).
- Un **sistema autónomo de alimentación** para el programador formado por un regulador solar 12V 120W, una batería 7 A y 12 V, y un panel solar (**Fig.29 y 30**).
- Tres **módulos externos** conectados vía radio con el programador, para la lectura de sensores agronómicos (de humedad del suelo), colocados en el interior de la parcela.
- **Sensores capacitativos** para la lectura del contenido de agua en suelo, en relación al contenido volumétrico m^3 agua/ m^3 suelo (**Fig.31**).
- **Multi-sensores** de 80 cm compuestos por 4 bi-sensores, para la lectura del contenido de agua en el suelo y la temperatura cada 20 cm (**Fig.32**).
- **Tensiómetros** (**Fig.35**).
- **Electroválvulas** tipo *latch* para el control del riego (**Fig.36**).
- **Contadores volumétricos** del agua de riego y cabezal de registro con emisor de pulsos (**Fig.39**).



Fig.28. Programador GPRS para sectorización del riego.



Fig.29. Programadores con omnidireccional para comunicación por radio, para conectar con módulos externos, y sistema autónomo de alimentación formado por un regulador solar 12V 120W, una batería 7 A 12 V y un panel solar.



Fig.30. Datalogger (o registrador de datos) para monitoreo y telemetría de sensores, detectores y contadores, para sectorización y macromedición de redes y control de fugas, con registro de caudales, volúmenes, gasto y presiones, y alertas de rotura y fugas.



Fig.31. Sensores capacitivos empleados en la parcela de ensayos.

MULTI-SENSOR PARA LA LECTURA DEL CONTENIDO DE AGUA EN SUELO Y LA TEMPERATURA



Sensores formados por diferentes bi-sensores (contenido de agua en suelo y temperatura) instalados a lo largo de la longitud de éstos. Dado que se instalan de forma perpendicular a la superficie del terreno, las medidas aportadas dan cuenta de la característica del perfil del terreno objeto de estudio.

La distancia máxima de una conexión mediante bus SDI-12 son 50m.



Fig.32. Multi-sensores empleados en la parcela de ensayos.



Fig.33. Sensores empleados en la parcela (ensayo patata).



Fig.34. Sistema de riego en la parcela de ensayos con patata.



Fig.35. Tensiómetros empleados en la parcela de ensayos.



Fig.36. Contador y válvulas empleadas en el ensayo.

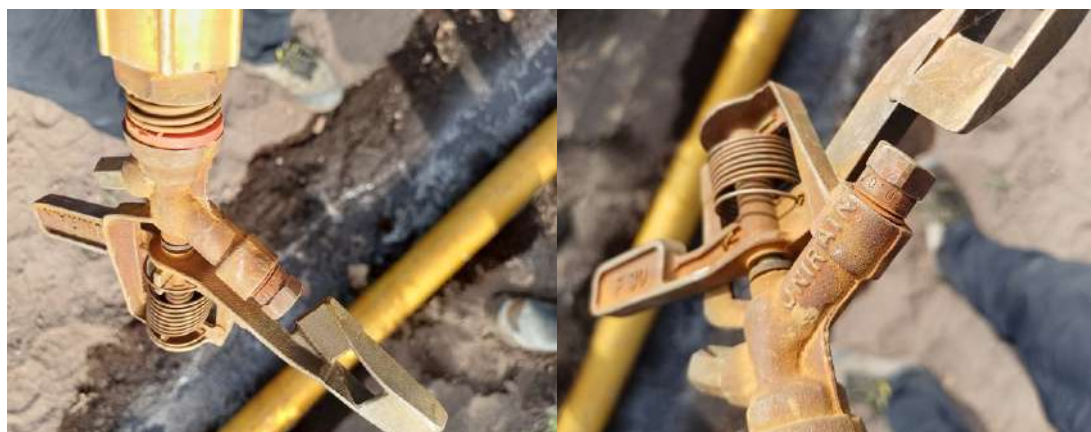


Fig.37. Aspersores.



Fig.38. Canalización del agua de riego.



Fig.39. Contadores de agua.

Este sistema se encargó de:

- ✓ Apertura y cierre de las válvulas, de acuerdo a los tiempos preestablecidos.
- ✓ Apertura y cierre de las válvulas, de acuerdo a los datos de humedad de los sensores instalados en la parcela.
- ✓ Lectura y recopilación de datos del porcentaje de humedad del suelo a distintas profundidades.
- ✓ Lectura y recopilación de datos de las lecturas del volumen de agua aplicada.

Por tanto, el sistema de control de riego fue el encargado de **recoger los datos de los sensores**, y también de poner en práctica las decisiones de riego que se tomaron en función del análisis de los datos registrados.

En oficina, se inspeccionaron los datos y actuaciones recibidas desde el programador, descargando de manera periódica los datos registrados, para ser procesados con otros programas (hojas de cálculo), y en base a ello, ir tomando decisiones para la programación del riego.

Una vez analizados los datos del estado de los sensores a lo largo del ciclo de cultivo, se han podido calcular los **umbrales del contenido de agua en el suelo** a distintas profundidades, para el tipo de suelo donde se realizaron los ensayos. Además, se determinó el **balance hídrico** en los cultivos, en los distintos tipos de suelo analizados, con el objetivo de crear las bases para el manejo del riego por aspersión, apoyándose en las nuevas tecnologías y el empleo de sensores de humedad.

Según avanzaba la campaña, se trató de ir **ajustando el calendario de riegos a los balances hídricos** resultantes del análisis de los datos de consumos y humedad obtenidos en tiempo real.

Durante el seguimiento del cultivo, el **manejo del riego** se ha llevado a cabo siguiendo los criterios del agricultor *Avelino Santana García*, realizándose el registro de datos en tiempo real de horarios de riego, duración del mismo, consumos de agua y humedad del suelo a distintas profundidades.

En cada una de las campañas, se han llevado a cabo las siguientes labores relacionadas con la aplicación de un sistema de riego optimizado:

- ✓ Montaje y puesta en servicio del sistema de telecontrol, sondas de humedad, así como de los equipos de mando y lectura, como electroválvulas y contadores de agua.
- ✓ Retirada de los equipos al final de la campaña de riego.
- ✓ Seguimiento del funcionamiento de todo el sistema.
- ✓ Recogida de datos en campo y procesado de las lecturas de los datos registrados on-line en gabinete.

La programación del riego por aspersión llevó a cabo según las pautas de manejo tradicionales de la zona para el cultivo de la patata. Inicialmente, fue el agricultor quien estableció las fechas y los tiempos de riego, para determinar el grado de infiltración del suelo, atendiendo a los tiempos en que la humedad va alcanzando los distintos horizontes.

El marco de riego considerado fue de 18 x 12 m, con aspersor de impacto ¾", resultando la precipitación media del sistema de 6,8 mm/h. Se marcaron tiempos de riego de 3 a 5 horas, con un intervalo medio de 6 a 7 días. Posteriormente, en los últimos riegos de cada campaña, el paro del riego se condicionó a las lecturas registradas por los sensores.

Para ello, se emplearon dos modelos de **sensores de humedad capacitativos** (sensor que mide la humedad del suelo mediante la variación de la capacitancia), registrado valores de humedad cada hora.

- ✓ Multi-sensores modelo *Aquacheck*, de 80 cm, compuestos por 4 bi-sensores para la lectura del contenido de agua en suelo, y temperatura cada 20 cm.
- ✓ Sensores para la lectura del contenido de agua modelo *TEROS 10*, colocados a dos profundidades (20 y 40 cm).

Se trata de sensores que miden el contenido volumétrico de agua en el suelo, que requieren poco mantenimiento y tienen un rango de medida amplio. Debe señalarse que son sensores costosos si los comparamos con otro tipo de sensores como los tensiómetros.

4.1.5. Estudio de la cosecha y calidad de los cultivos

La toma de decisiones en agricultura de precisión se basa en la realización de estudios detallados de todos los factores relacionados con la producción.

Para ello, al final los ciclos de cultivo, se realizó una cosecha sectorizada. La cosechadora estaba equipada con **sensores de rendimiento conectados a un sistema GPS**, lo que permitió elaborar un mapa de rendimiento para cada subparcela. Este sistema permite que sean capaces de medir la cantidad de producto que estaban cosechando instantáneamente, conociendo las coordenadas geográficas del punto en concreto y almacenando esa información de la parcela punto a punto para, posteriormente, generar mapas de distribución del rendimiento mediante colores de identificación, indicando las zonas más o menos favorables. Esto permitió una interpretación precisa de la variabilidad del rendimiento.

El *CETECA* realizó un estudio de la cantidad y calidad de las cosechas, evaluando la producción bruta y comercial, y en el caso de las patatas, su reparto de calibres, materia seca y defectos (podredumbres secas y húmedas, Rizoctonia, tubérculos agrietados, deformes, segundos crecimientos, verdeo, etc.). Se estudió el rendimiento en kg/ha, distinguiendo entre las zonas de mayor y menor productividad. También se realizó también el cálculo de costes de cultivo, estimando el ahorro en insumos, calculando el gasto de fertilizantes, fitosanitarios, etc.,

comparando siempre las parcelas de agricultura de precisión con las parcelas control (agricultura tradicional). Como hemos mencionado, esto se llevó a cabo mediante la elaboración de un mapa de rendimiento, determinando del estado del suelo en cada una de las subparcelas resultantes de la zonificación, y se realizó una estimación del ahorro en insumos con una evaluación del impacto ambiental.

Una vez recogidas las cosechas (**Fig.40**), en el **trigo** se determinó la producción bruta, el porcentaje de impurezas en los granos cosechados, el peso específico en kg/hL (que indica la densidad del grano), y el peso de 1000 granos.



Fig.40. Cosechado del trigo.

En el caso de la **patata (Fig.41)**, se analizó el **contenido en materia seca**, que se calculó en función del contenido en humedad. Para ello, se empleó un liofilizador de laboratorio, por diferencia de peso antes y después de introducir la muestra en el mismo. Se tomó una muestra de patata de aproximadamente 30-40 g. La liofilización, también conocida como criodesecación o secado por frío, es un proceso de deshidratación a baja temperatura.



Fig.41. Cosechado de las patatas.

Por otro lado, se evaluó la **calidad de la cosecha**. En el caso del **trigo**, el concepto de calidad **es relativo**, pero en términos generales, generalmente hace referencia al **contenido de proteínas del grano**, que es el parámetro fundamental del que depende dicha calidad (López-Bellido *et al.*, 2009).

Con respecto a la **calidad de cosecha en patatas**, se estimó mediante el **porcentaje de defectos**:

- **Defectos debidos a factores ambientales/externos:** agrietados, segundos crecimientos, tubérculos agujereados, manchas, verdeo, patatas huecas (“corazón hueco”), patatas roídas y afectadas por daños mecánicos.
- **Defectos debidos a enfermedades:** las enfermedades que se pueden encontrar habitualmente en el tubérculo de la patata, algunas de las cuales se pudieron observar en las patatas cosechadas, se describen a continuación, diferenciando entre los defectos causados por bacterias y por hongos.

4.1.5.1. Defectos en patatas debidos a enfermedades por bacterias

Algunas de las enfermedades causadas por bacterias, que es habitual encontrar en el cultivo de la patata, y que se pueden ver en los tubérculos cosechados son:

- **Marchitez bacteriana o podredumbre parda.** Está causada por la bacteria *Ralstonia solanacearum*, que bloquea los vasos de la planta, obstaculizando el transporte de agua. Los tubérculos infectados pueden presentar síntomas externos, dependiendo del grado de desarrollo de la enfermedad en el momento de la cosecha. Puede aparecer un círculo marrón, que se puede observar al hacer un corte transversal (MAPA, 2005) (**Fig.42**).



Fig.42. Patatas afectadas por marchitez bacteriana o podredumbre parda.

Fuente: *Bacterias de cuarentena que afectan al cultivo de la patata* (MAPA, 2005)

https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf/Vrural/Vrural_2005_213_16_20.pdf

- **Podredumbre anular bacteriana o necrosis.** Esta enfermedad es debida a la bacteria *Clavibacter sepedonicus*. En los tubérculos, el anillo vascular y el tejido circundante del tubérculo son de color amarillo pálido o vidrioso, y se oscurece conforme avanza la enfermedad. La pudrición puede extenderse hasta la médula central del tubérculo. A medida que se extiende la pudrición, la piel se decolora y aparecen grietas profundas (MAPA, 2005) (**Fig.43**).



Fig.43. Patatas afectadas por necrosis bacteriana.

Fuente: <https://patatadesiembra.es/enfermedades-de-la-patata-podredumbre-anular>

- **Sarna común.** Está provocada por la bacteria *Streptomyces scabies*. Pueden aparecer dos tipos en los tubérculos: uno de ellos produce manchas marrones, más o menos grandes y con textura corchosa (en algunos casos más extremos, esta enfermedad traspasa la piel y deja profundos ojos en el tejido); el otro tipo es más superficial, causando lesiones como pequeñas zonas rugosas (a veces, con ligeras protuberancias), que pueden ser tan numerosas que lleguen a cubrir toda la superficie de la patata (MAPA, 2005) (**Fig.44**).



Fig.44. Patatas afectadas por sarna común.

Fuente: *Bacterias de cuarentena que afectan al cultivo de la patata* (MAPA, 2005).

https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Vrural/Vrural_2005_213_16_20.pdf

4.1.5.2. Defectos en patatas debidos a enfermedades por hongos

- **Rizoctoniasis.** Está causada por el hongo *Rhizoctonia solani*. En la superficie de los tubérculos se observan manchas o costras de color oscuro, de tamaño y forma irregulares. Estas manchas pueden retirarse fácilmente al frotarlas o rasparlas (**Fig.45**).



Fig.45. Patatas afectadas por el hongo *Rhizoctonia solani*.

Fuente: <https://patatadesiembra.es/la-sarna-de-las-patatas>

- **Podredumbre seca.** Provocada por distintas especies de *Fusarium* (**Fig.46**). Generalmente, se desarrollan podredumbres alrededor de una herida, que conducen a la deshidratación del tubérculo. Se produce frecuentemente cuando la patata está afectada por daños mecánicos, bien sea en el cosechado o durante el almacenaje.



Fig.46. Patatas afectadas por el hongo *Fusarium sulphureum*.

Fuente: <https://patatadesiembra.es/enfermedades-de-la-patata-fusarium-o-podredumbre-seca>

- **Sarna Plateada.** Causada por el hongo *Helminthosporium solani*. Este tipo de sarna es fácilmente reconocible por su característico brillo plateado (**Fig.47**). Puede oscurecerse cuando se propaga, y causar una fuerte deshidratación (y, en consecuencia, un arrugado) de la patata.



Fig.47. Patatas afectadas por sarna plateada.

Fuente: <https://patatadesiembra.es/la-sarna-de-las-patatas>

3.1.5. Metodología para la implantación de nuevas herramientas

Se emplearon herramientas de desarrollo enmarcadas dentro de la *metodología Scrum*, para elaborar interacciones cortas, de forma que el producto resultante de cada una de ellas sea un **sistema evolucionado y funcional**, aportando agilidad y flexibilidad a la hora de implantar la retroalimentación del desarrollo, con los datos y requisitos mejorados de prototipos anteriores.

Según esta metodología, un proyecto se ejecuta en ciclos temporales cortos y de duración fija (en nuestro caso, interacciones de 2 semanas, límite máximo de *feedback* y reflexión). Los principales beneficios que proporcionó esta metodología fueron: la entrega mensual de resultados, lo cual conllevó múltiples ventajas (gestión regular de las expectativas basadas en resultados tangibles, datos anticipados, flexibilidad y adaptación con respecto a las necesidades,

gestión sistemática del retorno de inversión, mitigación de los riesgos del proyecto), además de conseguir productividad y calidad, alineamiento entre requisitos y el equipo de desarrollo y un equipo motivado.

4.1.6. Gestión del proyecto

Para la correcta ejecución de esta actividad, fue necesaria **la implicación de todas las entidades participantes** (*Avelino Santana García, CETECA, Amodo Soluciones S.L., Fortop S.L.U. y José Antonio Marra Bolaño*).

Se llevaron a cabo diferentes reuniones durante el desarrollo del proyecto, con la finalidad de planificar y de coordinar las tareas correspondientes, definir los objetivos propuestos, analizar los posibles inconvenientes y evaluar los resultados obtenidos.

4.1.7. Difusión de los resultados obtenidos

Las actividades de difusión de resultados las llevaron a cabo todos los socios participantes en el proyecto.

El *Plan de Divulgación* se organizó por temática (difusión general o científico-técnica) y por su alcance (difusión autonómica, nacional y europea). Así, en la primera anualidad, se realizó en anuncio de la concesión del proyecto en las páginas web y redes sociales oficiales de los socios participantes, indicando aspectos como el título del proyecto, los objetivos, las entidades implicadas y los organismos de financiación.

Una vez finalizados los ensayos, se realizaron acciones de **divulgación general**, mediante notas de prensa y publicación en páginas web de importancia para el sector. La **transferencia tecnológica al productor primario** se hizo mediante la realización de jornadas de campo para los agricultores de la región, organizado por el *CETECA* en colaboración con *Avelino Santana García y Amodo Soluciones S.L.*, con el fin de dar a conocer los beneficios de la implantación de las TIC en la gestión y control de los cultivos.

4.2. Fases de la planificación de las actividades y cronograma

La duración del proyecto fue de 38 meses, iniciándose el 1 de octubre de 2021 y con finalización el 30 de noviembre de 2024. El esquema de los ensayos llevados a cabo se organizó en **6 fases o actividades** diferenciadas que se describen a continuación, detallándose las tareas realizadas e indicando qué entidad de las participantes es la responsable de su ejecución.

ACTIVIDAD 1: CARACTERIZACIÓN TERRENO PARA CULTIVO

Esta actividad consistió en **definir el estado inicial de las parcelas** incluidas en el estudio. En esta fase, colaboraron el *CETECA*, realizando el muestreo de suelo y la caracterización del mismo en sus laboratorios, y el agricultor *Avelino Santana García*, llevando a cabo todas las acciones necesarias para la preparación de las parcelas.

- ✓ TAREA 1.1: Estudio de prospección (ABRIL-OCTUBRE 2022)
- ✓ TAREA 1.2: Selección de parcelas y preparación (OCTUBRE 2022-ENERO 2023).

ACTIVIDAD 2: TRABAJOS AGRONÓMICOS

Se llevó a cabo la **sectorización de las parcelas** según los estudios previos y ensayos de viabilidad de las técnicas de precisión en cultivos de trigo y patata. Se elaboró un informe de recomendaciones técnicas agronómicas y cuadernos de campo de patata y trigo.

- ✓ TAREA 2.1: Sectorización de las parcelas (DICIEMBRE 2022-ENERO 2023)
- ✓ TAREA 2.2: Siembra de patata y trigo (FEBRERO-ABRIL 2023)
- ✓ TAREA 2.3: Seguimiento de los cultivos (MARZO-OCTUBRE 2023)
- ✓ TAREA 2.4: Recolección de las cosechas (JUNIO-JULIO 2023; OCTUBRE 2023)

ACTIVIDAD 3: IMPLANTACIÓN TÉCNICAS AGRICULTURA PRECISIÓN

La finalidad de esta tarea fue el ajuste de las tecnologías de precisión de acuerdo a las necesidades de los cultivos y a los datos recopilados.

- ✓ TAREA 3.1: Selección de tecnologías de agricultura de precisión (JUNIO-JULIO 2022; FEBRERO 2023)
- ✓ TAREA 3.2: Especificaciones de trabajo en las parcelas de ensayo (JULIO-SEPTIEMBRE 2022; FEBRERO-MARZO 2023)
- ✓ TAREA 3.3: Monitorización de las áreas definidas (NOVIEMBRE 2022-FEBRERO 2023)
- ✓ TAREA 3.4: Trabajos de visualización con drones

- Definición de áreas a monitorizar por parcela (MARZO-ABRIL 2023)
 - Geolocalización de puntos críticos (ENERO-FEBRERO 2023; JUNIO-JULIO 2023)
 - Selección y configuración de drones (SEPTIEMBRE-NOVIEMBRE 2022; MARZO 2023; JULIO-AGOSTO 2023)
 - Realización de vuelos sobre puntos geolocalizados (ABRIL-MAYO 2023; SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2023). Producción de vídeos e imágenes en detalle de las incidencias.
-
- ✓ TAREA 3.5: Digitalización de los datos (NOVIEMBRE 2021-ABRIL 2024). Obtención de una herramienta digital para la visualización y control de parámetros y resultados obtenidos, que influyó mapas interactivos con visualización de indicadores relevantes.
 - ✓ TAREA 3.6: Implantación de un sistema de riego inteligente (ABRIL-SEPTIEMBRE 2023; y 2024).

ACTIVIDAD 4: ESTUDIO DE CALIDAD E IMPACTO

Se pretendió evaluar el efecto de la aplicación de tecnologías de precisión al mantenimiento de los cultivos, en lo relativo a la calidad de las cosechas.

- ✓ TAREA 4.1: Análisis de las cosechas: trigo y patata. Evaluación cuantitativa y cualitativa (JUNIO-AGOSTO 2023; OCTUBRE-NOVIEMBRE 2023)
- ✓ TAREA 4.2: Estudio del impacto económico y medioambiental (DICIEMBRE 2023-FEBRERO 2024)

La cosecha fue analizada en cantidad y calidad por parte del *CETECA*: producción bruta, producción comercial, reparto de calibres, porcentaje de materia seca, determinación de tubérculos por kg, porcentaje de destrío, defectos y su incidencia.

ACTIVIDAD 5. GESTIÓN DEL PROYECTO

Esta tarea se realizó a lo largo de las 3 anualidades en las que se extiende el proyecto. Se organizaron reuniones de carácter periódico, a fin de planificar y organizar las diferentes actividades, definir los objetivos a corto plazo y coordinar las acciones pendientes. Conllevó la elaboración de las justificaciones económicas parciales, las memorias parciales (3) y la memoria final del proyecto.

- ✓ TAREA 5.1. Coordinación y gestión técnica (ABRIL 2022-NOVIEMBRE 2024). Se planificaron las diferentes actividades y se gestionó la documentación requerida para el cumplimiento de los acuerdos entre entidades, y de las obligaciones estipuladas por el órgano gestor de la convocatoria de subvención.

- ✓ TAREA 5.2. Gestión científica (ABRIL 2022-NOVIEMBRE 2024).

ACTIVIDAD 6. DIFUSIÓN DE RESULTADOS

En las actividades de divulgación de resultados intervinieron todas las entidades participantes en el proyecto. El *Plan de Divulgación* se clasificó en tareas según su alcance (difusión autonómica, nacional y europea).

A. DIFUSIÓN AUTONÓMICA

- ✓ TAREA 6.1. Acciones de divulgación general: una vez finalizados los ensayos, se envió contenido para la emisión de notas de prensa y publicación en páginas web de importancia para el sector. En éstas se incluyó material gráfico recopilado durante la ejecución del proyecto (ENERO 2023 – ENERO 2024).
- ✓ TAREA 6.2. Transferencia tecnológica al productor primario, mediante la realización de talleres/jornadas de campo para los agricultores de la región, organizado por el CETECA en colaboración con Avelino Santana García y Amodo Soluciones S.L. (ENERO 2024 – MARZO 2024).

B. DIFUSIÓN ESTATAL.

En la primera anualidad, se realizó en anuncio de la concesión del proyecto en redes sociales oficiales de los socios participantes, así como en las páginas web de CETECA y de Amodo Soluciones S.L., indicando aspectos como el título del proyecto, los objetivos, las entidades implicadas y los organismos de financiación (ABRIL 2022).

Las publicaciones relativas al estado de ejecución del proyecto estuvieron supeditadas a la evolución de las tareas, así como a la planificación de reuniones de coordinación (SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2022; ENERO-FEBRERO 2023; JUNIO-JULIO 2023; OCTUBRE 2023-MARZO 2024).

C. DIFUSIÓN EUROPEA

- TAREA 6.3. DIFUSIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA: esta tarea se desarrolló entre la segunda y la tercera anualidad, cuando fueron recogidos los resultados, de acuerdo a las especificaciones del cronograma del proyecto. Se está realizando la redacción de un trabajo para su publicación en un congreso de ámbito internacional (ENERO 2024-NOVIEMBRE 2024).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Descripción de la zona de ensayo

La comarca de A Limia se encuentra en el sur de la provincia de Ourense, atravesada por el río Limia. La mayor parte de la comarca está ocupada por la depresión de Antela, una superficie llana, con una altitud media de 630 m sobre el nivel del mar (Gómez-Nieto, 1996).

En la zona norte de esta depresión se localizaba la antigua Laguna de Antela. Esta laguna fue desecada a partir de los años 50, creando una red de canales de drenaje que desembocan en un canal principal, que a su vez vierte al río Limia. Las tierras ocupadas antes esta laguna, se convirtieron en tierras de labor, destinadas principalmente al cultivo de patata, de gran relevancia en la economía de la comarca (López-Mateo, 2007).

La topografía es llana y la capa freática se encuentra próxima a la superficie del terreno. El clima de la zona es oceánico de transición (Gómez Nieto, 1996), con cierto carácter mediterráneo y rasgos de continentalidad. Según el mapa ombrotérmico (climograma) del *Atlas Climático de Galicia* (Martínez-Cortizas y Pérez-Alberti, 1999) el clima de esta zona es seco-templado.

5.2. Conectividad y transmisión de datos recopilados

La transmisión de los datos de sectorización al tractor equipado con *tecnología ISOBUS* permite una aplicación precisa y diferenciada de enmiendas en función de las características específicas de cada zona de la parcela, como la riqueza del suelo, la textura y las necesidades de nutrientes.

ISOBUS es un conjunto de protocolos de comunicación basados en la *Norma Internacional ISO 11783*, diseñados por los fabricantes de equipos agrícolas, y creados específicamente para gestionar la comunicación entre tractores agrícolas, aperos y software, para resolver los problemas de compatibilidad, estandarizando la comunicación entre los distintos equipos. Esto facilita trabajar con vehículos e implementos diferentes, permitiendo el intercambio de datos e información con un lenguaje universal a través de una única consola de control en la cabina del tractor.

Por otro lado, el **mapeo de la cobertura vegetal** es un parámetro de gran importancia que **se relaciona directamente con el crecimiento del cultivo**. Una forma de obtener imágenes de alta resolución espacial y temporal, es la implementación de **drones equipados con cámaras**

digitales (con sensores RGB, esto es, *Red Green Blue*). El procedimiento para estimar la cobertura vegetal con sensores remotos se está generalizando rápidamente, mediante imágenes de drones, donde el análisis de las imágenes se realiza usando índices de vegetación. Así, en imágenes de alta resolución espacial, es necesario conocer el **índice de vegetación** que mejor identifique a los píxeles que contienen vegetación y de los que no, con el objetivo de estimar la cobertura vegetal del cultivo. Este índice se utiliza para estudiar el estado fenológico y fisiológico de la vegetación, monitorear las etapas de desarrollo del cultivo y estimar los rendimientos.

Las imágenes tomadas desde los drones tienen ventajas respecto a las tomadas desde los satélites, en cuanto a coste, no interposición de nubes y mayor cercanía al objetivo. Además, los drones son capaces de llevar a cabo misiones automáticamente, permitiendo la toma de imágenes con diferente tipo de sensores tales como cámaras fotográficas (*sensor RGB*), térmicas o multiespectrales.

El procesamiento de **imágenes RGB tomadas por drones** se emplea principalmente cuando es necesario el monitoreo de grandes extensiones, con la finalidad de **detectar presencia de malezas, fallas en la siembra, estado de los cultivos**, o bien reflejar alguna **problemática en el campo**, facilitando información rápida y detallada de la situación. La información que se obtiene a través del procesamiento digital de imágenes RGB puede ser utilizada para diferentes aplicaciones: confección de mapas de riego y tratamiento a las malas hierbas, detección de plagas, detección de zonas favorables para los cultivos, determinación de cobertura vegetal y salud de los cultivos, entre otras. Conocer cuando un cultivo es saludable proporciona grandes ventajas a la hora de tomar medidas para mejorar el rendimiento, con un buen manejo de los insumos agrícolas.

Así, el proceso comenzó con la **recopilación de datos mediante vuelos con drones equipados con cámaras RGB** y otros sensores, que generaron mapas detallados de la parcela. Estos mapas identificaron además las zonas con variaciones en la fertilidad y la textura del suelo, como áreas de arena, barro, turba o suelos equilibrados. Estos datos se integraron en un software de gestión agrícola, que generó prescripciones específicas para cada zona, indicando las dosis exactas de enmiendas que debían aplicarse.

La información fue transmitida al tractor mediante el *sistema ISOBUS*, que permitió la comunicación estandarizada entre el equipo agrícola y el software. De esta forma, en el tractor recibe el mapa de prescripción y lo interpreta, ajustando automáticamente la maquinaria de aplicación (como abonadoras o esparcidoras) para dosificar la cantidad correcta de enmienda en cada zona, de acuerdo con las necesidades específicas previamente definidas.

Gracias a esta transmisión de datos y la automatización del proceso, se optimizó el uso de insumos, aplicando solo lo necesario en cada área. Esto no solo mejoró la eficiencia y redujo costes, sino que también minimizó el impacto ambiental, al evitar el exceso de enmiendas en zonas donde no eran requeridas.

5.3. Parcelas de control

Para llevar a cabo una **comparación efectiva entre el manejo convencional y la agricultura de precisión**, se estableció un conjunto de **parcelas control en cada zona de la parcela**, clasificadas según su tipo de suelo: normal, turba o arena. Estas parcelas permitieron evaluar el impacto de las prácticas diferenciadas en función de las características específicas de cada zona, contrastando los resultados con los obtenidos mediante técnicas de agricultura de precisión. En estas parcelas de control, se implementó un manejo común y estándar para todas ellas, aplicando insumos y prácticas agronómicas basadas en un enfoque tradicional, sin considerar las variaciones locales en la textura del suelo o las necesidades específicas de nutrientes. Las enmiendas y fertilizantes, se aplicaron de manera uniforme, sin diferencias en función de las características particulares del suelo de cada parcela.

En contraste, en las parcelas gestionadas bajo el enfoque de agricultura de precisión, las aplicaciones de enmiendas y otros insumos se realizaron de manera diferenciada, según las zonas previamente sectorizadas por drones y analizadas en función de su textura y fertilidad. Cada área recibió las cantidades óptimas de fertilizantes, riego o enmiendas, ajustadas específicamente a sus condiciones. De este modo, la comparación se basó en observar si el manejo diferenciado en función de la textura del suelo, como en las zonas de turba, arena y suelos normales, lograron un mejor rendimiento y eficiencia en el uso de recursos en comparación con el manejo convencional.

Esta metodología de comparación permitió no solo evaluar el impacto de la agricultura de precisión en la mejora del rendimiento, sino también identificar las áreas donde el manejo tradicional podría estar desperdiciando recursos o contribuyendo al deterioro del suelo.

5.4. Control local de la meteorología

El uso de **estaciones termo-pluviométricas** y una **estación de medición de humedad** en hoja permitió un control preciso de los parámetros climáticos como la precipitación, la temperatura y la humedad de los cultivos. Estas estaciones estaban estratégicamente distribuidas en las cercanías de la parcela, para monitorear en tiempo real las condiciones ambientales que afectaron el desarrollo de los cultivos y la planificación de las labores agrícolas.

Así, estas estaciones registraron la cantidad de lluvia caída y la temperatura ambiente en diferentes momentos del día. El **monitoreo de la precipitación** es crucial para entender la disponibilidad de agua natural y ajustar el riego de forma precisa, evitando tanto el déficit hídrico como el exceso, que podría provocar encharcamientos o escorrentías. Por otro lado, la **medición de la temperatura** permitió evaluar el impacto del clima en el crecimiento de las plantas, así como predecir posibles eventos climáticos extremos, como heladas u olas de calor.

Además, en el caso de la patata, la estación de **humedad en hoja** midió la cantidad de agua presente en la superficie de las hojas. Este dato es importante para evaluar el riesgo de enfermedades fúngicas, ya que muchos hongos patógenos proliferan en ambientes húmedos. Controlar la humedad foliar permite tomar decisiones más informadas sobre la aplicación de tratamientos fitosanitarios, previniendo el uso innecesario de productos químicos. El conjunto de datos recopilados por estas estaciones permitió un **manejo más eficiente de los cultivos y optimizando los rendimientos de la parcela** integrándolo en los datos recopilados por drones y analíticas.

