

**EFICIENCIA DEL USO DE NITRÓGENO EN LA
PRODUCCIÓN DE CEBADA (*HORDEUM VULGARE*
L.) MEDIANTE AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN
PINTAG, QUITO, ECUADOR.**

**NITROGEN USE EFFICIENCY IN BARLEY (*HORDEUM*
VULGARE L.) PRODUCTION USING PRECISION
AGRICULTURE IN PINTAG, QUITO, ECUADOR**

Recibido: 30/ 07/ 2025 - **Aceptado:** 11/11/2025

Jairo Benjamín Lema Paredes

Postulante al programa de Doctorado de Ciencias Agrarias de la Universidad de
Murcia
Murcia-España

Magister en Agronomía con mención en Producción Agrícola Sostenible en la
Universidad Politécnica Estatal del Carchi.

jlema724@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0008-7650-5167>

Leticia Janneth Rosero Reina

Estudiante Doctorado en Educación de la Universidad Católica Andrés Bello.
Caracas-Venezuela

Magister en Agronomía con mención en Producción Agrícola Sostenible en
la Universidad Politécnica Estatal del Carchi. Ingeniera en Desarrollo Integral
Agropecuaria de la Universidad Politécnica Estatal del Carchi

leticiajannethroseroreina@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-8371-0052>

Julio Jairo Peña Chamorro

Docente en la Universidad Politécnica Estatal Del Carchi
Tulcán – Ecuador

Magister en Administración de la construcción, en la Universidad De Las Fuerzas
Armadas (ESPE)

julio.penia@upec.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0510-8590>

Cómo citar este artículo:

Lema, J., Rosero, L., & Peña, J, (Enero – diciembre 2025). Eficiencia del uso de nitrógeno en la producción de cebada (*Hordeum vulgare* L.) mediante agricultura de precisión en Pintag, Quito, Ecuador. *Tierra Infinita* (11), 30 – 50. <https://doi.org/10.32645/26028131.1412>



Resumen

En Ecuador la industria cervecera depende de la disponibilidad de cebada como materia prima para su cadena de producción, sin embargo, la producción nacional no cubre la demanda, siendo necesaria la importación de esta. El objetivo fue aplicar técnicas de AP para mejorar la eficiencia en el uso del N proveniente de la urea en la producción de cebada. El estudio se realizó en Pintag, entre septiembre 2024 y febrero 2025. Se utilizó la variedad INIAP Cañicapa 2003. La siembra fue al voleo con una densidad de 110 kg ha^{-1} , utilizando diseño de AP similar al de una malla de parcelas, estas fueron distribuidas en función a los puntos georreferenciados con el GPS, en cuatro réplicas (bloques), con seis parcelas por réplica, con distinto número de parcelas recibiendo los tratamientos en las hileras. Dentro de cada repetición una columna recibió los tratamientos de fertilización nitrogenada (60, 90, y 120 kg N ha^{-1}) (N1) y la otra columna no (N0). Con los resultados obtenidos se demostró que la interacción entre biomasa del cultivo y el manejo de la fertilización condiciona la distribución del N en el suelo. En consecuencia, la aplicación de fertilización sitio-específica, ayuda a optimizar la eficiencia del uso del N y reducir las pérdidas por lixiviación o acumulación excesiva, en lo referente a producción de grano fue relativamente mayor en la cebada fertilizada que en la no fertilizada (3.1 t ha^{-1} y 2.7 t ha^{-1} , respectivamente), aunque esa diferencia no fue significativa ($p = 0,111$).

Palabras clave: cebada, fertilización nitrogenada, agricultura de precisión, nitrógeno, producción.

Abstract

In Ecuador, the brewing industry relies on the availability of barley as a raw material for its production chain; however, national production does not meet the demand, making imports necessary. The objective was to apply AP techniques to improve the efficiency in the use of N from urea in barley production. The research was conducted in Pintag, from September 2024 to February 2025, using the INIAP Cañicapa 2003 variety. The crop was sown by broadcasting at a seeding rate of 110 kg ha^{-1} , employing a PA-based design similar to a grid of plots. These were distributed based on georeferenced GPS points across four replicates (blocks), each containing six plots, with varying numbers of plots receiving treatments along the rows. Within each replicate, one column received nitrogen fertilization treatments (60, 90, and 120 kg N ha^{-1}) (N1), while the other column did not (N0). The results showed that the interaction between crop biomass and fertilization management affects nitrogen distribution in the soil. Consequently, site-specific fertilization helps optimize nitrogen use efficiency and reduce losses due to leaching or excessive accumulation. In terms of grain yield, fertilized barley performed relatively better than unfertilized barley (3.1 t ha^{-1} and 2.7 t ha^{-1} , respectively), although this difference was not statistically significant ($p = 0.111$).

Keywords: Barley, nitrogen fertilization, precision agriculture, nitrogen, production

Introducción

Por el nivel de producción, la cebada (*Hordeum vulgare* L.) es el cuarto cereal de importancia a nivel mundial después del trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz (*Zea mays* L.), y arroz (*Oryza sativa* L.) (Farag, et al., 2022). En Ecuador constituye un alimento básico de los campesinos, ocupando así el tercer lugar después de maíz y arroz dentro de los cereales con mayor producción, entre las zonas andinas más productoras tenemos a Chimborazo Cotopaxi Carchi, y Pichincha. Donde el 40% se destina para la producción de cerveza mientras que el 60% restante se destina para alimentación humana como la elaboración de subproductos como harinas, machica, grano pelado o arroz de cebada y para alimento para animales (Ponce, et al., 2022).

En la actualidad a nivel nacional la superficie dedicada al cultivo de cebada es de 11.115 hectáreas con una producción anual de 14.107 toneladas. Entre tanto que las importaciones alcanzaron las 37 mil t año⁻¹ (Ponce, et al., 2020). Este es un factor fundamental para la industria cervecera ya que depende directamente de la disponibilidad de cebada como materia prima para su cadena de producción. Para reducir estas importaciones, desde el 2024 el Ministerio de Agricultura, Ganadería, junto con cervecería nacional afianzaron su apuesta por el programa Siembra por Contrato, con este programa más de 20.000 hectáreas serán sembradas con cebada maltera hasta 2030, en todo el país, generando alrededor de 175.000 empleos en el campo. Esto permitirá sustituir las importaciones de cebada que demanda la industria cervecera, por producción nacional (MAG, 2024).

Ponce, et al., (2022) manifiestan que los cereales se cultivan en las tierras altas de la región interandina del Ecuador (sobre los 2000 metros de altitud), son zonas que se caracterizan por tener suelos erosionados de baja fertilidad y acidez, lo que causa directamente una disminución en los rendimientos de estos cultivos. Por tanto, se necesita de un correcto plan de fertilización para que pueda suplir los requerimientos nutricionales del cultivo y mejorar la producción. En los cereales el N es el elemento más limitante en cuanto a la producción sobre todo en las etapas de mayor demanda que son el ahijado y el encañado La fertilización nitrogenada (FN) es uno de los factores más importantes en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de cereales. La disponibilidad de N para la planta es indispensable por ser un componente básico de las moléculas orgánicas involucradas en el crecimiento y desarrollo vegetal (López, et al. 2020). Debido a la alta movilidad del N en el suelo y su constante transformación en sus formas químicas, la eficiencia en el uso del N que se aporta como fertilizante es la más baja en comparación con fertilizantes que aportan otros nutrientes (Morales, et al., 2019).

Garófalo (2012) encontró que la cebada extrae 20 kg N t⁻¹ de grano producido; pero otros trabajos reportan extracciones de 27 kg N t⁻¹ (Lazzari, et al., 2001) y 32 kg N t⁻¹ (García, et al, 2009). Además, una FN igual o superior a los 100 kg N ha⁻¹ ayuda a mejorar el contenido proteico del grano (Caviades, et al., 2018). Esto es bueno si la cebada se utiliza para la alimentación humana o animal. Sin embargo, se debe evitar altas aplicaciones de N porque hay una disminución en la eficiencia de uso del fertilizante con dosis iguales o superiores a 120 kg N ha⁻¹ (Larios, et al., 2021). Además, la excesiva FN puede resultar en un grano de menor calidad para la industria cervecera, donde se prefiere contenidos de proteína menores a 13.5% y contenidos de carbohidratos altos para tener una mayor eficiencia (alcohol producido) en el proceso de fermentación (Contreras, et al., 2008).

