UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE AGROPECUARIA

TEMA

"**EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE REMOLACHA FORRAJERA** (*Beta vulgaris* L.) **EN CHALTURA, IMABURA**"

Trabajo de grado previa a la obtención del Título de Ingeniero Agropecuario

AUTOR/A:

Odalys Nohelia Inlago Obando

DIRECTOR/A:

MVZ. Francisco Xavier Bonifaz Aguinaga, MS.c

IBARRA-ECUADOR

2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN

CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

EFECTO DE LA FERTILIZACIÓN EN EL COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO DE REMOLACHA FORRAJERA (*Beta vulgaris* L.) **EN CHALTURA, IMABURA**

Trabajo de grado revisado por el Comité Asesor, por lo cual se autoriza su presentación como requisito parcial para obtener Titulo de:

INGENIERA AGROPECUARIA

APROBADO:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO XAVIER BONIFAZ AGUINAGA

MVZ. Francisco Xavier Bonifaz Aguinaga, MS.c _____

DIRECTOR FIRMA

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUAN PABLO ARAGON SUAREZ

Ing. Juan Pablo Aragón _____

ASESOR FIRMA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Inlago Obando Odalys Nohelia
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Efecto de la fertilización en el comportamiento agronómico de remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) en Chaltura, Imbabura
AUTOR (ES):	Odalys Nohelia Inlago Obando
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	31 de agosto de 2026
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** ☐ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Agropecuaria
ASESOR /DIRECTOR:	MVZ. Xavier Bonifaz, MSc

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 31 días del mes de agosto de 2026.

LA AUTORA:

Verificar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ODALYS NOHELIA INLAGO OBANDO

Inlago Obando Odalys Nohelia

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Inlago Obando Odalys Nohelia

Ibarra a los 31 días del mes de junio de 2026

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO XAVIER
BONIFAZ AGUINAGA

(f) ……

MVZ. Francisco Xavier Bonifaz Aguinaga, MSc

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Guía: FICAYA-UTN

Fecha: Ibarra, a los 31 días del mes de junio del 2025

Odalys Nohelia Inlago Obando: "Efecto de la fertilización en el comportamiento agronómico de remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) en Chaltura, Imbabura" /Trabajo de titulación. Ingeniero Agropecuario.
Universidad Técnica del Norte. Carrera de Ingeniería Agropecuaria. Ibarra, a los 31 días del mes de junio del 2026, 72 páginas.

DIRECTOR (A): *MVZ. Francisco Xavier Bonifaz Aguinaga, MSc*

El objetivo principal de la presente investigación fue: Evaluar el efecto de la fertilización en el comportamiento agronómico de remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) en Chaltura, Imbabura,

Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Comparar el rendimiento de la remolacha forrajera entre los sistemas de fertilización.
- Determinar los contenidos nutricionales de la remolacha forrajera bajos sistemas de fertilización.
- Determinar el costo de producción por kilogramo de materia seca.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
FRANCISCO XAVIER
BONIFAZ AGUINAGA

(f) ……

MVZ. Francisco Xavier Bonifaz Aguinaga, MSc

Director de trabajo de grado

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
ODALYS NOHELIA
INLAGO OBANDO

(f) ……

Odalys Nohelia Inlago Obando

Autora

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por concederme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres, de manera especial a mi padre, Eduardo Inlago, por su apoyo permanente, su esfuerzo constante y su ejemplo de responsabilidad y perseverancia, los cuales han sido pilares fundamentales en mi desarrollo académico y personal. A mi madre, Janeth Obando por su amor incondicional, sus palabras de aliento y su motivación diaria para seguir adelante y superar cada desafío; su confianza en mí ha sido un soporte invaluable a lo largo de este proceso.

A Stalyn, por su comprensión, paciencia y respaldo incondicional durante el proceso de elaboración de esta investigación, así como por su motivación constante para alcanzar esta meta.

A mi director de tesis, MVZ. Xavier Bonica, MSc, por su guía académica, compromiso y valiosas orientaciones que permitieron el adecuado desarrollo del presente trabajo. De igual manera, a mi asesor, Ing. Juan Pablo Aragón, MSc, por su acompañamiento técnico, disposición y apoyo oportuno en cada fase de la investigación.

A mis compañeros y amigos, por el compañerismo y las experiencias compartidas a lo largo de la carrera, que contribuyeron significativamente a mi crecimiento profesional.

Finalmente, manifiesto mi agradecimiento a la Granja Experimental “La Pradera” y a todas las personas que colaboraron directa e indirectamente en la ejecución de este estudio, haciendo posible su culminación satisfactoria.

Odalys Nohelia Inlago Obando

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a mi padre, quien ha sido mi mayor inspiración, mi apoyo incondicional y la fuerza que me ha impulsado a seguir adelante en cada etapa de mi vida.

A mi madre, por motivarme cada día a superarme, por sus consejos, su confianza y por enseñarme con su ejemplo que el esfuerzo y la perseverancia siempre dan frutos.

A mi hermana Zoe, por su cariño sincero y por recordarme constantemente que soy capaz de lograr todo lo que me proponga. Sus palabras de aliento han sido un motor fundamental en este camino.

A mi enamorado, por acompañarme en los momentos de alegría y dificultad, por su paciencia, comprensión y apoyo constante durante esta etapa tan importante.

Y a todas las personas que creyeron en mí y confiaron en mi capacidad para alcanzar esta meta, porque este logro también les pertenece.