5.5. Ensayos en 2023: Patata y trigo

5.5.1. Cultivo de patata 2023

5.5.1.1. Zona de ensayo del cultivo de patata para ensayos de fertilización en 2023

La situación de la parcela de ensayos se encuentra en el municipio de Xunqueira de Ambía (provincia de Ourense), en el polígono 501, parcela 189. Las coordenadas UTM del centro de la parcela son X: 608481.24 y Y: 4664405.46, con un datum WGS84 y en el huso 29 (**Fig.48**).

La superficie total es de 7,1882 ha, siendo 7,1595 ha tierras arables (TA) y 0,0286 ha de matorral (MT). El vuelo fotográfico del centroide de la parcela fue realizado en julio de 2023, y la cartografía catastral más reciente es de abril de 2023.



Fig.48. Parcela de ensayos de patata en 2023.

5.5.1.2. Zonificación de la parcela de ensayos en 2023 en función de vuelos de dron y cámaras RGB

La zonificación de la parcela utilizando drones equipados con cámaras RGB permitió una evaluación detallada de las características del suelo, como la textura y la fertilidad (**Fig.49 a 52**). Este proceso fue clave para optimizar la gestión agrícola, ya que proporcionó la información precisa sobre las variaciones del terreno y facilitó la toma de decisiones adaptadas a cada sector de la parcela.

En este caso, se definió una zonificación que abarcaba desde la cabecera hasta el fondo de la parcela, con diferentes tipos de suelos y condiciones de fertilidad. A continuación, se describen las principales zonas detectadas tras los vuelos con dron y la evaluación de la textura del suelo:

- *Precisión Arena*: en esta zona, el análisis muestra una predominancia de suelos arenosos. Los suelos arenosos tienen partículas grandes, lo que facilita el drenaje, pero dificulta la retención de agua y nutrientes. Estos suelos frecuentemente suelen necesitar un manejo especial para mejorar su capacidad de retención de fertilizantes y agua.
- *Precisión Normal 1*: esta área tiene una textura equilibrada, posiblemente un suelo franco, que combina las propiedades de la arena, el limo y la arcilla, en proporciones que favorecen un buen balance entre drenaje y retención de nutrientes. Esta es una zona ideal para muchos cultivos, ya que requiere menos intervención en términos de manejo de suelos.
- *Precisión Turba*: los suelos de turba se caracterizan por su alta concentración de materia orgánica. Son muy fértiles, pero también muy esponjosos, con una alta capacidad para retener agua. Esta zona es particularmente adecuada para cultivos que requieren humedad constante y un alto nivel de nutrientes, pero puede ser necesario un control del drenaje para evitar el exceso de agua.
- *Precisión Normal 2*: similar a la zona *Precisión Normal 1*; esta área cuenta con suelos equilibrados en textura, probablemente franco-arenosos o franco-limosos, lo que facilita tanto el drenaje como la retención de agua. Aquí también se pueden implementar técnicas de manejo estándar sin grandes modificaciones para mejorar la fertilidad.
- *Precisión Barro*: los suelos arcillosos o con una alta concentración de barro presentan desafíos particulares. Son suelos que tienden a retener mucha agua, lo que puede dificultar el crecimiento de las raíces y limitar el acceso a oxígeno. El manejo de esta área probablemente requerirá una optimización del drenaje o la incorporación de materia orgánica para mejorar la aireación y la estructura del suelo.

En resumen, la zonificación basada en vuelos de **dron con cámaras RGB** reveló una **amplia gama de texturas de suelo**, que van desde arenosas hasta arcillosas, cada una con diferentes necesidades de manejo. La clave para optimizar el rendimiento en esta parcela fue **adaptar el riego, la fertilización y las prácticas de cultivo a cada zona**, con un enfoque especial en el drenaje de las áreas más húmedas, y la mejora de la retención de nutrientes en las zonas más arenosas.



Fig.49. Parcela de ensayos de patata en 2023. Imagen tomada con dron equipado con cámara *RGB*. Ortomosaico y el correspondiente Modelo Digital de Superficie Dispersa (DSM) antes de la densificación. Imagen procesada el 21/04/2023.

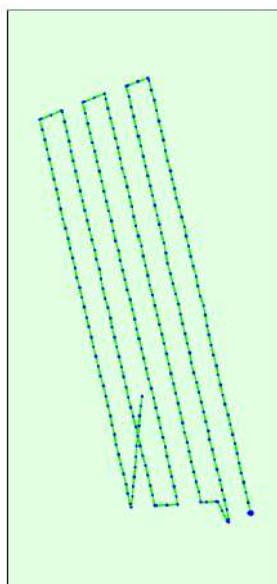


Fig.50. Parcela de ensayos de patata en 2023. Vista superior de la posición inicial de la imagen. La línea verde sigue la posición de las imágenes en el tiempo a partir del punto azul. Imagen procesada el 21/04/2023.

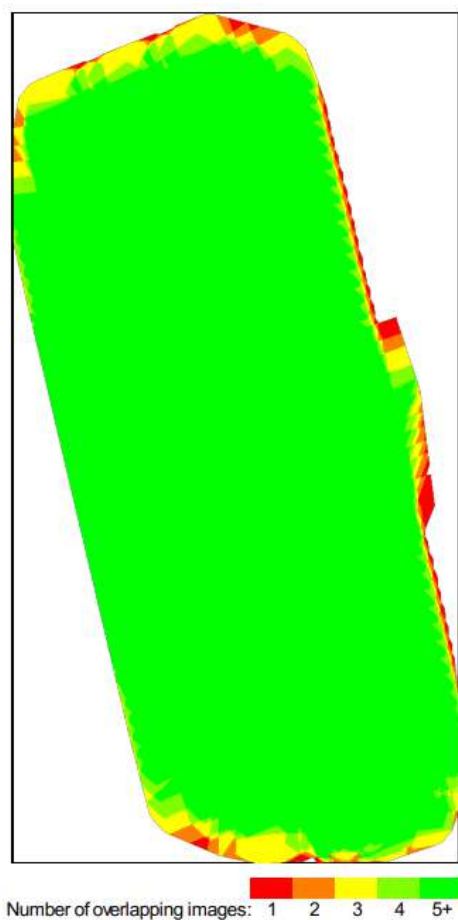


Fig.51. Parcela de ensayos de patata en 2023. Número de imágenes superpuestas calculadas para cada píxel del ortomosaico. Las áreas rojas y amarillas indican una superposición baja, para la que se pueden generar resultados deficientes. Las áreas verdes indican una superposición de más de 5 imágenes por cada píxel. Imagen procesada el 21/04/2023.



Fig.52. Parcela de ensayos de patata en 2023. Posiciones de imagen calculadas con enlaces entre imágenes coincidentes. La oscuridad de los enlaces indica el número de puntos clave 2D coincidentes entre las imágenes. Los enlaces más claros indican enlaces débiles. Las elipses de color verde oscuro indican la incertidumbre relativa de la posición de la cámara. Imagen procesada el 21/04/2023.

5.5.1.3. Precipitación acumulada y temperatura durante el ensayo de patata en 2023

Durante el ensayo de la variedad de patata *Lady Anna* en la parcela de A Limia antes descrita, se registraron diversas condiciones meteorológicas que influyeron en el desarrollo del cultivo.

A continuación, se analiza la evolución de los principales parámetros climáticos, como la precipitación acumulada (en mm) y la temperatura media (en °C), desde abril hasta septiembre de 2023, para evaluar cómo afectaron al ciclo de crecimiento de la patata (**Fig.53**).

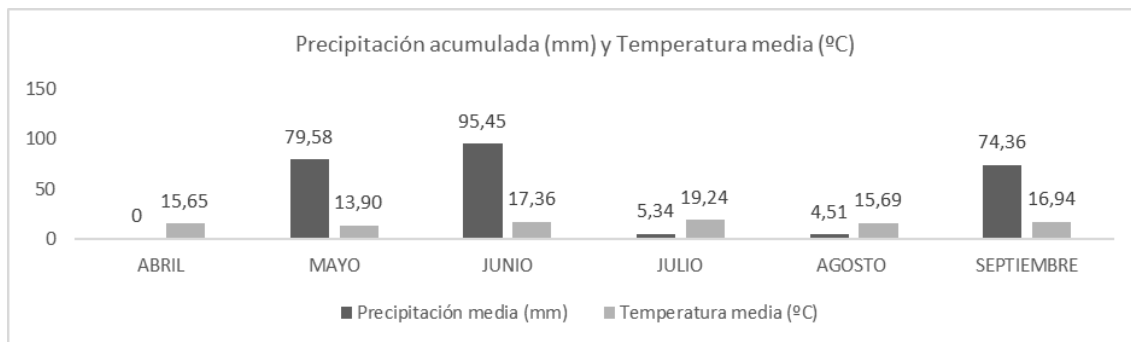


Fig.53. Precipitación acumulada y temperatura media registradas durante los meses de abril a septiembre de 2023.

Durante los meses de mayo y junio de 2023 las precipitaciones fueron significativas, alcanzando 79,58 mm en mayo y 94,45 mm en junio. Estas condiciones de alta humedad, junto con temperaturas moderadas (13,90°C en mayo y 17,36°C en junio), crearon un ambiente ideal para el desarrollo del mildiu de la patata, una de las enfermedades más devastadoras para este cultivo. Las lluvias frecuentes y la humedad persistente en las hojas proporcionaron el entorno perfecto para que las esporas del mildiu germinaran y penetraran en los tejidos de las plantas, lo que pudo desencadenar infecciones en el follaje y los tubérculos.

En mayo, las lluvias aseguraron una buena humedad del suelo para el desarrollo temprano de las plantas, pero también promovieron la aparición de las primeras infecciones. En junio, con lluvias aún más intensas, la situación se agravó, ya que la acumulación de agua en el ambiente y las hojas contribuyó a la rápida propagación de la enfermedad. El **manejo del mildiu** durante estos días críticos debió incluir tratamientos preventivos con fungicidas específicos que fueron imposibles de aplicar por la excesiva cantidad de agua en suelo, que impedía la circulación de máquinas pesadas.

En julio, la precipitación descendió a 5,34 mm, mientras que la temperatura media alcanzó los 19,24°C, por lo que este mes fue significativamente más seco y con temperaturas cálidas. Esta combinación puede haber ejercido estrés hídrico en las plantas, especialmente en áreas sin riego adecuado. Las altas temperaturas también podrían haber acelerado el metabolismo de las plantas, aumentando su demanda de agua y nutrientes, lo que pone de relieve la importancia de una buena gestión del riego.

El mes de agosto continuó con un patrón seco, con solo 4,51 mm de precipitación y una temperatura media de 15,69°C. Este mes probablemente fue un desafío para el manejo del cultivo debido a la escasez de lluvia. Las plantas en este periodo podrían haber sufrido estrés hídrico prolongado, lo que pudo afectar la calidad de los tubérculos. Las temperaturas más bajas, en comparación con julio, habrían reducido ligeramente el estrés por calor, pero la falta de agua

sigue siendo un factor limitante importante. Este mes es clave para el engorde de los tubérculos, por lo que la ausencia de lluvias puede haber afectado negativamente el tamaño final de la cosecha.

En septiembre, mes de cosecha, la precipitación acumulada aumentó a 74,36 mm, mientras que la temperatura media se mantuvo en 16,94°C. Este incremento en las lluvias llegó tarde en el ciclo del cultivo, aunque podría haber sido beneficioso para las etapas finales del desarrollo de los tubérculos, en la creación de piel y maduración de la misma, y para mejorar las condiciones del suelo en preparación para la cosecha. Las temperaturas moderadas habrían favorecido la maduración de los tubérculos, permitiendo que alcanzaran su tamaño final. Sin embargo, dependiendo del momento exacto de las lluvias y del estado del cultivo, el exceso de humedad en esta fase también podría haber aumentado el riesgo de enfermedades como el tizón tardío.

El análisis meteorológico durante el ensayo revela un **ciclo de crecimiento marcado por fluctuaciones en la precipitación y temperaturas** que, en general, fueron poco favorables en mayo y parte de junio, por el exceso de lluvia. Pese a ello, las condiciones secas de julio y agosto probablemente presentaron el mayor desafío para el desarrollo del cultivo, particularmente en términos de estrés hídrico durante las fases críticas de tuberización y engorde de los tubérculos. La falta de lluvias en estos meses clave pudo haber limitado el rendimiento potencial del cultivo, si no se realiza un riego adecuado en frecuencia y dosis, mientras que las lluvias de septiembre llegaron en un momento en el que su impacto sobre el rendimiento total ya sería más limitado.

5.5.1.4. Reparto de horas de desarrollo de la patata 2023

El análisis del reparto de horas de actividad de la planta de patata durante el periodo de junio a septiembre de 2023, basado en las diferentes franjas de temperatura, nos ofrece una visión clara de cómo las condiciones térmicas influyeron en el crecimiento y desarrollo de la patata en la parcela de ensayo (**Tabla 3**).

Tabla 3. Reparto de horas (en porcentaje) en función de la temperatura, durante el desarrollo de la patata de junio a septiembre de 2023.

Actividad nula	Menos de 5°C	3,25%
Actividad vegetativa mínima por bajas temperaturas	De 5° a 12°C	12,05%
Crecimiento óptimo del tubérculo	De 12° a 25°C	46,86%
Crecimiento de la parte aérea	De 25° a 28°C	17,73%
Sin actividad por altas temperaturas	Más de 28°C	20,12%

- *Actividad nula por temperaturas extremas*

Menos de 5°C (3,25% del tiempo): esta franja corresponde a periodos donde la actividad fisiológica de la planta es prácticamente nula debido a las temperaturas bajas. Durante esta etapa, la patata entra en una especie de letargo y no realiza ninguna función vital significativa. Aunque solo representa el 3,25% del tiempo total, estos episodios de bajas temperaturas pueden haber ocurrido en las primeras horas de la mañana o durante noches frías, afectando principalmente las fases de desarrollo inicial del tubérculo.

Más de 28°C (20,12% del tiempo): en este rango, las plantas de patata también dejan de tener actividad significativa debido a temperaturas demasiado altas. El 20,12% del tiempo con temperaturas superiores a 28°C implica un estrés térmico considerable que afecta al crecimiento del follaje y los tubérculos. Durante este periodo, las plantas probablemente dejaron de crecer y entraron en un estado de inactividad temporal, afectando el desarrollo total de los tubérculos, ya que el calor excesivo impide la fotosíntesis eficiente.

- *Actividad vegetativa mínima*

De 5° a 12°C (12,05% del tiempo): en este intervalo, la actividad vegetativa de la planta es mínima. Aunque las plantas pueden continuar desarrollándose, las bajas temperaturas limitan su crecimiento. Este porcentaje relativamente bajo de horas en este rango significa que las condiciones fueron mayoritariamente favorables para el desarrollo activo de la planta, pero durante las noches frescas o en periodos de transición, el crecimiento de las plantas pudo haberse ralentizado.

- *Crecimiento óptimo del tubérculo*

De 12° a 25°C (46,86% del tiempo): este es el intervalo de temperaturas óptimas para el desarrollo del tubérculo de la patata. Casi la mitad del tiempo, las temperaturas estuvieron en este rango, lo que favoreció el engorde de los tubérculos y un desarrollo saludable. Durante este periodo, la planta está en su máxima actividad metabólica, aprovechando las temperaturas moderadas para realizar fotosíntesis y crecer de manera eficiente. La mayoría de la acumulación de materia seca en los tubérculos ocurre en este rango, por lo que un 46,86% es un dato positivo para el rendimiento del cultivo.

- *Crecimiento de la parte aérea*

De 25° a 28°C (17,73% del tiempo): en este rango, el crecimiento principal se concentra en la parte aérea de la planta. Aunque las temperaturas son algo más elevadas, las plantas aún pueden seguir creciendo, especialmente el follaje. Un 17,73% del tiempo en este rango significa que, aunque la planta mantuvo un desarrollo activo del follaje, este crecimiento no es tan favorable como el desarrollo del tubérculo. Sin embargo, sigue siendo un periodo útil para el fortalecimiento de la planta.

El reparto de horas indica que las condiciones para el desarrollo de la patata fueron favorables, con un 46,86% del tiempo en temperaturas óptimas para el engorde del tubérculo. No obstante, el 20,12% de inactividad debido a temperaturas superiores a 28°C puede haber limitado el potencial de rendimiento, generando estrés térmico. Las bajas temperaturas afectaron mínimamente, lo que sugiere que la mayor preocupación fue el calor excesivo.

5.5.1.5. Análisis previos de las parcelas de patata en 2023: caracterización del suelo

El *Centro Tecnológico da Carne (CETECA)* ha sido el responsable de la toma de muestra para llevar a cabo la caracterización previa de los suelos: determinación de pH, materia orgánica, elementos disponibles para las plantas (CIC: capacidad de intercambio catiónica: calcio, magnesio, sodio, potasio), relaciones entre cationes, etc. (**Tabla 4**). Las muestras de suelo se tomaron de la capa arable (0-20 cm), para después secarlas al aire, tamizarlas por 2 mm y conservarlas para su análisis.

Los análisis de suelo revelaron que las diferentes zonas estudiadas tienen características variadas, que influyeron en el manejo agronómico de la patata variedad *Lady Anna*. La **Zona de Turba** parece ser la más favorable, debido a su alto contenido de materia orgánica (14,9%) y buena disponibilidad de potasio (511,5 mg/kg). En cambio, las **Zonas Normal 1** y **Normal 2** presentan una buena capacidad de retención de nutrientes, pero pueden beneficiarse de enmiendas específicas para optimizar el rendimiento del cultivo. Las condiciones del suelo en la **Zona de Barro** son aceptables, aunque también puede requerir ajustes para maximizar la producción (**Tabla 4**). La gestión adecuada de los nutrientes y el monitoreo constante del estado del suelo fueron fundamentales para el éxito del cultivo en cada una de estas zonas.

Tabla 4. Caracterización química de la capa arable de parcela de ensayos (20 cm) en las distintas zonas evaluadas para el cultivo de patatas (ensayo 2023).

	M.O.	P	pH	Ca	K	Mg	Na	Ca/Mg	K/Mg	Ca:K:Mg
Arena	9,08	159,02	5,58	667,5	460	100	176	6,67	1,52	73:11:16
Normal 1	4,48	152,22	5,07	784,2	288	128	148	6,13	2,25	65:11:24
Turba	14,91	84,90	5,07	445,3	511,5	176,4	187,8	2,52	2,90	40:16:44
Normal 2	7,05	135,58	5,21	1129,0	468	204	156	5,53	2,29	63:11:26
Barro	6,13	154,48	5,41	513,8	452	104	180	4,94	4,35	48:10:42

Donde:

pH en agua (1:2,5)

M.O.: Materia orgánica (%)

Fósforo asimilable (Olsen) (mg/kg)

Ca, K, Mg y Na en mg/kg

Podemos decir que en todos los casos se trata de suelo ácidos, con un **pH en agua** entre 5,07 (*Zona Turba* y *Normal 1*) y 5,58 (*Zona Arena*). Estos valores se encuentran, en algún caso, levemente por debajo del rango óptimo (5,5-6,5) especificado para producción de patata por Alonso Arce (1996), pero dentro del rango 4,5-7,0 señalado por Porta *et al.* (1994). Sin embargo, Lema (1996) propone como adecuado para el cultivo de la patata el intervalo de 5,2-5,6. Además, estos niveles son muy parecidos a los encontrados por López-Mateo (2007) (4,8-5,5), en parcelas cercanas a la zona, tradicionalmente dedicadas al cultivo de la patata.

Respecto a la **materia orgánica** del suelo, ésta es fundamental para el mantenimiento de su estructura, favoreciendo la retención de agua en épocas de sequía y el drenaje si el agua es excesiva. Además, contribuye de forma decisiva a la capacidad de intercambio catiónico. Por tanto, es un factor esencial en la conservación del suelo, ya que influye en sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En nuestro caso, se obtuvo un porcentaje variable en función del área considerada, oscilando entre 4,5% (*Zona Normal 1*) y 14,9% (*Zona de Turba*). Esta última es presenta un porcentaje de materia orgánica elevado, a pesar de que es habitual que, en el cultivo de patata, se encuentren frecuentemente niveles reducidos (Edwards *et al.*, 2000; Grandy *et al.*, 2002; Carter *et al.*, 2004; Stark y Porter, 2005).

El **fósforo asimilable** o disponible se determinó siguiendo el *método Olsen* (Olsen y Sommers, 1982), que es el empleado habitualmente en los laboratorios que realizan análisis de suelos en Galicia (López-Mateo, 2007). Las concentraciones de fósforo disponible encontradas inicialmente en las distintas zonas de la parcela son elevadas (84,9-159 mg/kg), aunque semejantes a los valores encontrados en otros estudios en la zona de A Limia. Por ejemplo, en su investigación, López-Mateos (2007) obtuvo valores de fósforo asimilable en torno a 75 mg/kg para suelos antes de iniciar la plantación de patata. En los suelos que presentan más de 25 mg/kg de fósforo, se considera que tienen reservas y sólo se han de efectuar aportes para compensar las extracciones del cultivo o como abonado de arranque (Lema, 1996).

Los **cationes intercambiables** (Ca, Mg, Na y K) se determinaron por el método de Peech *et al.* (1947). Así, se obtuvieron valores de **Ca intercambiable** que fueron de 445,3 mg/kg (2,23 cmol_e/kg) para la *Zona de Turba*, hasta 1129 mg/kg (5,64 cmol_e/kg) en la *Zona Normal 2*. En general, se considera que un suelo es deficiente en este elemento si posee menos de 1,5 cmol_e/kg o si la relación Ca/Mg es inferior a 0,5 (Buol *et al.*, 1975). Por tanto, nuestro suelo tendría un contenido adecuado de este elemento disponible para las plantas.

En relación al **Mg intercambiable**, se encontraron valores comprendidos entre 100 y 204 mg/kg (0,83 y 1,7 cmol_e/kg respectivamente), lo cual sería adecuado para el cultivo de patata en todos los casos, ya que se recomienda que se superen 0,8 cmol_e/kg (Lema, 1996).

Con respecto al **K intercambiable**, la patata es un cultivo que presenta elevadas absorciones de este elemento, por esto, aunque niveles de 0,2 cmol_e/kg se consideran limitantes para los cultivos en general, debido a las exigencias de la patata, el límite se eleva hasta 0,26 cmol_e/kg (Lema, 1996). En nuestro caso, valores encontrados en las distintas zonas, entre 288 mg/kg (0,74 cmol_e/kg) y 511 mg/kg (1,31 cmol_e/kg) estarían sobradamente dentro del rango recomendado.

5.5.1.6. Fertilización diferenciada de la parcela de patata en función del análisis obtenido

La implementación de la fertilización basada en datos extraídos de los vuelos de drones y los análisis de suelo no solamente mejoraron la eficiencia en el uso de insumos, sino que también tienen el potencial de aumentar significativamente el rendimiento del cultivo. De esta forma, la comparación con parcelas control establece un marco sólido para evaluar el impacto de esta técnica innovadora, abriendo la puerta a prácticas agrícolas más sostenibles y rentables. La combinación de tecnología y análisis de datos en la agricultura de precisión es un paso importante hacia el futuro de la agricultura.

El proceso seguido se resume en los siguientes pasos:

1. Mapeo mediante vuelos de dron

Como ya hemos mencionado, los vuelos con dron han proporcionado un mapeo detallado de la parcela, identificando variaciones en la textura del suelo, la fertilidad y el estado de las plantas. Las imágenes obtenidas permiten clasificar la parcela en diferentes zonas, como arena, turba, y otros tipos de suelo (descrito en el apartado 5.1.2. *Zonificación en función vuelo de dron y datos RGB*). Esta clasificación es fundamental, ya que cada tipo de suelo tiene diferentes

necesidades nutricionales y retenciones de agua, lo que influye directamente en el crecimiento de las plantas.

2. *Análisis de suelo*

Los análisis de suelo complementaron la información obtenida de los drones, proporcionando datos precisos sobre la composición química del suelo, incluyendo niveles de materia orgánica, fósforo, pH y minerales como calcio, potasio y magnesio. Esta información permite establecer un perfil nutricional específico para cada zona mapeada, lo que facilita la identificación de carencias y excesos de nutrientes.

3. *Fertilización personalizada*

Con los datos de mapeo y análisis de suelo, se pueden diseñar planes de fertilización personalizados. Utilizando un tractor dotado con *tecnología ISOBUS*, se pudo aplicar fertilizante de manera precisa y diferenciada en cada zona según sus requerimientos específicos. Esto aseguró que cada sección de la parcela recibiera la cantidad adecuada de nutrientes, optimizando el uso de insumos y reduciendo el riesgo de sobre fertilización que podría dañar el suelo y las plantas.

4. *Comparación con fertilización tradicional*

Los resultados de fertilización empleando tecnología de agricultura de precisión se contrastaron con los obtenidos con la fertilización *a ciegas* que se aplicó a toda la parcela de manera uniforme. En este último método, no se considera la variabilidad del suelo, lo que puede resultar en una distribución ineficiente de nutrientes. Para evaluar la efectividad de la fertilización personalizada, se establecieron **parcelas de control** que recibieron el manejo convencional. Esto permitió realizar comparaciones claras en términos de rendimiento, calidad de las cosechas y uso de recursos.

5.5.1.7. *Siembra, seguimiento del cultivo de patata y cosecha 2023. Evaluación de resultados en el ensayo de patata 2023*

La fecha de siembra se determinó según las condiciones climatológicas de la zona y la dosis de semilla se ajustó en función de la capacidad productiva del suelo y las necesidades específicas de la variedad *Lady Anna*. Las patatas se sembraron en el mes de abril (**Fig.54**).

Avelino Santana García se ocupó de realizar las labores agrícolas en las parcelas (arado, fertilización...), así como del seguimiento de los cultivos (siembra, aplicación de agroquímicos, eliminación de malas hierbas...) (**Fig.54, 55 y 56**).



Fig.54. Siembra de patatas en la parcela de ensayos en 2023.



Fig.55. Eliminación de malas hierbas y formación de surco mediante un alomador o conformador acoplado al tractor, en la parcela de ensayos en 2023.



Fig.56. Aplicación de agroquímicos en la parcela de patatas en 2023, mediante un pulverizador/sulfatadora acoplado al tractor.

En el ensayo realizado en 2023, se analizaron varios parámetros clave para comparar la efectividad de la **agricultura de precisión** con el **manejo convencional**. A continuación, se detalla el análisis de los siguientes indicadores:

- **Producción bruta:** se mide el peso total de los tubérculos cosechados por kg en ambas zonas (precisión y convencional). La producción bruta es un indicador clave de la **cantidad total generada** por cada sistema de manejo.
- **Producción comercial:** se evaluó la fracción de la producción que es apta para la comercialización, excluyendo los tubérculos defectuosos. El rendimiento comercial es crucial para **determinar la viabilidad económica** de cada método, dado que una mayor producción comercial puede aumentar los beneficios del agricultor.
- **Porcentaje de destrío:** porcentaje de tubérculos descartados por defectos (tamaño, forma o daños) se compara entre ambas zonas. La agricultura de precisión, al aplicar insumos de manera localizada y optimizada, busca reducir el destrío y aumentar el porcentaje de tubérculos comercializables.
- **Porcentaje de materia seca:** este indicador refleja la calidad de los tubérculos, importante para la industria alimentaria y la conservación. Se compararon los valores de

materia seca entre ambas zonas, ya que un mayor porcentaje es deseable para ciertos usos industriales.

La zona manejada bajo *agricultura de precisión* presentó una mayor eficiencia en el uso de insumos, menor destrío y una mayor calidad de los tubérculos, con porcentajes más altos de materia seca y mayor producción comercial. Por otro lado, la *zona convencional*, con un manejo homogéneo, mostró mayores variaciones en la calidad y cantidad, debido a la aplicación uniforme de fertilizantes y otros insumos, sin tomar en cuenta las variaciones del suelo y las necesidades del cultivo.

5.5.1.8. Instalación y registro de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo

La instalación de los equipos de monitoreo se llevó a cabo en la parcela antes descrita, a la cual fue necesario desplazarse con el equipo y material requerido para realizar el trabajo de manera efectiva. Las etapas del proceso de instalación se desarrollaron en dos partes principales: el sistema de sensores subterráneos y la instalación de transmisores para la transmisión de datos en tiempo real.

1. Instalación del sistema de sensores

Para llevar a cabo esta primera fase, se trasladó el material específico necesario para la instalación de sensores subterráneos, diseñados para monitorear condiciones en la plantación de patatas. Al llegar a la parcela de ensayos, se realizó un análisis del terreno, con el fin de estimar tanto el tamaño como la forma de la plantación, lo cual fue esencial para determinar los puntos de colocación de cada sensor.

La ubicación precisa de los sensores fue planificada cuidadosamente para asegurar una cobertura adecuada de toda la extensión de la plantación. Los sensores fueron colocados en el suelo a una profundidad de, al menos, 30 cm. Esta profundidad fue fundamental para evitar interferencias superficiales y asegurar que los datos recogidos, relacionados con la humedad, temperatura y otras variables del suelo, sean los más precisos y representativos posibles. Este sistema permitió un monitoreo continuo de las condiciones en el suelo, ayudando a optimizar el cultivo de las patatas y permitiendo la recolección de datos de alta precisión.

2. Instalación de transmisores

Una vez instalados los sensores, se procedió a montar una estructura en la superficie sobre cada uno de ellos. Esta estructura cumple varios objetivos: señala la posición de los sensores en la parcela, conecta los sensores a los transmisores y asegura que los datos recopilados puedan transmitirse eficazmente a la aplicación web que gestiona la información.

Los transmisores fueron configurados para enviar los datos en tiempo real, permitiendo así que se mantenga un registro constante y preciso de las condiciones del suelo. La estructura instalada garantiza que cada sensor esté correctamente conectado a un transmisor, asegurando así la comunicación fluida y sin interrupciones entre los sensores del suelo y el sistema de registro digital. La correcta instalación de esta estructura fue fundamental para evitar errores en la transmisión de datos y optimizar la gestión de la información recopilada.

Esta infraestructura en su conjunto permitió un control detallado y constante de las condiciones ambientales en la plantación, facilitando la toma de decisiones informadas para el cuidado y desarrollo de los cultivos.

5.5.1.8.1. Registro de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo: sensores de suelo y transmisores

En las siguientes gráficas (**Fig.57 a 59**), se reflejan algunos datos registrados y extraídos de los sensores (de humedad, conductividad eléctrica y temperatura) colocados en la parcela de ensayos.

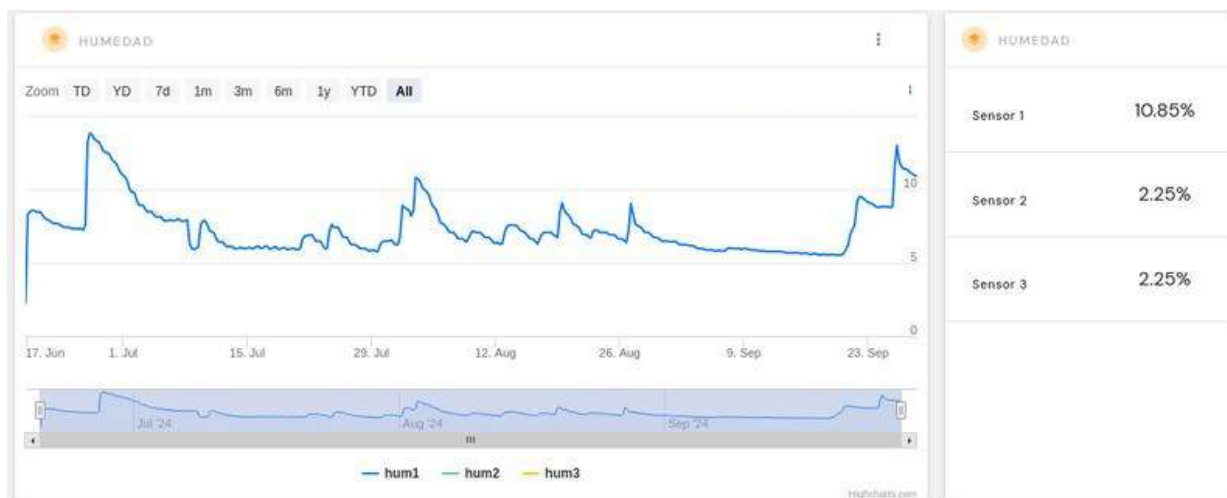


Fig.57. Ejemplo de registro de datos de humedad obtenidos de los sensores colocados en la parcela de ensayos de patata.