En Ecuador, la mayoría de los agricultores aplica N con base en un conocimiento empírico o manuales de fertilización en los que no se consideran las variables agroclimáticas. Son pocos los que hacen análisis de suelo previo al establecimiento del cultivo y cuando lo hacen, toman una sola muestra que representa a toda el área de siembra, sin considerar la variabilidad espacial y temporal del suelo (Peralta,

et al., 2015). Esto resulta en uso deficiente de los fertilizantes, pues en algunas áreas se hace una sobre fertilización y en otras una sub-fertilización.

A partir de las últimas décadas se ha impulsado el desarrollo y la utilización de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) y los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) que dieron lugar al surgimiento de la Agricultura de Precisión. La AP basa su aplicación en la variabilidad espacial y temporal del cultivo y el suelo, con lo que se hace una aplicación heterogénea de insumos, pero más eficiente en términos ambientales y productivos (Peralta, et al., 2015). Sin embargo, la utilización de AP en Ecuador es limitada, esto se debe a la falta de información técnica sobre herramientas de AP y por el poco acceso a equipo de mapeo debido a su costo elevado (Rodrigo et al., 2010). Ante este panorama, la FN en cebada no se realiza con base en la variabilidad espacial del suelo, y por eso se hacen aplicaciones uniformes de fertilizante a todo el campo de producción, lo que resulta en una producción heterogénea y por debajo de los niveles esperados (INIAP, 2011). Por eso, el objetivo de esta investigación fue aplicar técnicas de AP para mejorar la eficiencia en el uso del N proveniente de la urea en la producción de cebada.

Materiales y métodos

Localización

Esta investigación se desarrolló en la parroquia Pintag, cantón Quito, provincia de Pichincha, Ecuador. El sitio experimental se encuentra a 2830 msnm, a una Longitud: 0°22'39"S y una Latitud: 78°23'33"O. El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI 2023) indica que esta zona se caracteriza por tener un clima de tipo templado frío, con una temperatura media de 14 °C y una precipitación anual de 1300 mm. El periodo de lluvia por lo general es entre los meses de octubre y mayo, aunque los cambios climáticos pueden hacer que este periodo cambie año a año. La siembra del cultivo se realizó el 17 de septiembre de 2024 y la cosecha se realizó el 14 de febrero de 2025 (desde finales de la época seca hasta mediados de la época lluviosa).

Manejo del cultivo en el sitio experimental.

Para esta investigación se seleccionó la variedad de cebada INIAP Cañicapa 2003, al ser esta una de las variedades más utilizadas para la producción de cerveza en Ecuador (Cervecería Nacional – CN y el MAG). En el sitio experimental se sembró cebada de la misma variedad previo al establecimiento de esta investigación, cultivo al que solo se le aplicó una dosis uniforme de 150 kg ha⁻¹ del fertilizante 15⁻¹5⁻¹5 dos meses después de la siembra (una práctica común en la zona), y que fue cosechado el 31 de agosto de 2024 (se esperó dos semanas después de esa cosecha para iniciar la investigación). A pesar de que la incidencia de malezas era baja (con menos del 5% del área experimental cubierto por malezas), se hicieron dos pases de rastra pesada a 20 cm de profundidad el 15 de septiembre de 2024 (previo a la siembra) para incorporar las malezas y no fue necesario aplicar herbicidas para este control. La siembra se realizó al voleo el 16 de septiembre, para lo cual se utilizó un estimado de semilla de 110 kg ha⁻¹. Se hizo un pase de rastra liviana a 5 cm de profundidad para cubrir la semilla.

Por sugerencia de los agricultores de la zona y con base en antecedentes históricos de la producción de cebada en la zona de cultivo, dos meses después de la siembra se aplicó con bomba de mochila el fungicida oxicarboxin a una dosis de 300 g 100 L⁻¹ de agua para el control de la roya (*Puccinia hordei*) de la cebada, y también se aplicó el herbicida 2, 4-D éster en dosis de 400 mL ha⁻¹ para controlar malezas de hoja ancha. La aplicación de los tratamientos de FN se hizo al voleo el 29 de noviembre de 2024 siguiendo un diseño de AP, y para lo cual se utilizó urea granulada (46% de N).

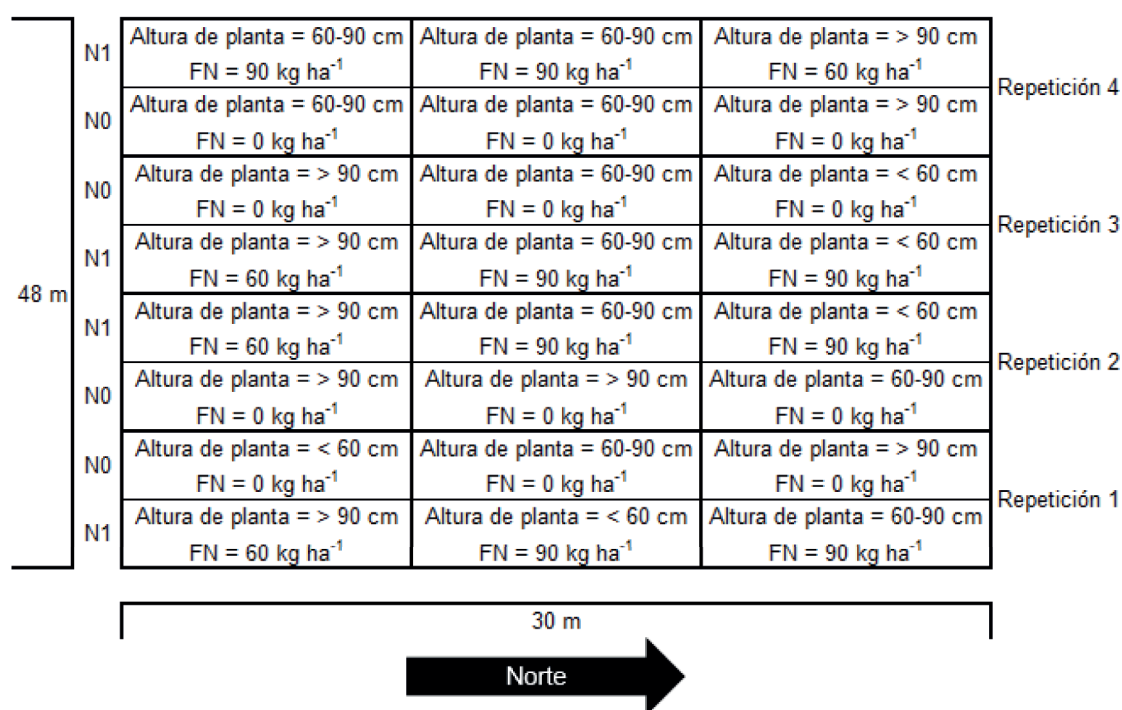
Los datos de precipitación y temperatura se recopilaron en la estación meteorológica que se localiza en la Hacienda El Prado y que administra la Carrera de Ingeniería Agropecuaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Esta estación se encuentra a 2.9 km de cada sitio experimental y es monitoreada por el INAMHI.

Diseño experimental

Se estableció el experimento de FN con base en la variabilidad nutricional del suelo y la altura de la cebada a los 70 d después de la siembra, para lo cual se siguió un diseño de AP similar al de una malla de parcelas de acuerdo con la variabilidad del campo (Gerhards et al., 2011). Se utilizó un diseño experimental de precisión según el cual las parcelas fueron distribuidas en cuatro réplicas (bloques), con seis parcelas por réplica, pero con distinto número de parcelas recibiendo los tratamientos (niveles de FN) en las hileras. Dentro de cada repetición una columna recibió los tratamientos de FN (N1) y la otra columna no (N0) (Figura 1). Al final el campo quedó dividido en 24 parcelas de 6 × 10 m (60 m²) cada una, que corresponden a las unidades experimentales.