Odalys Nohelia Inlago Obando

ÍNIDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO vi

DEDICATORIA vii

ÍNIDICE DE CONTENIDO viii

ÍNIDICE DE FIGURAS xii

ÍNIDICE DE TABLAS xiii

RESUMEN xiv

ABSTRACT xv

CAPITULO I 16

INTRODUCCIÓN 16

1.1 Antecedentes 16

1.2 Problema de investigación 17

1.3 Justificación 18

1.4 Objetivos 20

1.3.1 Objetivo general 20

1.3.2 Objetivos específicos 20

1.5 Hipótesis 20

1.5.1 Hipotesis nula 20

1.5.2 Hipotesis alternativa 20

CAPITULO II 21

MARCO TEÓRICO 21

2.1 Origen de la remolacha 21

2.2 Generalidades de la remolacha forrajera 21

2.2.1 Clasificación taxonómica 21

2.2.2 Requerimientos edafoclimaticos 21

2.2.3 Valor nutricional y potencial forrajero 22
2.3 Importancia de la remolacha forrajera *22*
2.4 Uso de la remolacha forrajera (Beta vulgaris, L). *23*
2.5 Análisis bromatológico *24*
2.6 Fertilización *24*
2.7 Rendimiento *25*
2.8 Potencial forrajero *25*
2.8.1 Raíz o Bulbo 26
2.8.2 Biomasa Foliar (Hojas) 26
2.9 Marco Legal *26*
CAPITULO III 29
MARCO METODOLÓGICO 29
3.1 Descripción del área de estudio *29*
3.1.1 Caracterización del área de estudio 30
3.2 Materiales *30*
3.3 Métodos *30*
3.3.1 Factores en estudio 31
3.3.2 Tratamientos 32
3.3.3 Diseño experimental 32
3.3.4 Características del experimento 33
3.3.4.1 Características de la unidad experimental 33
3.3.5 Análisis estadístico 34
3.3.6 Variables evaluadas 34
3.3.6.1 Altura de la planta. 34
3.3.6.2 Clorofila. 34
3.3.6.3 Número de hojas. 35
3.3.6.4 Longitud del bulbo. 35
3.3.6.5 Longitud del bulbo con raíz. 35
3.3.6.6 Diámetro del bulbo. 35

3.3.6.7 Grados Brix. 35
3.3.6.8 Peso del bulbo con materia verde. 35
3.3.6.9 Peso bulbo. 36
3.3.6.10 Longitud de las hojas. 36
3.3.6.11 Costo de producción por kilogramo de materia seca. 36
3.4 Manejo del experimento *36*
3.5 Métodos de producción de remolacha forrajera *37*
3.5.1 Análisis de suelo 37
3.5.2 Preparacion del suelo 38
3.5.3 Delimitación del terreno 38
3.5.4 Surcado 38
3.5.5 Transplante 38
3.5.6 Fertilización 38
3.5.7 Monitoreo 39
3.5.8 Riego 39
3.5.9 Control de malezas 39
3.5.10 Aporque 39
3.5.11 Registro de datos 39
3.5.12 Cosecha 39
3.5.13 Análisis bromatológico 40
CAPÍTULO IV 41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN 41
4.1 Longitud del bulbo *41*
4.2 Longitud del bulbo con raíz *42*
4.3 Diámetro del bulbo *44*
4.4 Grados Brix *46*
4.5 Peso del bulbo con materia verde-hojas *48*
4.6 Peso del bulbo *50*
4.7 Longitud de las hojas *52*

4.8 Altura de la planta *54*

4.9 Número de hojas *55*

4.10 Clorofila de las hojas *57*

4.11 Análisis bromatológico *59*

4.12 Costo de producción por kilogramo de materia seca *61*

4.12.1 Nivel 0 61

4.12.2 Nivel 1 62

4.12.3 Nivel 2 63

CAPÍTULO V 65

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 65

5.1 CONCLUSIONES *65*

5.2 RECOMENDACIONES *67*

REFERENCIAS 68

ÍNIDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Mapa de la ubicación del área de la investigación.* 29

Figura 2. *Diseño experimental utilizado en la investigación en el desarrollo productie remolacha forrajera*.....32

Figura 3. *Diseño de la unidad experimental que se evaluó*.....34

Figura 4. *Manejo del experimento*.....37

Figura 5. *Comparación del diámetro del bulbo entre tratamientos*.....45

Figura 6. *Peso del bulbo con materia verde (hojas) expresados en kg*.....49

Figura 7. *Peso del bulbo de la remolacha forrajera expresados en Kg*.....51

Figura 8. *Longitud de hojas expresadas en cm.* 53

Figura 9. *Altura de la planta con relación a días después del trasplante (cm).* 54

Figura 10. *Número de hojas de la remolacha forrajera con relación a los días después del trasplante*. 56

Figura 11. *Clorofila de las hojas de la remolacha forrajera con relación a días después del trasplante*. 57

ÍNIDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Ubicación geográfica y climática del estudio*. 30

Tabla 2. *Materiales y Equipos de trabajo*.....30

Tabla 3. *Tipos de fertilización que se utilizará en la remolacha forrajera*. 31

Tabla 4. *Fertilización que se utilizará en la remolacha forrajera*.....32

Tabla 5. *Características del experimento*. 33

Tabla 6. *Características del experimento*. 33

Tabla 7. *Longitud del bulbo de remolacha forrajera con diferentes niveles de fertilización.* 41

Tabla 8. *Longitud de la remolacha forrajera con raíz expresados en cm.* 43

Tabla 9. *Grados Brix de la remolacha forrajera en el día de la cosecha*. 47

Tabla 10. *Resultados de análisis bromatológico*. 59

Resultados de análisis bromatológico 59

Tabla 11. *Tabla Nivel 0.*.....61

Tabla 12. *N1.*.....62

Tabla 13. *N3.*.....64

EFFECTO DE LA FERTILIZACION EN EL COMPORTAMIENTO AGRONOMICO DE REMOLACHA FORRAJERA (Beta vulgaris L.) IN CHALTURA, IMABURA

Odalys Nohelia Inlago Obando
Universidad Técnica del Norte
Correo: oninlagoo@utn.edu.ec

RESUMEN

La remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) representa una alternativa estratégica de alta densidad energética para la alimentación de rumiantes en la región Sierra del Ecuador. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes sistemas de fertilización en el comportamiento agronómico del cultivo en la parroquia de Chaltura, provincia de Imbabura. El estudio se ejecutó en la Granja Experimental "La Pradera" bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con tres tratamientos y tres repeticiones: Testigo (N0), Fertilización Orgánica (N1) y Fertilización Química (N2). Los resultados determinaron que la fertilización química (N2) influyó de forma altamente significativa en el desarrollo transversal del cultivo, alcanzando el mayor diámetro promedio de bulbo con 50.77 cm ($p < 0.01$) y el mayor peso fresco de bulbo con materia verde con 4.57kg por planta ($p = 0.0012$), superando categóricamente a N0 y N1, los cuales compartieron el mismo rango estadístico inferior. Por el contrario, las variables de elongación vertical no mostraron sensibilidad ante la nutrición, reportando una longitud de bulbo sin raíz promedio de 47.69cm ($p = 0.4129$) y una longitud total con raíz de 31.6 cm ($p = 0.3100$), lo que denota una fuerte regulación genotípica. Se concluye que la fertilización mineral balanceada optimiza el rendimiento físico y el calibre comercial del cultivo bajo las condiciones edafoclimáticas locales, validando parcialmente la hipótesis alternativa.