Fig.58. Ejemplo de registro de datos de conductividad eléctrica obtenidos de los sensores colocados en la parcela de ensayos de patata.

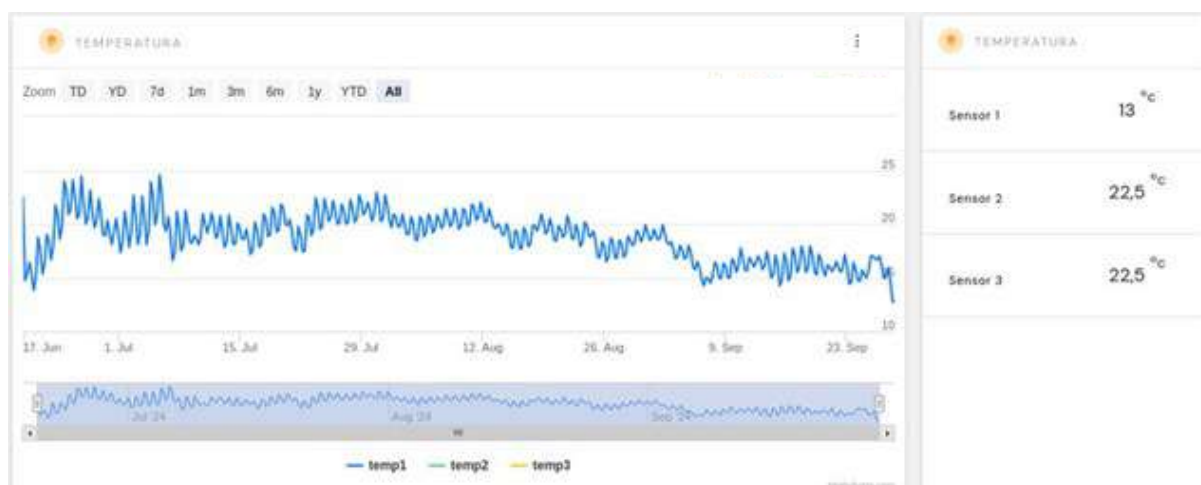


Fig.59. Ejemplo de registro de datos de temperatura obtenidos de los sensores colocados en la parcela de ensayos de patata.

5.5.1.9. Resultados en el estudio del nemátodo

5.5.1.9.1. Parcela de ensayos para el estudio del nemátodo en patata

La parcela para los ensayos se encuentra en el municipio de Xunqueira de Ambía, provincia de Ourense.

La parcela tiene una superficie total de 9 hectáreas. Sin embargo, para los ensayos solo se emplearon 5 ha. Está situada a una altitud de 600 m sobre el nivel del mar y presenta una pendiente suave del 0,50%, lo cual indica que el terreno es casi plano y adecuado para el cultivo.

En cuanto al uso del suelo, esta parcela está clasificada como tierras arables, lo que significa que su uso principal es para el cultivo. Es 100% subvencionable para actividades agrícolas, particularmente pastos, aunque es apta para otros cultivos. En los últimos tres años, la parcela ha sido explotada bajo riego, lo que permite que en los ensayos se considere el uso de recursos hídricos para una evaluación precisa de técnicas de manejo agrícola.

Para realizar los ensayos en la parcela indicada, se dividió el área destinada a ensayos en dos franjas de 2,5 ha cada una. Esto permitió hacer comparaciones entre dos tipos de manejo (convencional y de precisión), dentro de una porción representativa de la parcela total.

5.5.1.9.2. Estado de infestación de nemátodo. Toma de datos

Para estudiar la presencia del nematodo en la parcela de ensayo, se procedió a dividir el terreno en cuadrículas de 20 x 20 m. Esta subdivisión permitió realizar un muestreo organizado y uniforme a lo largo de toda el área destinada al experimento. El objetivo fue obtener datos detallados y precisos sobre la distribución y densidad del nemátodo en distintas zonas de la parcela.

Una vez establecidas las cuadrículas, se recogieron muestras de suelo en cada una de ellas. Estas muestras fueron secadas para facilitar el procesamiento posterior. A continuación, se sometieron a un proceso de secado, tamizado y lavado, siguiendo el *método de Fenwick*, permitiendo que el análisis de nemátodos fuera más preciso.

Después de procesar las muestras, se procedió al conteo de quistes presentes en cada cuadrícula. Los quistes, que son estructuras que protegen a los nemátodos en el suelo, proporcionan una medida útil de la cantidad de individuos en su fase reproductiva. También se contaron los juveniles en segundo estadio (J2), una fase en el ciclo de vida del nemátodo en la

que suelen ser altamente infectivos. Este conteo de juveniles J2 es especialmente relevante, ya que permite evaluar la cantidad de nematodos potencialmente activos y listos para infectar.

Este procedimiento en cada cuadrícula permite obtener un **mapa detallado de la densidad y distribución del nemátodo en la parcela**. Los datos resultantes pueden utilizarse para entender mejor las zonas de mayor infestación y desarrollar estrategias de manejo agrícola específicas para cada área de la parcela.

La parcela elegida para el estudio del nemátodo, presentó quistes de *G. Pallida* y *G. rostochiensis* en el muestreo inicial del suelo de la misma. Para clasificar las áreas de la parcela de ensayo según la infestación, se establecieron **tres tipos de zonas en función de la densidad de quistes presentes en el suelo (Fig.60)**. Estas zonas se definieron de la siguiente manera:



Fig.60. Distribución de la plaga de nemátodo según la densidad de quistes.

Zona Blanca (Baja Infestación):

En esta zona, la **infestación de nemátodos es prácticamente inexistente**. Los análisis mostraron una presencia de entre 0 y 3 quistes y ninguna presencia de J2 en 100 g de suelo. Esta zona representa áreas donde el riesgo de daño por nemátodos es mínimo o nulo, siendo lugares seguros para el cultivo sin necesidad de tratamientos específicos.

Zona Amarilla (Infestación Media):

En esta zona, la **infestación de nemátodos es moderada**. Se registraron hasta 30 quistes y hasta 600 J2 por cada 100 g de suelo. La presencia de J2 en esta cantidad indica un **riesgo potencial** para los cultivos futuros, por lo que se requiere un monitoreo continuo y algunas medidas de control preventivo para evitar que la infestación aumente.

Zona Roja (Alta Infestación):

Las zonas rojas muestran una **alta densidad de nemátodos**, con más de 30 quistes y más de 1000 J2 por 100 g de suelo. Esta alta concentración de quistes y juveniles J2 representa un **riesgo considerable para el rendimiento de los cultivos**, debido a la alta actividad de nemátodos infectivos. Se recomienda aplicar tratamientos específicos de control en estas áreas para reducir la infestación y proteger la productividad del cultivo.

En la **Fig.61** se muestra el plano de la parcela de ensayos con las dosis aplicadas.



Fig.61. Distribución de las dosis aplicadas de nematocida en la parcela de ensayos.

5.5.1.9.3. Distribución de la plaga en la parcela de ensayos

La **Tabla 5** muestra la distribución de la superficie afectada por diferentes grados de infestación de nemátodos en la parcela de ensayo, de 5 ha, que está dividida en dos franjas de manejo: una con técnicas de precisión y otra con técnicas convencionales. Cada franja abarca 2,5 ha.

Tabla 5. Reparto de la superficie afectada por el nemátodo de la patata en la parcela de ensayos.

Infestación	Precisión superficie (ha)	Convencional superficie (ha)	Total (ha)
Baja: 0 a 3 quistes	2,00	2,10	4,10
Media: 3 a 30 quistes	0,30	0,40	0,70
Alta: más 30 quistes	0,20	0,00	0,20
Total	2,50	2,50	5,00

- **Zona de baja infestación (0 a 3 quistes):** La presencia de nemátodos es mínima, con una densidad de entre 0 y 3 quistes. En la franja de manejo de precisión, hay 2 ha de baja infestación. En la franja de manejo convencional, se identificaron 2,1 ha con baja infestación. En total, esta zona de baja infestación ocupa 4,1 ha de la parcela, lo que representa la mayor parte del área.
- **Zona de infestación media (3 a 30 quistes):** La infestación es moderada, con entre 3 y 30 quistes presentes. En la franja de precisión, hay 0,3 ha con infestación media. En la franja convencional, se encuentran 0,4 ha con infestación media. En total, esta zona de infestación media abarca 0,7 ha.
- **Zona de alta infestación (más de 30 quistes):** Esta zona presenta la mayor concentración de nemátodos, con más de 30 quistes. En la franja de manejo de precisión, se encontraron 0,2 ha con alta infestación. En la franja convencional, no hay áreas con alta infestación. En total, la zona de alta infestación representa solo 0,2 hectáreas de la parcela.

En resumen, **la mayor parte de la parcela se encuentra en condiciones de baja infestación** (4,1 ha). Las áreas con infestación media y alta son menores y están distribuidas de forma desigual entre las franjas de manejo de precisión y convencional, siendo la franja de precisión la única que contiene una pequeña área con alta infestación (0,2 ha).

5.5.1.9.4. Tesis de tratamiento propuestas

Para la **zona de manejo de precisión**, el **tratamiento con nematicida en patata varió según el nivel de infestación de nemátodos en el suelo**.

En zonas donde se identificó una alta infestación, se aplicó una dosis elevada de 20 kg/ha. Esta dosis buscó controlar eficazmente la población de nemátodos y evitar que continuaran dañando las raíces de las plantas.

Para las zonas con infestación media, donde la presencia de nemátodos fue menor, pero aún significativa, la dosis recomendada fue de 12 kg/ha. Esta aplicación más moderada, permitió un control adecuado, sin exceder el umbral necesario para una erradicación completa, optimizando el uso de recursos y reduciendo el impacto ambiental.

En las áreas catalogadas con baja infestación de nemátodos, no fue necesario aplicar ningún tratamiento nematicida. Esta estrategia evita el uso innecesario de productos químicos, lo que contribuye tanto a la sostenibilidad agrícola como a la preservación del medio ambiente.

Por otro lado, el **manejo convencional** en zonas de cultivo sin una estrategia específica de manejo integrado de plagas, recibió una **dosis única de 12 kg/ha**, que se aplicó **en un solo tratamiento**. Esta dosis intermedia está pensada para cubrir una gama de condiciones de infestación moderada, aunque **no tiene la flexibilidad de ajustarse a las necesidades específicas de cada zona** de cultivo. Sin embargo, es una opción práctica para aquellos productores que no cuentan con la capacidad de realizar un análisis detallado de la infestación de nemátodos en sus campos.

5.5.1.9.5. Producto nematicida aplicado

Oxamilo es un nematicida-insecticida de amplio espectro para el control de plagas de importancia económica en diversos cultivos hortícolas. Ha sido utilizado en Europa durante más de 30 años, y su primer registro se obtuvo para el control de nemátodos del suelo en un amplio rango de cultivos. *Oxamilo* está incluido en el grupo 1A, de acuerdo con la clasificación del modo de acción IRAC España (enero de 2012). Pertenece a la familia química de los carbamatos, y actúa por inhibición de la enzima acetilcolinesterasa, responsable de las transmisiones de los impulsos nerviosos. El precio de los productos comerciales con esta materia activa ronda los 18 €/kg.

5.5.1.9.6. Resultados de cosecha de patata obtenidos en función del tratamiento nematicida comparando agricultura tradicional y de precisión

Comparar los resultados de cosecha de patata (variedad *Agria*) obtenidos en las parcelas del manejo convencional frente a los de agricultura de precisión permitió **analizar la efectividad de cada enfoque en términos de rendimiento, costes y sostenibilidad**.

Cosecha de patatas obtenida con manejo de nemátodo convencional

Para obtener datos precisos sobre los rendimientos en el manejo convencional, se han establecido 6 parcelas de 10 m a lo largo de toda la zona de manejo convencional, permitiendo un análisis representativo de la cosecha. En esta zona de la parcela de ensayo, se midió la producción bruta en kilogramos por hectárea (kg/ha) en seis puntos de muestreo diferentes. Los resultados de producción en cada punto se muestran en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Producción bruta (kg/ha) obtenida en la parcela de ensayos de tratamiento convencional del nemátodo de la patata.

	Producción bruta (kg/ha)
CONVENCIONAL P1	46363
CONVENCIONAL P2	45523
CONVENCIONAL P3	44056
CONVENCIONAL P4	45467
CONVENCIONAL P5	44017
CONVENCIONAL P6	44874
Cosecha promedio	45050

Al calcular el promedio de estos seis valores, la producción bruta promedio en la zona de manejo convencional resultó ser de 45.050 kg/ha (**Tabla 6**). Esto refleja una producción relativamente uniforme entre los puntos, con algunas variaciones leves, pero sin grandes fluctuaciones.

El análisis muestra que **la producción en la zona de tratamiento nematicida convencional es bastante estable**, aunque con una ligera tendencia a la baja en ciertos puntos (puntos 3 y 5). Esto podría estar asociado con factores específicos de esas áreas, como diferencias en la densidad de nemátodos, variaciones en el suelo o el microclima, que pueden influir en el rendimiento de los cultivos.

Cosecha de patatas obtenida con manejo de nemátodo con técnicas de precisión

En la zona de agricultura de precisión de la parcela de ensayo, se realizaron muestreos en seis parcelas seleccionadas estratégicamente (**Tabla 7**). Estas parcelas se distribuyeron en función de los niveles de infestación de nemátodos, previamente identificados en el suelo, abarcando zonas de baja, media y alta infestación. Para cada nivel de infestación, se muestrearon dos parcelas, lo que permite un análisis representativo de cómo varía la producción según el grado de presencia de quistes en el área.

Cada una de estas parcelas tiene una longitud de 10 m, lo que proporciona una superficie adecuada para realizar las mediciones de producción y evaluar la efectividad del manejo de precisión en respuesta a las condiciones de infestación. Esta metodología asegura que los datos obtenidos reflejen de manera precisa la variabilidad del rendimiento en función del manejo y de la presencia de nemátodos en diferentes zonas de la parcela.

En la zona de agricultura de precisión, la producción bruta promedio varió ligeramente según los niveles de infestación de nemátodos (**Tabla 7**).

Tabla 7. Producción bruta (kg/ha) obtenida en la parcela de ensayos de tratamiento con técnicas de precisión del nemátodo de la patata.

	Producción bruta (kg/ha)
PRECISION INFESTACIÓN BAJA 1	44325
PRECISION INFESTACIÓN BAJA 2	44775
PRECISION INFEST BAJA PROMEDIO	44550
PRECISION INFESTACIÓN MEDIA 1	44565
PRECISION INFESTACIÓN MEDIA 2	45235
PRECISION INFEST MEDIA PROMEDIO	44900
PRECISION INFESTACIÓN ALTA 1	44560
PRECISION INFESTACIÓN ALTA 2	45140
PRECISION INFEST ALTA PROMEDIO	44850

Como se puede muestra en la **Tabla 7**, en las parcelas de infestación baja, el promedio de producción fue de 44.550 kg/ha. Con respecto a las parcelas de infestación media de nemátodo, el valor medio de producción bruta aumentó a 44.900 kg/ha, y en las parcelas de alta infestación, se alcanzaron los 44.850 kg/ha de producción bruta.

Si **comparamos la producción bruta resultante de la agricultura convencional y la agricultura de precisión**, se observa una **diferencia mínima en los rendimientos obtenidos en cada zona de manejo (Fig.62)**.

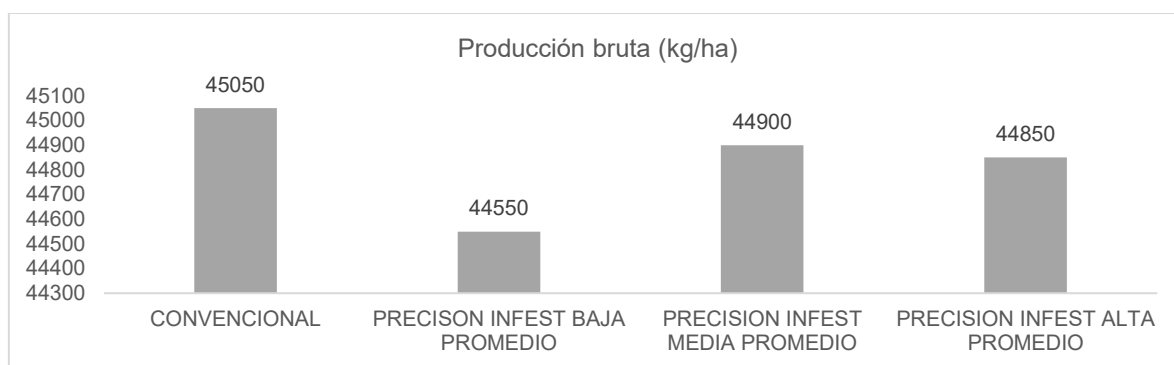


Fig.62. Producción bruta de patata Agria obtenida en función del tratamiento nematicida, comparando agricultura convencional vs. precisión.

Las variaciones entre la producción convencional y las diferentes zonas de precisión son exiguas y no resultan estadísticamente significativas. Aunque las áreas de infestación media y alta en la agricultura de precisión presentan rendimientos ligeramente menores en comparación con el sistema convencional, la diferencia es mínima. Esto sugiere que **el manejo de precisión logra un rendimiento comparable al convencional, incluso en áreas con mayor infestación de nemátodos.**

En conclusión, los resultados indican que, a pesar de las diferencias en los niveles de infestación, el impacto sobre la producción es bajo. Tanto el sistema convencional como el manejo de precisión mantienen producciones estables, con variaciones poco relevantes entre zonas, lo que refuerza la **efectividad de ambos métodos** en la gestión de infestaciones.

5.5.1.9.7. Análisis de los costes precisión vs. convencional.

En el análisis de costes de tratamiento con nematicida en las zonas de manejo convencional y de precisión, se observa una **diferencia significativa en los gastos totales**, destacando la eficiencia de la agricultura de precisión en la reducción de costes.

En la **zona de manejo convencional**, se trató una superficie total de 2,5 ha, solo con la dosis media (12 kg/ha), con un coste de 18 euros por kg de nematicida, el **coste total para esta aplicación fue de 540 euros (Tabla 8).**

Tabla 8. Costes de tratamiento de nematicida en la parcela por zonas.

	Superficie tratada (ha)	Dosis alta (kg/ha)	Dosis media (kg/ha)	Superficie Dosis alta (ha)	Superficie Dosis media (ha)	Coste nematicida (€/kg)	Precio dosis alta tratado (€)	Precio dosis media tratado (€)	Gasto total (€)
Convencional	2,5	20	12	0,0	2,5	18,00	0	540,00	540,00
Precisión	0,5	20	12	0,2	0,3	18,00	72,00	64,80	136,80

En la **zona de agricultura de precisión**, se dividió el tratamiento en diferentes niveles de dosificación según la infestación detectada. Se trataron 0,5 ha en total, de las cuales 0,2 ha recibieron la dosis alta (20 kg/ha) y 0,3 ha la dosis media (12 kg/ha). Esto permitió **optimizar el uso del nematicida solo en las áreas que realmente lo necesitaban**. Teniendo en cuenta que el coste de nematicida por kg es de 18 euros, el gasto fue de 72 euros para la superficie tratada con dosis alta y de 64,80 euros para la tratada con dosis media, dando lugar a un **coste total de 136,8 euros en la zona de precisión (Tabla 8).**

Es decir, el **manejo de precisión** dio lugar a un **ahorro considerable en comparación con el manejo convencional**, reduciendo el gasto total de 540 a 136,8 euros. Este análisis

muestra que la agricultura de precisión permite una aplicación más eficiente y económica del nematocida, adaptando la dosis al nivel de infestación y minimizando los costes de tratamiento. Esta diferencia refleja un ahorro significativo que no solo reduce los costes operativos, sino que mejora la rentabilidad del cultivo al minimizar los insumos.

Las conclusiones extraídas de este estudio de costes, contrastando el manejo del nemátodo de la patata en parcelas de ensayo, resaltan tanto el **ahorro económico** como los **beneficios medioambientales** que proporciona la agricultura de precisión frente al manejo convencional. Al aplicar la dosis necesaria solo en áreas específicas, se evita la contaminación del suelo y el entorno, reduciendo el impacto de los químicos en el ecosistema. La agricultura de precisión, por tanto, contribuye a una práctica agrícola más sostenible y responsable con el medio ambiente.

A pesar de las ventajas del manejo de precisión, el tratamiento convencional podría considerarse adecuado de forma preventiva en casos donde exista el riesgo de un repunte en la población de nemátodos en el futuro. Un tratamiento preventivo en toda la superficie podría ayudar a mantener bajos los niveles de infestación en el largo plazo y evitar problemas graves en próximas campañas.

5.5.1.10. *Riego diferenciado en la parcela de ensayos 2023*

Se colocó un equipo para la programación y gestión del riego a distancia, con la capacidad de realizar completos registros como *data logger* e históricos, de manera que se pueda asegurar la trazabilidad de sectores de riego, contadores y sensores.

A esta automatización, se unió un equipo de sensores colocados a dos profundidades, para poder observar la influencia en las condiciones de inicio y de parada.

5.5.1.10.1. Viabilidad económica de la instalación del sistema de riego

De acuerdo con los equipos y materiales usados en los ensayos, para una superficie de 5 ha de cultivo de patata, la técnica empleada supuso la siguiente inversión:

- a) Un programador para la gestión en parcela, equipado con panel solar 10 W 12 V y regulador solar con batería 7 A 12 V, para la alimentación del programador, con las siguientes prestaciones:

- Programable desde una aplicación móvil y desde la Web
- Comunicación vía radio con módulos externos para la lectura de sensores.
- Lectura instantánea del caudal de los contadores de agua y *data logger* para al registro de las lecturas y tiempos.

Esto supuso un coste de 1.500 €.

b) Electroválvulas tipo *latch* conectadas directamente por cable al programador, para el manejo del riego: 10 unidades (1 por sector de 0,5 ha) + 1 válvula maestra (corte general). El coste estimado de estas electroválvulas fue de 2.035 €.

c) Un contador volumétrico de transmisión magnética y cabezal de registro, con emisor de pulsos, con un valor de 365 €.

d) Equipamiento de sensores de humedad (sensores capacitivos) para la lectura del contenido de agua en suelo. En este caso, se valoraron dos alternativas:

Alternativa 1: 5 unidades de multi-sensores de 80 cm con 4 bi-sensores para a lectura del contido de auga en suelo y temperatura cada 20 cm, modelo *Aquacheck*, con un coste de 4.200 €.

Alternativa 2: 10 unidades de sensores para la lectura del contenido de agua *TEROS 10* para colocar en batería a dos profundidades (20-40 cm), lo que supone una inversión de 2.990 €.

e) 5 módulos externos con comunicación vía radio con el programador, para la lectura de los sensores de humedad del suelo, colocados en el interior de las parcelas, con un valor estimado de 2.500 €.

El total de la inversión del equipo para la programación y gestión del riego a distancia, con la capacidad de realizar registros completos como *data logger* e históricos, de manera que se pueda asegurar la trazabilidad de sectores de riego, contadores y sensores, es de 3.900 € (780 €/ha).

Si a la automatización le añadimos un equipo de sensores colocados a dos profundidades, para poder influenciar en las condiciones de inicio o en las unidades de riego, el investimento total asciende a 5.490 € (1.098 €/ha).

5.5.1.10.2. Consumos de agua

Se llevó un control del consumo de agua mediante un registro de lecturas del contador. Durante el desarrollo de la patata en la parcela en el año 2023, se distinguieron 2 tipos de zonas (zona 1 y zona 2).

Así, en la zona 1, se dieron 7 riegos, lo que supuso un total de 23 horas riego, con un consumo total de 620 m³, lo que equivale a un consumo de 1.150 m³/ha. Por el contrario, en la zona 2, se realizaron 5 riegos, suponiendo un total de 20 horas, con un consumo total de 548 m³ (1370 m³/ha).

5.5.1.10.3. Eficiencia de riego

Para determinar la eficiencia del riego, se emplearon los **sensores capacitativos** (para la lectura del contenido de agua en suelo) y **contadores volumétricos** de transmisión magnética con emisor de pulsos.

Analizados los datos del estado de los sensores a lo largo de la campaña de riego, se han podido calcular los **umbrales del contenido de agua** en el suelo a capacidad de campo, a distintas profundidades (**Tabla 9** y **Fig.63**). La medida de estos sensores está influenciada por la variabilidad del suelo, por lo que resultó difícil establecer valores umbrales para manejar el riego.

Tabla 9. Umbrales del contenido del agua en el suelo (en %) a capacidad de campo y a distintas profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm y 60-80 cm) (ensayo 2023).

	vwc (cc) %			
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm
Zona 1	21,20	25,80	29,10	24,20
Zona 2	10,60	20,00	28,40	29,30

Siendo:

Vwc: Contenido volumétrico de agua

CC: Capacidad de campo

Los **valores de saturación para cada suelo reflejan una textura diferente para cada profundidad (Fig.59)**. Si se descartan los valores obtenidos para el primer estrato (de 0 a 20 cm), que incluyen los 10-15 cm de altura de caballón, la zona 1 presentó valores entre los 25,8 y los 29,1% de contenido volumétrico de agua (VWC) para las profundidades de 20-40 cm y 40-60 cm respectivamente, mientras que, por debajo de estas capas, fue de 24,2%. En la zona 2,

de 20 a 60 cm de profundidad, se encontraron valores entre 20 y 28,4% de contenido de agua, y de 60-80 cm, 29,3%. Según estos valores, el tipo de **textura del suelo es franco arenoso**.



Fig.63. Umbrales del contenido del agua en el suelo (en %) para texturas específicas.

En vista de los resultados obtenidos, se observó que en los **suelos con mayor contenido en materia orgánica** no hubo prácticamente un lavado de agua hacia los horizontes más profundos (60-80 cm), incluso cuando el riego se prolongó hasta cinco horas. En **suelos más ligeros**, este lavado se pudo producir antes de las tres horas de comenzar a regar. Por ello, en los suelos con más materia orgánica, se pudieron efectuar riegos de más de 5 h sin problemas de lixiviados a las capas más profundas, por lo que el intervalo mínimo entre riegos de 6 días resultó suficiente. En suelos más arenosos, este lavado se produce prácticamente a las 2,5 h de comenzar a regar. En consecuencia, atendiendo a la climatología y al estado fenológico del cultivo, el intervalo entre riegos pudo resultar inferior a los 3 días.

El tiempo que tardan en estabilizarse las lecturas de humedad va aumentando según va aumentando la profundidad. De esta manera, a 60 cm, el tiempo de estabilización de la humedad puede ser inferior a 1 hora en los suelos de textura más ligera, en cambio, se pueden alcanzar hasta tres horas en los suelos con más materia orgánica. Por ello, para poder establecer el inicio y paro del riego según las condiciones de humedad del suelo, éste quedará sujeto al control de la humedad de los primeros 40 cm.

El empleo de sensores a más de 60 cm está condicionado por tiempo de respuesta que presentan los suelos a esa profundidad, por lo que no se aconseja su uso para establecer los tiempos de riego. Además, atendiendo que los suelos sean más o menos húmedos, la lectura puede estar influenciada por la presencia de un nivel freático elevado en las primeras fases del

cultivo. Su uso, por tanto, quedó limitado a un detector de humedad que nos permitió calibrar los valores de corte para los sensores colocados en los primeros 40 cm. En las figuras **Fig.64** y **65** se muestran la evolución del contenido del agua en el suelo (en %) y el caudal de riego a las distintas profundidades de suelo, mostrados por el sensor 1 y el 2 respectivamente, en la parcela de ensayo de patata en 2023.

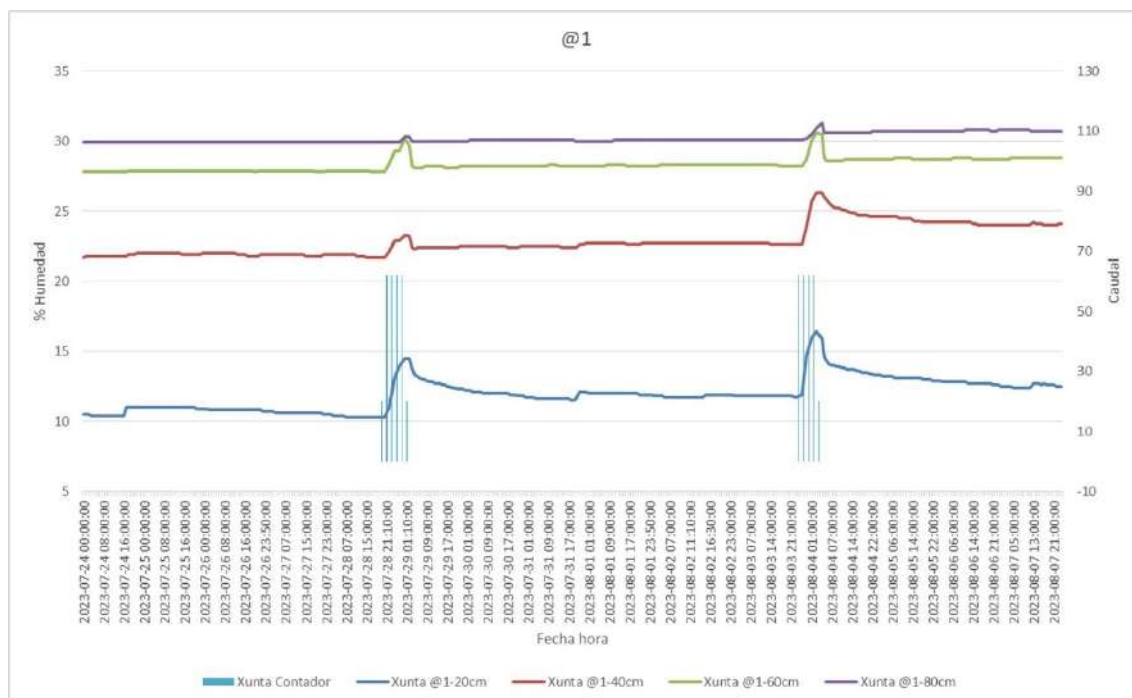


Fig.64. Contenido del agua en el suelo (en %) y caudal de riego a distintas profundidades de suelo, mostrados por el sensor 1, en la parcela de ensayo de patata en 2023.



Fig.65. Contenido del agua en el suelo (en %) y caudal de riego a distintas profundidades de suelo, mostrados por el sensor 2, en la parcela de ensayo de patata en 2023.

5.5.1.11. Producción bruta de patatas variedad Lady Anna en la cosecha de 2023

El análisis de la producción bruta de la variedad de patata *Lady Anna* en A Limia, comparando las parcelas bajo un *manejo de precisión* y las parcelas de control que siguen un *manejo convencional*, muestra diferencias significativas en el rendimiento. A continuación, se presentan los resultados de producción por hectárea para cada zona (**Fig.66**).

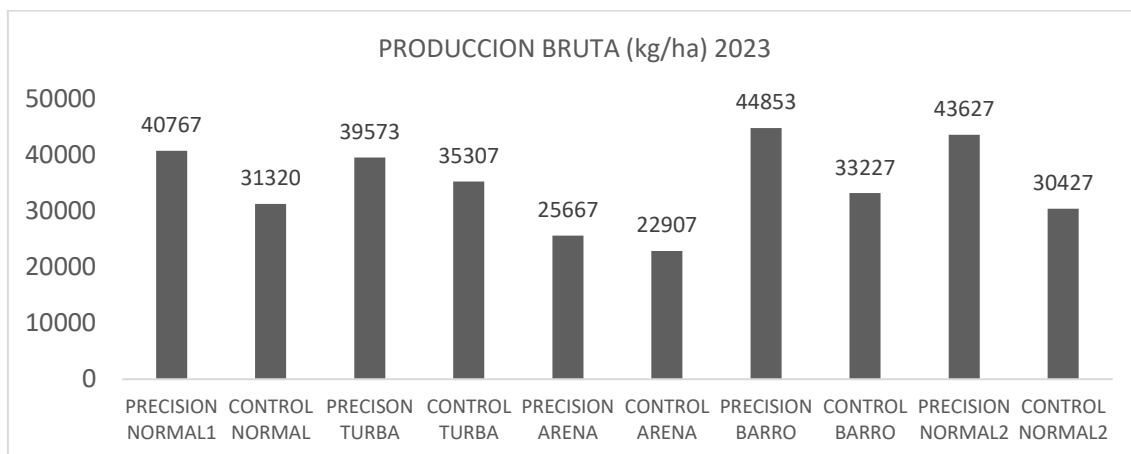


Fig.66. Producción bruta (kg/ha) de patatas en 2023, comparando agricultura de precisión con tradicional (control).