Figura 1.

Distribución de los tratamientos de fertilización nitrogenada que se evaluaron en la producción de cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003, con el uso de agricultura de precisión. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador. 2024 – 2025. N1 = recibió fertilización nitrogenada; N0 = no recibió fertilización nitrogenada



Para las columnas que recibieron la FN, las dosis aplicadas fueron 60, 90, y 120 kg N ha⁻¹, que corresponden a los niveles de altura inicial de planta > 90, 60–90, y < 60 cm, respectivamente, de acuerdo con la variabilidad en el campo. Además, se generó una base de datos geo-referenciada utilizando el sistema de información geográfico OpenJUMP (GLP), en la que se combinaron la distribución de N inicial en el suelo, altura inicial de plantas, cobertura de plantas, dosis de FN, y producción de grano.

Muestreo inicial de suelos

El muestreo inicial del suelo se realizó el 29 de noviembre previo a la aplicación de los tratamientos de FN. Para dicho muestreo cada réplica se dividió en tres fracciones (norte-centro-sur: donde cada fracción incluyó dos parcelas). En cada fracción se recolectó seis sub-muestras de suelo de forma aleatoria y a 20 cm de profundidad. Esas sub-muestras se mezclaron y 1 kg de esa mezcla fue enviada para análisis al laboratorio de suelos de la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD).

Variables evaluadas

Se evaluaron variables antes de la cosecha (al final del crecimiento vegetativo—cuando el cultivo inició la etapa de maduración) y durante la cosecha. Antes de la cosecha las variables evaluadas incluyeron: altura de planta, y número de granos por planta. En la cosecha en cambio se evaluó la producción de grano, producción de biomasa (rastrojo), el contenido de proteína en el grano y el análisis final del contenido de N en el suelo después de la cosecha.

La altura de planta se determinó en 10 plantas de cada parcela tomadas al azar. Para ello se midió desde la superficie del suelo hasta la punta de la última hoja completamente desarrollada. Para el número de granos por planta se evaluó en las mismas plantas en las que se midió la altura. Para ello hizo un conteo del número de granos en la espiga de la planta.

Para evaluar la producción de grano y biomasa se recolectaron de forma manual y aleatoria tres sub-muestras de 1 m² en cada parcela (3 m² en total). Para ello, se cortó la cebada a nivel del suelo y las tres sub-muestras se juntaron en una sola. Las muestras recolectadas se secaron a temperatura ambiente por 10 días, para luego separar el grano de la biomasa de forma manual. El grano recolectado se volvió a secar a temperatura ambiente hasta alcanzar una humedad estable de cerca del 10%. El grano que se obtuvo de cada parcela se pesó y el resultado fue corregido para obtener la producción en t ha⁻¹. La biomasa también fue pesada y corregida para obtener la producción en t ha⁻¹.

Para el análisis del contenido de proteína se tomó una muestra de 20 g de grano de cada parcela, la cual fue analizada en el laboratorio de bromatología de AGROCALIDAD. Aquí las muestras de grano se secaron otra vez a 60 °C por 48 h con circulación permanente de aire y luego se molieron. En el análisis, primero se determinó el contenido de N mediante el método Kjeldahl, y el valor obtenido se multiplicó por un factor de 6.25 para estimar el contenido de proteína.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el software R3.2.3 “Wooden Christmas-Tree”, ©2015, The R Foundation for Statistical Computing. El análisis de las variables se hizo utilizando un modelo lineal mixto y se añadieron efectos de la unidades de aleatorización (parcela de tratamiento a una determinada altura inicial). El efecto sobre la producción de grano de aplicar una FN de acuerdo con la variabilidad espacial de altura de planta se analizó incluyendo covariables como contenido inicial de N, la altura inicial, y cobertura inicial como variables fijas. Los efectos de cada nivel de FN (0, 60, 90, y 120 kg N ha⁻¹) dentro de una misma altura inicial y dentro de la columna tratada en una misma repetición se consideraron como variables aleatorias del modelo. El modelo estadístico general fue [Ecuación 1]:

$$y_{ijk} = \mu + \beta_{ijk}(\omega_{ij}) + \epsilon_{ij}$$

Donde y es la producción de grano en t ha⁻¹, i es la repetición, j es el indicador de la columna de los tratamientos, k es el indicador de la altura inicial de planta, μ es el intercepto (promedio estimado de

producción de grano en $t\ ha^{-1}$), β es el efecto de los tratamientos: N1 y N0 (aplicación y no aplicación de FN, respectivamente), ω_{ij} es el efecto anidado de la altura inicial de planta dentro de las columnas sin FN en cada repetición; y ε es el efecto residual del experimento, incluyendo los efectos aleatorios de las alturas iniciales de planta.

Para el análisis de este modelo se usó el paquete NLME en R3.2.3 y las diferencias entre los factores N1 y N0 se verificaron con el método de media de mínimos cuadrados (LSM) con el paquete LSMEANS de R3.2.3 y utilizando un nivel de significancia del 5% ($p \leq 0.05$). Las variables altura de planta y producción de rastrojo se evaluaron como covariables de efectos fijos en la Ecuación [1], para determinar sus efectos en la producción de grano y porcentaje de proteína en el grano.

Resultados y discusión

Clima

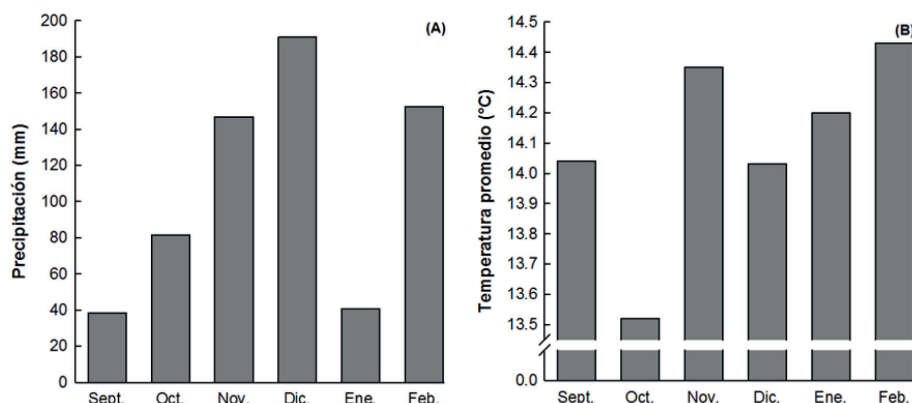
Por lo general la cebada requiere de 500–700 mm de lluvia durante el ciclo de cultivo (INIAP, 2011). En esta investigación las precipitaciones cubrieron ese requerimiento (Figura 2A). Pero cuando se presentan bajas precipitaciones se produce un lento crecimiento y desarrollo de los órganos de la planta (Khatun et al., 2021), lo que puede resultar en una menor producción y calidad del grano. Por el contrario, el exceso de lluvias, en especial si se da en la etapa de maduración, puede generar pérdidas en la producción por el acame de las plantas (Agropinos, 2023).

Según INIAP (2011), la variedad INIAP Cañicapa 2003 presenta 4 estadios fenológicos. El primero inicia con la germinación (0–8 d) y es recomendable tener una temperatura óptima de 15–21 °C. Ya en el segundo estadio del macollamiento y desarrollo (9–79 d) la cebada necesita una temperatura de 15–21 °C, con una mínima de 5–15 °C y una máxima de 25–34 °C. En el tercer estadio de espigado y llenado de los granos (80–120 d) la temperatura óptima es de 16–21 °C, y en el último estadio o madurez (121–150 d) la temperatura óptima es de 18–21 °C (Lasluisa, 2022). La temperatura promedio en esta investigación fue relativamente baja en comparación con los requerimientos del cultivo, ya que casi todo el ciclo de 14 °C, con excepción de octubre, mes que fue 1 °C más frío que el resto del ciclo del cultivo (Figura 2B).

La temperatura afecta procesos de crecimiento como formación y expansión foliar, y la tasa de asimilación de nutrientes; así como procesos de desarrollo como iniciación y formación de primordios florales, antesis y madurez. Si la temperatura no es la adecuada la planta puede sufrir de estrés y enfermedades, retraso en la germinación y crecimiento, problemas en polinización y baja calidad del grano (Pulles, 2024).