Palabras clave: Beta vulgaris, Diseño de Bloques Completos al Azar, fertilización química, expansión alométrica, rendimiento forrajero.

EFFECT OF FERTILIZATION ON THE AGRONOMIC PERFORMANCE OF FORAGE BEETROOT (Beta vulgaris L.) IN CHALTURA, IMABURA

Odalys Nohelia Inlago Obando
Universidad Técnica del Norte
Correo: oninlagoo@utn.edu.ec

ABSTRACT

Fodder beet (*Beta vulgaris* L.) represents a strategic, high-energy alternative for ruminant feed in the Andean region of Ecuador. The objective of this research was to evaluate the effect of different fertilization systems on the agronomic performance of the crop in the parish of Chaltura, Imbabura province. The study was conducted at the "La Pradera" Experimental Farm using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three treatments and three replicates: Control (N0), Organic Fertilization (N1), and Chemical Fertilization (N2). The results determined that chemical fertilization (N2) significantly influenced the transverse development of the crop, achieving the largest average bulb diameter at 50.77 cm ($p < 0.01$) and the highest fresh bulb weight with green matter at 4.57 kg per plant ($p = 0.0012$), categorically surpassing N0 and N1, which shared the same lower statistical range. Conversely, the vertical elongation variables showed no sensitivity to nutrition, reporting an average bulb length without roots of 47.69 cm ($p = 0.4129$) and a total length with roots of 31.6 cm ($p = 0.3100$), indicating strong genotypic regulation. It is concluded that balanced mineral fertilization optimizes the physical yield and commercial size of the crop under local soil and climate conditions, partially validating the alternative hypothesis.

Keywords: Beta vulgaris, Randomized Complete Block Design, chemical fertilization, allometric expansion, forage yield.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A nivel mundial, la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) se ha posicionado globalmente como una de las alternativas de más alta densidad energética e idoneidad para la alimentación de rumiantes, gracias a su elevada digestibilidad (superior al 80%) y su capacidad de aportar energía en periodos críticos de baja disponibilidad de pasturas. Fisiológicamente, el comportamiento agronómico de esta especie está intrínsecamente ligado a la disponibilidad y absorción de nutrientes en el suelo. De acuerdo con Gibbs et al. (2015), bajo un óptimo manejo nutricional y agronómico, el cultivo puede alcanzar rendimientos sobresalientes de 20 a 30 toneladas de materia seca por hectárea. Al respecto, Quintero (2006) señala que la especie posee una alta exigencia mineral, extrayendo aproximadamente 100 kg de N, 35 kg de P_2O_5 y 150 kg de K_2O para una cosecha estandarizada de 30 t/ha, lo que evidencia que el llenado y desarrollo de su raíz reservante depende críticamente de un suministro balanceado de macronutrientes.

En el contexto de la región latinoamericana, especialmente en los ecosistemas altoandinos, la introducción de este cultivo busca mitigar los efectos de la estacionalidad climática sobre los pastos tradicionales. En estas zonas, se ha determinado que la dinámica de crecimiento y la acumulación de biomasa de la remolacha forrajera responden de forma diferenciada según las técnicas de establecimiento y los regímenes de fertilización. Estudios regionales como los de Paz-Ayala et al. (2022) indican que prácticas como el trasplante técnico y una adecuada densidad de siembra potencian la eficiencia en la respuesta de la planta al nitrógeno, permitiendo una mayor tasa de expansión celular. Asimismo, la literatura regional destaca que el volumen neto y las dimensiones transversales del bulbo son altamente plásticas y dependientes de la concentración de la solución del suelo, estabilizándose positivamente cuando se alcanza un plano nutricional óptimo.

En el Ecuador, el interés por la producción de raíces forrajeras ha crecido significativamente en las provincias de la región Sierra, impulsado por la necesidad de sustituir concentrados comerciales costosos por fuentes energéticas locales de alta palatabilidad. No obstante, los productores agropecuarios del país enfrentan una severa presión financiera debido a la volatilidad de los precios de los fertilizantes sintéticos tradicionales, lo que ha obligado a la investigación nacional a buscar un equilibrio entre la productividad física y la eficiencia

económica. En este sentido, la optimización del costo de producción por kilogramo de materia seca se ha convertido en un indicador crucial en el país, orientando los esfuerzos hacia sistemas de fertilización combinados o alternativos que sostengan el rendimiento ganadero sin comprometer la rentabilidad del hato.

A nivel de la provincia de Imbabura, la investigación local ha empezado a evaluar el comportamiento del cultivo enfocándose en el aprovechamiento de recursos y enmiendas de origen orgánico. Así, Castillo (2019), en un estudio realizado en el cantón Ibarra, determinó que la aplicación de biofertilizantes líquidos en dosis de 30 L/ha optimiza notablemente la altura de la planta y el porcentaje de prendimiento, superando en un 80% el rendimiento del testigo absoluto. Por su parte, Paredes (2023), en la comunidad de Ushapungo (cantón Cotacachi), evaluó el efecto de abonos orgánicos de origen bovino y ovino, reportando rendimientos de hasta 130.56 t/ha de materia verde y demostrando que la integración de insumos locales disminuye significativamente los costos operativos. A pesar de estos aportes locales en la provincia, existe un vacío de información técnica respecto al comportamiento agronómico, cualitativo (grados Brix) y bromatológico de la remolacha forrajera bajo las condiciones edafoclimáticas específicas de la parroquia de Chaltura. Se desconoce si la fertilización química de rápida disponibilidad genera ventajas alométricas definitivas en el calibre del bulbo frente a las enmiendas orgánicas locales en dicha zona, lo que justifica plenamente el desarrollo del presente estudio experimental en la Granja "La Pradera".