La comparación de los rendimientos entre ambos tipos de agricultura (precisión vs. tradicional) revela que las parcelas tratadas con técnicas de fertilización personalizada superan a las parcelas de control en todas las zonas analizadas.

Así, a la vista de los resultados, se observa que, en las parcelas de *Zona de Precisión Normal 1* y *Zona de Barro* se obtuvieron las diferencias más significativas, con incrementos de 9,447 kg/ha y 11,626 kg/ha, respectivamente (**Fig.66**). Esto sugiere que el **manejo adaptado a las características del suelo en estas áreas optimiza el crecimiento de los tubérculos**, proporcionando un entorno más adecuado para su desarrollo.

La *Zona Normal 2* también muestra un rendimiento notable, con un incremento de 13,200 kg/ha en comparación con el control, lo que refuerza la idea de que el manejo específico para cada tipo de suelo es altamente beneficioso.

En la *Zona de Arena*, aunque el incremento en la producción es el más bajo (2,760 kg/ha), se sigue observando una mejora respecto al manejo convencional, lo que indica que, aunque las condiciones no sean las óptimas, la fertilización personalizada contribuye a mejorar los resultados.

Los resultados de producción bruta evidencian que la **implementación de técnicas de agricultura de precisión**, basadas en análisis de suelo y datos de drones llevados a campo, con máquinas conectadas, capaces de hacer fertilizaciones y trabajos diferenciados, **tiene un impacto positivo significativo en el rendimiento de la patata Lady Anna**. Este enfoque no solo optimiza el uso de insumos, sino que también mejora la eficiencia en la producción, contribuyendo a un mayor rendimiento y potencialmente a una rentabilidad económica más alta para los agricultores.

La diferencia encontrada en los rendimientos entre las parcelas de precisión y las de agricultura convencional (control) corrobora la importancia de aplicar prácticas de agricultura de precisión que consideren las particularidades de cada zona, lo que permite maximizar la producción y, en última instancia, apoyar un manejo agrícola más sostenible y rentable.

5.5.1.12. Producción comercial y porcentaje de destrío en la cosecha de 2023

Con respecto a la producción comercial obtenida para la variedad de patata *Lady Anna* en el ensayo de 2023, y comparando la fertilización personalizada a través de agricultura de precisión con el manejo convencional (control), ésta mostró diferencias notables en los rendimientos por hectárea (**Fig.67**).

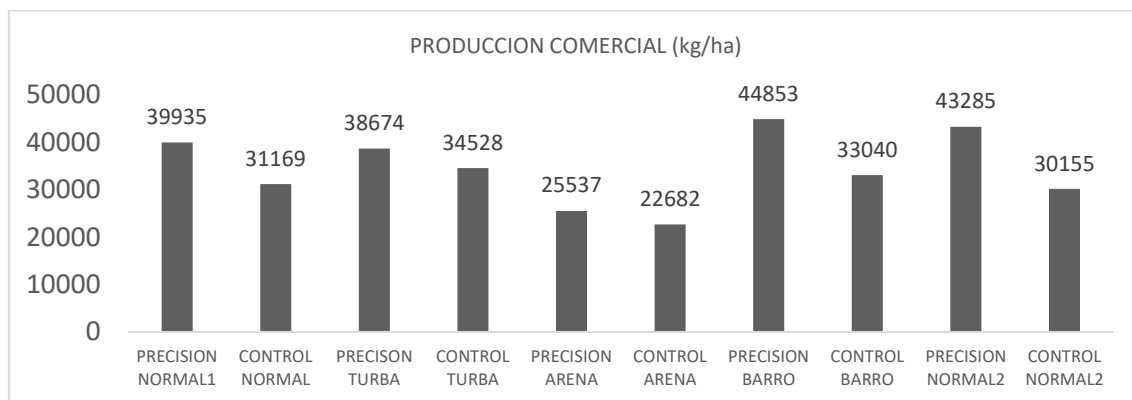


Fig.67. Producción comercial (kg/ha) de patatas variedad *Lady Anna* en 2023, comparando agricultura de precisión con tradicional (control).

Analizando por áreas, la producción comercial media en la *Zona de Precisión Normal 1* fue de 39.935 kg/ha, mientras que en la parcela control fue de 31.169 kg/ha, resultando en una diferencia de 8.766 kg/ha a favor de la fertilización personalizada. Esto refleja un **aumento significativo en la productividad gracias al manejo de precisión**, adaptando la fertilización a las características específicas del suelo.

En la *Zona de Precisión Turba*, la producción alcanzó 38.674 kg/ha, superando la producción del *Control Zona Turba*, que fue de 34.528 kg/ha. La diferencia de 4.146 kg/ha indica que **la fertilización ajustada según la textura y las características de este suelo**, con su alta capacidad de retención de agua, **mejora notablemente los rendimientos**.

La *Zona de Precisión Arena* dio lugar a una producción comercial de 25.537 kg/ha, en comparación con 22.682 kg/ha en la *Zona Control Arena*, lo que significa un incremento de 2.855 kg/ha. Aunque la Zona de Arena es más desafiante, debido a la baja capacidad de retención de nutrientes, la fertilización precisa aún demuestra ser beneficiosa, mejorando ligeramente los rendimientos.

En la *Zona de Precisión Barro*, la producción media fue de 44.853 kg/ha, un aumento considerable en comparación con los 33.040 kg/ha del control. La diferencia de 11.813 kg/ha muestra que **el abonado de precisión es eficaz** en este tipo de suelo, probablemente debido a la mejor distribución de nutrientes y gestión del riego.

Finalmente, en la *Zona de Precisión Normal 2*, la producción comercial fue de 43.285 kg/ha, en comparación con 30.155 kg/ha obtenidos para el control en esa zona. Esto representa una de las mayores diferencias, con 13.130 kg/ha más en la zona de precisión, lo que indica una **clara ventaja de la fertilización ajustada a las características específicas del suelo**.

Los resultados del ensayo muestran que la **fertilización de precisión basada en los análisis de suelo y mapeo mediante drones mejora significativamente la producción comercial en todas las zonas evaluadas en comparación con el manejo convencional de control**. Las diferencias más notables se observan en las *Zonas Barro* y *Normal 2*, donde los incrementos superan los 11.000 kg/ha y 13.000 kg/ha respectivamente. Incluso en las zonas más difíciles, como la de arena, el manejo con agricultura de precisión aporta mejoras notables. Estos datos sugieren que **la agricultura de precisión no solo maximiza el rendimiento, sino que optimiza el uso de insumos**, lo que puede traducirse en un mayor retorno económico y sostenibilidad para los productores.

Con respecto al análisis del **destrío en la producción** de la variedad de patata *Lady Anna* en el ensayo de 2023, y comparando las parcelas gestionadas con agricultura de precisión y las de control con manejo convencional, revela variaciones significativas en la calidad de la cosecha. El **destrío** se refiere a la **proporción de patatas que no cumplen con los estándares de calidad comercial**, ya sea por tamaño, deformidades o daños. En la **Fig.68** se reflejan los resultados obtenidos en este ensayo.

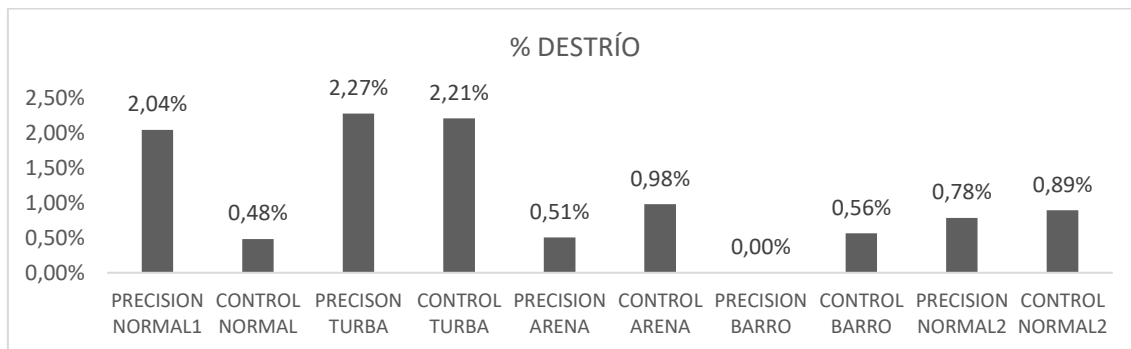


Fig.68. Porcentaje de destrío de patatas variedad *Lady Anna* en 2023, comparando agricultura de precisión con tradicional (control).

Si observamos los datos extraídos por zonas, en la de *Precisión Normal 1*, el porcentaje de destrío promedio fue de 2,04%, comparado con el 0,48% de la *Zona Control*. Aunque el destrío fue mayor en la parcela de precisión, la producción total también resultó superior (39.935 kg/ha frente a 31.169 kg/ha). Esto indica que, aunque se produjo un mayor volumen de patatas no aptas para el mercado, el rendimiento neto sigue siendo favorable con la fertilización de precisión.

El porcentaje medio de destrío en la *Zona de Precisión Turba* fue ligeramente mayor (2,27%) en comparación con el control (2,21%). La diferencia es mínima, lo que sugiere que en esta zona la **fertilización personalizada no afectó** sustancialmente la proporción de patatas de menor calidad, pero sí mejoró la producción total.

En la *Zona de Precisión Arena*, el porcentaje de destrío fue de 0,51%, mientras que en el control fue más elevado (0,98%). Este resultado indica que **la fertilización de precisión en suelos arenosos** no solo mejora la producción total (25.537 kg/ha frente a 22.682 kg/ha), sino que también **reduce el porcentaje de patatas defectuosas**. Esto puede deberse a una mejor gestión de nutrientes y agua en este tipo de suelos más pobres.

La *Zona de Precisión Barro* fue la única que no presentó destrío (0,00%), lo que indica que todas las patatas cosechadas cumplieron con los estándares comerciales. En comparación con la zona control, se obtuvo un destrío promedio de 0,56%. Esto, junto con la diferencia de producción (44.853 kg/ha frente a 33.040 kg/ha), resalta **el impacto positivo de la fertilización de precisión en la calidad y cantidad de las patatas en suelos arcillosos**.

El porcentaje de destrío observado en la *Zona de Precisión Normal 2* fue de 0,78%, mientras que en el control fue de 0,89%. Aunque la diferencia no es grande, se observa un ligero incremento de este porcentaje en la parcela de precisión, tanto en calidad como en cantidad de producción (43.285 kg/ha frente a 30.155 kg/ha).

5.5.1.13. Porcentaje de materia seca y relación tubérculos por kilogramo en las patatas cosechadas en 2023

El análisis del porcentaje de materia seca en la producción de patata de la variedad *Lady Anna* durante el ensayo de 2023, comparando la agricultura de precisión con el manejo tradicional (control), ofrece una visión importante sobre la calidad del producto (**Fig.69**).

El **porcentaje de materia seca** es un **indicador clave de la textura y calidad de las patatas**, afectando tanto su uso en la industria alimentaria (como fritura o procesamiento) como su vida útil en almacenamiento.

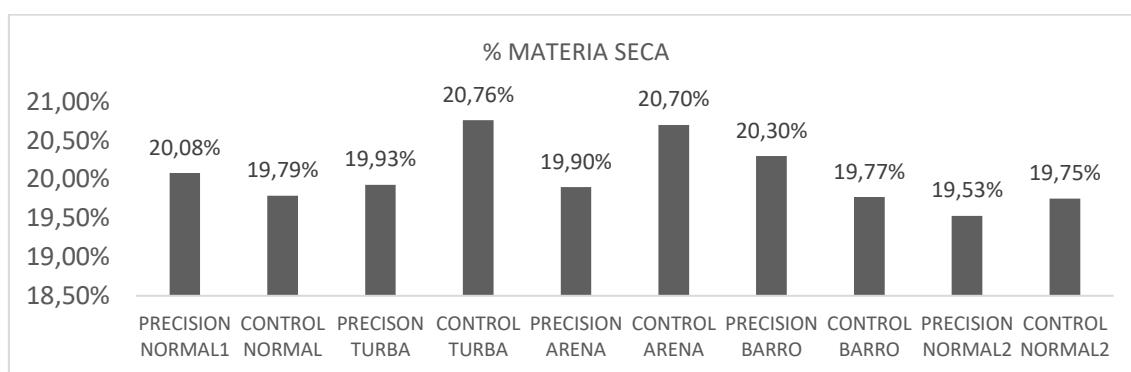


Fig.69. Porcentaje de materia seca en las patatas variedad *Lady Anna* cosechadas en 2023, comparando agricultura de precisión con tradicional (control).

Según los datos obtenidos para la *Zona de Precisión Normal 1*, el valor medio de materia seca obtenida en las patatas de la parcela fue del 20,08%, ligeramente superior al 19,79% de los tubérculos de la parcela control en la misma zona. Este incremento indica que la **fertilización de precisión ha logrado mejorar la concentración de materia seca en las patatas**, lo cual es beneficioso para la calidad general del tubérculo. Un mayor contenido en materia seca está asociado a mejores características para el procesamiento, como en la producción de patatas fritas.

En la *Zona de Precisión Turba*, el porcentaje promedio de materia seca obtenido en las patatas cosechadas fue del 19,93%, mientras que en la zona control, el valor medio resultó ligeramente superior (20,76%). Aunque los niveles de materia seca fueron ligeramente menores en la parcela de precisión, esta diferencia pudo deberse a la alta retención de agua de este suelo de turba. Aun así, el contenido de materia seca en ambas zonas es adecuado para una buena calidad de las patatas.

Si observamos los datos de la *Zona de Precisión Arena*, el porcentaje de materia seca fue de 19,90%, comparado con el 20,70% resultante en las patatas cosechadas de la parcela control. Al igual que en la zona de turba, la materia seca es ligeramente inferior en la parcela de precisión, probablemente debido a una mejor retención de agua gracias a la fertilización personalizada. No obstante, esta pequeña diferencia no debería afectar significativamente la calidad del producto.

Respecto a la *Zona de Precisión Barro*, la materia seca alcanzó un porcentaje de 20,30%, superando al 19,77% obtenido en los tubérculos cosechados en la zona control. Este incremento en el porcentaje de materia seca de las patatas recogidas en la parcela de precisión, sugiere que el manejo de fertilización específica para este tipo de suelo favoreció un mejor desarrollo del tubérculo. Este mayor contenido en materia seca puede mejorar tanto la calidad como la capacidad de almacenamiento de las patatas.

Por último, en la *Zona de Precisión Normal 2*, el porcentaje en materia seca en las patatas fue de 19,53%, comparado con el 19,75% de las recogidas en la parcela de la zona control. La diferencia es mínima, sin embargo, ambas parcelas muestran valores aceptables para garantizar la calidad de las patatas.

El análisis del porcentaje de materia seca revela que, en general, **las parcelas de precisión mantienen niveles de materia seca similares o superiores a las de control**. En algunas zonas, como la *Normal 1* y *Barro*, la fertilización de precisión logró mejorar ligeramente la concentración de materia seca, lo que puede tener un impacto positivo en la calidad del producto final. Por otro lado, la materia seca obtenida en las patatas sembradas en las *Zonas de Turba* y *Arena*, fue ligeramente inferior en las parcelas de precisión, probablemente debido a una mejor gestión del riego y una mayor retención de agua. Sin embargo, estas diferencias no son lo suficientemente grandes como para comprometer la calidad comercial de las patatas. En general, los resultados indican que **la agricultura de precisión no solo mejora el rendimiento y la calidad del cultivo, sino que también permite mantener niveles adecuados de materia seca**, esenciales para la calidad del tubérculo en la industria y su almacenamiento.

Por otro lado, el indicador **tubérculos por kilogramo** (tubérculos/kg) estima el número de tubérculos que se encuentran en un kilogramo de cosecha, lo que **refleja el tamaño promedio de los tubérculos (Fig.70)**. Un número más alto sugiere que los tubérculos son más pequeños, mientras que un número más reducido indica tubérculos más grandes. Este parámetro es crucial para evaluar la calidad de la producción, ya que, dependiendo del uso final, los mercados pueden preferir tubérculos de mayor o menor tamaño.

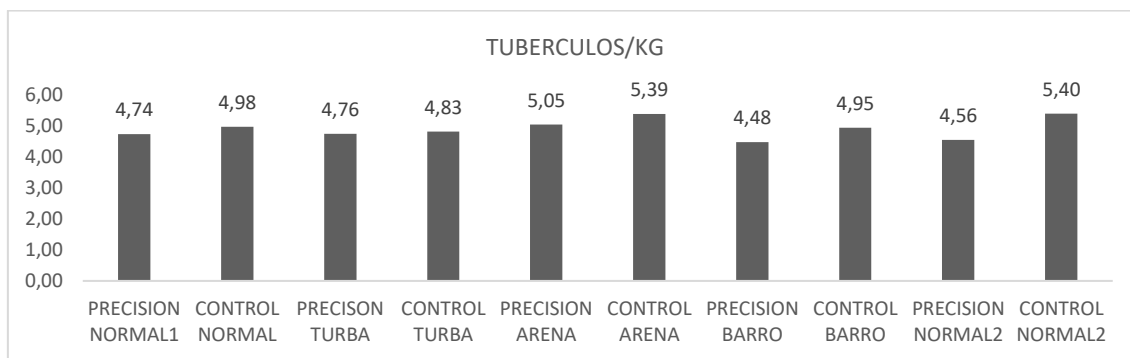


Fig.70. Relación de tubérculos recogidos por kg de cosecha en 2023, comparando agricultura de precisión con tradicional (control).

Observando los valores obtenidos en la *Zona de Precisión Normal 1*, vemos que se obtuvieron 4,74 tubérculos/kg (valor promedio), mientras que en el control de la misma zona se registraron 4,98 tubérculos recogidos por kg de cosecha. Esto sugiere que la **fertilización de precisión produjo tubérculos ligeramente más grandes** en comparación con el control, probablemente debido a una mejor gestión de nutrientes, que permitió un desarrollo más uniforme de los tubérculos.

Con respecto a la *Zona de Precisión Turba*, el resultado fue de 4,76 tubérculos/kg, en comparación con los 4,83 tubérculos/kg de la parcela control en la misma zona. La diferencia es mínima, lo que indica que, en suelos de turba, la **fertilización de precisión y la tradicional producen tamaños de tubérculos muy similares**, aunque ligeramente más grandes en la parcela de precisión.

En la *Zona de Precisión Arena*, se obtuvieron 5,05 tubérculos/kg, frente a los 5,39 tubérculos/kg recogidos en la zona control. Por tanto, en esta área se observaron **tubérculos más pequeños en ambas parcelas**, pero la fertilización de precisión logró reducir ligeramente el número de tubérculos por kilogramo, lo que implica un incremento en el tamaño de los tubérculos en comparación con el control. Dado que los suelos arenosos suelen ser menos fértiles y retienen menos agua, esta mejora en el tamaño puede deberse a una mejor distribución de los insumos en la parcela de precisión.

En la *Zona de Precisión Barro*, se alcanzaron 4,48 tubérculos/kg, mientras que en la parcela de la zona control se calcularon 4,95 tubérculos recogidos por kg de cosecha. Esta es una de las mayores diferencias observadas, lo que indica que la **fertilización de precisión produjo tubérculos significativamente más grandes en suelos arcillosos**. Esto podría deberse a una mejor gestión de la estructura del suelo y una optimización de la disponibilidad de nutrientes, factores clave en suelos con alta capacidad de retención de agua y nutrientes.

Finalmente, en la *Zona de Precisión Normal 2*, se obtuvieron 4,56 tubérculos por kg cosechados, mientras que en la parcela control, gestionada de forma tradicional, se encontraron 5,40 tubérculos recolectados/kg. Esta es la diferencia más significativa, con tubérculos notablemente más grandes en la parcela de precisión, lo que sugiere que **la fertilización diferenciada tuvo un impacto considerable en esta zona**. Un menor número de tubérculos por kilogramo es indicativo de un mejor desarrollo de los tubérculos individuales.

Por tanto, a modo de resumen, podemos decir que el análisis de los tubérculos por kilogramo revela que la **fertilización de precisión tiende a producir tubérculos más grandes en todas las zonas evaluadas**, en comparación con el manejo convencional de las parcelas control. Esto es especialmente notable en las *Zonas de Barro* y *Normal 2*, donde la diferencia entre la fertilización de precisión y el control es más pronunciada. En las zonas más difíciles, como la de *Arena*, aunque los tubérculos son más pequeños en general, la fertilización personalizada todavía contribuyó a mejorar ligeramente el tamaño en comparación con el control. Esto nos indica que, incluso en suelos menos fértiles, la optimización de los nutrientes puede generar mejores resultados en términos de tamaño de tubérculo.

En conclusión, el uso de técnicas de **agricultura de precisión no solo optimiza el rendimiento total del cultivo, sino que también mejora la calidad del tubérculo al producir patatas de mayor tamaño**, lo cual es un indicador positivo tanto para el mercado como para la eficiencia del cultivo.

5.5.1.14. Optimización de insumos en el cultivo de patata 2023

5.5.1.14.1. Ahorro de fertilizante

La optimización de insumos es uno de los beneficios más significativos de la agricultura de precisión en comparación con la fertilización convencional de forma uniforme. En el ensayo realizado en 2023 con la variedad de patata *Lady Anna* en A Limia, la implementación de fertilización personalizada permitió un **ahorro notable en el uso de fertilizantes**, lo que supone una reducción significativa tanto en costos como en el impacto ambiental.

Gracias a los vuelos con dron y el análisis de suelo detallado, se generaron **mapas de prescripción específicos para cada zona de la parcela**, permitiendo **ajustar la dosis de fertilizante según las características** de textura, fertilidad y necesidades nutricionales de cada área. Esto contrasta con la fertilización convencional, donde se aplica la misma cantidad de insumos en toda la parcela, sin considerar las variaciones del suelo. En zonas como *Arena*, donde la capacidad de retención de nutrientes es baja, la dosis de fertilizante se vio reducida

considerablemente. Al aplicar únicamente lo necesario para optimizar la producción, se evitaron excesos, generando un ahorro sustancial. En zonas más fértiles como *Barro* y *Turba*, la fertilización se ajustó para evitar la saturación de nutrientes, logrando un uso más eficiente y reduciendo el riesgo de lixiviación.

Este enfoque de fertilización diferenciada permitió un **ahorro del 23% en fertilizantes respecto a la zona manejada en convencional**, lo que se traduce en una reducción de costos significativos para los agricultores. Además, al aplicar únicamente lo necesario en cada zona, se mejora la sostenibilidad del cultivo, minimizando el impacto ambiental asociado con el exceso de fertilización, como la contaminación de suelos y cuerpos de agua.

5.5.1.14.2. Ahorro en fitosanitarios

La optimización de insumos en la aplicación de fitosanitarios fue fundamental en el ensayo de 2023, especialmente en un año marcado por severos ataques de mildiu. A través de la implementación de tecnologías de agricultura de precisión, se logró **un ahorro del 15% en el uso de fitosanitarios**, gracias a una gestión más eficiente y específica.

La estación de humedad en hoja desempeñó un papel crucial en la detección temprana de condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades. Mediante el monitoreo constante de la humedad foliar, se establecieron alertas que permitieron al equipo agrícola aplicar fitosanitarios solo en los momentos y lugares necesarios. Esta metodología evitó aplicaciones innecesarias, reduciendo la presión de los tratamientos químicos en el cultivo.

Comparado con el control convencional, donde se aplicaron fitosanitarios de manera rutinaria, la estrategia de precisión resultó en una menor incidencia de enfermedades y un uso más responsable de insumos. Las parcelas que se gestionaron con alertas de humedad presentaron una mejor salud general, permitiendo que las plantas mantuvieran su vigor a pesar de los desafíos climáticos del año.

El enfoque proactivo y adaptado permitió no solo un ahorro significativo en el uso de fitosanitarios, sino que también contribuyó a una agricultura más sostenible. Esta experiencia resalta la importancia de utilizar tecnologías de monitoreo para optimizar la gestión de plagas y enfermedades en cultivos vulnerables, garantizando un equilibrio entre productividad y sostenibilidad. En conclusión, la fertilización de precisión no solo optimiza el rendimiento del cultivo, sino que también reduce los costos de producción, promoviendo una agricultura más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

5.5.2. Cultivo de trigo 2023

En este proyecto, se analizaron las mejoras obtenidas al integrar la agricultura de precisión en la producción de trigo. Se abordaron las tecnologías clave, como el mapeo de suelos, así como sus impactos en el aumento de rendimientos, la reducción de costos y la mitigación de impactos ambientales. Este enfoque buscó no solo maximizar la rentabilidad del cultivo de trigo, sino también garantizar la sostenibilidad a largo plazo de los sistemas agrícolas.

5.5.2.1. Zona de ensayo del cultivo de trigo en 2023

La parcela seleccionada para el ensayo de agricultura de precisión de trigo se encuentra en el municipio de Xunqueira de Ambía, en la provincia de Ourense. Está registrada en el SIGPAC con el polígono 501, parcela 261, y cuenta con la referencia catastral 32037A501002610000DL. La ubicación geográfica exacta se establece mediante coordenadas UTM: X 605427.25 y Y 4667043.70, dentro del huso 29 del DATUM WGS84. Esta localización precisa permite integrar herramientas tecnológicas, como sistemas de información geográfica (SIG) para un monitoreo detallado del terreno (**Fig.71**).



Fig.71. Parcela de ensayos de trigo en 2023 y 2024 (foto tomada en julio de 2023).

La parcela tiene una superficie total de 9,3377 hectáreas y está clasificada como tierra arable, adecuadas para cultivos agrícolas intensivos. Presenta una pendiente del 0,50% (valor promedio), lo que facilita el uso de maquinaria agrícola y tecnologías avanzadas. Además, su altitud de 618 m sobre el nivel del mar, asegura condiciones climáticas apropiadas para el desarrollo del trigo. Cabe destacar que esta parcela ha sido utilizada como tierra de cultivo de regadío al menos en uno de los últimos tres años, lo que evidencia su capacidad para implementar sistemas de riego avanzados como parte de las técnicas de agricultura de precisión.

Los datos catastrales y cartográficos fueron actualizados recientemente, con la última foto aérea tomada en julio de 2023 y la cartografía catastral revisada en abril del mismo año. La parcela se mapeó con una escala de 1:3500, lo que permite identificar con precisión las características espaciales del terreno, fundamentales para diseñar un plan de manejo diferenciado y maximizar la eficiencia de los insumos.

Estas características convierten a la parcela en un lugar idóneo para la aplicación de tecnologías de agricultura de precisión. Esto incluye el uso de sensores, drones y sistemas de fertilización variable para optimizar el rendimiento del trigo, reducir los costos de producción y minimizar los impactos ambientales. La topografía y las condiciones del suelo son particularmente favorables para implementar estrategias innovadoras, evaluando su impacto en la productividad y sostenibilidad del cultivo.

5.5.2.2. Zonificación de la parcela de ensayos en 2023 en función de vuelos de dron y cámaras RGB

La zonificación de la parcela utilizando drones equipados con cámaras *RGB* permitió una evaluación detallada de las características de la misma (**Fig.72 a 75**). Este proceso fue importante para optimizar la gestión agrícola, ya que proporcionó la información precisa sobre las variaciones del suelo y facilitó la toma de decisiones adaptadas a cada zona de la parcela.

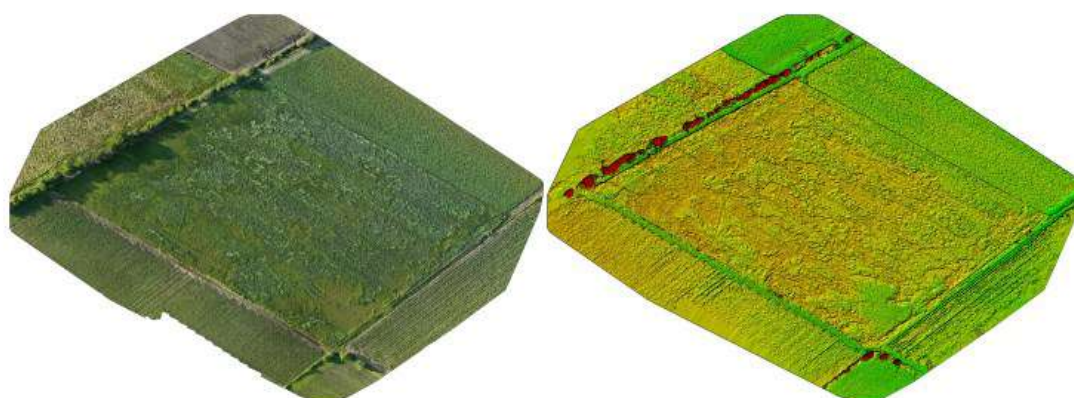


Fig.72. Parcela de ensayos de trigo en 2023 y 2024. Imagen tomada con dron equipado con cámara RGB. Ortomosaico y el correspondiente Modelo Digital de Superficie Dispersa (DSM) antes de la densificación. Imagen procesada el 08/03/2023.

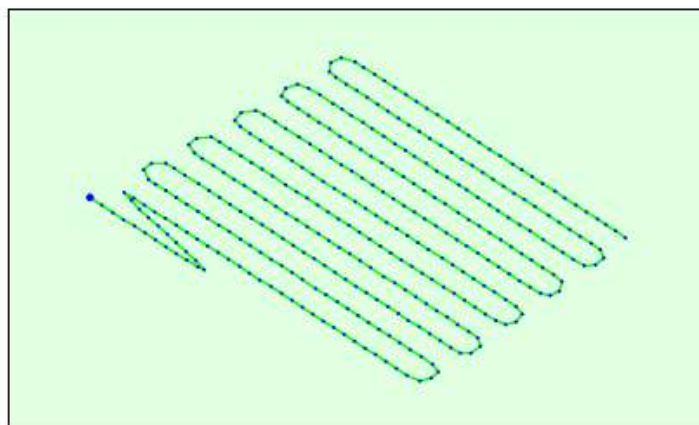


Fig.73. Parcela de ensayos de trigo en 2023. Vista superior de la posición inicial de la imagen. La línea verde sigue la posición de las imágenes en el tiempo a partir del punto azul. Imagen procesada el 08/03/2023.

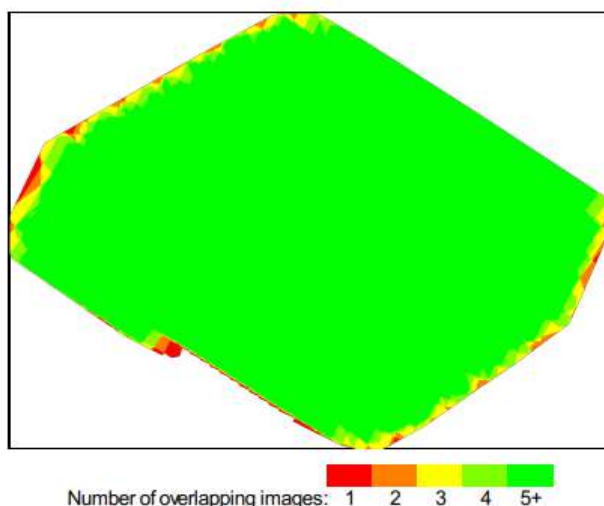


Fig.74. Parcela de ensayos de trigo en 2023. Número de imágenes superpuestas calculadas para cada píxel del ortomosaico. Las áreas rojas y amarillas indican una superposición baja, para la que se pueden generar resultados deficientes. Las áreas verdes indican una superposición de más de 5 imágenes por cada píxel. Imagen procesada el 08/03/2023.