Figura 2.

Datos climatológicos del campo experimental. A) Precipitación, y B) Temperatura. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador.



Análisis inicial del suelo

El análisis inicial mostró un suelo con una textura de tipo franca, con partes iguales de limo y arena (45%) y 10% de arcilla (Tabla 1). Por lo general, los suelos con texturas francas y que no han sufrido problemas de compactación, son suelos fértiles, con una alta capacidad para retener humedad y nutrientes. Pero en climas lluviosos, las altas precipitaciones pueden resultar en lixiviación considerable de nutrientes en estos suelos (INTAGRI, 2017). El pH del sitio experimental fue ligeramente ácido, pero es considerado óptimo para la producción la cebada (Garófalo et al., 2010). Los niveles altos de materia orgánica (mayores a 5%) podrían facilitar la mineralización y disponibilidad de N en el sitio experimental; sin embargo, los productores de cebada de esta región del país acostumbran a aplicar FN (con urea y fertilizante 15-15-15) debido al clima templado frío que resulta en una descomposición lenta de la materia orgánica. El análisis también mostró concentraciones altas de P y K, por lo que estos nutrientes no se consideraron como factores de evaluación en esta investigación y no se necesitó realizar fertilizaciones correctivas para suplirlos.

Tabla 1.

Promedio del análisis inicial de suelo antes de la aplicación de los tratamientos de fertilización nitrogenada utilizando agricultura de precisión en cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003.

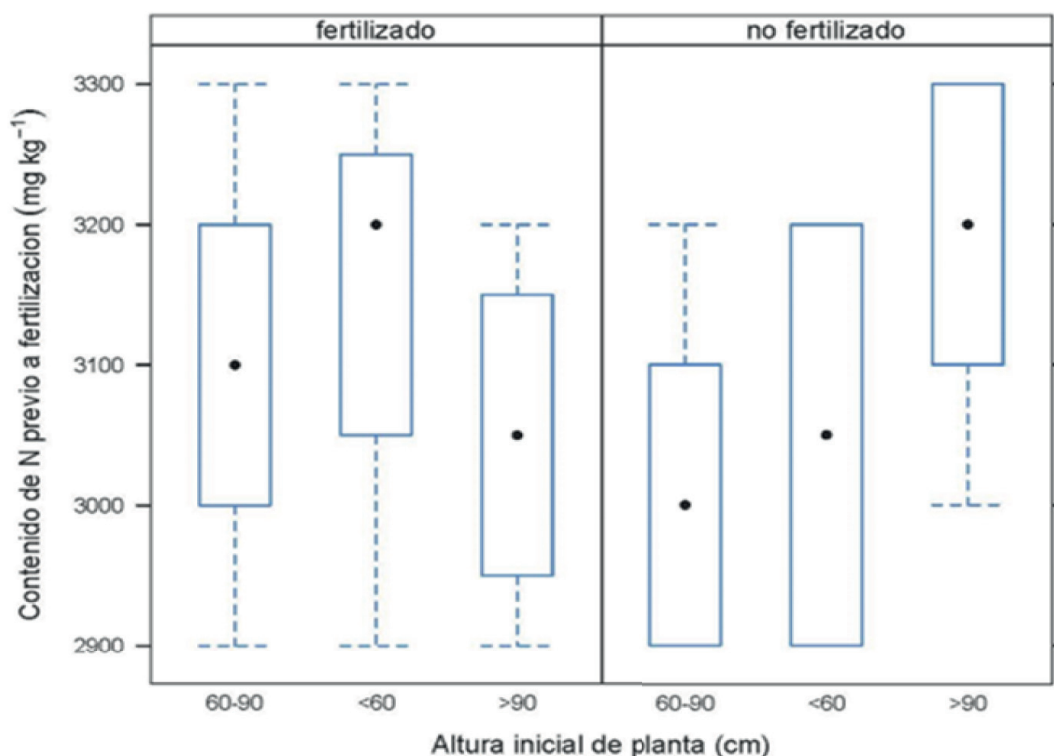
Ph	Materia orgánica	N	P	K	Textura
	----- % -----		----- mg kg-1 -----		
6.0	6.18	0.31	23	384	Franca
Rangos óptimos†					
5.8 – 6.5	3.0 - 3.5	0.20 - 0.30	11 - 20	80 - 160	--

† Rangos óptimos que maneja la Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro (AGROCALIDAD), institución rectora de la Red de Laboratorios de Suelos del Ecuador (RELASE).

Con respecto al contenido de N en el suelo, se observó que los contenidos totales de este elemento fueron altos, lo que se debe al alto contenido de materia orgánica (Figura 3). Sin embargo, se sabe que en suelos de climas templado-frío la descomposición de la materia orgánica es relativamente lenta, por lo que la disponibilidad de N proveniente de los residuos orgánicos del suelo es limitada y puede ocasionar deficiencias nutricionales en el cultivo. Esto resulta la aplicación de FN en este tipo de suelos para mantener o mejorar las producciones óptimas. Además, la distribución del contenido de N en el suelo es relativamente homogénea en el campo experimental, lo que indica que las diferencias de altura inicial de las plantas pueden deberse no solo a la disponibilidad del N, sino también a factores agroclimáticos como la distribución de la humedad del suelo (León et al., 2018).

Figura 3.

Contenido de nitrógeno (mg kg^{-1}) en el suelo previo a la aplicación de los tratamientos de fertilización nitrogenada en cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003.



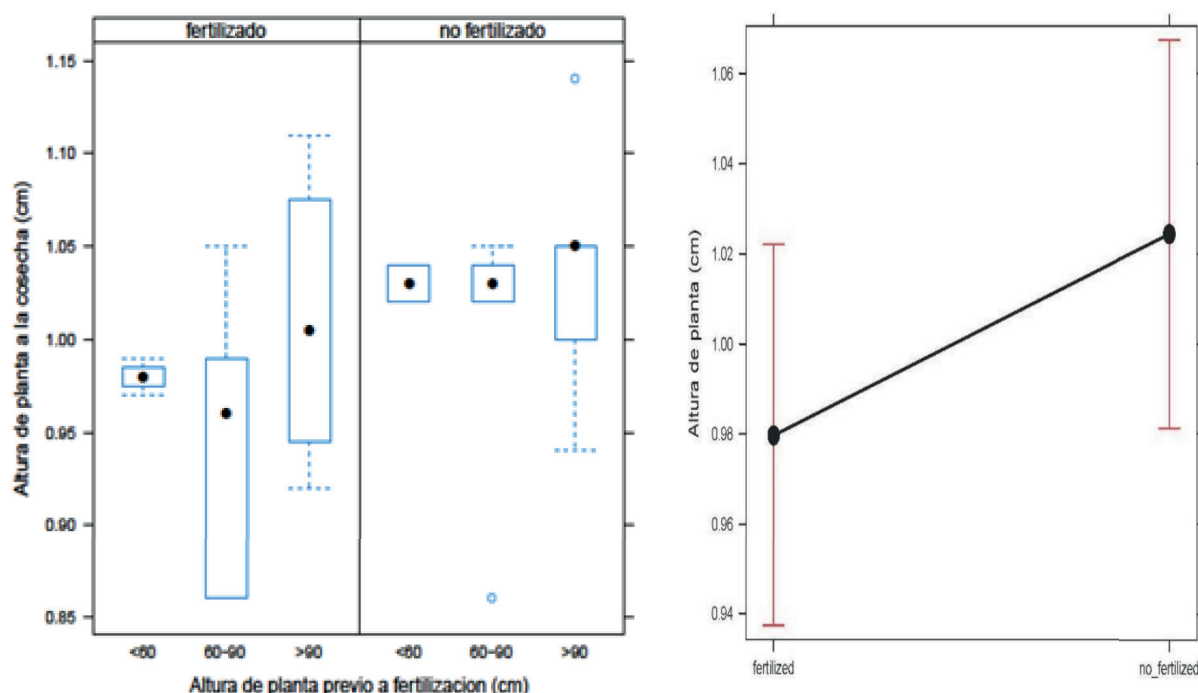
Altura de planta

La altura de la cebada suele ser una variable que depende de la genética del cultivo (variedad), el ambiente, y el manejo. Además, esta variedad se correlaciona con el número de hojas de la planta. Aunque en esta investigación hubo una leve tendencia a que las plantas que no recibieron FN sean más altas que las que si recibieron FN, esta diferencia no fue significativa y por tanto la FN no afectó la altura de planta previo a la cosecha ($p = 0,725$) (Figura 4). Un factor que pudo resultar en la falta de efecto de la FN en la altura de la planta es la alta precipitación que se presentó en el sitio experimental en el mes de diciembre (pocos días después de haber aplicado los tratamientos de FN), lo que pudo ocasionar lixiviación de N (Pantoja, 2014). Por situaciones como esta y para reducir las pérdidas de N se recomienda fraccionar la FN en al menos dos aplicaciones (siembra e inicio del macollamiento) (Pérez et al., 2016). Esto suena viable, pero