1.2 Problema de investigación

En la región Sierra del Ecuador, específicamente en la provincia de Imbabura, la ganadería bovina constituye una de las principales actividades socioeconómicas (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2022). Sin embargo, la productividad del sector se encuentra seriamente limitada por la estacionalidad de las pasturas, las cuales presentan un marcado descenso en su calidad nutricional y disponibilidad de biomasa durante los períodos de estiaje (Vargas-Burgos et al., 2018). Ante este escenario, surge la necesidad de incorporar alternativas forrajeras de alta densidad energética y adaptabilidad, entre las cuales destaca la remolacha forrajera (Beta vulgaris L.) debido a su elevado potencial de rendimiento de materia seca y energía digestible en comparación con las especies tradicionales (López-González et al., 2021). No obstante, la máxima expresión del potencial agronómico y nutricional de este cultivo está directamente condicionada por un manejo integral y preciso de la nutrición vegetal (Castro & Gómez, 2020). En la parroquia de Chaltura, esta situación se complejiza debido a factores fundamentales de orden técnico, fisiológico y económico. En primer lugar, se observa un

marcado desconocimiento respecto a los requerimientos nutricionales específicos de la especie y a la eficiencia diferencial entre fuentes de fertilización, lo que genera que los productores apliquen planes de nutrición de manera empírica (Sánchez & Ramírez, 2019). Esto deriva en escenarios de subfertilización que restringen el rendimiento real, o en una dependencia estricta de la fertilización química tradicional que, además de elevar exponencialmente los costos de producción, incrementa el riesgo latente de degradación del suelo y contaminación por nitratos (Sánchez & Ramírez, 2019). Por otro lado, aunque el uso de enmiendas orgánicas surge como una alternativa sostenible, a nivel local se carece de esquemas técnicos que validen si estas fuentes logran cubrir la alta tasa de extracción mineral de la planta con la misma eficacia que los fertilizantes de alta solubilidad. En segundo lugar, se evidencia una alta variabilidad e incertidumbre en el comportamiento agronómico y en la composición bromatológica del cultivo en la zona (Villalba et al., 2023). Variables macro-morfológicas como la altura de la planta, el diámetro del bulbo y el peso total, así como parámetros cualitativos esenciales la concentración de sólidos solubles totales (grados Brix) y el perfil nutricional del forraje están estrechamente ligados a la interacción entre el tipo de fertilizante y las características edafoclimáticas locales (Villalba et al., 2023). La ausencia de investigación regional específica en Chaltura impide predecir con certeza cómo afectarán los diferentes regímenes de fertilización (orgánica y química) a la partición de materia seca y al valor nutricional final del bulbo y del follaje bajo su microclima particular. Finalmente, subsiste una marcada incertidumbre económica para el productor ganadero. No se ha determinado si la inversión financiera requerida para la implementación de un programa de fertilización optimizado sea este químico o basado en insumos orgánicos es efectivamente compensada por el incremento en el rendimiento de materia seca y el ahorro en la compra de concentrados comerciales (Martínez & Torres, 2022). Esta falta de indicadores económicos locales genera dudas sobre la viabilidad financiera y la rentabilidad real del cultivo, limitando su adopción definitiva como estrategia de suplementación estratégica en la zona.

1.3 Justificación

La remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) es una especie con una elevada capacidad de extracción de nutrientes del suelo. Al respecto, Paredes (2023) señaló que el rendimiento de este cultivo se encuentra estrechamente ligado a la disponibilidad de nitrógeno y potasio, elementos que resultan determinantes en el desarrollo y tamaño del bulbo, así como en la calidad bromatológica de la hoja. Desde una perspectiva técnica, esta investigación se justifica al contrastar un sistema de fertilización química caracterizado por la rápida disponibilidad y

asimilación de nutrientes frente a la fertilización orgánica; esta última, como sostuvo Castillo (2019), no solo aporta elementos esenciales a la planta, sino que optimiza las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos en la provincia de Imbabura. Asimismo, la inclusión de un tratamiento testigo es técnicamente indispensable para establecer la línea base de productividad en las condiciones edáficas de la parroquia de Chaltura, lo que permite validar científicamente la magnitud de la respuesta del cultivo ante las intervenciones externas evaluadas.

El incremento global y la volatilidad en los precios de los fertilizantes sintéticos ejercen una presión financiera severa sobre los productores agropecuarios, obligándolos a buscar alternativas viables que reduzcan los costos operativos. Como señalaron Muñoz et al. (2020), la eficiencia económica en los sistemas productivos de cultivos forrajeros no debe cuantificarse únicamente en función del volumen de materia verde obtenida, sino a través del costo de producción por kilogramo de materia seca (MS) utilizable. De este modo, el estudio se justifica económicamente al evaluar si el empleo de enmiendas orgánicas de origen local posee la capacidad de competir en rentabilidad con los fertilizantes químicos tradicionales, proveyendo al sector ganadero de Chaltura de una estrategia científica para disminuir la dependencia de insumos externos de alto costo.

La ganadería bovina en Imbabura enfrenta desafíos críticos asociados al desabastecimiento alimentario y a la pérdida de calidad de las pasturas durante los períodos de estiaje. Quintero (2006) mencionó que la remolacha forrajera constituye una alternativa estratégica debido a su alta palatabilidad, digestibilidad y contenido energético. Por consiguiente, la investigación se justifica socialmente debido a que los resultados generados proporcionarán a los productores de Chaltura un protocolo de fertilización validado que maximice el rendimiento y garantice un perfil nutricional óptimo en términos de proteína y energía. La adopción de estas directrices técnicas contribuirá directamente al mejoramiento de la productividad láctea local y, de manera colateral, al fortalecimiento socioeconómico y la calidad de vida de las familias rurales de la zona.