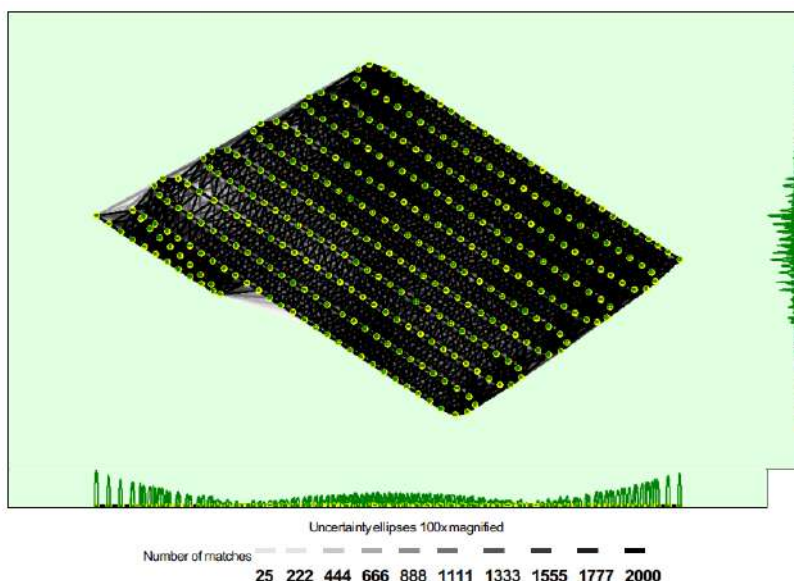
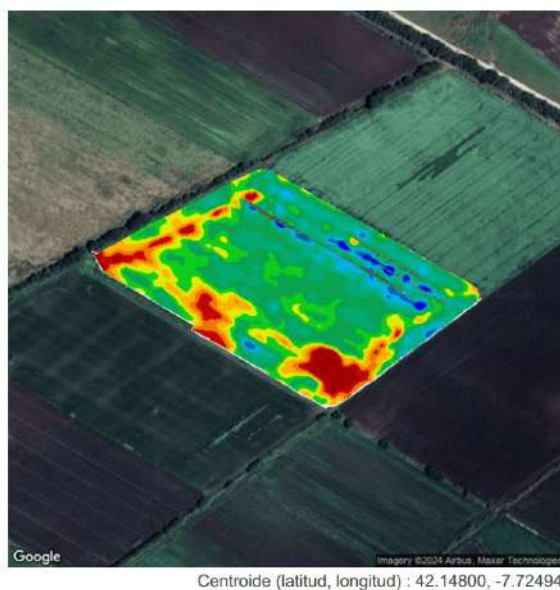


Fig.75. Parcela de ensayos de trigo en 2023. Posiciones de imagen calculadas con enlaces entre imágenes coincidentes. La oscuridad de los enlaces indica el número de puntos clave 2D coincidentes entre las imágenes. Los enlaces más claros indican enlaces débiles. Las elipses de color verde oscuro indican la incertidumbre relativa de la posición de la cámara. Imagen procesada el 08/03/2023.

5.5.2.3. Ensayo de producción de trigo en 2023

En 2023, se obtuvieron datos de producción por zonas, facilitados por la cosechadora, para implementar un **manejo diferenciado** el en año siguiente (2024) en la mitad de la parcela, dejando una parte fertilizada de manera uniforme como referencia. El objetivo fue **comparar el impacto de la fertilización sectorizada sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso de insumos**.

La **Fig.76** que se presenta a continuación, muestra el plano de producción de la parcela de trigo *Caaveiro* en A Limia, con los rendimientos registrados en cada área de la parcela. En este plano, se reflejan las distintas zonas, con variaciones en el rendimiento del cultivo, basadas en los datos obtenidos durante la cosecha.



Leyenda

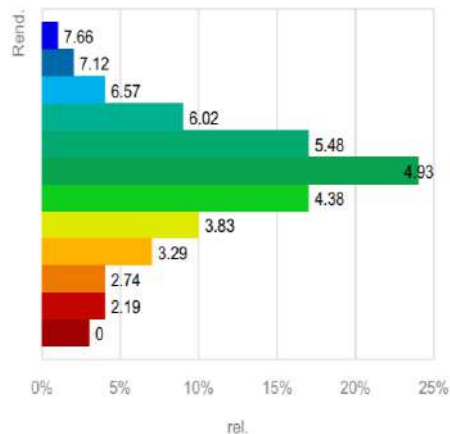


Fig.76. Parcela de ensayos de trigo en 2023. Rendimientos obtenidos.

El cuadro de la derecha refleja los rendimientos obtenidos en la cosecha de trigo *Caaveiro* en 2023, diferenciados por zonas de la parcela. Las zonas rojas, que representan áreas de menor productividad, registraron un rendimiento de 2.750 kg/ha. En cambio, las zonas azules, indicativas de áreas con mayor productividad, lograron un rendimiento de 4.512 kg/ha. El promedio total de la parcela fue de 3.637 kg/ha, lo que refleja un rendimiento intermedio entre las zonas más productivas y las de menor rendimiento. La mitad de la parcela restante dio un rendimiento de 3.687 kg/ha.

5.5.2.4. Siembra, seguimiento del cultivo de trigo y cosecha 2023. Evaluación de resultados en el ensayo

La fecha de siembra del cereal (marzo en nuestro caso) se determinó según las condiciones climatológicas de la zona, y la dosis de semilla se ajustó en función de la capacidad productiva del suelo y las necesidades específicas del cultivo (**Fig.77**).

Avelino Santana García se ocupó de realizar las labores agrícolas en las parcelas (arado, fertilización...), así como del seguimiento de los cultivos (siembra, aplicación de agroquímicos, eliminación de malas hierbas...).



Fig.77. Siembra de trigo en la parcela de ensayos (2023).

5.6. Ensayos en 2024: Patata y trigo

5.6.1. Cultivo de patata 2024

5.6.1.1. Zona de ensayo del cultivo de patata en 2024

En 2024, se decidió realizar el ensayo en una nueva ubicación, diferente a la parcela utilizada en 2023, con el fin de corroborar y validar los datos obtenidos el año anterior. Entre las parcelas dedicadas al cultivo de patata durante esta anualidad, y en colaboración con el agricultor *Avelino Santana García*, se seleccionó una parcela que presenta condiciones similares en cuanto a clima y tipo de suelo, pero con ligeras variaciones que permitirán un análisis comparativo más completo.

Este cambio de ubicación tiene como objetivo **verificar la consistencia de los resultados**, tanto en producción como en calidad y ahorro de insumos, aplicando agricultura de precisión y métodos convencionales, en la variedad de patata *Lady Anna*.

La parcela seleccionada se denomina *Fernando*. El análisis de la parcela para el ensayo de patata en 2024 se basa en la información catastral y agronómica recogida en el documento *SigPac*. Se localiza en la provincia de Ourense, municipio de Sandiás, con las siguientes coordenadas UTM: X 607722.22 y Y 4664584.50, en el datum WGS84, fuso 29. La cartografía se actualizó el 25 de julio de 2022, mientras que la foto aérea fue tomada en julio de 2023 (Fig.78).

La parcela se clasifica en el polígono 177, parcela 214, con un uso predominante de tierras arables (TA), que ocupa una superficie de 10,7543 hectáreas, a una altitud de 616 metros y con una pendiente del 1%. También incluye una pequeña área de matorral (MT), con 0,5110 hectáreas y una pendiente del 8,4%.

Dado el historial de la parcela, que indica explotación de regadío en alguno de los últimos tres años, es idónea para un ensayo de patata, ya que presenta una superficie cultivable considerable, un terreno principalmente plano y apto para regadío. No hay incidencias que limiten su uso como tierras arables, lo que facilitó la planificación de los ensayos.



Fig.78. Parcela de ensayos de patata en 2024.

5.6.1.2. Zonificación de la parcela de ensayos de patata en 2024 en función de vuelos de dron y cámaras RGB

En 2024, al igual que en el año anterior, se llevó a cabo una **zonificación de la parcela**, utilizando los datos obtenidos mediante un vuelo con dron equipado con cámara RGB, realizado cuando la tierra aún estaba desnuda (**Fig.79**). El análisis de estas imágenes permitió identificar y delimitar cuatro zonas diferenciadas dentro de la parcela, basadas en las características del suelo y su potencial productivo.

En 2023, las **zonas de la parcela fueron denominadas según la textura del suelo**. En 2024, el proceso se refinó, resultando en la **identificación de cuatro zonas**, esta vez **basadas en análisis** de suelo más detallados. Estos análisis corroboraron las diferencias observadas previamente, aportando datos precisos sobre la **composición y características del terreno**.

La parcela se dividió en cuatro zonas, partiendo de la cabecera norte hacia el sur, según las siguientes denominaciones y medidas:

- **PRECISION50**: desde 0 hasta 70 metros.
- **PRECISION70**: desde 70 hasta 124 metros.
- **PRECISION130**: desde 124 hasta 165 metros.
- **PRECISION170**: desde 165 metros hasta el fondo, en el sur de la parcela.

En paralelo hacia el lado este de la parcela, se establecieron **cuatro áreas de control o blancos** para comparar con las zonas fertilizadas, según las lecturas del dron. Estas áreas fueron fertilizadas de manera uniforme, siguiendo un **manejo convencional**, sin diferenciar entre zonas como en el sistema de agricultura de precisión.

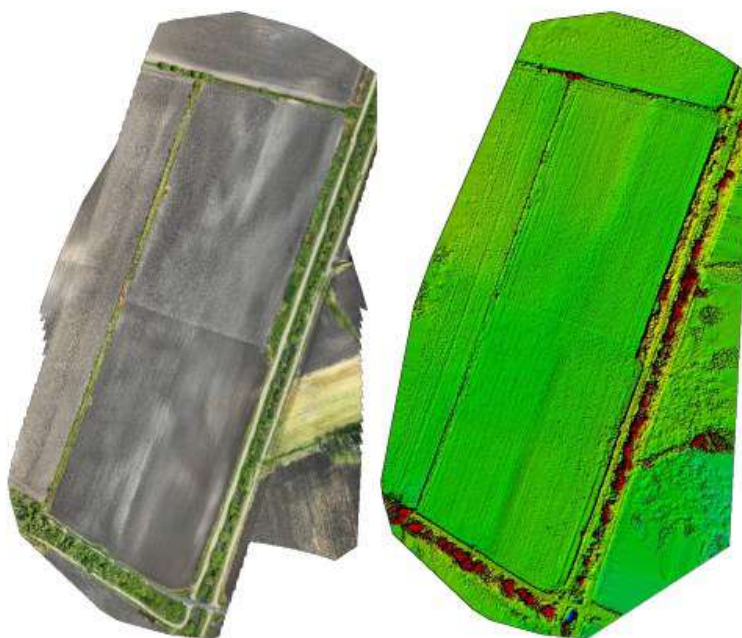


Fig.79. Parcela de ensayos de patata en 2024. Imagen tomada con dron equipado con cámara **RGB**. Ortomosaico y el correspondiente Modelo Digital de Superficie Dispersa (DSM) antes de la densificación. Imagen procesada el 01/05/2024.

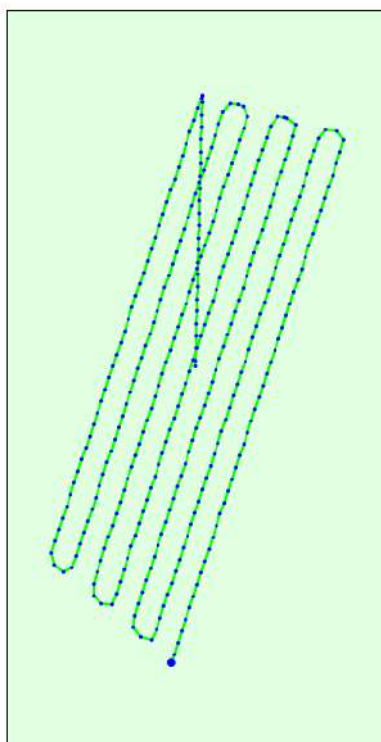


Fig.80. Parcela de ensayos de patata en 2024. Vista superior de la posición inicial de la imagen. La línea verde sigue la posición de las imágenes en el tiempo a partir del punto azul. Imagen procesada el 01/05/2024.

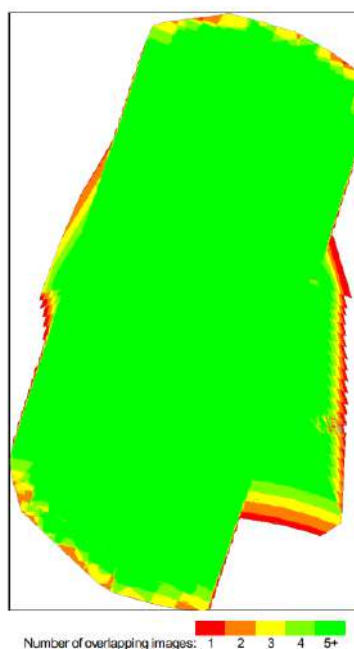


Fig.81. Parcela de ensayos de patata en 2024. Número de imágenes superpuestas calculadas para cada píxel del ortomosaico. Las áreas rojas y amarillas indican una superposición baja, para la que se pueden generar resultados deficientes. Las áreas verdes indican una superposición de más de 5 imágenes por cada píxel. Imagen procesada el 01/05/2024.

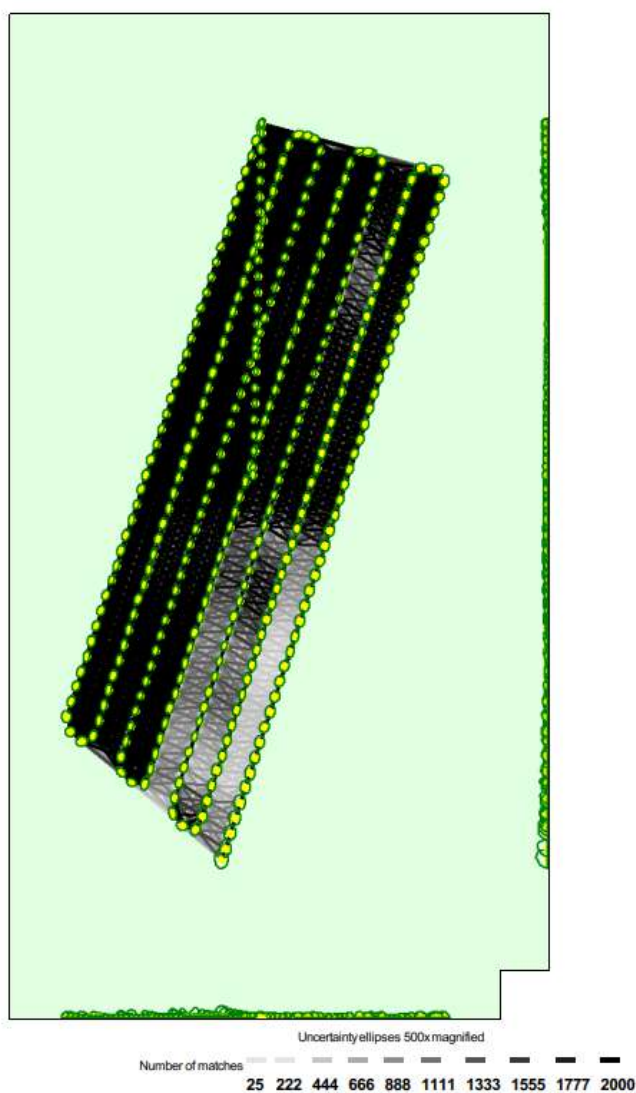


Fig.82. Parcela de ensayos de patata en 2024. Posiciones de imagen calculadas con enlaces entre imágenes coincidentes. La oscuridad de los enlaces indica el número de puntos clave 2D coincidentes entre las imágenes. Los enlaces más claros indican enlaces débiles. Las elipses de color verde oscuro indican la incertidumbre relativa de la posición de la cámara. Imagen procesada el 01/05/2024.

5.6.1.3. Precipitación acumulada y temperatura durante el ensayo de patata en 2024

Los meses que comprendieron el ciclo de cultivo de la patata, durante el año 2024, presentaron condiciones climáticas favorables, pero la disminución significativa de la precipitación en agosto presentó un reto en la gestión del agua. Por ello, fue crucial implementar un sistema de riego eficiente y realizar un seguimiento continuo de las condiciones climáticas, para optimizar el rendimiento del cultivo (**Fig.83**).

Así, el mes de junio presentó una buena cantidad de precipitación, lo que sugiere que las condiciones iniciales para el desarrollo del cultivo fueron favorables. La temperatura fue moderada, ideal para el crecimiento de las patatas. En el mes siguiente, la reducción de la precipitación, en comparación con junio, requirió un ajuste en el riego, especialmente con el aumento de temperatura. Sin embargo, la temperatura fue adecuada para el desarrollo.

El mes de agosto mostró una drástica disminución de la precipitación, lo que podría generar estrés hídrico si no se gestiona adecuadamente el riego. Las temperaturas fueron elevadas, pudiendo impactar negativamente en el desarrollo del cultivo, si la humedad del suelo no resultó suficiente.

Para finalizar, en el mes de septiembre, aunque las precipitaciones fueron reducidas, la temperatura también disminuyó, lo que pudo ayudar a mitigar el estrés por calor de agosto. Sin embargo, se requirió un monitoreo minucioso del riego para asegurar que el cultivo se mantuviera saludable hasta la cosecha.

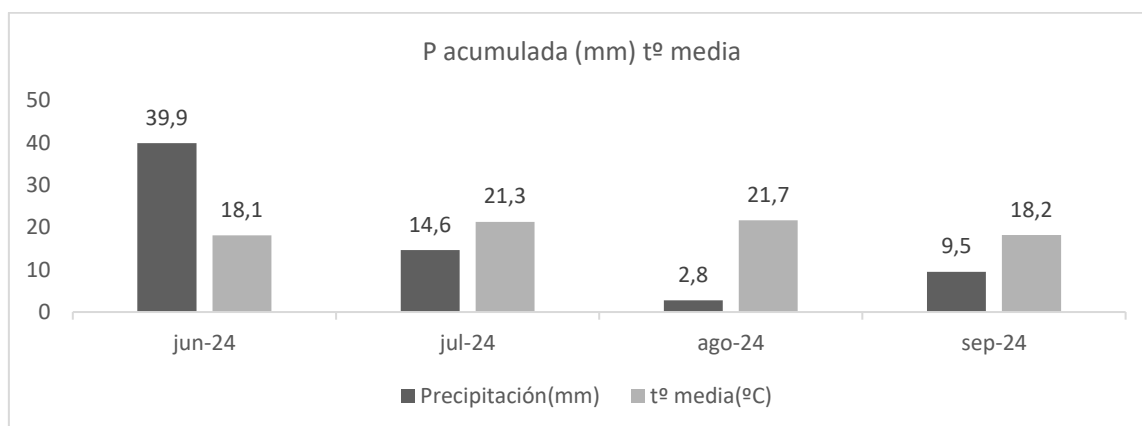


Fig.83. Precipitación acumulada y temperatura media durante el ciclo de la patata (junio-septiembre) en 2024.

5.6.1.4. Reparto de horas de desarrollo de la patata 2024

La actividad del cultivo de patata varió significativamente según las temperaturas ambientales, lo que impactó directamente en su desarrollo y producción. En condiciones de frío extremo, es decir, cuando las temperaturas descienden por debajo de 5°C, la actividad del cultivo se vuelve nula, lo que detiene cualquier proceso de crecimiento y desarrollo. En este contexto, la planta no puede realizar la fotosíntesis, ni absorber nutrientes adecuadamente, lo que impide su desarrollo. Cuando las temperaturas oscilan entre 5°C y 12°C, la actividad vegetativa se vuelve mínima. Aunque la planta aún puede sobrevivir, su crecimiento se ralentiza, y la producción de tubérculos se ve comprometida.

El rango ideal para el crecimiento óptimo del tubérculo se sitúa entre 12°C y 25°C, donde la patata muestra su máximo potencial de desarrollo. En este intervalo, las condiciones son favorables para la fotosíntesis, lo que resulta en un crecimiento robusto y una buena producción de tubérculos. Sin embargo, cuando las temperaturas superan los 28°C, la actividad se reduce, ya que el estrés térmico puede llevar a una disminución en la producción y afectar la calidad del cultivo. Por lo tanto, es crucial monitorear y gestionar adecuadamente las condiciones climáticas para optimizar el rendimiento del cultivo de patata (**Tabla 10**).

Tabla 10. Reparto de horas en porcentaje, en función de la temperatura, de la actividad de la planta de patata de junio a septiembre de 2024.

Actividad nula	Menos de 5°C	1,94%
Actividad vegetativa mínima por bajas temperatura	De 5°C a 12°C	18,89%
Crecimiento óptimo del tubérculo	De 12°C a 25°C	61,64%
Crecimiento de la parte aérea	De 25°C a 28°C	7,52%
Sin actividad por altas temperaturas	Más de 28°C	10,01%

- *Actividad nula por temperaturas extremas (menos de 5°C):*

El porcentaje de 1,94% fue muy bajo, lo que indica que en muy pocas ocasiones las temperaturas fueron tan frías como para detener completamente la actividad del cultivo. Esto sugiere que el cultivo no experimentó periodos prolongados de frío extremo.

- *Actividad vegetativa mínima por bajas temperaturas (de 5°C a 12°C):*

Las temperaturas en este rango pueden afectar negativamente al desarrollo vegetativo de las plantas, y en este año, supuso casi el 19% del tiempo en este período. Esto indica que hubo una cantidad significativa de horas durante las cuáles las temperaturas no fueron ideales para el crecimiento activo.

- *Crecimiento óptimo del tubérculo (de 12°C a 25°C):*

Este es el rango de temperatura más favorable para el cultivo de patata, y más del 61% del tiempo se encontró dentro de este intervalo. Esto fue fundamental para el desarrollo de los tubérculos, sugiriendo que las condiciones climáticas en este periodo son muy propicias para maximizar la producción.

- *Crecimiento de la parte aérea (de 25°C a 28°C):*

Aunque las temperaturas en este rango son algo elevadas, el cultivo puede continuar desarrollándose, aunque no de manera óptima. El porcentaje 7,52% nos indica que solamente durante un tiempo limitado se encontró el desarrollo del cultivo en este rango de temperatura.

- *Sin actividad por altas temperaturas (más de 28°C):*

En condiciones de calor extremo, el crecimiento de la patata se ve afectado. Esto puede resultar en estrés hídrico y disminuir el rendimiento de los tubérculos si las temperaturas se mantienen elevadas por períodos prolongados. En nuestro caso, supuso un porcentaje de horas del 10%.

A modo de resumen, con los datos del cultivo de patata en 2024, observamos que experimentó un predominio de condiciones óptimas para el crecimiento de tubérculos durante la mayor parte del tiempo. Sin embargo, los períodos con temperaturas extremas (bajas y altas) pudieron limitar el desarrollo adecuado del cultivo. Por ello, la gestión del riego y la aplicación de prácticas agrícolas adecuadas se centraron en mitigar el impacto de las temperaturas extremas, maximizando así el rendimiento y la calidad de la producción.

5.6.1.5. Análisis previos de las parcelas de patata en 2024: caracterización del suelo

Al igual que en 2023, antes de la siembra, se realizaron muestreos de suelo en puntos georreferenciados, con el fin de obtener una representación precisa de las características del terreno. Los puntos de muestreo se seleccionaron en base a la variabilidad espacial del terreno y cubrieron toda la parcela experimental. De nuevo, se analizaron los siguientes parámetros: pH, materia orgánica, nutrientes esenciales (N, P, K, Ca, Mg, Na) (**Tabla 11**) y presencia de nemátodos (identificación y cuantificación de quistes/huevos).

Para implementar una fertilización efectiva en el cultivo de patata, se ha llevado a cabo un análisis de suelo en cuatro zonas específicas de la parcela, así como un análisis general que integra todos los datos obtenidos.

A continuación, se presenta una descripción de cada una de las zonas:

- **Zona hasta 70 m:** Esta zona presenta características de suelo que favorecen la retención de humedad y nutrientes. Se recomendó una fertilización equilibrada, priorizando nitrógeno y fósforo, para potenciar el desarrollo inicial del cultivo.

- **De 70 a 124 m:** Los análisis observados en esta zona, indican una ligera acidez del suelo. Se sugirió la aplicación de fertilizantes nitrogenados y potásicos, para equilibrar el pH y mejorar la disponibilidad de nutrientes.
- **De 124 a 165 m:** Esta zona mostró un buen contenido de materia orgánica, lo que favoreció la actividad microbiana. Se procuró mantener una fertilización regular con énfasis en el potasio, para apoyar el desarrollo de los tubérculos.
- **De 165 hasta el fondo:** En esta zona, los análisis realizados reflejaron un suelo más compacto, lo que pudo afectar el crecimiento de las raíces. Se aconsejó la incorporación de materia orgánica y una fertilización ajustada en función de las necesidades específicas del cultivo.

El **análisis general** indicó que, en promedio, las zonas presentan una variabilidad en nutrientes y textura. Por lo tanto, se propuso un **plan de fertilización sectorizado**, en función de las características particulares de cada zona. Esto garantizó que cada área recibiera los nutrientes necesarios, para maximizar el rendimiento del cultivo y minimizar el uso excesivo de insumos.

Tabla 11. Caracterización química de la capa arable de parcela de ensayos (20 cm) en las distintas zonas evaluadas para el cultivo de patatas (ensayo 2024).

ZONAS	pH	M.O.	P	Ca	K	Mg	Na	Ca/Mg	K/Mg	Ca:Mg:K
hasta 70 m	5,20	5,33	104,42	718,99	219,08	94,55	61,89	4,61	0,72	73:16:11
de 70 a 124 m	5,03	2,99	85,81	672,59	164,34	69,68	68,73	5,85	0,73	77:13:10
de 124 a 165 m	5,32	4,62	92,62	703,38	201,84	72,34	104,84	5,90	0,87	76:13:11
de 165 hasta fondo	5,33	7,05	146,62	915,23	192,44	90,90	48,73	6,11	0,66	79:13:8
GENERAL (control)	5,43	5,39	84,45	670,78	213,52	71,64	47,16	5,68	0,93	75:13:12

Donde:

pH en agua (1:2,5)

M.O.: Materia orgánica (%)

Fósforo asimilable (Olsen) (mg/kg)

Ca, K, Mg y Na en mg/kg

Se observa que, en todos los casos, se trata de suelo ácidos, con un **pH en agua** entre 5,03 (*Zona hasta 70 m*) y 5,43 (*Zona Control*). Estos niveles se encuentran ligeramente por debajo del rango óptimo (5,5-6,5) especificado para producción de patata por Alonso Arce (1996), pero dentro del rango adecuado (4,5-7,0) señalado por Porta *et al.* (1994). En cambio, Lema (1996) propone como adecuado para el cultivo de la patata el intervalo de 5,2-5,6. Debemos señalar que estos valores son muy similares a los encontrados en parcelas cercanas a la zona, tradicionalmente dedicadas al cultivo de la patata (López-Mateo, 2007).

Respecto a la **materia orgánica** del suelo, se obtuvo un porcentaje variable en función del área considerada, oscilando entre 2,99% (*Zona de 70 a 140 m*) y 7,05% (*Zona de 165 m hasta el fondo de la parcela*). Es habitual que, en el cultivo de patata, se encuentren frecuentemente niveles reducidos de materia orgánica en el suelo (Edwards *et al.*, 2000; Grandy *et al.*, 2002; Carter *et al.*, 2004; Stark y Porter, 2005), aunque ésta es fundamental para el mantenimiento de su estructura, favoreciendo la retención de agua en épocas de sequía y el drenaje. Además, contribuye de forma decisiva a la capacidad de intercambio catiónico. Por tanto, es un factor esencial en la conservación del suelo, ya que influye en sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

El **fósforo asimilable** o disponible se determinó siguiendo el *método Olsen* (Olsen y Sommers, 1982), que es el empleado habitualmente en los laboratorios que realizan análisis de suelos en Galicia (López-Mateo, 2007). Las concentraciones de fósforo disponible encontradas inicialmente en las distintas zonas de la parcela son elevadas (84,45-146,62 mg/kg), y semejantes a los valores encontrados en otros estudios en la zona de A Limia. Así, López-Mateos (2007) obtuvo valores de fósforo asimilable cercanos a 75 mg/kg para suelos antes de iniciar la siembra de patata. En los suelos que presentan más de 25 mg/kg de fósforo, se considera que tienen reservas y sólo se han de efectuar aportes para compensar las extracciones del cultivo o como abonado de arranque (Lema, 1996).

Los **cationes intercambiables** (Ca, Mg, Na y K) se determinaron por el método de Peech *et al.* (1947). Se obtuvieron valores de **Ca intercambiable** que fueron de 670,78 mg/kg (3,36 cmol_e/kg) para la *Zona de Control*, hasta 915,23 mg/kg (4,58 cmol_e/kg) en la *Zona de 165 m hasta el fondo de la parcela*. En general, se considera que un suelo es deficiente en este elemento si posee menos de 1,5 cmol_e/kg o si la relación Ca/Mg es inferior a 0,5 (Buol *et al.*, 1975). Por tanto, nuestro suelo tendría un contenido adecuado de este elemento disponible para las plantas.

En relación al **Mg intercambiable**, se encontraron valores comprendidos entre 69,68 y 94,55 mg/kg (0,58 y 0,79 cmol_e/kg respectivamente), lo cual sería ligeramente inferior a lo recomendado para el cultivo de patata en todas las zonas de la parcela evaluadas, ya que se aconseja que se superen 0,8 cmol_e/kg (Lema, 1996). Por ello, sería necesario compensar esta carencia con fertilización.

Con respecto al **K intercambiable**, la patata es un cultivo que presenta elevadas absorciones de este elemento, por esto, aunque niveles de 0,2 cmol_e/kg se consideran limitantes para los cultivos en general, debido a las exigencias de la patata, el límite se eleva hasta 0,26 cmol_e/kg (Lema, 1996). En nuestro caso, valores encontrados en las distintas zonas, entre 164,34 mg/kg (0,42 cmol_e/kg) y 219,08 mg/kg (0,54 cmol_e/kg) estarían dentro del rango recomendado.

5.6.1.6. Fertilización diferenciada de la parcela de patata en función del análisis obtenido

Al igual que en el año anterior, en el ensayo de 2024, cada zona de la parcela fue abonada siguiendo el mapeo generado por el dron y los análisis de suelo realizados con anterioridad (**fertilización sectorizada**). Esto nos permitió aplicar insumos en función de las necesidades detectadas en cada parte de la parcela, optimizando la producción del cultivo de patata. Las áreas fertilizadas con el sistema de agricultura de precisión recibieron los niveles ajustados de fertilizantes, agua y otros insumos, en función de las características particulares del suelo y la vegetación.

Del mismo modo, se dejó una franja, desde la cabecera hasta el fondo de la parcela, en la que se aplicó un manejo convencional. Esta franja actuó como **parcela control**, permitiendo evaluar el impacto de la fertilización diferenciada en comparación con un enfoque más uniforme. Los resultados de esta comparación fueron esenciales para **determinar la efectividad de la agricultura de precisión frente a las prácticas agrícolas tradicionales**.

Así, el objetivo de esta fertilización sectorizada fue **optimizar la producción y mejorar la calidad del cultivo**, garantizando que cada zona recibiera la atención adecuada según su composición y características del suelo. Además, este enfoque buscó reducir el uso excesivo de insumos, minimizando costes y el impacto ambiental asociado.

La fertilización fue sectorizada utilizando maquinaria abonadora con tolvas múltiples y control automatizado mediante sensores conectados a un GPS. Cada fertilizante fue aplicado de manera precisa según las necesidades nutricionales de cada subparcela, tomando en cuenta los resultados del análisis de suelo. La maquinaria distribuyó varios tipos de fertilizantes de forma simultánea, regulando la dosis para cada sector de acuerdo con un plan de abonado previamente programado. Los fertilizantes aplicados fueron Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), y otros micronutrientes según fue necesario. El método de aplicación fue mediante fertilización localizada con variación en la dosis según los resultados edáficos.

La implementación de la fertilización basada en datos de drones y análisis de suelo no solo mejora la eficiencia en el uso de insumos, sino que también tiene el potencial de aumentar significativamente el rendimiento del cultivo. La comparación con parcelas control establece un marco sólido para evaluar el impacto de esta técnica innovadora, abriendo la puerta a prácticas agrícolas más sostenibles y rentables. La combinación de tecnología y análisis de datos en la agricultura de precisión es un paso importante hacia el futuro de la agricultura.

El proceso fue el siguiente:

1. Mapeo mediante vuelos de dron

Los vuelos con dron nos proporcionaron un mapeo detallado de la parcela, identificando variaciones en la textura del suelo, fertilidad y el estado de las plantas. Las imágenes obtenidas, permiten clasificar la parcela en diferentes zonas, como arena, turba, y otros tipos de suelo. Esta clasificación es fundamental, ya que cada tipo de suelo tiene diferentes necesidades nutricionales y retenciones de agua, lo que impacta directamente en el crecimiento de las plantas.

2. Análisis de suelo

Los análisis de suelo complementaron la información obtenida de los drones, proporcionando datos precisos sobre la composición química del suelo, incluyendo niveles de materia orgánica, fósforo, pH y minerales como calcio, potasio y magnesio. Esta información permitió establecer un perfil nutricional específico para cada zona mapeada, lo que facilitó la identificación de carencias y excesos de nutrientes.