por temas de costo y manejo del cultivo muchos agricultores prefieren hacer una sola aplicación algunas semanas después de la siembra. En cambio, (Acan 2022) recomienda que la FN puede incrementarse en zonas lluviosas para mantener altos niveles de producción de cereales, pero para hacerlo hay que evaluar el costo adicional del fertilizante y su efecto en la rentabilidad neta de la producción.

Figura 4.

Altura de planta como resultado de la fertilización nitrogenada utilizando agricultura de precisión y previo a la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003. La primera parte (izquierda) muestra los resultados de acuerdo con la altura inicial de las plantas, y la segunda parte (derecha) compara los promedios entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas.

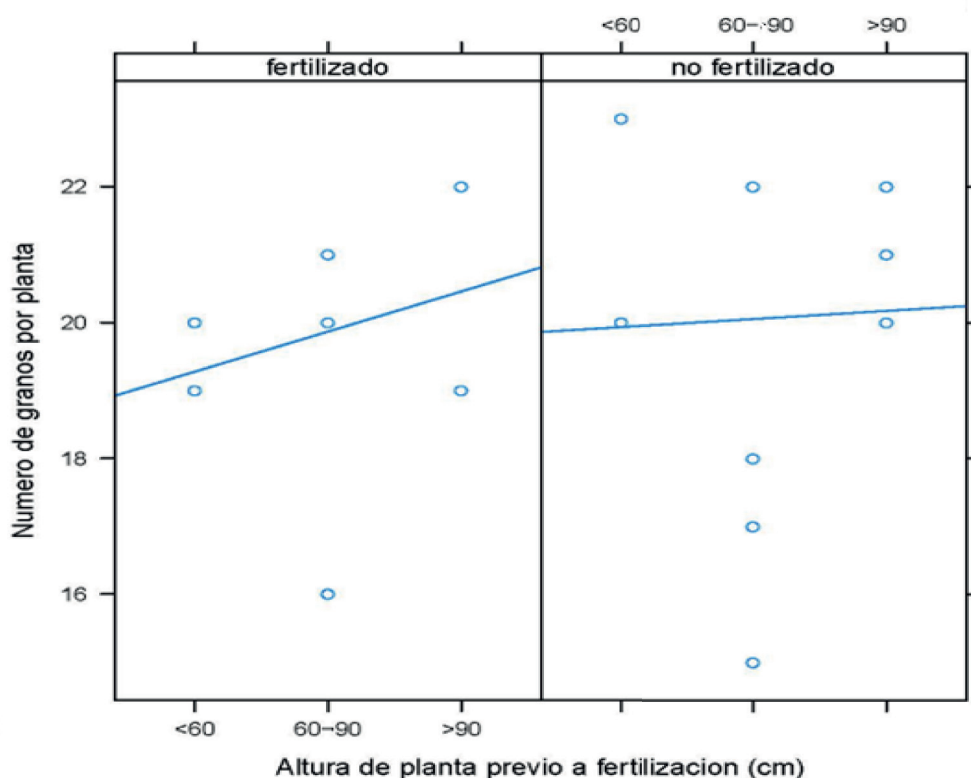


Numero de granos por planta

La variable número de granos por planta no fue afectada por la aplicación de urea ni por la falta de fertilización ($p = 0,836$). Se esperaba que la aplicación de FN resultara en un mayor número de granos en comparación con las parcelas que no recibieron esa fertilización, pero esto no ocurrió. De acuerdo con Moreno, et al. (2003) la aplicación de riego y las precipitaciones pueden influir en la eficiencia de la FN en la producción de grano, algo que pudo ocurrir en esta investigación. Sin embargo, se observó una tendencia esperada que se correlaciona con la altura inicial de planta previo a la aplicación de tratamientos de FN. Esta tendencia se refiere a que existieron más granos por planta a medida que la altura inicial de planta incrementaba. Esto puede suponer un efecto mínimo de la FN e indica un posible incremento en el aprovechamiento de N por las plantas de cebada a medida que la altura aumentaba (Figura 5).

Figura 5.

Número de granos por planta como resultado de la fertilización nitrogenada utilizando agricultura de precisión y previo a la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003. La primera parte (izquierda) muestra los resultados de acuerdo con la altura inicial de las plantas, y la segunda parte (derecha) compara los promedios entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas.

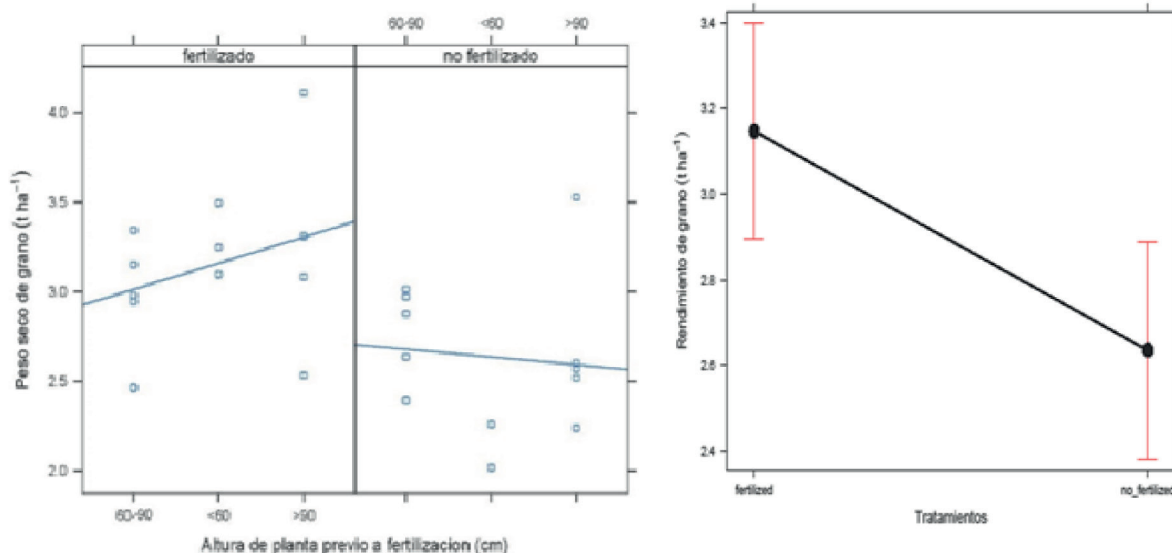


Producción de grano

La producción de grano fue relativamente mayor en la cebada fertilizada que en la no fertilizada (3.1 t ha^{-1} y 2.7 t ha^{-1} , respectivamente), aunque esa diferencia no fue significativa ($p = 0,111$) (Figura 6). Producciones mayores a 1 t ha^{-1} no son comunes en Ecuador, ya que para muchos agricultores la cebada es un cultivo de subsistencia (Ponce, et al., 2022). Los pequeños agricultores por lo general obtienen producciones menores a 1 t ha^{-1} , en cambio los agricultores que tecnifican el cultivo llegan a obtener 3.0 t ha^{-1} (Gadvay, et al., 2024). Sin embargo, estos niveles de producción siguen siendo bajos si se compara con la producción que se obtiene por ejemplo en México con aplicaciones FN de 120 kg N ha^{-1} y con el uso de sistemas de riego, donde se obtienen más de 7.0 t ha^{-1} (Báez, et al., 2012). En esta misma línea Moreno, et al. (2003) destacan que el mejor rendimiento se da a una dosis de 120 kg N ha^{-1} dosis mayores a esta no debe superarse debido a que no beneficia al cultivo y supone un riesgo de contaminación para el medio ambiente. En Ecuador, la falta de tecnificación del cultivo ocasiona bajos niveles de producción, mientras que en países desarrollados el uso de riego y dosis óptimas de fertilización, en especial la FN, resultan en niveles de producción mayores a 5.0 t ha^{-1} (Castañeda, et al. 2009).