1.4 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar el efecto de la fertilización en el comportamiento agronómico de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) en Chaltura, Imbabura

1.3.2 Objetivos específicos

- Comparar el rendimiento de la remolacha forrajera entre los sistemas de fertilización.
- Determinar los contenidos nutricionales de la remolacha forrajera bajos sistemas de fertilización.
- Determinar el costo de producción por kilogramo de materia seca.

1.5 Hipótesis

Las investigaciones experimentales deben incluir hipótesis. Cuando un hipotesis no es apropiado, se incluye preguntas directrices en vez de hipotesis.

1.5.1 Hipotesis nula

El efecto de la fertilización no influye en el comportamiento agronómico de la remolacha forrajera.

1.5.2 Hipotesis alternativa

El efecto de la fertilización influye en el comportamiento agronómico de la remolacha forrajera.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Origen de la remolacha

Las formas silvestres de *Beta vulgaris* L. se distribuyen originariamente a lo largo de la cuenca mediterránea, extendiéndose hacia el este hasta Indonesia y hacia el oeste a lo largo del litoral atlántico, las islas Canarias y el sur de Noruega. Históricamente, el cultivo de *B. vulgaris* se inició en el Mediterráneo oriental y el Medio Oriente con el propósito de aprovechar sus hojas; esta práctica se registró por primera vez en la literatura mesopotámica en el siglo IX a.C. (Lange et al., 1999). Posteriormente, aproximadamente 500 años a.C., se documentó su utilización como recurso alimenticio para el ganado en Grecia. En el contexto de Europa continental, la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) se derivó genéticamente a partir de la remolacha forrajera durante el siglo XIX, un desarrollo agrícola impulsado por la necesidad de sustituir las importaciones de caña de azúcar tras los bloqueos comerciales marítimos impuestos por los ingleses durante las guerras napoleónicas (Demanet Filippi & Canales Cartes, 2020).

2.2 Generalidades de la remolacha forrajera

2.2.1 Clasificación taxonómica

La remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) es una planta dicotiledónea que pertenece a la familia Amaranthaceae (subfamilia Betoideae). Se caracteriza por ser una especie bienal; durante el primer año desarrolla su fase vegetativa, acumulando reservas sacarosas en la raíz, mientras que en el segundo año induce su fase reproductiva con la emisión del tallo floral y la producción de semillas (Insuasty-Santacruz & Jurado-Gámez, 2020).

Anatómicamente, la planta está constituida por una corona foliar densa y una raíz pivotante engrosada o bulbo, el cual es el principal órgano de reserva energética. Dependiendo del cultivar (como los del tipo *fodder beet*), entre el 30% y el 50% de la estructura del bulbo puede desarrollarse de forma aérea sobre la superficie del suelo, lo que facilita su cosecha manual o pastoreo directo (Demanet Filippi & Canales Cartes, 2020).

2.2.2 Requerimientos edafoclimaticos

Es una especie altamente plástica con capacidad de adaptación a un amplio rango de ecosistemas templados y altoandinos. Su rango óptimo de desarrollo térmico oscila entre los 8

°C y los 25 °C, mostrando una notable tolerancia al estrés hídrico transitorio una vez establecida (Demanet Filippi & Canales Cartes, 2020).

Sin embargo, a nivel edáfico (suelo), el cultivo exhibe exigencias estrictas. Es altamente susceptible a la acidez del suelo, requiriendo sustratos con un pH superior a 6.2 para evitar limitantes en la germinación y asimilación de nutrientes. Asimismo, debido a su elevado potencial de rendimiento de biomasa, demanda suelos profundos, con buena estructura física (suelos mullidos) y con una alta disponibilidad de macronutrientes, especialmente nitrógeno y potasio, los cuales dinamizan la expansión foliar y el llenado del bulbo (Paredes, 2023).

2.2.3 Valor nutricional y potencial forrajero

El principal atributo de la remolacha forrajera en la alimentación ganadera es su densidad energética y alta digestibilidad, la cual promedia entre el 85% y 90% debido a su bajo contenido de fibra cruda y su alta concentración de carbohidratos solubles no nitrogenados (sacarosa) en el bulbo (Gutiérrez, 1973). Su valor energético oscila estacionalmente entre 2.8 y 3.0 Mcal de Energía Metabolizable por kilogramo de Materia Seca (Mcal EM/kg MS), equiparándose al valor energético de los granos de cereales (Demanet Filippi & Canales Cartes, 2020).

Por el contrario, el bulbo es estructuralmente deficiente en proteína cruda; no obstante, esta carencia es compensada por la biomasa aérea (hojas y cuello), la cual concentra entre el 12% y el 16% de proteína cruda dependiendo de la fertilización nitrogenada aplicada (Insuasty-Santacruz & Jurado-Gámez, 2020). Debido a esta composición balanceada entre hojas y raíz, se le considera un suplemento estratégico ideal para sostener la productividad láctea y mitigar el déficit nutricional bovino durante las épocas de estiaje en la Sierra ecuatoriana.

2.3 Importancia de la remolacha forrajera

El cultivo de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) destaca en el sector pecuario debido a que se considera una de las especies con mayor capacidad para aportar un alto valor nutricional y registrar los mayores rendimientos de forraje por unidad de superficie en comparación con otras alternativas forrajeras convencionales. Pese a estos atributos productivos, la superficie cultivada ha experimentado una contracción en diversas regiones geográficas; esta tendencia responde a la complejidad que presenta su mecanización agrícola y a que constituye un cultivo altamente demandante de mano de obra para las labores de manejo y cosecha (Gómez, 2005; Guerrero, 1999).

Fisiológicamente, la remolacha forrajera ejerce un marcado efecto lactogénico estimulante en el ganado bovino, lo que fundamenta su relevancia estratégica en la suplementación de vacas lecheras de alta producción. Bajo condiciones de riego, este cultivo posee un potencial de rendimiento que oscila entre las 70 y 100 toneladas de raíz por hectárea, volumen al cual se adiciona el rendimiento de la biomasa foliar (Guerrero, 1999). Asimismo, su suministro durante las épocas de estiaje e incremento térmico resulta altamente palatable y apetecido por los animales; el elevado contenido de agua estructural presente en los tejidos de la raíz desempeña un rol metabólico y de hidratación superior al del agua convencional de los abrevaderos, independientemente de los sistemas de distribución de esta última (Guerrero, 1999).