3. Fertilización personalizada

Con los datos de mapeo y análisis de suelo, se pudieron diseñar **planes de fertilización personalizados**. Como ya hemos descrito, utilizando un tractor dotado con *tecnología ISOBUS*, se pudo aplicar fertilizante de manera precisa y diferenciada en cada zona, según sus requerimientos específicos. Con esto, a cada sección de la parcela se le aportó la cantidad adecuada de nutrientes, optimizando el uso de insumos y reduciendo el riesgo de exceso de fertilización, que podría dañar al suelo y las plantas.

4. Comparación con fertilización tradicional

Este enfoque se comparó con la fertilización que se aplicó a toda la parcela de manera uniforme. En este último método, no se consideró la variabilidad del suelo, lo que puede resultar en una distribución ineficiente de nutrientes. Para evaluar la efectividad de la fertilización personalizada, se establecieron *parcelas control* que recibieron un manejo convencional. Esto nos permitió realizar comparaciones claras en términos de rendimiento, calidad de las cosechas y uso de recursos.

La estrategia de abonado para el cultivo de patata se ha implementado de manera diferenciada según los tramos de agricultura de precisión y de forma general para los lotes manejados convencionalmente (control). En los cultivos bajo el enfoque de precisión, se ha

aplicado un fertilizante con la formulación 13-10-20, con dosis que varían según la zona y las necesidades específicas del cultivo (**Tabla 12**).

Tabla 12. Fertilización diferenciada en la parcela del ensayo de cultivo de patatas en 2024.

ZONA	Dosis fertilizante 13-10-20 (kg/ha)	Dosis potasa (kg/ha)
<i>PRECISION50</i>	1300	600
<i>PRECISION70</i>	1000	500
<i>PRECISION130</i>	1300	300
<i>PRECISION170</i>	1200	400
GENERAL (CONTROL o BLANCO)	1300	400

La zona *PRECISION50* ha recibido 1300 kg/ha de fertilizante y 600 kg/ha de potasa, lo que refleja una alta demanda nutricional para optimizar el rendimiento. En *PRECISION70*, se ha aplicado un total de 1000 kg/ha de fertilizante y 500 kg/ha de potasa, que es ligeramente inferior al anterior, indicando una estrategia ajustada a las características del suelo y la planta. En el caso de *PRECISION130*, se mantuvo la dosis de 1300 kg/ha de fertilizante, pero se redujo la potasa a 300 kg/ha. Finalmente, la zona *PRECISION170* ha recibido 1200 kg/ha de fertilizante y 400 kg/ha de potasa (**Tabla 12**).

Para la zona *GENERAL CONTROL*, que son los lotes manejados de **forma convencional**, se estableció una dosis uniforme de 1300 kg/ha de fertilizante y 400 kg/ha de potasa. Esta estrategia buscó simplificar la fertilización en estos lotes, donde no se utilizan prácticas de precisión. Así, el abonado diferenciado en los cultivos de agricultura de precisión buscó optimizar el uso de insumos y responder a las necesidades específicas de cada zona, a diferencia de la aplicación generalizada en los lotes convencionales.

5.6.1.7. Siembra, seguimiento del cultivo de patata y cosecha 2024. Evaluación de resultados en el ensayo de patata 2024

La fecha de siembra se determinó según las condiciones climatológicas de la zona y la dosis de semilla se ajustó en función de la capacidad productiva del suelo y las necesidades específicas de la variedad *Lady Anna*. Al igual que en el ensayo llevado a cabo en el año anterior, se utilizó una sembradora de precisión equipada con GPS y sistemas de control automatizado de dosis y profundidad de siembra. Los parámetros de siembra (densidad, dosis de semilla y profundidad) fueron ajustados en función de los datos de fertilidad del suelo, textura y riesgos potenciales (como la pérdida de plántulas en emergencia) obtenidos del análisis de suelo. El diseño experimental incluyó diferentes sectores dentro de la parcela con variación en las condiciones edáficas.

Posteriormente, al finalizar el ciclo de cultivo de la patata, se realizó una cosecha sectorizada, mediante una cosechadora equipada con sensores de rendimiento conectados a un sistema GPS (**Fig.84**), lo que permitió elaborar un mapa de rendimiento para cada subparcela.



Fig.84. Recogida de las patatas en 2024.

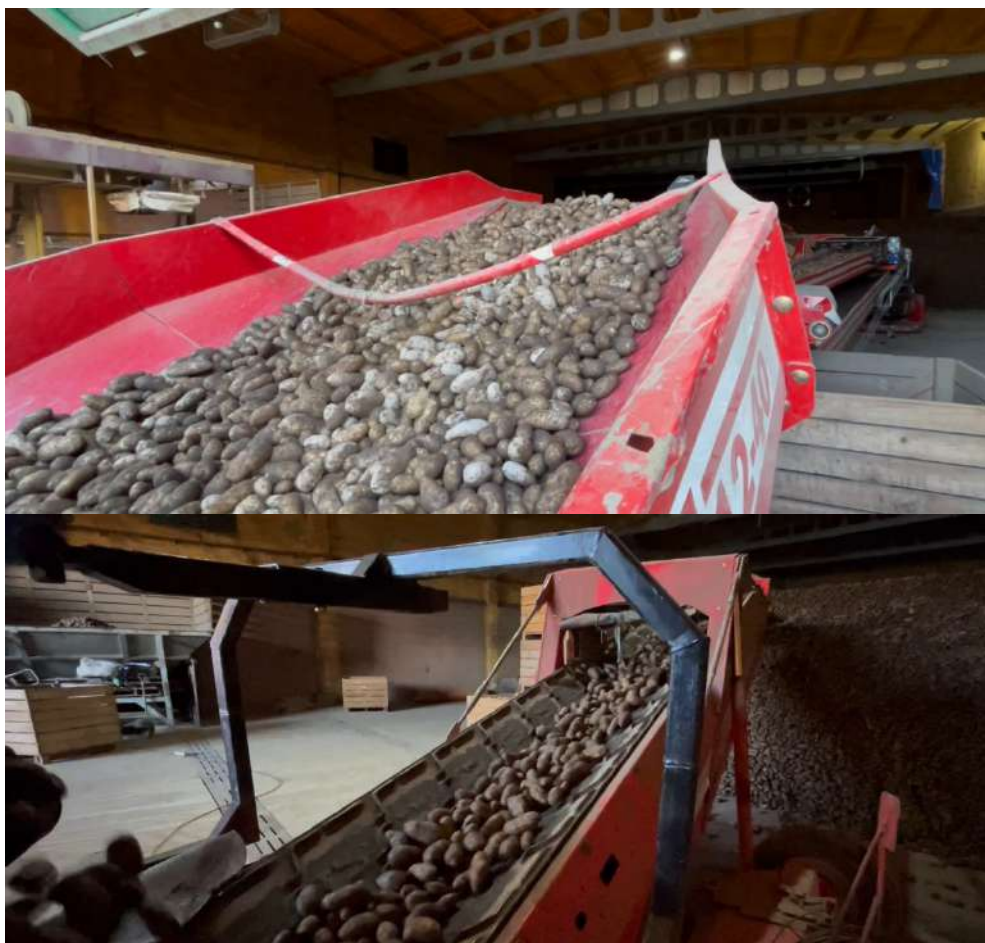


Fig.85. Transporte de las patatas al almacén.

A continuación, se llevaron al almacén (**Fig.85**), y se procedió al análisis cuantitativo y cualitativo de la cosecha de patatas en cada uno de los sectores manejados con agricultura de precisión y comparándolos con los tratados de forma tradicional. Asimismo, se estimó el ahorro de insumos, calculando el ahorro en fertilizantes, fitosanitarios, etc.

Para ello, se analizan varios parámetros clave para **comparar la efectividad de la agricultura de precisión frente al manejo convencional**:

- **Producción bruta:** es un indicador clave de la **cantidad total generada** por cada sistema de manejo.
- **Producción comercial:** fracción de la producción que es apta para la comercialización, excluyendo los tubérculos defectuosos. El rendimiento comercial es crucial para **determinar la viabilidad económica** de cada método (precisión vs. tradicional).

- **Porcentaje de destrío:** porcentaje de tubérculos descartados por defectos (tamaño, forma o daños). La agricultura de precisión, al aplicar insumos de manera localizada y optimizada, busca reducir el destrío.
- **Porcentaje de materia seca:** refleja la calidad de los tubérculos. Se compararon los valores de materia, ya que un mayor porcentaje de ésta es deseable para ciertos usos industriales.

5.6.1.8. Instalación y registro de datos obtenidos mediante el sistema de monitoreo

La instalación de los equipos de monitoreo realizó, al igual que en el año anterior, en la parcela antes descrita para 2024, a la cual fue necesario trasladar el equipo y material necesario. Como se ha descrito anteriormente, el proceso constó de la instalación del sistema de sensores subterráneos y de transmisores.

Los sensores colocados en el suelo fueron diseñados para monitorear condiciones en la plantación de patatas. La ubicación de los mismos fue planificada con anterioridad, para asegurar una cobertura adecuada de toda la extensión de la parcela de ensayo. Se colocaron a una profundidad de 30 cm, para evitar interferencias superficiales y asegurar que los datos registrados (humedad, temperatura y conductividad) sean lo más representativos posible. Este sistema permitió un monitoreo continuo de las condiciones en el suelo, ayudando a optimizar el cultivo de las patatas y permitiendo la recolección de datos de alta precisión.

Una vez instalados los sensores, se procedió a montar una estructura en la superficie sobre cada uno de ellos. Esta estructura tiene el objetivo de señalar la posición de los sensores en la parcela, conectar los sensores a los transmisores y asegurar que los datos recopilados puedan transmitirse correctamente.

Los transmisores se configuraron para enviar los datos en tiempo real, permitiendo así que se mantenga un registro constante y preciso de las condiciones del suelo. Cada sensor estaba conectado a un transmisor, asegurando así la comunicación fluida y sin interrupciones entre los sensores del suelo y el sistema de registro digital. La correcta instalación de esta estructura fue fundamental para evitar errores en la transmisión de datos y optimizar la gestión de la información recopilada.

Esta infraestructura permitió un control preciso y constante de las condiciones ambientales en la plantación, facilitando la toma de decisiones para el cuidado y desarrollo del cultivo.

5.6.1.9. Riego diferenciado en la parcela de ensayos 2024 y comparativa con 2023

5.6.1.9.1. Consumos de agua

Se llevó a cabo un seguimiento y control del consumo de agua mediante el registro de lecturas del contador. En este caso, se diferenciaron de nuevo 2 zonas, en función del tipo de suelo (zona 3 y zona 4). De esta forma, se obtuvo, durante la campaña de riego del cultivo de patata:

- Suelo 3: Se dieron 6 riegos, alcanzando un total de 20 horas riego, con un consumo total de 536 m³, lo que equivale a 1340 m³/ha.
- Suelo 4: Se realizaron 4 riegos, suponiendo 18 horas en total, con un consumo de 488 m³, esto es, 1220 m³/ha.

5.6.1.9.2. Eficiencia de riego

Para determinar la eficiencia del riego, se emplearon los **sensores capacitativos**, mediante la lectura del contenido de agua en suelo, y **contadores volumétricos** de transmisión magnética con emisor de pulsos.

Una vez analizados los datos del estado de los sensores a lo largo de las campañas de riego, se estimaron los umbrales del contenido de agua en el suelo a capacidad de campo, distinguiendo entre profundidades (**Tabla 13**). Como ya hemos señalado anteriormente, la medida de estos sensores está marcada por la variabilidad del suelo, por lo que es complicado establecer valores umbral.

Tabla 13. Umbrales del contenido del agua en el suelo (en %) a capacidad de campo y a distintas profundidades (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm y 60-80 cm) (ensayo 2024).

	vwc (cc) %			
	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm
Zona 3	23,60	26,00	29,50	23,70
Zona 4	15,90	24,30	29,50	30,30

Siendo:

Vwc: Contenido volumétrico de agua

CC: Capacidad de campo

Según los resultados de la **Tabla 13**, los valores de saturación para cada zona reflejan una textura del suelo diferente para cada profundidad.

Si se descartan los valores para el primer estrato (de 0 a 20 cm), considerando una profundidad de 20 a 60 cm, la zona 3 presentó valores entre 26 y 29,5% de contenido volumétrico de agua (VWC), mientras que, por debajo de esta profundidad, el valor se situó en 23,7%. Para la zona 4, se obtuvieron valores en las capas de 20-40 cm y 40-60 cm, de 24,3 y los 29,5% de contenido volumétrico de agua respectivamente. Sin embargo, por debajo de éstas, se situó en 30,3%. Con estos valores el tipo de textura del suelo es franco arenoso.

Comparando los resultados obtenidos con el año anterior, en concreto, la zona 3 (2024) con la 2 (2023), y considerando los datos extraídos de los sensores *Teros 10*, éstos reflejaron valores más elevados para el mismo tipo de suelo. Así, en los primeros 40 cm, presentó valores de saturación entre los 30 y los 23% en la capa arable y entre el 34,8 y el 22,6 % en el estrato inferior. Con esto valores, los tipos de textura del suelo se encontrarían entre franco y franco arenoso.

Tabla 14. Umbrales del contenido del agua en el suelo (en %) a capacidad de campo y a profundidades 40 y 60 cm, para los suelos 2 y 3 (ensayos 2023 y 2024).

	vwc (cc) %	
	40 cm	60 cm
Suelos tipo 3	28,0	30,8
Suelos tipo 2	23,0	22,6

Siendo:

Vwc: Contenido volumétrico de agua

CC: Capacidad de campo

En los ensayos, de acuerdo a los datos del multisensor *Aquacheck*, en el suelo más ligero (tipo 2) el agua disponible en los primeros 40 cm no descendió del 13%, mientras que el suelo menos ligero y con un mayor contenido en materia orgánica (suelo tipo 3) no bajó del 15%. Sin embargo, según los datos extraídos del sensor *Teros 10*, en el suelo de la zona 2, el contenido volumétrico de agua disponible a 40 cm de profundidad no bajó del 15,0%, mientras que en el tipo 3, se mantuvo por encima del 17%.

El tiempo que tardan en estabilizarse las lecturas de humedad de los sensores va aumentando con la profundidad. Además, el tiempo de estabilización de la humedad puede ser inferior a 1 hora en los suelos más ligeros (tipo 2), a una profundidad de 60 cm; por el contrario, se pueden alcanzar hasta tres horas de estabilización en los suelos con más materia orgánica.

En los **suelos con más materia orgánica (tipo 3)**, no se aprecia el lavado de agua hacia los horizontes más profundos (60-80 cm), aun cuando el riego se extendió hasta las cinco horas. Por el contrario, en **suelos más ligeros (tipo 2)**, este lavado se pudo producir antes de las tres horas de comenzar a regar. Por ejemplo, en suelos más arenosos, se produce prácticamente a las 2,5 horas después del riego. En consecuencia, atendiendo a la climatología y al estado fenológico del cultivo, el intervalo entre riegos pudo resultar inferior a los 3 días.

En los suelos con más materia orgánica, se pudieron efectuar riegos de más de 5 horas sin problemas de lixiviados a las capas más profundas, por lo que el intervalo mínimo entre riegos de 6 días resultó suficiente. Así, **se determinó el inicio y paro del riego a las condiciones de humedad del suelo**, por lo que quedó sujeto al control de la humedad de los primeros 40 cm.

El empleo de sensores a más de 60 cm está condicionado por tiempo de respuesta que presentan los suelos a esa profundidad, por lo que no se aconseja su uso para establecer los tiempos de riego. Además, atendiendo que los suelos sean más o menos húmedos, sus lecturas pueden verse condicionadas a la presencia de un nivel freático alto en las primeras fases del cultivo. Su uso, por tanto, quedó limitado a un detector de humedad nos permitió calibrar los valores de corte para los sensores colocados en los primeros 40 cm.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados generales obtenidos en los ensayos de riego llevados a cabo durante el ciclo de cultivo de la patata en 2023 y 2024 (**Tabla 15**).

Tabla 15. Tabla general de resultados de riego de precisión, para los ensayos 2023 y 2024.

DATOS GENERALES DEL SISTEMA					
precipitación sistema de riego	6,8	mm			
eficiencia del riego por aspersión	75	%			
TIPOS DE SUELOS					
identificación	franco		franco arenoso		
profundidad extracto	0,4	m	0,4	m	
inicio riego	16	% vwc	14	% vwc	
corte riego (cc)	26	% vwc	20	% vwc	
reserva utilizable (R.U.)	10	% vwc	6	% vwc	
aportación agua útil	400	m³/ha	240	m³/ha	

APORTACIONES AGUA DE RIEGO								
tiempo de riego	6	horas	5	horas	4	horas	3	horas
aportación neta	408	m³/ha	340	m³/ha	272	m³/ha	204	m³/ha
aportación bruta	544	m³/ha	453	m³/ha	363	m³/ha	272	m³/ha
BALANCE								
tiempo de riego	6	horas	5	horas	4	horas	3	horas
suelo más ligero (tipo 2)	8	m³/ha	-60	m³/ha	-128	m³/ha	-196	m³/ha
suelo más turba (tipo 3)	168	m³/ha	100	m³/ha	32	m³/ha	-36	m³/ha

De acuerdo a los resultados, se pudieron establecer las siguientes recomendaciones para el uso de sensores capacitativos y la lectura del contenido de agua en suelo:

- **Corte del riego:** cuando contenido volumétrico de agua (VWC) estaba a capacidad de campo.
 - ✓ Para suelos de textura franco-arenosa, con más materia orgánica: VWC=26%
 - ✓ Para suelos de textura franco-arenoso, con menor contenido en materia orgánica: VWC=20%.
- **Inicio del riego:**
 - ✓ Para suelos de textura franco-arenosa, con más materia orgánica: VWC=16%.
 - ✓ Para suelos de textura franco-arenoso, con menor contenido en materia orgánica: VWC=14%.
- **Intervalos de riego mínimo:**
 - ✓ Para suelos de textura franco-arenosa, con más materia orgánica: 6,5 días
 - ✓ Para suelos de textura franco-arenoso, con menor contenido en materia orgánica: 4 días.

Debemos señalar que el uso del tensiómetro no se ha adaptado bien al manejo del riego tal y como se han llevado a cabo los ensayos, dado que su rango de medida (entre 0 y -80 kPa), resulta escaso para los intervalos de riegos realizados.

Se puede concluir que el sistema ensayado permitió **un control más eficiente del uso del agua de riego**, debido a que poder disponer de información precisa sobre los niveles de humedad del suelo, garantiza que los cultivos reciban la cantidad necesaria de agua en el momento adecuado, reduciendo el desperdicio de agua.

Las lecturas inmediatas del consumo de agua facilitan su gestión, pudiendo acceder a su consumo diario y establecer alarmas para identificar fugas o consumos inusuales. Asimismo, el telecontrol es fundamental para el monitoreo y control remoto de todos los sectores de riego, lo que se traduce en una mayor calidad de vida del agricultor.

5.6.1.10. Producción bruta de patatas en la cosecha de 2024

El análisis de la producción bruta de patata en A Limia, comparando las parcelas bajo un manejo de precisión y las parcelas de control (manejo convencional), mostró diferencias significativas en el rendimiento. A continuación, se presentan los resultados de producción por hectárea para cada zona (**Fig.86**).

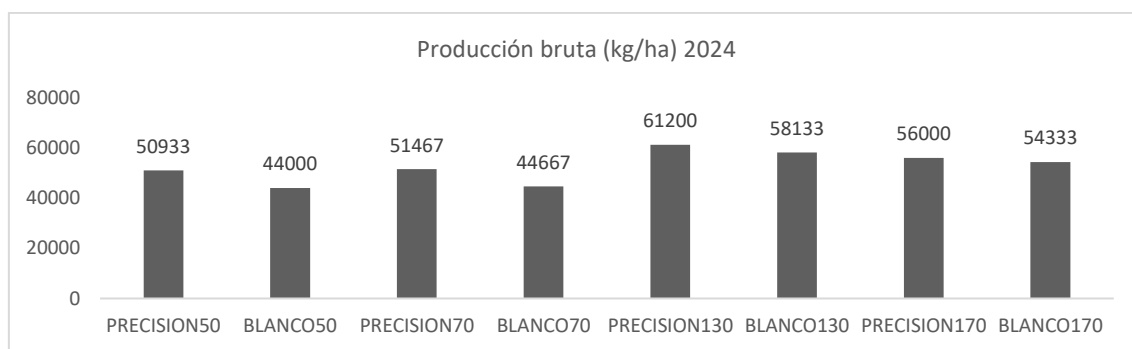


Fig.86. Producción bruta (kg/ha) obtenida en el cultivo de patata, diferenciando entre zonas de agricultura de precisión y zonas control (blanco), en la parcela de ensayos en 2024.

Podemos observar que las zonas gestionadas mediante agricultura de precisión reflejaron un aumento consistente en la producción bruta en todas las áreas, con incrementos que varían desde un 3,1% hasta un 15,7%. Esto refleja el impacto positivo de aplicar insumos de manera diferenciada y precisa, lo que optimiza los recursos y aumenta el rendimiento, en comparación

con el manejo convencional homogéneo. Las mayores diferencias se encontraron en las zonas de *PRECISION50* y *PRECISION70*, mientras que las diferencias en las zonas de *PRECISION130* y *PRECISION170* fueron menores.

Más detalladamente, vamos a describir por zonas los resultados obtenidos (**Fig.80**):

- *Zona PRECISION50*: La producción bruta resultante de esta zona alcanzó los 50.933 kg/ha, en comparación con los 44.000 kg/ha obtenidos para el control *BLANCO50*. Si calculamos la diferencia, tenemos que la zona con agricultura de precisión produjo aproximadamente 6.933 kg/ha más, lo que supuso un incremento del 15,7% respecto al manejo convencional.
- *Zona PRECISION70*: En esta zona, la producción bruta fue de 51.467 kg/ha, muy superior a los 44.667 kg/ha obtenidos de la parcela control *BLANCO70*. Esto quiere decir que el manejo con agricultura de precisión generó 6.800 kg/ha más, lo que representa un incremento del 15,2%.
- *Zona PRECISION130*: Esta fue la zona con una mayor producción bruta alcanzada, con 61.200 kg/ha, frente a los 58.133 kg/ha del control *BLANCO130*. Esto supuso que, en esta zona, la agricultura de precisión logró un aumento de 3.067 kg/ha, un 5,3% más que el manejo convencional.
- *Zona PRECISION170*: Se obtuvo una producción bruta de 56.000 kg/ha, frente a los 54.333 kg/ha del control en esta zona, es decir, la agricultura de precisión produjo 1.667 kg/ha más, equivalente a un 3,1% de incremento.

5.6.1.11. Producción comercial y porcentaje de destrío en la cosecha de 2024

El análisis de la producción comercial en el ensayo 2024 para la variedad de patata Lady Anna revela que las parcelas gestionadas con agricultura de precisión presentaron rendimientos superiores, en comparación con las gestionadas bajo el sistema convencional (**Fig.87**).

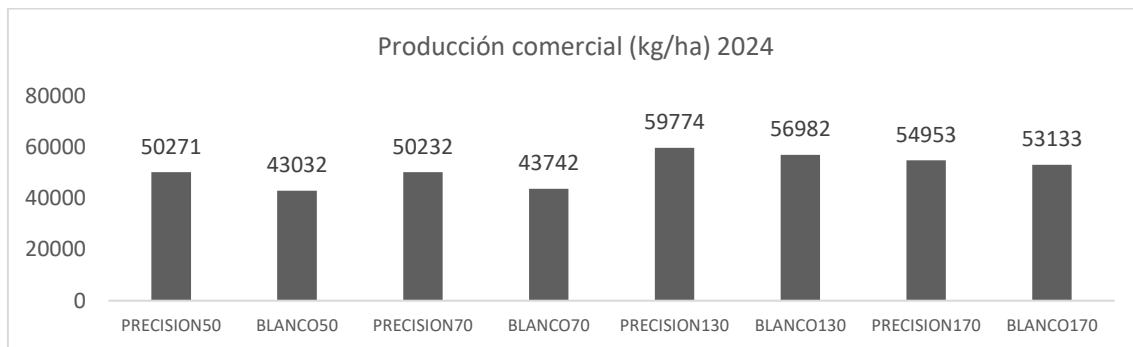


Fig.87. Producción comercial (kg/ha) obtenida en el cultivo de patata, diferenciando entre zonas de agricultura de precisión y zonas control (blanco), en la parcela de ensayos en 2024.

Según la **Fig.87**, en la que se reflejan los resultados obtenidos de producción comercial de patatas en el ensayo de 2024, observamos que:

- En la *zona PRECISION50*, la producción comercial alcanzó los 50.271 kg/ha, superando en 7.239 kg/ha a la parcela *control BLANCO50*, de agricultura convencional, con 43.032 kg/ha. Este incremento representa un 16,8% a favor del manejo empleando técnicas de agricultura de precisión.
- En la *zona PRECISION70*, la producción fue de 50.232 kg/ha, mientras que en la parcela convencional (*BLANCO70*) se obtuvieron 43.742 kg/ha, lo que supone una diferencia de 6.490 kg/ha y un aumento del 14,8% en la producción.
- En la *zona PRECISION130*, se registraron 59.774 kg/ha de producción comercial, frente a 56.982 kg/ha en la zona control, gestionada de forma convencional. Esto supuso una diferencia de 2.792 kg/ha, lo que equivale a un 4,9% más de producción.
- Finalmente, en la *zona PRECISION170*, la producción estimada fue de 54.953 kg/ha, mientras que el control obtuvo 53.133 kg/ha, lo que representa un incremento de 1,820 kg/ha (3,4% de diferencia favorable al manejo de precisión).

Por tanto, esto corrobora lo descrito anteriormente para el ensayo de 2023, en el que se obtuvo que **la agricultura de precisión demostró un aumento consistente en la producción comercial en todas las zonas**, destacando un mayor rendimiento en comparación con el manejo convencional. Este resultado subraya la eficacia de un manejo sectorizado en la optimización del rendimiento en la producción de patata.

En lo que respecta al **análisis del destrío** en la producción de patata variedad *Lady Anna* durante el ensayo de 2024, éste reveló que las diferencias entre las zonas manejadas con agricultura de precisión y las convencionales fueron mínimas y **no presentaron defectos destacables**, lo que sugiere que los descartes estuvieron más relacionados con el calibre de los tubérculos que con problemas de calidad o enfermedades (**Fig.88**).

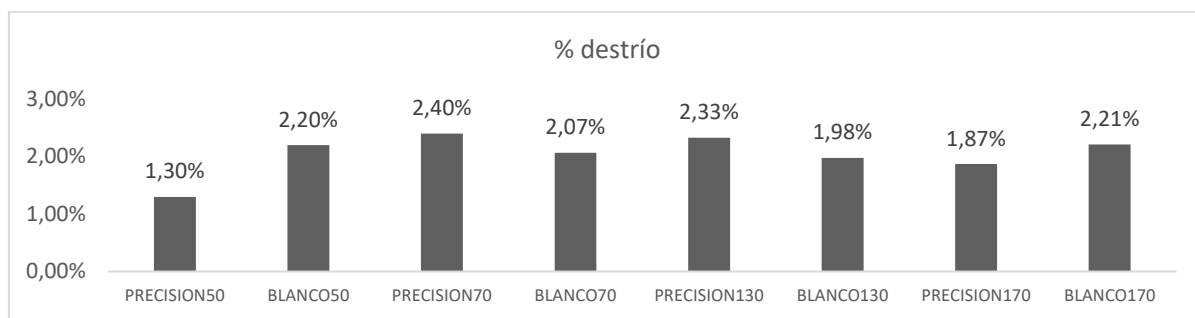


Fig.88. Porcentaje de destrío obtenido en el cultivo de patata, diferenciando entre zonas de agricultura de precisión y zonas control (blanco), en la parcela de ensayos en 2024.

Así, en la *zona PRECISION50*, el porcentaje de destrío resultó de un 1,30%, mientras que en la zona convencional fue del 2,20%. La diferencia es pequeña, aunque, de todos modos, refleja un mejor manejo de la agricultura de precisión, reduciendo el número de tubérculos pequeños.

La *zona PRECISION70* mostró un destrío del 2,40%, ligeramente superior al obtenido en la zona control (2,07%). Aunque el porcentaje es algo mayor, sigue dentro de un rango aceptable y se atribuye principalmente a la producción de tubérculos más pequeños, en lugar de defectos importantes. Lo mismo ocurrió en la *zona PRECISION130*, con un porcentaje de destrío del 2,33%, comparado con el 1,98% alcanzado en la *zona control (BLANCO130)*.

Finalmente, en la *zona PRECISION170*, el destrío estimado fue del 1,87%, frente al 2,21%, calculado en la zona convencional control, lo que refleja un mejor resultado bajo el manejo de precisión, con menos patatas pequeñas y descartes.

En general, los niveles de destrío en ambas prácticas de manejo fueron reducidos, lo que sugiere que la calidad de los tubérculos fue buena en general y los descartes no fueron significativos (**Fig.88**). Los pocos tubérculos que fueron eliminados en el destrío, se debieron principalmente a un calibre pequeño, y no a defectos graves como enfermedades, golpes o malformaciones. Esto indica que tanto el manejo de precisión como el convencional lograron mantener una calidad alta en la producción de patata en todas las zonas del ensayo.

5.6.1.12. Porcentaje de materia seca y relación de tubérculos por kilogramo en las patatas cosechadas en 2024

El análisis del porcentaje de materia seca en las patatas cultivadas durante 2024 reveló una tendencia consistente: las zonas manejadas bajo **agricultura de precisión**, además de obtener una mayor producción bruta y comercial, también lograron un **contenido de materia seca** ligeramente **superior** en comparación con las zonas manejadas de forma convencional (**Fig.89**).

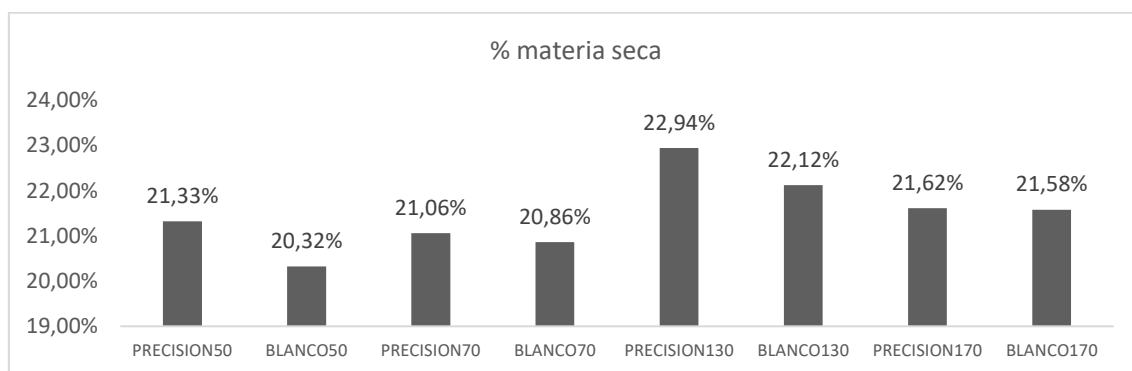


Fig.89. Porcentaje de materia seca promedio obtenido en las patatas, diferenciando entre zonas de agricultura de precisión y zonas control (blanco), en la parcela de ensayos en 2024.

De esta forma, tenemos que en la *zona PRECISION50*, el porcentaje de materia seca promedio estimado en las patatas fue del 21,33%, mientras que la zona control, de manejo convencional (*BLANCO50*) éstas presentaron un 20,32%. Por tanto, tenemos que, además de que la producción bruta fue considerablemente mayor (50.933 kg/ha frente a 44.000 kg/ha), la zona de manejo con agricultura de precisión mantuvo una mayor concentración de sólidos en los tubérculos.

Del mismo modo, en la *zona PRECISION70* las patatas mostraron un contenido en materia seca medio de 21,06%, ligeramente superior al 20,86% de la *zona control*. Algo similar ocurrió en la *zona PRECISION130*, en la cual se observó el mayor porcentaje de materia seca en los tubérculos (22,94%), comparado con el 22,12% en los cosechados en la *zona BLANCO130*. A pesar de que ambas zonas mostraron una producción elevada (61.200 kg/ha en PRECISION130 y 58.133 kg/ha en BLANCO130), la concentración de materia seca fue más alta en la zona manejada con agricultura de precisión.