Figura 6.

Producción de grano como resultado de la fertilización nitrogenada utilizando agricultura de precisión y previo a la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003. La primera parte (izquierda) muestra los resultados de acuerdo con la altura inicial de las plantas, y la segunda parte (derecha) compara los promedios entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas. Pintag, Quito, Pichincha, Ecuador.



Además, los datos de producción seca de grano fueron descritos por la Ecuación [1] en forma adecuada usando el método Restricted maximum likelihood, con un Criterio de información de Akaike (AIC) de 39. Los resultados mostraron que, si no se realiza una fertilización de precisión, se puede tener una pérdida de producción de hasta 0.5 t ha^{-1} (Tabla 2). Los datos no mostraron signos de autocorrelación y el efecto aleatorio de los niveles de urea aplicados, basados en la altura inicial de planta dentro de la columna tratada (N1), evitaron un error estimado de 0.23 t ha^{-1} . Sin embargo, los intervalos de confianza de los LSM se superponen, indicando que no existe una diferencia significativa entre los tratamientos, pero sí una clara tendencia en la reducción de la variabilidad en la cosecha individual de cada parcela tratada, es decir, homogeneidad de cosecha en todo el campo tratado (Figura 6).

Los niveles de urea, aunque incrementaron en cantidad usada, no se esperaba que incremente la dosis de N como ocurre en experimentos de dosificación. La aplicación de fertilizantes con tecnología de precisión busca reducir la variabilidad en la producción en campo, corrigiendo donde había deficiencias con más altas dosis y no desperdiciando fertilizante en las parcelas con mayor contenido de N inicial. Este mayor contenido inicial se asumió visible en plantas de cebada de mayor altura promedio por parcela. En suma, se buscaba obtener una mayor y uniforme producción y disminuir la FN utilizada en el campo experimental. Las covariables contenidos de N inicial en el suelo, altura inicial de plantas, cobertura de plantas no mostraron ningún efecto en la producción ($p > 0.05$), con lo cual se comprobó que el criterio para definir los niveles de urea aplicados fue adecuado (ej., aplicar una mayor dosis de fertilizante en plantas de menor altura y viceversa).

Tabla 2.

Mínimos cuadrados promedio (LSM) de producción entre las parcelas fertilizadas (N1) y no fertilizadas (N0), con el error estándar (SE), grados de libertad (GL) y los intervalos de confianza al 95% (95%-CI).

Tratamiento	LSM	SE	GL	95%-CI
N0	2,61	0.125	3	2.74–3.54
N1	3,14	0.127	3	2.23–3.04

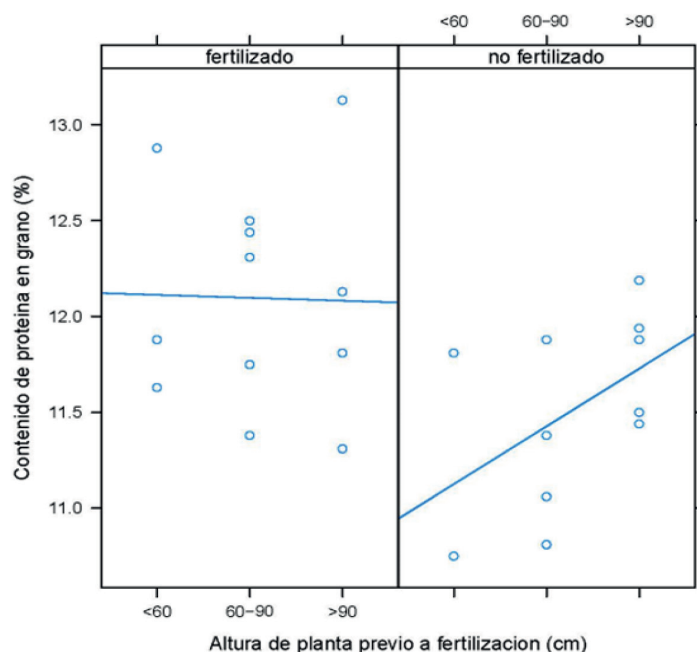
Contenido de proteína en el grano

El contenido de proteína en el grano fue afectado por la FN ($p < 0.001$). Las parcelas fertilizadas mostraron un contenido proteico promedio de 12.1 ± 0.18 , mientras que las no fertilizadas presentaron un contenido proteico promedio de 11.5 ± 0.18 . En las parcelas fertilizadas el contenido proteico en el grano fue relativamente homogéneo, mientras que en las parcelas sin fertilizar el contenido proteico incrementó a medida que se incrementó la altura inicial de la planta (Figura 7). Lauric, et al., (2015) quienes evaluaron el efecto de la fertilización nitrogenada en el cultivo de cebada indican que aplicaciones tempranas de nitrógeno pueden incrementar el rendimiento y disminuir el contenido proteico debido a la relación inversa entre proteína y rendimiento. Para obtener un contenido proteico entre el 10 y el 12% (deseable en las malterías) se debe disponer aproximadamente $22 \text{ kg N t grano}^{-1}$. Los resultados indican que al fertilizar el cultivo con técnicas de precisión se homogeniza la eficiencia en el uso de los nutrientes, mientras que al no fertilizar las plantas más altas serán más eficientes en la asimilación de nutrientes, en este caso del N.

Figura 7.

Contenido de proteína en el grano como resultado de la fertilización nitrogenada utilizando agricultura de precisión y previo a la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003. La primera parte (izquierda)

muestra los resultados de acuerdo con la altura inicial de las plantas, y la segunda parte (derecha) compara los promedios entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas.



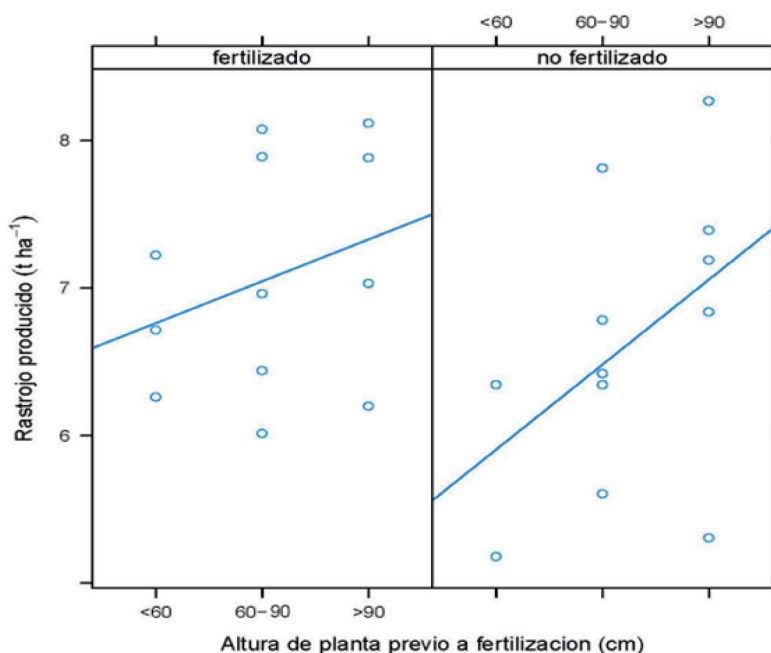
Producción de rastrojo

Al igual que la variable número de granos por planta, la producción de rastrojo o biomasa no respondió a la aplicación de urea ni a la falta de fertilización ($p = 0,876$). A pesar de ello, se pudo observar una tendencia esperada que se correlaciona con la altura inicial de planta antes de la aplicación de tratamientos de FN. Esta tendencia indica una mayor producción de rastrojo con el aumento de la altura inicial de la planta. Este resultado indica un efecto mínimo de la FN y un posible incremento en el aprovechamiento de N por las plantas de cebada a medida que la altura aumentaba (Figura 8). Para Lacasta, et al. (2007), las mejores densidades de siembra de cebada son de 80–160 kg ha⁻¹; a medida que aumenta la densidad aumenta la producción de biomasa pero no necesariamente la producción de grano. Por eso, si el agricultor está interesado en producir biomasa para alimentar ganado o para la generación de biocombustibles debe aumentar la densidad de siembra. Al contrario que con el grano, un aumento en la densidad de siembra no afecta el valor nutritivo del forraje (Aroni, et al., 2024). Aunque la producción de biomasa de la cebada varía de 1.0–6.0 t ha⁻¹, cuando la densidad de siembra de la var. INIAP Cañicapa 2003 es de 110–135 kg ha⁻¹ se logran producciones de biomasa mayores a 5.0 t ha⁻¹ (INIAP, 2011).