Desde la perspectiva del manejo agronómico, las técnicas de establecimiento y manejo de la remolacha forrajera guardan similitud con las implementadas en la remolacha azucarera, aunque la variedad forrajera exhibe menores exigencias nutricionales generales, pero una mayor susceptibilidad a los descensos drásticos de temperatura (estrés por frío). Por otra parte, bajo un enfoque de evaluación de calidad, el valor agroindustrial y nutricional de la remolacha forrajera queda determinado rigurosamente por las propiedades analíticas de sus jugos celulares, el porcentaje total de materia seca, la concentración y composición de las cenizas solubles, y el rendimiento final de las sustancias nitrogenadas y carbohidratos no estructurales (Guerrero, 1999).

2.4 **Uso de la remolacha forrajera** *(Beta vulgaris, L).*

El uso principal de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) se concentra en los sistemas de producción lechera intensivos y semi-intensivos, donde actúa como un sustituto energético eficiente de los concentrados comerciales a base de cereales. Debido a su alta concentración de carbohidratos no estructurales de rápida fermentación ruminal (sacarosa), su consumo estimula la síntesis de propionato en el rumen. Este ácido graso volátil es el principal precursor de la glucosa en el hígado del animal, lo que se traduce directamente en un incremento del volumen de leche producido y en una mejora de los sólidos totales, especialmente la proteína láctea (Demanet Filippi & Canales Cartes, 2020).

Para evitar trastornos metabólicos como la acidosis ruminal, la literatura técnica sugiere introducir el bulbo de forma gradual en la dieta, combinándolo siempre con fuentes de fibra efectiva (pasturas maduras o henificados) para mantener la estabilidad del pH del rumen (Silva et al., 2011).

2.5 Análisis bromatológico

El análisis bromatológico posee como propósito fundamental determinar la composición cualitativa y cuantitativa de los recursos alimenticios y las materias primas empleadas en la nutrición animal. En el ámbito zootécnico, este procedimiento analítico es indispensable para la formulación precisa de raciones y dietas balanceadas, ajustándose de manera estricta a los requerimientos metabólicos de cada especie y etapa productiva (Salazar, 2008). En la producción ganadera, la evaluación bromatológica permite diagnosticar rigurosamente la calidad nutricional de los pastos y forrajes complementarios mediante la cuantificación de fracciones críticas como la materia seca (MS), cenizas, extracto etéreo, proteína cruda (PC), fibra cruda, calcio y fósforo (Salazar, 2008).

En el contexto de la presente investigación, el análisis bromatológico se aplica con el fin específico de evaluar la calidad nutricional diferenciada de las dos estructuras aprovechables de la remolacha forrajera: el follaje (hojas) y el bulbo (raíz), bajo el efecto de los distintos tratamientos de fertilización química y orgánica. A través de este procedimiento de laboratorio, se cuantificarán las siguientes fracciones críticas para determinar el valor real del forraje producido en Chaltura.

2.6 Fertilización

Las exigencias nutricionales de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) son considerablemente elevadas, por lo que los programas de fertilización deben diseñarse en función de su ciclo vegetativo prolongado. Debido a esta naturaleza fisiológica, el cultivo demanda un suministro balanceado que combine fuentes de nutrientes de rápida disponibilidad y asimilación para las etapas iniciales de establecimiento, junto con elementos de liberación prolongada que sostengan el crecimiento continuo a lo largo del ciclo (Paredes, 2023). En este sentido, la fertilización química estratégica desempeña un rol crítico en la optimización de la productividad, ya que incrementa significativamente el rendimiento de biomasa por unidad de superficie, mejorando la eficiencia operativa y económica del sistema productivo (Demanet Filippi & Canales Cartes, 2020).

Para maximizar la asimilación de estos nutrientes, la especie requiere suelos profundos con texturas franco-arenosas, franco-limosas o franco-arcillosas, caracterizados por poseer una adecuada capacidad de retención de humedad y un elevado contenido de materia orgánica. Respecto a la dinámica interna de los elementos, la nutrición mineral debe fundamentarse en un equilibrio macroelemental de nitrógeno, fósforo y potasio (Paredes, 2023).

Fisiológicamente, la disponibilidad de fosfatos ejerce un efecto directo sobre el desarrollo estructural de la planta; estos compuestos estimulan la expansión de la superficie foliar sin comprometer la tasa de translocación de carbohidratos solubles desde las hojas hacia el órgano de almacenamiento. Este fenómeno ocurre debido a que el fósforo refuerza la diferenciación y el desarrollo celular de los haces vasculares conductores (xilema y floema), optimizando el flujo de foto asimilados hacia el bulbo (Castro & Gómez, 2020).

2.7 Rendimiento

A nivel histórico, la evolución del cultivo de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) ha mostrado variaciones significativas en su superficie y volumen de producción. En España, durante el año 1985, se registraba una superficie cultivada cercana a las 17,000 hectáreas (ha), mientras que para el año 2000, la estimación se contrajo a aproximadamente 3,400 ha, alcanzando una producción nacional consolidada de 139,000 toneladas (t) (Mateo, 2005). Respecto al potencial productivo individual, Mateo (2005) señaló que una hectárea de remolacha forrajera bajo condiciones de regadío posee la capacidad de producir un rendimiento que oscila entre las 70 y 100 t * ha^-1 de peso fresco de raíz.

Asimismo, la productividad y la velocidad del desarrollo fenológico del cultivo se encuentran fuertemente influenciadas por las características climáticas de la zona de implantación. Al respecto, Holguín (2012) reportó que en las condiciones ambientales de la costa peruana se lograron obtener rendimientos de hasta 76 t* ha^-1 de raíz en un ciclo vegetativo dinámico de apenas seis meses. Este comportamiento contrasta significativamente con el desarrollo del cultivo en el continente europeo, donde las condiciones térmicas y el fotoperiodo extienden el ciclo productivo hasta los nueve meses para alcanzar la madurez fisiológica óptima (Holguín, 2012).