Finalmente, en la *zona PRECISION170*, el porcentaje de materia seca medio estimado en las patatas recogidas fue del 21,62%, semejante al de zona control, gestionada con agricultura convencional (21,58%). Aunque la diferencia es mínima, es importante señalar que la mayor

producción de la *zona PRECISION170* (56.000 kg/ha) no sacrificó la calidad de las patatas, en términos de materia seca.

Observamos que, además de haberse obtenido una **mayor producción en las zonas de agricultura de precisión**, estas áreas lograron **mantener o mejorar ligeramente el contenido de materia seca en los tubérculos**. Esto sugiere que el manejo sectorizado, adaptado a las condiciones del suelo y las necesidades específicas de cada zona, no solo optimiza el rendimiento, sino que también preserva la calidad del producto.

Por lo tanto, al igual que sucedió en el año 2023, la zona con un manejo de *agricultura de precisión* presentó una mayor eficiencia en el uso de insumos, un menor destrío y una mayor calidad de los tubérculos, con porcentajes más altos de materia seca y mayor producción comercial. En cambio, la *zona convencional*, con un manejo homogéneo, mostró mayores variaciones en la calidad y cantidad, debido a la aplicación uniforme de fertilizantes y otros insumos, sin tomar en cuenta las variaciones del suelo y las necesidades del cultivo.

En lo que respecta al **análisis de tubérculos por kilogramo** en las diferentes zonas evaluadas durante el ensayo de 2024, se muestran variaciones mínimas entre las áreas de agricultura de precisión y las manejadas de manera convencional. Estas diferencias no resultaron ser significativas ni impactaron de forma importante en los resultados globales del ensayo (Fig.90).

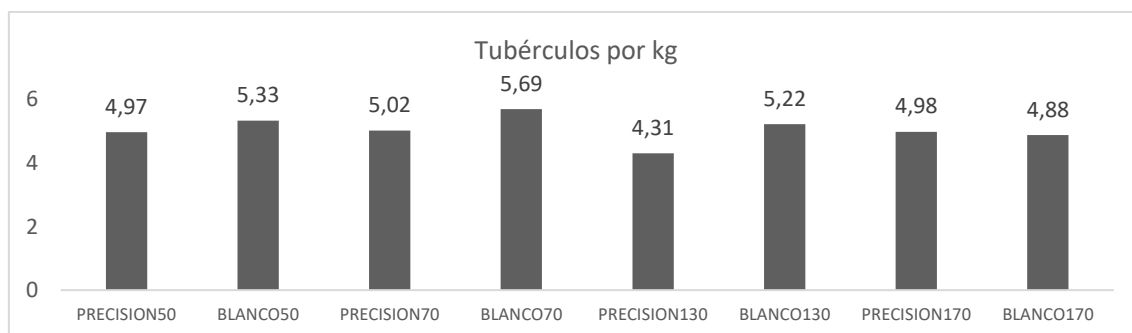


Fig.90. Tubérculos por kilogramo cosechado, diferenciando entre zonas de agricultura de precisión y zonas control (blanco), en la parcela de ensayos en 2024.

En general, **las zonas de agricultura de precisión mostraron un número ligeramente menor de tubérculos por kilogramo en comparación con las áreas convencionales**. Esto se observa, por ejemplo, en el área de *PRECISION50*, donde se calcularon 4,97 tubérculos por kilogramo, frente a los 5,33 estimados en la *zona control BLANCO50*. Sin embargo, esta variación es pequeña y no afecta de manera notable la productividad o la calidad comercial del producto. En las otras zonas, como *PRECISION130* (4,31 tubérculos/kg) y *control BLANCO130*

(5,22 tubérculos/kg), también se observaron ligeras diferencias, pero sin consecuencias significativas.

5.6.1.13. Optimización de insumos en el cultivo de patata 2024

5.6.1.13.1. Ahorro de fertilizante

El ensayo llevado a cabo en 2024 complementó el realizado en el año anterior, permitiendo evaluar el ahorro de insumos, particularmente de fertilizantes, al comparar los dos sistemas de manejo agrícola: la agricultura de precisión y el manejo convencional en el cultivo de patata. Este fue uno de los principales objetivos, esto es, **analizar el uso eficiente de los fertilizantes** y cómo la agricultura de precisión puede reducir el consumo de estos insumos sin comprometer la productividad.

Como ya hemos señalado, en el sistema de *agricultura de precisión*, se aplicaron fertilizantes de manera sectorizada, basándonos en los datos obtenidos de los vuelos con drones y los análisis de suelo previos. Las parcelas fueron divididas en cuatro zonas, y a cada una se le asignaron dosis específicas de fertilizante, optimizadas según las necesidades del suelo y el estado del cultivo. Este manejo diferenciado permitió **aplicar la cantidad justa de insumos**, evitando malgastar y asegurando que las plantas recibieran los nutrientes necesarios en las zonas donde realmente lo requerían. Como resultado, **se consiguió un ahorro de fertilizantes de entre 20 y 25% en comparación con el sistema convencional**.

En el sistema de manejo convencional, los fertilizantes se aplicaron de forma uniforme en toda la parcela, sin tener en cuenta las variaciones en el tipo de suelo o el estado del cultivo en cada área. Este enfoque homogéneo tiende a sobre fertilizar algunas zonas que no necesitan tantos nutrientes, mientras que otras pueden quedar insuficientemente abonadas, lo que afecta la eficiencia del uso de insumos. Aunque este sistema garantiza que todas las plantas reciban fertilizantes, se traduce en un mayor consumo de insumos.

El ahorro de fertilizantes siguiendo técnicas de agricultura de precisión se logró **sin comprometer la productividad**. De hecho, las zonas manejadas de esta forma mostraron resultados de rendimiento similares o superiores a las áreas convencionales, lo que demuestra que una mejor gestión de los insumos, basada en datos específicos de cada zona, no solo es más sostenible, sino también más eficiente. Este ahorro de fertilizantes no solo reduce los costos de producción, sino que también **disminuye el impacto ambiental**, contribuyendo a una agricultura más sostenible.

5.6.1.13.2. Ahorro de fitosanitarios

En el ensayo de 2024, se estimó mediante el análisis del uso de fitosanitarios, un **ahorro del 11%** siguiendo el sistema de agricultura de precisión, en comparación con el manejo convencional. Aunque éste es notable, representa una reducción menor en comparación con el año anterior (2023), cuando se lograron ahorros más significativos debido a un mayor número de tratamientos necesarios para controlar las enfermedades.

Este año se caracterizó por condiciones climáticas más favorables y un menor nivel de infestación en mildiu, lo que resultó en una reducción en la frecuencia de aplicaciones de fitosanitarios. En el sistema de precisión, se utilizó un enfoque más preciso para determinar las necesidades fitosanitarias de las plantas, aplicando tratamientos solo cuando fueron necesarios y en las zonas específicas que presentaban problemas. Esto permitió un uso más eficiente de los productos fitosanitarios, evitando aplicaciones excesivas que podrían haber impactado negativamente en el medio ambiente. Por otro lado, el manejo convencional continuó utilizando un enfoque más generalizado, aplicando fitosanitarios de manera uniforme en toda la parcela. Esto llevó a un mayor consumo de estos insumos, a pesar de que no fue necesario en todas las áreas.

En resumen, aunque el ahorro en fitosanitarios fue menor en 2024 en comparación con 2023, la **agricultura de precisión demostró ser más eficiente** al utilizar estos insumos, contribuyendo a una producción más sostenible y responsable.

5.6.1.14. *Evaluación final de los ensayos de patata de 2023 y 2024*

La evaluación final del ensayo de cultivo de patata Lady Anna en 2023 y 2024 proporcionó información crucial sobre la efectividad de los métodos de agricultura convencional y de precisión. En **2023 se establecieron las bases para medir el rendimiento y la sostenibilidad del cultivo**, mientras que en **2024 se aplicaron mejoras significativas** basadas en los datos obtenidos el año anterior. En 2024, se implementó una fertilización sectorizada según el mapeo generado por los vuelos de dron y análisis de suelo, permitiendo un ajuste preciso de los insumos en cada una de las cuatro zonas. La franja manejada de manera unificada bajo agricultura convencional se empleó como control para contrastar los resultados.

La comparación de los datos de rendimiento, calidad y uso de insumos entre ambos años permitió identificar tendencias y mejoras en la productividad y sostenibilidad del cultivo. Además, se analizó el impacto ambiental de cada enfoque, proporcionando así una base sólida para futuras decisiones en la gestión de cultivos. Este análisis contribuyó al avance de prácticas agrícolas más eficientes y responsables.

5.6.2. Cultivo de trigo 2024

La parcela empleada para llevar a cabo los ensayos de trigo fue la misma que el año anterior. Como ya se ha mencionado, en 2023 se obtuvieron datos de producción por zonas, facilitados por la cosechadora, para implementar un **manejo diferenciado** en la mitad de la parcela en 2024, dejando una parte fertilizada de manera uniforme como referencia, con la finalidad de **contrastar el impacto de la fertilización sectorizada sobre el rendimiento y la eficiencia en el uso de insumos**.

5.6.2.1. Precipitación acumulada y temperatura durante el ensayo de trigo en 2024

Este análisis meteorológico cubre la evolución de la precipitación y las temperaturas promedio del suelo a 0,1 m durante el ensayo del cultivo de trigo desde el 19 de abril hasta el 19 de agosto de 2024 (**Fig.91**). Estos parámetros fueron fundamentales para entender el impacto de las condiciones climáticas en el desarrollo del cultivo.

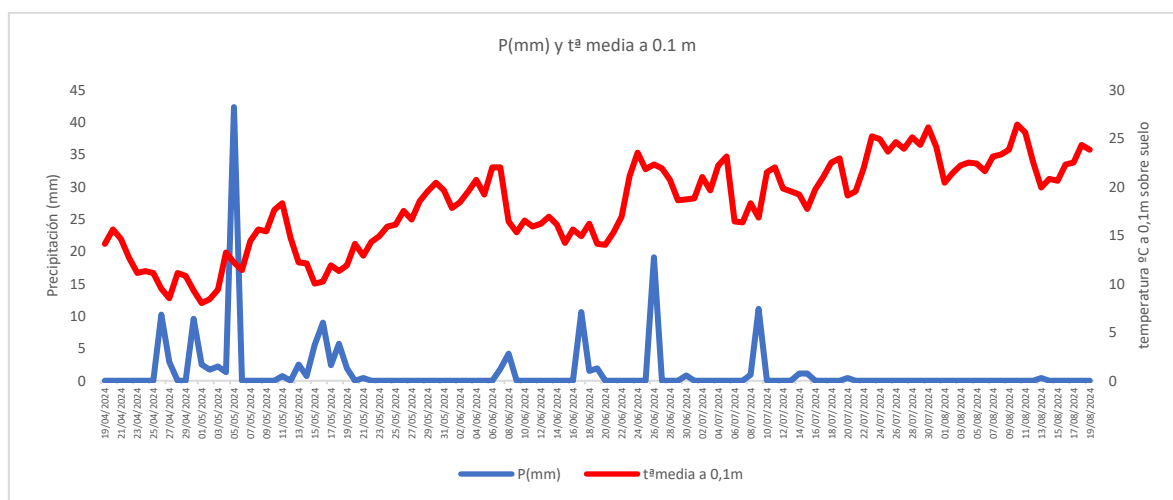


Fig.91. Precipitación y temperatura registradas en la parcela de ensayos de trigo en 2024.

El clima proporcionó un buen inicio para el trigo de primavera, con precipitaciones adecuadas en los meses clave de abril y principios de mayo, lo que permitió un crecimiento saludable. La disminución de las precipitaciones a partir de junio y las altas temperaturas en julio y agosto podrían haber impactado en la maduración y llenado de granos, lo que podría haber afectado el rendimiento final.

El ensayo de trigo estuvo marcado por una distribución irregular de las lluvias y un aumento constante de las temperaturas. Las lluvias escasas y las temperaturas más cálidas en los meses

críticos de llenado de grano (junio y julio) probablemente impactaron negativamente el rendimiento del cultivo, especialmente en cuanto al peso del grano. Sin embargo, las condiciones frescas y las lluvias intermitentes al inicio de la campaña proporcionaron un buen ambiente para el establecimiento y desarrollo vegetativo del trigo.

5.6.2.2. Fertilización diferenciada de la parcela de trigo en 2024

La fertilización adecuada es clave para maximizar el rendimiento agrícola, pero la sobre fertilización puede tener efectos negativos tanto en el medio ambiente como en los costos de producción. Para evitar este problema, es esencial adaptar la fertilización al potencial productivo del suelo, aplicando los nutrientes necesarios de manera específica y eficiente.

Este enfoque requiere un diagnóstico preciso del suelo, mediante análisis de nutrientes, pH y textura, que permitan identificar las áreas con mayores capacidades productivas y aquellas que necesitan más insumos. En zonas con alta fertilidad, como las que ya han demostrado un buen rendimiento, es crucial evitar la sobre fertilización, ya que esto puede generar pérdidas económicas y daño ambiental, como la contaminación del agua y la emisión de gases de efecto invernadero. La implementación de tecnologías de precisión, como mapas de fertilidad, permite realizar aplicaciones exactas, adaptadas a las características del terreno, optimizando los recursos y promoviendo una agricultura más sostenible y rentable.

Para la campaña de 2024, se propuso dividir la parcela de trigo Caaveiro en tres zonas diferenciadas, con el fin de aplicar una estrategia de fertilización más eficiente y optimizada. **La división se realizó en función de los rendimientos obtenidos en 2023** y se empleó la tecnología de agricultura de precisión para ajustar las dosis de fertilizante según las necesidades específicas de cada zona (**Fig.92**).

En la primera **zona A de precisión**, se aplicó una dosis de **350 kg/ha de fertilizante** 20-10-8, utilizando un sistema de abonado de precisión. Esta zona fue la que, según los datos de rendimiento, presentó una **menor productividad**, por lo que se buscó mejorar la eficiencia del uso de insumos y fomentar su recuperación, sin realizar una aplicación excesiva de fertilizantes.

La segunda **zona B de precisión** que corresponde a la zona de producción donde se espera un mayor potencial productivo, recibió una **dosis más alta de fertilizante**, de **500 kg/ha** del mismo tipo de fertilizante. En esta área, la tecnología de precisión permitió aplicar una cantidad mayor de nutrientes en las zonas que más lo requerían, optimizando los recursos disponibles para maximizar el rendimiento del cultivo en esas áreas con más capacidad de respuesta.

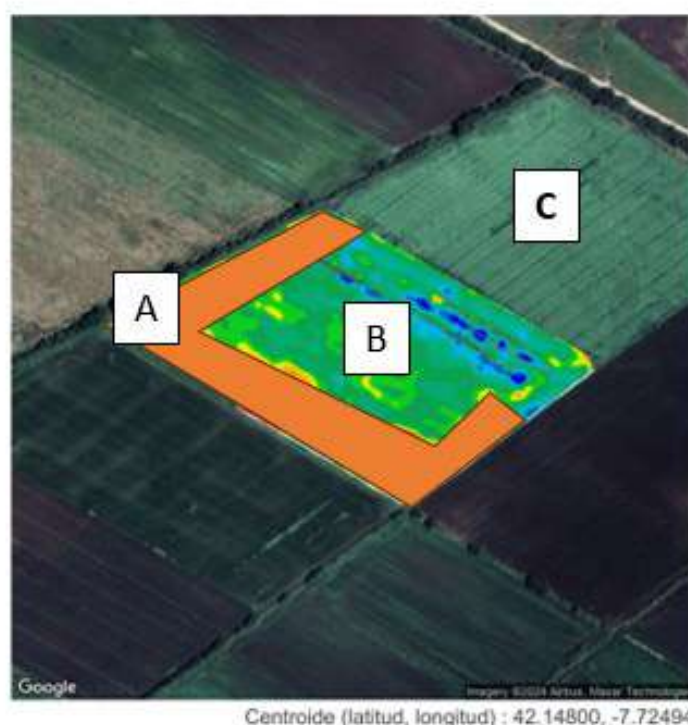


Fig.92. Plano de fertilización aplicada en 2024.

Finalmente, se mantuvo una **zona C de control**, que fue fertilizada de manera uniforme con **500 kg/ha de fertilizante 20-10-8**, siguiendo la práctica tradicional. Esta zona se empleó para comparar los resultados obtenidos con la fertilización ajustada a las necesidades de la parcela frente a la fertilización convencional, permitiendo una evaluación directa de la eficiencia de la nueva estrategia.

5.6.2.3. Ensayo de producción de trigo en 2024

En 2024, se obtuvo una distribución de rendimientos similar a la de 2023, con áreas rojizas y amarillas que presentan una menor capacidad productiva, y áreas verdes y azules con mayor potencial de producción (**Fig.93**).

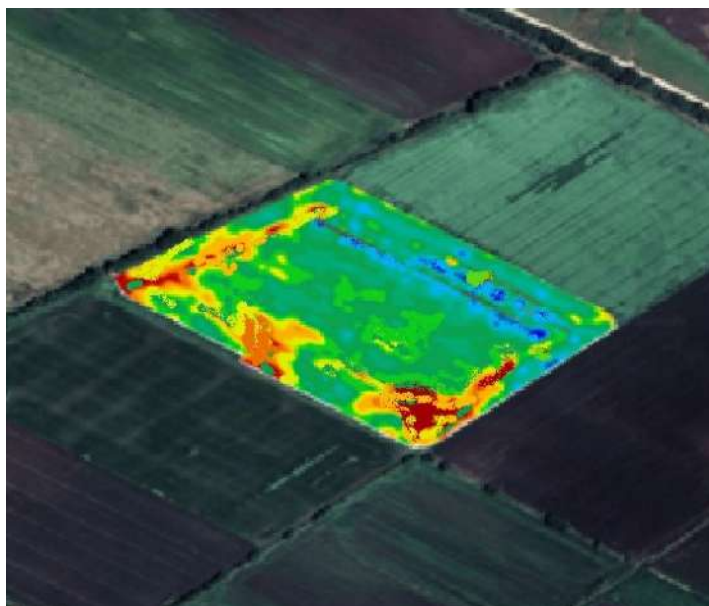


Fig.93. Plano de rendimientos de cultivo en 2024.

En la cosecha de 2024, los rendimientos observados en las diferentes zonas del campo muestran variaciones significativas que reflejan el potencial productivo de cada área. Según los datos proporcionados, observados en la **Fig.93**:

- **Zonas rojas A:** El rendimiento registrado fue de 2.856 kg/ha, lo que indica que estas áreas tienen una **capacidad productiva limitada** en comparación con otras zonas. Esto podría deberse a factores como deficiencias en nutrientes, mala estructura del suelo o condiciones climáticas menos favorables.
- **Zonas azules B:** Estas áreas alcanzaron un rendimiento de 5.058 kg/ha, lo que refleja un **alto potencial productivo**. Las zonas azules, probablemente mejor nutridas y con características de suelo más favorables, muestran una **productividad destacada**, lo que indica que estas zonas podrían beneficiarse de una fertilización moderada para mantener este alto rendimiento sin caer en la sobre fertilización.
- **Blanco o Control C:** Con un rendimiento de 3.328 kg/ha, esta área se encuentra en un término medio entre las zonas rojas y azules, lo que sugiere que su **capacidad productiva podría optimizarse mediante un ajuste adecuado en la fertilización**.

Este análisis de cosecha resalta la importancia de adaptar las estrategias de fertilización a las características específicas de cada zona, evitando el uso excesivo de insumos en áreas ya

productivas y enfocándose en las zonas que realmente necesitan mejora. Esto no solo incrementa la eficiencia de los recursos, sino que también contribuye a una agricultura más sostenible.

5.6.2.4. Comparación de cosecha en 2023 y 2024

La comparación de las cosechas de 2023 y 2024 (**Fig.94**) revela algunos patrones interesantes en los rendimientos de las distintas zonas del campo, lo que puede proporcionar información clave para **ajustar las estrategias de fertilización y manejo de cultivos**.

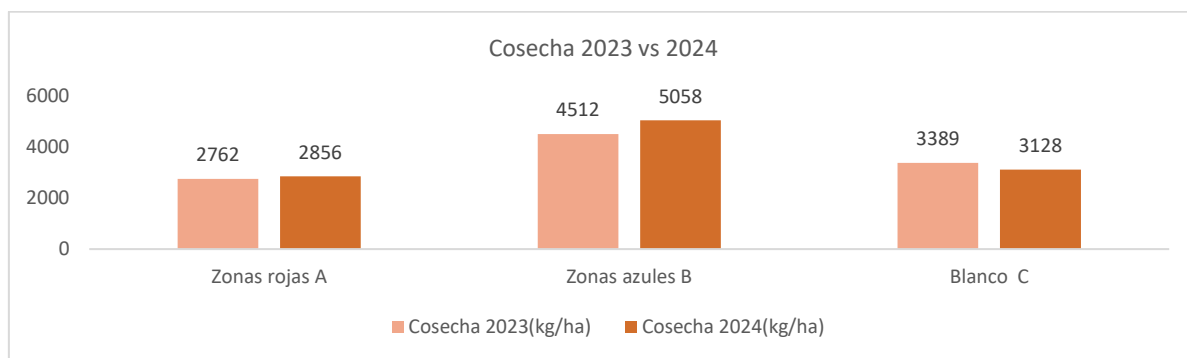


Fig.94. Cosecha comparada por zonas en 2023 y 2024.

- **Zonas rojas A:** en 2023, el rendimiento fue de 2.762 kg/ha, y en 2024 aumentó a 2.856 kg/ha. Este **incremento** de 94 kg/ha podría indicar una ligera mejora en la productividad de estas zonas, posiblemente **debido a ajustes en las prácticas de manejo agrícola** o un mejor manejo de los nutrientes.
- **Zonas azules B:** este es el caso más notable, con un rendimiento de 4.512 kg/ha en 2023, que aumentó significativamente a 5.058 kg/ha en 2024. El incremento de 546 kg/ha en estas áreas destaca su **alto potencial productivo**. El aumento sugiere que las zonas azules continúan beneficiándose de un **manejo adecuado y un suministro de nutrientes adecuado**.
- **Control o Blanco C:** en 2023, la cosecha fue de 3.389 kg/ha, y en 2024 descendió a 3128 kg/ha. Aunque la disminución no es drástica, de 261 kg/ha, sugiere que podría haber habido factores limitantes en estas zonas, como desequilibrios nutricionales o condiciones ambientales menos favorables. Esta caída podría indicar la necesidad de un

análisis más profundo para ajustar la fertilización y otros factores que puedan haber influido en este leve descenso de rendimiento.

Por tanto, mientras que las zonas rojas y verdes presentan ligeros cambios en su rendimiento a mejor, las *Zonas de Control C* experimentan una bajada en su productividad, lo que resalta la **importancia de seguir ajustando las estrategias de manejo de fertilización** de manera específica **según las necesidades de cada zona**.

La ocupación del terreno según las zonas y la aplicación diferencial de fertilización (precisión vs. convencional) refleja una estrategia de manejo de suelos adaptada a las características productivas de cada área.

La ocupación del terreno fue la siguiente (**Tabla 16**):

Tabla 16. Ocupación del terreno de cada fertilización.

	Manejo	Ocupación de terreno (ha)
Zonas rojas A	Precisión	1,55
Zonas azules B	Precisión	3,45
Control o Blanco C	Convencional	5,00

- **Zonas rojas A (1,55 ha):** En estas zonas, con un rendimiento más bajo, se aplicó una fertilización de precisión que ajustó la cantidad de insumos según las necesidades específicas del suelo. A pesar de su capacidad productiva limitada, una estrategia de fertilización bien dirigida podría mejorar los rendimientos sin sobrecargar el suelo con nutrientes innecesarios.
- **Zonas azules B (3,45 ha):** Las zonas azules, que muestran un alto potencial productivo, se fertilizan con tecnología de precisión. Dado que estas áreas ya han demostrado altos rendimientos, responden bien a fertilizaciones más intensas.
- **Control o Blanco C (5 ha):** Esta área fue fertilizada en convencional con la misma dosis en toda la parcela a 500 kg/ha.

5.6.2.5. Siembra, seguimiento del cultivo de trigo y cosecha 2024. Evaluación de resultados en el ensayo



Fig.95. Siembra de trigo en la parcela de ensayos (2024).

El **análisis de la cosecha 2024** muestra una diferencia notable entre los resultados obtenidos en las áreas manejadas con fertilización de precisión (A + B) y las de fertilización convencional (C), tanto en términos de rendimiento como de costes de fertilización (**Fig.96**).

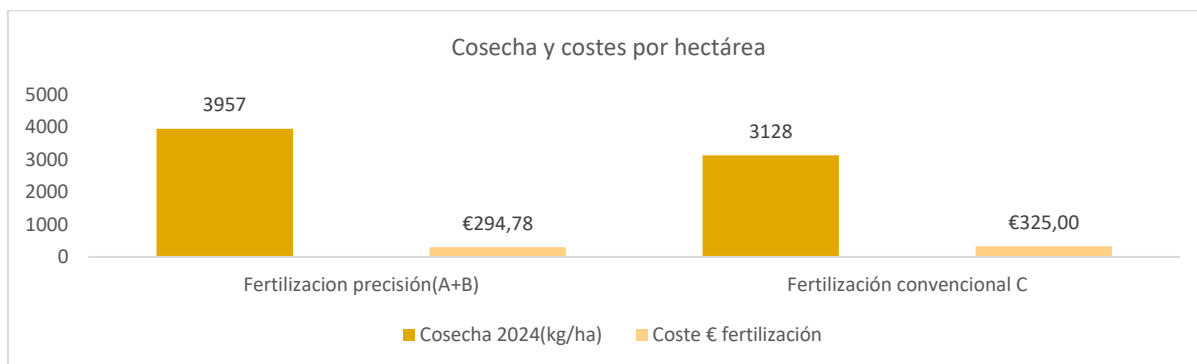


Fig.96. Cosecha obtenida de trigo en 2024 en la parcela de ensayos y costes según el manejo.

- **Fertilización de precisión (A+B):** el rendimiento promedio alcanzado fue de 3.957 kg/ha, significativamente superior al obtenido en el área C. Este aumento puede atribuirse al manejo ajustado de nutrientes según las necesidades específicas de las zonas rojas (A) y azules (B). El coste total de fertilización fue de 1.473,88 € para 5 ha, resultando en un coste por hectárea promedio de 294,78 €/ha.

- **Fertilización convencional (C):** el rendimiento obtenido fue de 3.128 kg/ha, notablemente inferior al promedio de las zonas con manejo de precisión. El coste total de fertilización en este caso fue de 1.625 € para las mismas 5 ha, con un coste por ha de 325 €, muy superior al de las zonas manejadas con precisión.

Así, el uso de fertilización de precisión (A+B) logró un rendimiento promedio superior en 829 kg/ha respecto al manejo convencional (C), con un aumento del 10,25% en cuanto al gasto en fertilización. Por el contrario, el manejo convencional aplicó los fertilizantes de manera uniforme, lo que resultó en una menor productividad y un menor aprovechamiento de los recursos invertidos.

5.6.2.6. Optimización de insumos en el cultivo del trigo en 2024

5.6.2.7. Ahorro de fertilizante

El análisis de los costes de fertilización muestra diferencias significativas entre el área de Control o Blanco C, fertilizada de manera convencional, y las zonas A (rojas) y B (azules), fertilizadas con agricultura de precisión (**Tabla 17**).

Tabla 17. Precios de la fertilización de la parcela de trigo.

	Fertilización 20-10-8 (kg/ha)	Coste (€/kg)	Precio (€/ha)	Ocupación de terreno (ha)	Precio de fertilización
Zonas rojas A Precisión	350	0,65 €	227,50 €	1,55	352,63 €
Zonas azules B Precisión	500	0,65 €	325,00 €	3,45	1.121,25 €
Control o Blanco C Convencional	500	0,65 €	325,00 €	5	1.625,00 €

- ✓ **Zonas A y B (agricultura de precisión):** El coste total de fertilización fue de 352,63 € en las zonas rojas y 1.121,65 € en las zonas azules, lo que suma un total de 1.473,88 € para las 5 ha. Este valor es ligeramente superior al del área control, aunque **incluye una distribución más ajustada y eficiente de los insumos según las necesidades de cada zona.**
- ✓ **Control o Blanco C:** El coste total de fertilización en esta zona fue de 1.625 € para 5 ha, con un precio por ha de 325 €. A pesar de ocupar el mismo terreno que las zonas A y B combinadas (5 ha), el precio total de fertilización es más elevado que la suma de las dos áreas manejadas con precisión.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones del ensayo de patatas comparando agricultura de precisión vs. convencional 2023

El ensayo realizado en 2023 con la variedad de patata *Lady Anna* en A Limia comparó la agricultura de precisión con el manejo convencional (control). Los resultados mostraron diferencias significativas en términos de producción, calidad del tubérculo y eficiencia del manejo agronómico.

A continuación, se presentan las **conclusiones principales**, estructuradas en puntos clave:

- ✓ En todas las zonas evaluadas, la **fertilización diferenciada mejoró notablemente la producción comercial** en comparación con el control. La agricultura de precisión generó un incremento de entre un 10% y un 30% en la producción comercial, minimizando el uso de insumos y adaptándose a las características específicas del suelo.
- ✓ Aunque el manejo convencional permitió una producción aceptable, fue notablemente inferior en todas las zonas en comparación con la fertilización basada en agricultura de precisión. La fertilización uniforme no optimiza las necesidades específicas del suelo, lo que reduce el rendimiento total del cultivo.
- ✓ En lo que respecta a la **calidad de cosecha** obtenida en la mayoría de las zonas, los tubérculos fueron más grandes, reflejado en un menor número de tubérculos/kg. En cuanto al destrío, aunque en algunas zonas el porcentaje fue ligeramente mayor con precisión, la mayor producción compensó este aspecto. La **fertilización diferenciada no solo mejoró el rendimiento**, sino también **el tamaño y la calidad de los tubérculos**, reduciendo el destrío.
- ✓ Los tubérculos en las **parcelas control** tendieron a ser más pequeños, con un mayor número de tubérculos por kilogramo, lo que refleja un desarrollo menos óptimo del cultivo. En algunas zonas, los porcentajes de destrío fueron menores, pero la producción total fue significativamente más baja. Aunque el manejo convencional mantuvo porcentajes de destrío aceptables, la calidad global de los tubérculos fue inferior debido a un menor tamaño y desarrollo.

- ✓ La **materia seca** se mantuvo en **niveles óptimos** en la mayoría de las zonas, con porcentajes similares o superiores a los del control. El manejo preciso de nutrientes permitió mantener una concentración adecuada de materia seca, asegurando la calidad del producto final para su procesamiento y almacenamiento. Aunque en algunas zonas el control presentó valores ligeramente superiores de materia seca, la diferencia no fue lo suficientemente significativa como para compensar el menor rendimiento total. El manejo convencional permitió una adecuada calidad de la materia seca, pero a costa de una menor producción.
- ✓ La **fertilización diferenciada** permitió una aplicación eficiente de los insumos, reduciendo el uso excesivo en zonas que no lo requerían y maximizando su impacto en suelos con mayores necesidades. Este enfoque **optimizó el uso de fertilizantes y otros insumos, reduciendo costes y minimizando el impacto ambiental**.
- ✓ En cambio, el **manejo convencional** no tuvo en cuenta la variabilidad del suelo, lo que resultó en una aplicación menos eficiente de los insumos, llevando a un uso excesivo en algunas zonas y un uso insuficiente en otras. La fertilización uniforme resulta en un **uso ineficiente de los insumos**, lo que podría afectar la sostenibilidad a largo plazo.

6.2. Conclusiones del ensayo de patata comparando agricultura de precisión vs. convencional 2024

El ensayo de este año 2024 sobre la producción de patata en el contexto de la agricultura de precisión frente a la convencional ha proporcionado una serie de conclusiones clave que reflejan las ventajas y desafíos de cada sistema de manejo agrícola:

- ✓ Productividad y calidad del cultivo: los resultados obtenidos en la producción bruta y comercial de patata muestran que la agricultura de precisión ha logrado rendimientos competitivos en comparación con la agricultura convencional. Sin embargo, la calidad de los tubérculos, evaluada a través del porcentaje de destrío y la materia seca, indica que, si bien ambos sistemas produjeron patatas de buena calidad, las áreas manejadas con precisión presentaron ligeramente más materia seca, lo que puede ser indicativo de una mejor salud del cultivo y un manejo más eficiente de los recursos.
- ✓ Uso de insumos: su optimización es uno de los objetivos principales de la agricultura de precisión. En este ensayo, se observó un ahorro significativo en fertilizantes y fitosanitarios, en comparación con la agricultura convencional. Aunque el ahorro en fitosanitarios fue menor que en el año anterior, se mantuvo un enfoque en la aplicación específica y

sectorizada, lo que contribuyó a la sostenibilidad del sistema. Este manejo eficiente se traduce en menores costos operativos y un menor impacto ambiental.