Figura 8.

Producción de rastrojo como resultado de la fertilización nitrogenada utilizando agricultura de precisión y previo a la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003. La primera parte (izquierda) muestra los

resultados de acuerdo a la altura inicial de las plantas, y la segunda parte (derecha) compara los promedios entre las parcelas fertilizadas y no fertilizadas.



Contenido de N (mg kg^{-1}) después de la fertilización durante la cosecha.

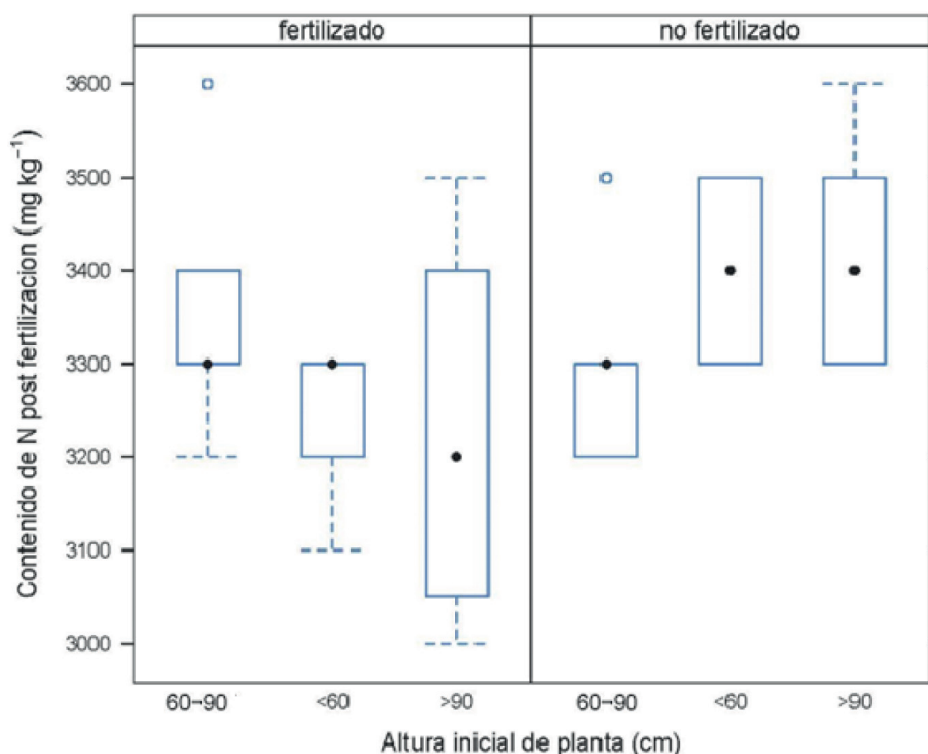
En la Figura 9 se presenta la relación entre el contenido de nitrógeno (N) en el suelo, medido después de la fertilización, y la altura inicial de las plantas de cebada, bajo condiciones con y sin aplicación de FN. Se observa que, en las parcelas con FN, las plantas con mayor altura (> 90 cm) mostraron una mayor variabilidad en los niveles de N residual, acompañada de una mediana más baja, lo cual sugiere una mayor extracción del nutriente por parte de plantas con mayor desarrollo vegetativo. Por el contrario, las plantas en el rango de 60–80 cm presentaron concentraciones más elevadas y homogéneas, lo que podría indicar una mejor sincronía entre la demanda del cultivo y la disponibilidad de N. En el grupo de menor altura (<60 cm), el contenido de N fue más bajo y con poca dispersión, posiblemente debido a una limitada capacidad de absorción o una menor actividad metabólica.

En las parcelas no fertilizadas, el patrón fue distinto. Se evidenció una mayor estabilidad en los niveles de N entre los diferentes rangos de altura, con medianas incluso superiores a las del tratamiento fertilizado. Esto podría estar relacionado con una mineralización del nitrógeno orgánico del suelo, o con una menor absorción de N por parte de las plantas, lo que resultó en una acumulación del nutriente en el perfil superficial. Las plantas más altas (>90 cm) en este tratamiento también mostraron los niveles más

altos de N, lo cual indicaría una mayor eficiencia en la exploración del suelo y absorción del N disponible de forma natural.

Figura 9.

Contenido de nitrógeno en el suelo como resultado de la aplicación de tratamientos de fertilización nitrogenada durante la cosecha de la cebada, variedad INIAP Cañicapa 2003.



Conclusiones

Los resultados de esta investigación evidencian que la interacción entre la biomasa del cultivo y el manejo de la fertilización influye en la distribución del nitrógeno en el suelo. En este contexto, la altura inicial de las plantas se presenta como un criterio útil para diseñar estrategias de fertilización sitio-específica, lo que permite optimizar la eficiencia del uso del nutriente y reducir pérdidas por lixiviación o acumulación. Ya en la parte de la producción de grano fue relativamente mayor en las plantas fertilizadas ($3,1 \text{ t ha}^{-1}$) en comparación con las no fertilizadas ($2,7 \text{ t ha}^{-1}$), aunque sin significancia estadística ($p = 0,111$). El contenido de proteína del grano se mantuvo entre 11% y 12%, dentro del rango ideal para la producción de cerveza.

Recomendaciones

Se recomienda continuar investigando la relación entre biomasa del cultivo y manejo de la fertilización, dada su influencia directa en la eficiencia del uso del nitrógeno. Es importante replicar este estudio en diferentes ciclos agrícolas y zonas productoras del país, con el fin de obtener resultados más representativos. Además, se sugiere explorar alternativas sostenibles como el uso de fertilizantes orgánicos y bioinsumos, para evaluar su impacto tanto en la productividad del cultivo como en la salud del suelo.