2.8 Potencial forrajero

La remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) se consolida como una alternativa de alta eficiencia debido a su capacidad para generar volúmenes significativos de biomasa con un elevado valor nutricional para diversas especies zootécnicas. En términos de rendimiento, el cultivo posee el potencial de producir entre 10 y 16 t*ha^-1 de materia seca (MS) concentrada en la raíz, mientras que la biomasa aérea correspondiente a las hojas registra rendimientos que oscilan entre las 12 y 20 t*ha^-1 de MS (Draycott & Hollies, 2001).

Bromatológicamente, los órganos de almacenamiento presentan un comportamiento nutricional diferenciado y complementario:

2.8.1 Raíz o Bulbo

Se caracteriza por una densidad energética sobresaliente, reportando valores promedio de 12 MJ *kg^-1 de MS; no obstante, exhibe una concentración limitada de proteína cruda (PC), la cual ronda el 6% de la MS. Su elevado contenido de carbohidratos solubles no estructurales (principalmente sacarosa) le confiere una excelente palatabilidad y ejerce un efecto estimulante sobre la actividad y la cinética del microbiota ruminal (Draycott & Hollies, 2001). Asimismo, la estructura celular de la raíz presenta bajos niveles de pared celular, con valores de fibra detergente neutro (FDN) situados entre el 10% y 15% de la MS, y de fibra detergente ácido (FDA) entre el 5.5% y 6.8% de la MS. Estas condiciones estructurales determinan una tasa de digestibilidad aparente de la MS excepcionalmente alta, alcanzando rangos del 90% al 93.6% (Hartnell et al., 2005).

2.8.2 Biomasa Foliar (Hojas)

Presenta niveles energéticos moderados, estimados en aproximadamente 9 MJ * kg^-1 de MS, pero compensa la deficiencia del bulbo al registrar un contenido sustancial de PC que promedia el 15% de la MS. Esta característica permite que las hojas sean aprovechadas de manera directa mediante pastoreo controlado o procesadas bajo sistemas de ensilaje (Draycott & Hollies, 2001).

2.9 Marco Legal

La presente investigación se fundamenta en el ordenamiento jurídico de la República del Ecuador, en concordancia con las políticas nacionales vigentes y los tratados internacionales que regulan la producción agropecuaria sostenible, la seguridad alimentaria y la conservación de los recursos naturales. El estudio del comportamiento agronómico y el rendimiento de la remolacha forrajera (B*eta vulgaris* L.) bajo diferentes regímenes de fertilización en la parroquia de Chaltura, provincia de Imbabura, responde a una necesidad técnico-científica respaldada por un marco normativo jerárquico que promueve la eficiencia productiva y la resiliencia ecosistémica.

En primera instancia, la Constitución de la República del Ecuador constituye la base macro-normativa de la investigación. El proyecto se articula de forma directa con los principios constitucionales que garantizan el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como con el reconocimiento explícito de los derechos de la naturaleza. Al evaluar el efecto de la fertilización con énfasis en el uso eficiente de nutrientes y la incorporación de alternativas de origen orgánico, este estudio busca establecer un modelo

de manejo agronómico que respete los ciclos vitales y la capacidad regenerativa del suelo en la zona de intervención.

Asimismo, la investigación tributa al régimen de soberanía alimentaria establecido en la Carta Magna; al optimizar el rendimiento de un cultivo de alto valor energético y nutricional para la ganadería, se fortalece la base alimentaria del sector pecuario local, garantizando la disponibilidad de biomasa de calidad en la provincia de Imbabura. A nivel de legislación secundaria, el estudio se ampara en la Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria (LORSA) y en la Ley Orgánica de Agro biodiversidad, Semillas y Fomento de la Agricultura Sustentable. Ambos cuerpos legales mandan al Estado, a los organismos técnicos y a la academia a incentivar la investigación científica, la innovación tecnológica y la adopción de prácticas ecológicamente limpias. El desarrollo de este ensayo experimental cumple con dicho precepto jurídico al generar datos técnicos locales orientados a elevar la productividad por unidad de superficie mediante un uso racional y eficiente de los insumos agrícolas, mitigando los impactos ambientales negativos derivados del uso excesivo de fertilizantes de síntesis química. Siguiendo el orden jerárquico de las políticas públicas locales, el proyecto se vincula de manera estratégica con el Plan Nacional de Desarrollo vigente (Plan de Acción Ecuador 2024-2025). Esta investigación se alinea directamente con el Eje Económico del plan, el cual busca promover la productividad y la competitividad sistémica de los sectores agrícolas del país. De forma específica, la tesis responde a la meta nacional de incrementar la eficiencia y rentabilidad en las unidades de producción del sector rural, así como al objetivo de fomentar prácticas agroecológicas que resguarden la base productiva del suelo. Al ofrecer a los productores ganaderos de la región norte del país una alternativa forrajera de alto rendimiento validada para las condiciones edafoclimáticas de Chaltura, el estudio contribuye directamente a reducir los costos de alimentación animal, optimizar la rentabilidad del hato pecuario y dinamizar de forma sostenible las cadenas de valor locales de la carne y la leche. Finalmente, en el ámbito internacional, las políticas locales antes descritas convergen con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. De manera específica, el estudio aporta al ODS 2 (Hambre Cero), vinculándose directamente con la Meta 2.3, la cual busca duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos en pequeña escala, y con la Meta 2.4, orientada a asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos mediante prácticas agrícolas resilientes que mejoren progresivamente la calidad de la tierra y del suelo. De igual forma, se articula con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) bajo la Meta 12.4 de lograr la gestión ecológica racional de los

productos químicos reduciendo su liberación al suelo, y con el ODS 15 (Vida de Ecosistemas Terrestres) al buscar un equilibrio técnico en la fertilización de la remolacha forrajera que controle y mitigue los procesos de degradación de las tierras agrícolas de la parroquia.