- ✓ Condiciones climáticas y monitoreo: el uso de estaciones termo-pluviométricas y la monitorización continua del clima han sido fundamentales para el éxito del ensayo. Las condiciones climáticas del año 2024, más favorables en comparación con el año anterior, permitieron una mejor evaluación del rendimiento de los cultivos y una planificación más precisa de las labores agrícolas. La integración de datos climáticos y de rendimiento ha demostrado ser una herramienta valiosa para la toma de decisiones en la gestión del cultivo.
- ✓ Sostenibilidad y eficiencia: la agricultura de precisión se ha demostrado como una alternativa viable y sostenible a la agricultura convencional. A través de la recolección y análisis de datos, se han logrado mejoras significativas en la gestión de recursos y la reducción de insumos. Esto no solo beneficia la rentabilidad del agricultor, sino que también contribuye a la preservación del medio ambiente al disminuir la contaminación y el uso innecesario de productos químicos.
- ✓ Desafíos y recomendaciones: a pesar de los resultados positivos, existen desafíos en la implementación de la agricultura de precisión, como la necesidad de capacitación y el acceso a tecnologías avanzadas. Es fundamental continuar investigando y desarrollando herramientas que faciliten la adopción de estas técnicas de precisión, asegurando que los agricultores cuenten con los conocimientos y recursos necesarios para maximizar sus beneficios.

En conclusión, el ensayo de 2024 ha demostrado que **la agricultura de precisión puede ofrecer ventajas significativas en comparación con la agricultura convencional**, tanto en términos de productividad como de sostenibilidad. La combinación de tecnología y buenas prácticas agrícolas representa un camino prometedor hacia el futuro de la agricultura.

6.3. Conclusiones del ensayo de trigo comparando agricultura de precisión vs. convencional 2023-2024

Los resultados del ensayo reflejan diferencias significativas entre la fertilización de precisión (A+B) y la fertilización convencional (C) en términos de productividad y costes asociados.

- ✓ La fertilización de precisión logró un rendimiento promedio de 3.957 kg/ha, destacándose como una estrategia eficiente para maximizar la productividad del cultivo; en comparación,

la fertilización convencional obtuvo un rendimiento inferior, de 3.128 kg/ha, mostrando una diferencia de 829 kg/ha a favor del manejo de precisión. Este aumento considerable del 26,50% en la cosecha demuestra el **impacto positivo de ajustar los insumos a las necesidades específicas de cada área del suelo**.

- ✓ En cuanto a los costes, la fertilización de precisión implicó un gasto de 1.473,88 €/ por 5 ha, que fue ligeramente inferior al coste de 1.625,00 € registrado en el manejo convencional en la misma superficie (5 ha). Calculado en coste por hectárea, el gasto de fertilizante en precisión fue de 294,78 €/ha frente a los 325 €/ha en convencional. Esto evidencia que la **fertilización de precisión** no solo **es más productiva**, sino también **más económica** en términos de fertilización por hectárea, lo que se traduce en una **mayor rentabilidad** para el productor, en este caso el ahorro es del 10,25%.

Como conclusión, podemos decir que la **fertilización de precisión para el cultivo del trigo presenta claras ventajas frente al manejo convencional**. Este ensayo mostró que un manejo adecuado de los insumos puede no solo optimizar la cosecha, sino también reducir los costes. Esto convierte a la **fertilización de precisión** en una **alternativa más eficiente y rentable**, especialmente en un contexto que demanda mayor sostenibilidad en la agricultura.

En resumen, la fertilización de precisión ofreció mejores resultados, al ajustar los insumos a las necesidades específicas del suelo, logrando una mayor productividad por hectárea, además de reducir el impacto medioambiental del cultivo. Aunque implica un coste inicial más elevado, su eficiencia y capacidad de maximizar los rendimientos la convierten en una **estrategia más adecuada para una agricultura sostenible y rentable a largo plazo**.

6.4. Conclusiones finales

El análisis de los ensayos de 2023 y 2024 en los cultivos de patata y trigo, llevados a cabo en la comarca de A Limia, comparando la agricultura de precisión con la agricultura convencional, ha permitido obtener conclusiones significativas que destacan las tendencias y resultados a lo largo de los dos años considerados.

Así, en vista de los resultados obtenidos, **podemos concluir que:**

- **Mejora en la toma de decisiones:** El uso de técnicas de **agricultura de precisión** sobre cultivos de alta producción como la **patata** (variedad *Lady Anna*) y el **trigo**, muy dependientes de los parámetros del suelo y el ambiente, dio lugar a la **implantación de un sistema efectivo** para la **toma de decisiones específicas** para cada zona concreta

de la parcela. De esta forma, los ensayos llevados a cabo entre 2023 y 2024 han resaltado la efectividad de la **agricultura de precisión** como una **alternativa viable y sostenible a la agricultura convencional**.

- **Mejora continua en productividad:** Los resultados mostraron que la agricultura de precisión logró rendimientos competitivos y, superiores a los del manejo convencional. En 2024, la **producción bruta de patata** se mantuvo a la par con la convencional, lo que demuestra que la agricultura de precisión no solo puede igualar, sino también mejorar la productividad cuando se implementa correctamente. Con respecto al **trigo**, la fertilización de precisión logró un rendimiento mayor en el caso de las zonas fertilizadas con técnicas de precisión, con un aumento del 26,50% en la cosecha, lo que demostró el **impacto positivo de ajustar los insumos a las necesidades específicas de cada zona del suelo**. La consistencia en los resultados nos indica que el enfoque sectorizado y basado en datos puede ser altamente efectivo.
- **Ahorro de insumos:** Con la aplicación de esta tecnología, **se redujo el aporte de insumos**, esto es, del uso de agroquímicos y en el control preciso del riego, con su consecuente impacto ambiental. De esta forma, se observó un **ahorro notable en el uso de fertilizantes y fitosanitarios** en el sistema de precisión. Para el **cultivo de patata**, en 2023 el ahorro fue mayor, pero 2024 también mostró un ahorro del 11% en fitosanitarios. En el caso del **trigo**, se alcanzó un ahorro de 10,25% empleando **fertilización de precisión**, lo que se traduce en una **mayor rentabilidad**. Esta tendencia hacia la reducción del uso de insumos es fundamental para mejorar la sostenibilidad de los cultivos, evidenciando la capacidad de la agricultura de precisión para **optimizar recursos y minimizar el impacto ambiental**.

Asimismo, con respecto al **cultivo de la patata**, el análisis de los ensayos de 2023 y 2024, la reducción de insumos también pudo observarse en el tratamiento del nemátodo, que generalmente se resuelve con la aplicación de **nematicidas** a toda la zona (lo que supone un exceso de la dosis necesaria). Empleando técnicas de agricultura de precisión, **se redujeron los costes de producción**, ajustando las dosis a las necesidades reales.

Por otro lado, se puede concluir que el **sistema de riego** ensayado permitió un control más eficiente del uso del agua. Poder proporcionar información precisa sobre los niveles de humedad del suelo, garantizó que los cultivos recibieran la cantidad adecuada de agua en el momento idóneo, reduciendo el desperdicio. El telecontrol fue fundamental para el monitoreo y control remoto de los sectores de riego, lo que se tradujo en una mayor calidad de vida del agricultor. Además, las lecturas instantáneas del consumo de

agua, facilitaron la gestión y detección de alarmas para identificar fugas o consumos inusuales.

- **Calidad del producto:** En lo que respecta a la calidad del tubérculo (evaluada a través del porcentaje de destrío y la materia seca) no hubo grandes diferencias comparando los dos sistemas (precisión vs. tradicional); de todos modos, las áreas bajo agricultura de precisión presentaron mejores características de calidad en comparación con las convencionales. Esto sugiere que el manejo diferenciado de nutrientes y fitosanitarios en puede resultar en tubérculos de mayor calidad.
- **Monitoreo de condiciones climáticas:** Las variaciones en las condiciones climáticas entre 2023 y 2024 influyeron en la salud y el rendimiento de los cultivos. En 2024, el clima más favorable permitió una evaluación más clara de las técnicas aplicadas. La implementación de estaciones de monitoreo climático resultó ser crucial para ajustar prácticas agrícolas en tiempo real y mejorar la toma de decisiones.
- **Sostenibilidad y eficiencia:** La agricultura de precisión se ha confirmado como un modelo más sostenible en comparación con la agricultura convencional. Con el diseño e instalación de un **sistema de control de riego por aspersión** se pudo evaluar y mejorar el manejo en el cultivo de patata mediante el empleo de modernas tecnologías de agricultura de precisión. La reducción de insumos y el uso eficiente de recursos, junto con un manejo más responsable de los agroquímicos, indican que contribuye a una **agricultura más respetuosa con el medio ambiente**.
- Las mejoras en productividad, ahorro de insumos y calidad del producto apoyan la idea de que la agricultura de precisión puede desempeñar un papel crucial en el futuro de la agricultura, promoviendo prácticas más responsables y eficientes.
- Finalmente, dado que A Limia es la región agrícola extensiva más importante de Galicia, sería interesante seguir profundizando en la **aplicación de técnicas de agricultura de precisión en otros cultivos extensivos**, que puedan darse bien en la comarca. Con ello, se persigue la finalidad de modernizar las explotaciones agrícolas, teniendo en cuenta las características propias del lugar, haciéndolas más efectivas y competitivas, a la vez que se establece una gestión más eficiente de los recursos.

6.5. Beneficios que puedan derivar del proyecto: repercusión económica, medioambiental y social

La comarca de A Limia es una zona con diferentes tipos de suelos, en cuanto a composición y estructura, niveles de materia orgánica y textura, lo que puede dar lugar a **distintas necesidades de abonado, riego y siembra**. Por ello, en este proyecto fue importante la división en subparcelas por similitud de necesidades de cada cultivo, para la aplicación de tratamientos específicos.

Estudios previos han demostrado la **efectividad de las técnicas de agricultura de precisión en la gestión de los cultivos**. Además, el empleo de imágenes capturadas con drones, en sustitución a las proporcionadas por satélite, tienen un menor margen de error y mayor precisión.

Por otra parte, en agricultura convencional, para el tratamiento de enfermedades y plagas de los cultivos, como ocurre con el nemátodo de la patata, se aplica el producto de forma general a toda la parcela, siendo habitual que en los rodales afectados la dosis resulte escasa y que en el resto de la parcela se aplique producto innecesariamente. Todo ello genera un gasto de insumos con alto contenido en compuestos químicos. El poder aplicar fitosanitarios empleando agricultura de precisión solamente a la zona afectada, supone un gran **ahorro de insumos y costes** y una **reducción de la contaminación del medio**.

La implantación de estas técnicas de agricultura de precisión en zonas agrícolas como A Limia, con datos precisos, recopilados en los cultivos, así como de cosechas previas, con el fin de desarrollar mapas de cultivos, obtenidos mediante vuelos de dron, resulta de gran interés para la estimación de la dosis de abonado, siembra, agua de riego y fitosanitarios, adecuando los insumos a las necesidades reales del cultivo.

Los resultados globales demostraron que la agricultura de precisión ofrece mayores rendimientos, mejora la calidad del producto y permite una gestión más eficiente y sostenible de los insumos. La fertilización de precisión es un enfoque superior para maximizar el potencial de los suelos y mejorar tanto la cantidad como la calidad de la producción de los cultivos.

Aunque el manejo convencional asegura resultados aceptables, no puede competir con la mejora en producción y calidad que proporciona la fertilización diferenciada. El manejo convencional es viable, pero ineficiente en comparación con la agricultura de precisión, especialmente en términos de optimización de recursos y sostenibilidad.

El efecto de este proyecto al sector primario será mediante la **transferencia** directa, a través del agricultor que lo lidera (*Avelino Santana García*), el centro tecnológico (*CETECA*) y las empresas participantes (*Amodo Soluciones S.L.* y *Fortop S.L.U.*), y servirá de ejemplo para la comunidad agrícola de la comarca. Podemos decir que este proyecto contribuye, además, al fortalecimiento de otros sectores como el terciario, al poner en contacto a las empresas que ofertan los servicios tecnológicos con los agricultores, que constituyen un sector tradicionalmente poco modernizado.

Asimismo, el **beneficio ambiental** derivado de este estudio es de suma importancia, ya que no causó perjuicio significativo a alguno de los siguientes objetivos ambientales: mitigación del cambio climático, adaptación al cambio climático, uso sostenible y protección de los recursos hídricos, economía circular, prevención y control de la contaminación de la atmósfera, el agua o el suelo y protección de la biodiversidad y los ecosistemas. Así, el proyecto contribuye a un objetivo medioambiental, de conformidad con el *Reglamento de Taxonomía* (artículos 10 a 16). De esta forma, se dio **prioridad a la conservación y mejora del medio**, mediante una reducción significativa de agroquímicos y la modernización de las explotaciones agrícolas, lo que supuso un impacto en la sostenibilidad, gracias al incremento de su eficiencia. Con la implantación de estas técnicas, se consiguió economizar costes, al ajustar las dosis en unidades de suelo más pequeñas, ahorrando en agua de riego, fertilizantes y fitosanitarios que, además de costosos, en altas dosis son contaminantes.

Por último, este proyecto ayudó a crear un equipo formado por agricultores, comerciales y técnicos que generarán una nueva cultura, con respecto al manejo de las explotaciones, beneficiando a todos los sectores: al primario (principalmente), secundario (los cultivos obtenidos son de mejor calidad y generan menos residuos, como materias primas para transformación), terciario (empresas de desarrollo de software como *Amodo Soluciones S.L.*, participante en el proyecto, tendrán una mejor implantación en zonas agrícolas). Es importante llevar a cabo iniciativas de investigación que transfieran al agricultor los conocimientos sobre estas técnicas y los beneficios económicos. Además, la mejora de las condiciones de trabajo del sector primario supone un incentivo para la incorporación de gente joven al rural.

6.6. Aspectos clave para implantar agricultura de precisión. Desafíos a los que hacer frente

A pesar de los resultados positivos, se identificaron **retos** en la implementación de la agricultura de precisión, como la necesidad de mayor capacitación y acceso a tecnología avanzada. Por ello, se recomienda **continuar la investigación y el desarrollo de herramientas** que faciliten la **adopción de la agricultura de precisión**, asegurando que todos los agricultores

tengan acceso a estas tecnologías. Para facilitar la implantación de este tipo de agricultura, es crucial abordar estos desafíos mediante políticas que fomenten la inversión en tecnologías, programas de capacitación accesibles y un enfoque gradual en la transición.

1. Adaptación gradual: la transición a la agricultura de precisión no puede realizarse de manera abrupta. Los agricultores suelen estar acostumbrados a las prácticas convencionales, y cambiar a un nuevo sistema requiere un proceso de adaptación que debe ser progresivo. Este proceso implica no solo el cambio de técnicas, sino también la reconfiguración de toda la gestión agrícola, desde la planificación hasta la implementación de tecnologías. Esta adaptación puede llevar tiempo y generar incertidumbre en los productores.

2. Costes iniciales altos: la implementación de la agricultura de precisión a menudo conlleva elevados costes iniciales. La adquisición de tecnologías avanzadas, como drones, sensores, adaptación de tractores, sistemas de información geográfica (SIG) y software especializado, puede resultar costoso, especialmente para pequeños y medianos agricultores. Estos costes pueden disuadirlos de invertir en agricultura de precisión, ya que necesitan ver resultados inmediatos que justifiquen la inversión.

3. Necesidades formativas: para maximizar su potencial, es esencial que los agricultores reciban formación adecuada sobre cómo utilizar las nuevas tecnologías y técnicas. Sin embargo, la falta de programas de capacitación y recursos educativos puede limitar el acceso a este conocimiento. Los agricultores necesitan aprender no solo a operar equipos, sino también a interpretar datos y tomar decisiones basadas en información analítica. La falta de formación puede conducir a un uso ineficaz de las herramientas de agricultura de precisión, lo que, a su vez, podría disminuir la confianza en su efectividad.

4. Resistencia al cambio: el cambio de prácticas tradicionales a un enfoque más tecnológico puede generar resistencia en algunos agricultores, quienes pueden ser escépticos sobre los beneficios de la agricultura de precisión. Esta resistencia puede estar arraigada en una falta de comprensión de las ventajas que ofrece la agricultura de precisión o en experiencias previas con tecnologías que no funcionaron como se esperaba.

5. Acceso a tecnología: la disponibilidad y el acceso a la tecnología son factores críticos. En regiones rurales o menos desarrolladas, la infraestructura necesaria para implementar la agricultura de precisión puede ser limitada, lo que dificulta su adopción.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Arce, F. (1996). El cultivo de la patata. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 272 pp.
- Allison M.F., Fowler J.H., Allen E.J. (2001b). Responses of potato (*Solanum tuberosum*) to potassium fertilizers crop. *Journal of Agricultural Science*, 136:407-426.
- Alloway B.J. (2008). Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production. Chapter 1: Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production: An Introduction. Ed. Springer. 1-39.
- Anastassiades M., Lehotay S.J., Štajnbaher D., Schenck F.J. (2003). Fast and Easy Multiresidue Method Employing Acetonitrile Extraction/Partitioning and “Dispersive Solid-Phase Extraction” for the Determination of Pesticide Residues in Produce. *Journal of AOAC International*, 86(2): 412-431.
- Antelo Cortizas J. M., Arce Vázquez F. (1996). Características físico-químicas das augas superficiais. En: Díaz-Fierros, F. (ed.). *As augas de Galicia*. Consello da Cultura Galega, 351-346.
- Beals K.A. (2018). Potatoes, Nutrition and Health. *American Journal of Potato Research*. 96(103): 102-110.
- Benford D., Bolger P.M., Carthew P., Coulet M., Dinovi M., Leblanc J.C., Renwick A. G., Setzer W., Schlatter J., Smith B., Slob W., Williams G., Wildemann T. (2010). Application of the Margin of Exposure (MOE) approach to substances in food that are genotoxic and carcinogenic. *Food and Chemical Toxicology*, 48: S2-S24.
- Bhutto R.A., Bhutto N.H., Khanal S., Wang M., Iqbal S., Fan Y., Yi J. (2024). Potato protein as an emerging high-quality: Source, extraction, purification, properties (functional, nutritional, physicochemical, and processing), applications, and challenges using potato protein. *Food Hydrocolloids*, 157: 110415.
- Boone F.R., De Smet L.A.H., Van Loon C.D. (1985). The effect of a ploughpan in marine loam soils on potato growth. Physical properties and rooting patterns. *Potato Research*, 28: 295-314.
- Borruey A., Cotrina F., Mula J., Vega C. (2000). Calidad industrial y culinaria de las variedades de patata. In: Pascualena J., Ritter E. (Eds.). *Libro de Actas del Congreso Iberoamericano de Investigación y Desarrollo en Patata*. Patata 2000. 3- 6 Julio, Vitoria-Gasteiz, Spain.
- Buol S.W., Sánchez P.A., Cate R.B., Granger M.A. (1975). Soil fertility capability classification. In: Borne-misza, E., Alvarado, A. (Eds.), *Soil Management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, 126-141.

- Burton W.G. (1989). The potato. Longman Scientific and Technical. England. 742 pp.
- Carter M.R., Sanderson J.B., Macleod J.A. (2004). Influence of compost on the physical properties and organic matter fractions of a fine sandy loam throughout the cycle of a potato rotation. Canadian Journal of Soil Science 84: 211-218.
- Caldiz D.O., Gaspari F.J., Moreno Kiernan A., Struik P.C. (2002). Agro-ecological zoning at the regional level: spatio-temporal variation in potential yield of the potato crop in the Argentinian Patagonia. Agriculture. Ecosystems and Environment. 88: 3-10.
- Cámara Hurtado M., Conchello Moreno P., González Fandos M.E., Mañes Vinuesa J., Rodríguez Lázaro D., Ros Berrueto G., Talens Oliag P. (2017). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Consumo, Seguridad Alimentaria y Nutrición (AECOSAN) sobre los criterios de seguridad que limiten la exposición a acrilamida producida por la fritura de patatas. AECOSAN-2017-007: Documento aprobado por la Sección de Seguridad Alimentaria y Nutrición del Comité Científico en su sesión plenaria de 20 de septiembre de 2017. Revista del Comité Científico, nº26: 29-55.
- Comisión *Codex Alimentarius* (2009). Código de prácticas para reducir el contenido en acrilamida en los alimentos. CAC/RCP 67- 2009: 1-8.
- Diario Oficial de la Unión Europea (2021). Guía técnica sobre la aplicación del principio de “no causar un perjuicio significativo” en virtud del Reglamento relativo al Mecanismo de Recuperación y Resiliencia (2021/C 58/01).
- Domínguez Vivancos A. (1997). Tratado de fertilización. Tercera edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 613 pp.
- Dunovska L., Hajlova J., Hajkova, T., Holadova K., Hajkova K. (2004). Changes of acrylamide levels in food products during technological processing. Czech Journal Food Science, 22 Special Issue, 283-286.
- Edwards L., Burney J.R., Richter G., Macrae A.H. (2000). Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada. Agriculture Ecosystems & Environment 81: 217-222.
- European Food Safety Authority (EFSA) (2015). Panel on contaminants in the food chain. Scientific opinion on acrylamide in food. EFSA Journal, 13 (6): 4104.
- European Food Safety Authority (EFSA): Benford D, Bignami M, Chipman JK, Ramos Bordajandi L. (2022). Assessment of the genotoxicity of acrylamide. EFSA Journal, 20(5): e07293.
- Elmore J.S., Briddon A., Dodson A.T., Muttucumaru N., Halford N.G., Mottram D.S. (2015). Acrylamide in potato crisps prepared from 20 UK-grown varieties: Effects of variety and tuber storage time. Food Chemistry, 182: 1-8.

- Fan M., Xu X., Lang W., Wang W., Wang X., Xin A., Zhou F., Ding Z., Ye X., Zhu B. (2023). Toxicity, formation, contamination, determination and mitigation of acrylamide in thermally processed plant-based foods and herbal medicines: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 260, 115059.
- Food Drink Europe (2019). Acrylamide Toolbox. Disponible en: <https://www.fooddrinkeurope.eu/resource/acrylamide-toolbox/>
- García Calvo L., Álvarez Mociño O. (2003). A comarca da Limia. *Revista do Instituto do Campo* 4: 7-8.
- Genovese J., Tappi S., Luo W., Tylewicz U., Marzocchi S., Marziali S., Romani S., Ragni L., Rocculi P. (2019). Important factors to consider for acrylamide mitigation in potato crisps using pulsed electric fields. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 55: 8-26.
- Gokmen V., Palazoglu T.K. (2009). Measurement of evaporated acrylamide during frying of potatoes: Effect of frying conditions and Surface area to volumen ratio. *Journal of Food Engineering*, 93, 172-176.
- Gómez Nieto G. (1996). A Limia: Xeografía física, humana e económica. En: Rodríguez Iglesias F. (ed.). *Galicia. Xeografía*, Vol. XX, pp. 22-63. Hércules de Ediciones. A Coruña. España.
- Grandy A.S., Porter G.A., Erich M.S. (2002). Organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1311-1319.
- Gutián F., Carballas T. (1976). *Técnicas de análisis de suelos*. Ed. Pico Sacro, Santiago de Compostela, 276 pp.
- Haase U.N., Matthaus B., Vosmann K. (2003). Acrylamide formation in foodstuffs: Minimising strategies for potato crisps. *Deutsche Lebensmittel- Rundschau*, 99(3): 87-90.
- Harrison H.C., Bergman E.L., Cole R.H. (1982). Growth responses, cooking quality determinations, and leaf nutrient concentrations of potatoes as related to exchangeable calcium, magnesium, and potassium in the soil. *American Potato Journal* 59: 113-124.
- Hawkes J.C. (1993). The historical and social role of the potato. *Proceedings of the 12th Triennial Conference of the EAPR*. Paris, France, 75-84.
- Herlihy M., Carrollm P. J. (1969). Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium and their interactions on yield, tuber blight, and quality of potatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 20: 513-517.
- Hijmans R.J., Spooner D.M. (2001). Geographic distribution of wild potato species. *American Journal of Botany* 88(11): 2101-2112.

Instituto Galego de Estatística. Anuario de Estadística Agraria 2023.
<https://agacal.xunta.gal/es/estadistica-y-publicaciones/estadisticas>

Jiménez Aguilar M. (1994). La evaluación de suelos para el cultivo de patata: respuesta a la fertilización y al riego. Tesis Doctoral. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Ciencias. Universidad de Granada.

Kavvadias V., Paschalidis C., Akrivos G., Petropoulos D. (2012). Nitrogen and Potassium fertilization responses of potato (*Solanum tuberosum*). CV. Spunta Communications in Soil Science and Plants Analysis, 43: 176-189.

Kita A. (2002). The influence of potato chemical composition on crisp texture. Food Chemistry 76: 173-179.

Knutsen S.H., Dimitrijevic S., Molteberg E.L., Segtnan V.H., Kaaber L., Wicklund T. (2009). The influence of variety, agronomical factors and storage on the potential for acrylamide formation potatoes grown in Norway. Food Science and Technology, 42: 550-556.

Kolbe H., Muller K., Olteanu G., Gorea T. (1995^a). Effects of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer treatments on weight-loss and changes in chemical composition of potato-tubers stored at 4-degrees-C. Potato Research, 38: 97-107.

Kolbe H., Meineke S., Zhang W.L. (1995^b). Differences in organic and mineral fertilization on potato-tuber yield and chemical-composition compared to model calculations. Agribiological Research - Zeitschrift für Agrarbiologie Agrikulturchemie Ökologie, 48: 63-73.

Kumar P., Pandey S.K., Singh S.V., Rawal S., Kumar D. (2004). Effect of potassium fertilization on processing grade tuber yield and quality parameters in potato (*Solanum tuberosum*). Indian Journal of Agricultural Sciences, 74: 177-179.

Lema M.J. (1996). Evaluación de los suelos de la comarca de Bergantiños para el cultivo de la patata. Tesis doctoral. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela.

López-Mateo M.C. (2007). Efectos agronómicos y ambientales de la fertilización en el cultivo de patata en A Limia (Ourense). Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.

Low M.Y., Koutsidis G., Parker J.K., Elmore J.S., Dodson A.T. Mottram D.S. (2006). Effect of citric acid and glycine addition on acrylamide and flavor in a potato model system. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54: 5976-5983.

Marchettini N., Focardi S., Guarnieri M., Guerranti C., Perra G. (2013). Determination of acrylamide in local and comercial cultivar of potatoes from biological farm. Food Chemistry, 136: 1426-1428.

- Martínez Cortizas A., Pérez Alberti A. (1999). Atlas Climático de Galicia. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela.
- Mauri Ablanque P. V., Vergara García, G. (2003). Variedades del IMIA: trigo. Instituto Madrileño de Investigación Agraria y Alimentaria (IMIA). Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Boletín Agrario nº 39.
- Mestdagh E., Wilde T.D., Castelein P., Nemeth O., Van Peteghem C., Meulenaer B. (2008). Impact of the reducing sugars on the relationship between acrylamide and Maillard browning in french fries. *European Food Research and Technology*, 227: 69-76.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2005). Bacterias de cuarentena que afectan al cultivo de la patata. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_Vrural/Vrural_2005_213_16_20.pdf
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018). Aplicación de los drones en la agricultura de precisión. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/josefernandoortegacifuentes_12092018_tcm30-483045.pdf
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2018). Jornada Técnica sobre el cultivo sostenible de la lavanda e innovaciones en agricultura de precisión. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/marianosuarezapcifuentes_tcm30-483044.pdf
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) y Consellería do Medio Rural (2018). Pliego de Condiciones: Indicación Geográfica Protegida (IGP) “PATACA DE GALICIA” o “PATATA DE GALICIA”.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2019). Superficies y producciones de cultivo, año 2019.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2022). Caracterización del sector de la patata fresca de consumo. Anuario de Estadística y Avances de Superficies y Producciones Anuales de Cultivos.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2022). Superficies y producciones de cultivos. Cereales grano-trigo: Serie histórica de superficie, rendimiento, producción, precio, valor. Serie histórica de superficie y producción según dureza del grano. Análisis provincial de superficie, rendimiento y producción, 2021. Análisis provincial de superficie y producción según dureza del grano, 2021.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2023). Análisis de campaña de la patata 2023.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2024). Avances de superficies y producciones de cultivos.

Disponible en: https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/cuaderno_julio2024_tcm30-693595.pdf

Moinuddin K.S., Bansal S.K., Pasricha N.S. (2004). Influence of graded levels of potassium fertilizer on growth, yield, and economic parameters of potato. *Journal of Plant Nutrition*, 27: 239-259.

Olsen S.R., Sommers R.E. (1982). Phosphorus. En: Page *et al.* (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. SSSA. Madison, Wisconsin, EEUU.

Panique E., Kelling K.A., Schulte E.E., Hero D.E., Stevenson W.R., James R.V. (1997). Potassium rate and source effects on potato yield, quality, and disease interaction. *American Potato Journal* 74 (6): 379-398.

Pauletti V., Menarim E. (2004). Época de aplicação, fontes e doses de potasio na cultura da batata. *Scientia Agraria* 5 (1-2): 15-20.

Porta J., López-Acevedo M., Roquero C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 807 pp.

Raigond P., Sastry S. Jayanty, Vandana Parmar, Som Dutt, Sushil S. Changan, Satish Kumar Luthra, Brajesh Singh (2023). Health-Promoting compounds in Potatoes: Tuber exhibiting great potential for human health, *Food Chemistry*, Volume 424, 136368.

Reglamento (UE) 2017/2158 de la Comisión de 20 de noviembre de 2017 por el que se establecen medidas de mitigación y niveles de referencia para reducir la presencia de acrilamida en los alimentos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 304/24.

Reis R.A., Fontes P.C.R. (1996). Qualidade de tubérculos de batata em função de doses da adubação potássica. *Horticultura Brasileira*, Brasília 14 (2): 170-174.

Rhue R.D., Hensel D.R., Kidder G. (1986). Effect of K fertilization on yield and leaf nutrient concentrations of potatoes grown on a sandy soil. *American Potato Journal* 63: 665-681.

Rosas-Hernández L. (2018). Métodos de extracción de nematodos fitopatógenos. XVI Congreso Internacional y XLI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Fitopatología. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 32 (Suplemento): 32-33.

- Rouselle P., Robert Y., Crosnier J.C. (1999). La patata: producción, mejora, plagas y enfermedades, utilización. INRA. (versión española de J.M. Mateo Box). Ed. Mundi-Prensa.
- Ruiz de Galarreta Gómez J. I. (2008). Historia de la investigación de la patata en España. Tierras: Agricultura, 144: 46-48.
- Saidi, A., Hajibarat, Z. (2021). Approaches for developing molecular markers associated with virus resistances in potato (*Solanum tuberosum*). Journal of Plant Diseases and Protection, 128 (3): 649 -662.
- Singh B., Raigond P., Dutt S., Lal M.K., Jaiswal A., Changan S.S., Koundal B. (2023). Chapter: Nutrition in Potato and Its Food Products. In: Singh, B., Kalia, P. (eds) Vegetables for Nutrition and Entrepreneurship. Springer, Singapore. 179-201.
- Stark J.C., Porter G.A. (2005). Potato nutrient management in sustainable cropping systems. American Journal of Potato Research, 82: 329-338.
- Stevens R.G., Hammond M.W. (1992). What is needed and how do we maintain these resources. American Potato Journal, 69(11): 717-730.
- Torres M.D.A., Parreno W.C. (2009). Thermal processing and quality optimization. Advances in potato chemistry and technology.
- Urbano-Terrón, P. (2015). Tratado de fitotecnia general. Ediciones Mundi-Prensa, 2ª edición.
- Van Lierop W., Trans T.S., Bauville G. (1982). Effect of liming on potato yield as related to soil pH, Mn, Al, Ca. Agronomy Journal, 74: 1050-1054.
- Van der Zaag, D.E. (1987). La patata y su cultivo en los Países Bajos. Ministerio de Agricultura y Pesca. La Haya. Holanda.
- Westermann D.T., James D.W., Tindall T.A., Hurst R.L. (1994b). Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: sugars and starch. American Potato Journal, 71: 433-453.
- Zaheer K., Akhtar M.H. (2016). Potato production, usage, and nutrition—a review. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 56(5): 711-721.