Referencias

- Acan, C. (2022). Evaluación de tres dosis de nitrógeno en el rendimiento de tres variedades de cebada maltera (*Hordeum vulgare* L.), en la estación experimental Tunshi. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba. Disponible en: <https://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/17456>
- AGROPINOS. (2023). El impacto de la prolongación de las temporadas de lluvias en la agricultura: retos y oportunidades. [En línea]. Disponible en: <https://www.agropinos.com/blog/impacto-de-la-lluvia-en-el-invernadero>
- Aroni, Y., Arias, M., Curasma, J., Cordero, A., Vilcapaza, L., Contreras, J., & Mayhua, J. (2024). “Tiempos de cosecha sobre el valor nutritivo del forraje verde hidropónico de cebada”. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*. [En línea]. (Perú). Volumen 35 No 5. ISSN: 1609-9117. pp. 1-15. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/rivep/v35n5/1609-9117-rivep-35-05-e25129.pdf>
- Báez, A., Arreola, J., Triomphe, B., Bautista, A., & Licea, P. (2012). “Implementación de la siembra directa para producción de cebada maltera en el estado de Guanajuato”. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. [En línea]. (México). Volumen 3 No 8. ISSN: 2007-0934. pp. 1509-1519. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n8/v3n8a3.pdf>
- Castañeda, M., Castañeda, C., Colinas, T., Molina, J., & Hernandez, A. (2009). “Rendimiento y calidad de la semilla de cebada y trigo en campo e invernadero”. *Interciencia*. [En línea]. (Venezuela). Volumen 24 No 4. ISSN: 0378-1844. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000400013
- Caviedes, M., Gangotena, D., Albán, M., León, A., & Pantoja, J. (2018). “Primer Simposio de Suelos y Nutrición de Cultivos”. Archivos Académicos USFQ. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/341169071_Primer_Simposio_de_Suelos_y_Nutricion_de_Cultivos
- Contreras, E., Jaimez, J., Hernández, T., Añorve, J., & Beltrán, R. (2008). “Composición química de cebadas cultivadas bajo diferentes condiciones de labranza en tres localidades del estado de Hidalgo, México”. *Bioagro*. [En línea]. (México). Volumen 20 No 3. ISSN: 1316-3361. Disponible en: https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000300007
- Gadvay, A., Aynaguano, M., Peralta, M., Lindao, V., & Suarez, A. (2024). “Características socioeconómicas de los productores de cebada maltera en la región de Chimborazo, Ecuador”. *Perfiles*. [En línea]. (Ecuador). Volumen 13 No 3. ISSN: 2477-9105. pp. 1-10. [Consulta 2025-04-10]. Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/perfiles/v1n31/2477-9105-perfiles-1-31-00006.pdf>
- García, P., Lucena, J., Ruano, S., & Nogales, M. (2009). “Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. Parte I—El suelo, los nutrientes, los fertilizantes y la fertilización.”. [En línea]. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/agricultura/publicaciones/01_fertilizacion-baja-.pdf

- Gerhards, R., Gutjahr, C., Weis, M., Keller, M., Sokefeld, M., Mohring, J. & Piepho, H. (2011). Using precision farming technology to quantify yield effects attributed to weed competition and herbicide application. *Weed Research*. Volumen 52 No 1. pp. 5-15. ISSN: 1027-2887. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260741166_Using_precision_farming_technology_to_quantify_yield_effects_due_to_weed_competition_and_herbicide_application
- INTAGRI. (2017). Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas. *Serie Suelos*. Núm. 29. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. pp. 5. Disponible de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>
- Khatun, M., Sarkar, S., Farzana, E., Mominul, A., Anwar, P., Fahad, S., Datta, R., & Aminul, A. (2021). “Estrés por sequía en leguminosas de grano: Efectos, mecanismos de tolerancia y manejo”. *Agronomía*, 11 (12), 2374. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122374>
- Lacasta, C., Estalrich, E., Meco, R., & Benitez, M. (2007). “Interacción de densidades de siembra de cebada y rotaciones de cultivo sobre el control de la flora arvense y el rendimiento del cultivo”. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/16604>
- Larios, R., García, L., Jerónimo, M., Avalos, C., & Castro, J. (2021). “Pérdidas de nitrógeno por volatilización a partir de dos fuentes nitrogenadas y dos métodos de aplicación”. *Siembra*. [En línea]. (Ecuador). Volumen 8 No 2. ISSN: 2477-8850. pp. 1-11. Disponible en: <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA/article/view/2475/3852>
- Lasluisa, J. (2022). “Evaluación del comportamiento agronómico de líneas promisorias de cebada (*Hordeum vulgare* L.) dística del INIAP bajo condiciones agroecológicas del campus Salache UTC 2021 – 2022”. [Tesis de Ingeniería Agrónoma, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c59e3e1f-a0cf-4cd1-aa5b-a55aa6fd8f45/content>
- Lauric, A., Marinessen, A., Torres, C., & Loewy, T. (2015). “Efecto de la fertilización nitrogenada en el cultivo de cebada en un año de sequía”. INTA. [En línea]. Disponible en: <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/efecto-de-la-fertilizacion-nitrogenada-en-cebada-en-un-ao-de-sequia.pdf>
- Lazzari, M., Landriscini, M., Cantamutto, M., Miglierina, A., Roseli, R., & Echague, M. (2001). “Absorción de nitrógeno por cebada cervecera en dos suelos del sur bonaerense, Argentina”. *Ciencia del Suelo*. [En línea]. (Argentina). Volumen 19 No 2. ISSN: 1850-2067. pp. 101-108. Disponible en: https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_19n2/lazzari_101-108.pdf
- León, R., Bonifaz, N., & Gutiérrez, F. (2018). Pastos y forrajes del Ecuador, siembra y producción de pasturas. Universidad Politécnica Salesiana. – Editorial Universitaria Abya-Yala. Disponible en (<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19019/4/PASTOS%20Y%20FORRAJES%20DEL%20ECUADOR%202021.pdf>)

- López, J., Rodríguez, F., Wong, F., Ramírez, F., Rueda, E., & López, G. (2020). "Influencia de la fertilización en rendimiento y calidad de grano del centeno en la zona árida de Sonora, México". *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. [En línea]. (México). Volumen 10 No 6. ISSN: 2007-0934. pp. 1219-1230. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v10n6/2007-0934-remexca-10-06-1219.pdf>
- Farag, M., Xiao, J., & Abdallah, H. (2022). "Nutritional value of barley cereal and better opportunities for its processing as a value added food: a comprehensive review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Volumen 62 No 4, pp. 1092-1104. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33092405/>
- INIAP. (2011). Manejo Integrado de los cultivos Trigo y Cebada. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2719/1/iniapscpm183.PDF>
- MAG. (2024). "Ecuador dejará de importar cebada para la industria cervecera en 2030". [En línea]. Disponible en: <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-dejara-de-importar-cebada-para-la-industria-cervecera-en-2030/>
- Morales, E., Arriaga, M., López, J., Martínez, A., & Morales, E. (2019). "Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales". *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. [En línea]. (México). Volumen 10 No 8. ISSN: 2007-0934. pp. 1975-1986. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v10n8/2007-0934-remexca-10-08-1875.pdf>
- MORENO, A. et al. (2003). "Influencia de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) cultivada en regadío". *Spanish Journal of Agricultural Research*. [En línea]. (España). Volumen 1 No 1. ISSN: 1695-971X. pp. 91-100. Disponible en: <https://sjar.revistas.csic.es/index.php/sjar/article/view/12/9>
- Pantoja, J. (2014). Efecto de los cultivos de cobertura en la nutrición de cultivos y la dosis de fertilización. 2do Simposio de Fisiología Vegetal. Disponible en: <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/archivosacademicos/article/view/1469/1794>
- Peralta, N., Barbieri, P., Gowland, T., Aparicio, V., & Costa, J. (2015). "Agricultura de precisión: dosis variable de nitrógeno en cebada". *Ciencia del suelo*. [En línea]. (Argentina). Volumen 33 No 1. ISSN: 1850-2067. pp. 131-137. [Consulta 2025-04-12]. Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672015000100013
- Pérez, J., Zamora, M., Mejía, J., Hernández, A., & Solano, S. (2016). Evaluación de 10 genotipos de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en cinco fechas de siembra y dos ciclos agrícolas. *Agrociencia*, 50 (2), 201-213. Recuperado en 14 de julio de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952016000200201&lng=es&tlng=es.
- Ponce, L., Noroña, P., Campaña, D., Garófalo, J., Coronel, J., Jimenez, C., & Cruz, E. (2020). "La cebada (*Hordeum vulgare* L.): Generalidades y variedades mejoradas para la Sierra ecuatoriana". INIAP. [En línea] [Consulta 2025-05-20]. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5587/2/Manual%20116%20La%20cebada.pdf>

- Ponce, L., Garófalo, J., Velasquez, J., Noroña, P., & Jimenez, C. (2022). “Manual para la producción sostenible de cebada en la Sierra ecuatoriana”. INIAP. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/6015>
- Pulles, B. (2024). Evaluación agronómica de 18 variedades mejoradas de cebada (*Hordeum vulgare* L.) en la granja experimental La Pradera, Chaltura–Imbabura. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador Tesis Ing. Agrícopecuaria. Facultad de Ing. en Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Disponible en <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/15462/2/03%20AGP%20400%20TRABAJO%20GRADO.pdf>