CAPITULO III

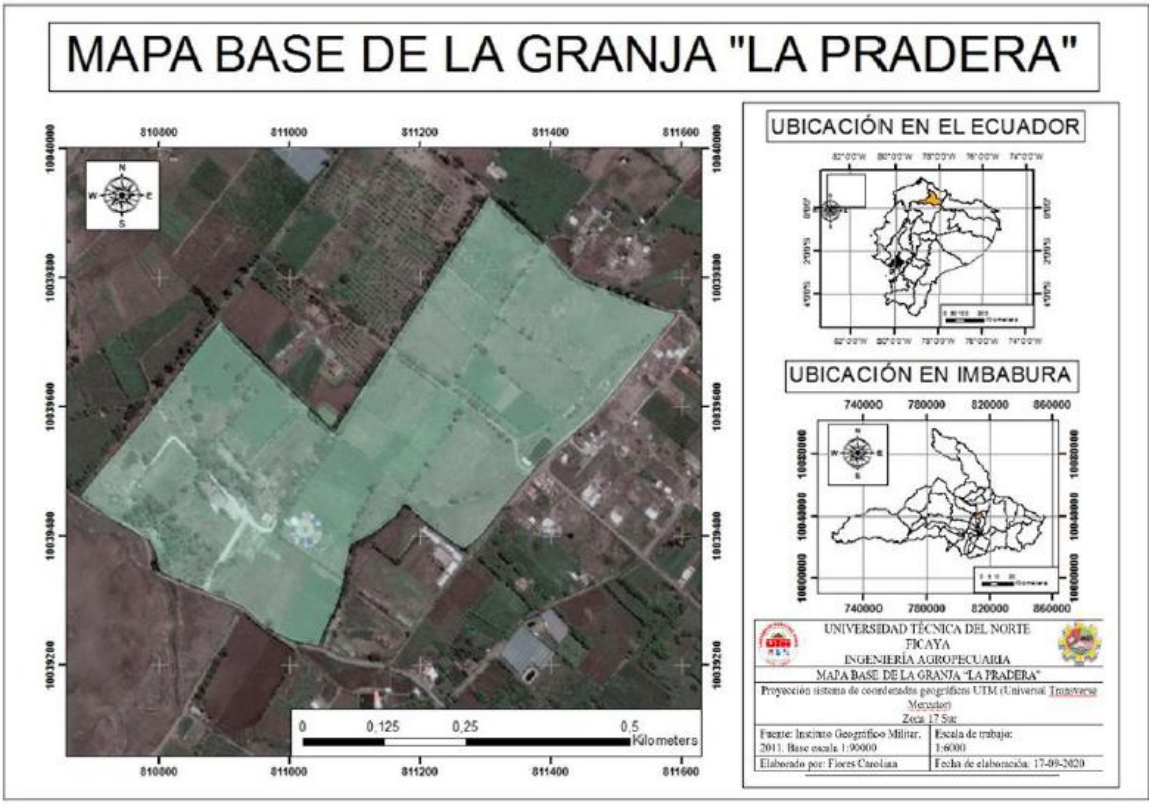
MARCO METODOLÓGICO

3.1 Descripción del área de estudio

La presente investigación se realizará en la Granja Experimental “LA PRADERA”, de la Universidad Técnica del Norte, que se encuentra ubicada en la provincia de Imbabura, cantón Antonio Ante, parroquia San José de Chaltura como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Mapa de la ubicación del área de la investigación.



Fuente: Instituto Geográfico militar (2020).

3.1.1 Caracterización del área de estudio

Tabla 1. **.**

Ubicación geográfica y climática del estudio

Ubicación/ Característica	Descripción
Provincia:	Imbabura
Cantón:	Antonio Ante
Parroquia:	San José de Chaltura
Sector:	Granja Experimental “LA PRADERA”
Altitud:	-78.204756
Temperatura media anual:	14 a 16ºC
Humedad relativa:	70%
Pluviosidad:	500 a 700 mm

3.2 Materiales

En la tabla 2, se presenta los insumos, materiales y equipos a utilizar en campo durante el desarrollo del experimento de campo.

Tabla 2.

Materiales y Equipos de trabajo.

Materiales	Equipos	Insumos
Bandejas de germinación	Celular	Fertilizante orgánico
Azadón	Computadora	Fertilizante químico
Rastrillo	Cuaderno de campo	Semilla de remolacha forrajera
Piola	Hojas de registro	Análisis bromatológico
Cinta métrica	Medidor de clorofila	
Flexómetro		
Rótulos		

3.3 Métodos

El presente estudio se rigió bajo una metodología de investigación experimental de campo y de analítica de laboratorio. El ensayo se estableció en un área neta de 330 m², cuyas características agroecológicas fueron previamente determinadas para contextualizar el comportamiento agronómico real de la remolacha forrajera (Beta vulgaris L.) en la localidad.

A fin de evaluar la respuesta del cultivo ante los diferentes tratamientos de fertilización propuestos, se realizó el seguimiento y cuantificación de las siguientes variables:

Variables de crecimiento vegetal (Evaluación en campo): Altura de la planta, número de hojas, longitud de hojas y contenido de clorofila (parámetro fisiológico).

Variables de rendimiento y morfología del órgano de reserva (Evaluación en cosecha): Longitud del bulbo (con y sin raíz), diámetro del bulbo, peso del bulbo en materia verde (MV) y peso neto del bulbo.

Variables de calidad inmediata (Evaluación en campo): Concentración de sólidos solubles totales determinados mediante grados Brix en el jugo del bulbo.

Variables de composición bromatológica (Análisis de laboratorio): Determinación del perfil nutricional cuantitativo aplicado de forma exclusiva a la fracción de la raíz (bulbo), mediante la cuantificación analítica de: Materia Seca (MS), Proteína Cruda (PC), Fibra Cruda (FC), Extracto Etéreo (EE), Cenizas Totales, Calcio (Ca) y Fósforo (P).

El análisis estadístico de este conjunto integral de variables permitió cuantificar con precisión el efecto de los niveles de fertilización sobre el rendimiento físico y la calidad nutricional final de la raíz, asegurando que los resultados obtenidos reflejen fielmente el potencial agronómico y zootécnico del cultivo bajo las condiciones locales de la parroquia de Chaltura.

3.3.1 Factores en estudio

En esta investigación se utilizó un factor, siendo este los tipos de fertilización que se explica en la Tabla 3.

Tabla 3.

Tipos de fertilización que se utilizará en la remolacha forrajera

Niveles	Tipos de fertilización
0	Testigo
1	Fertilización orgánica
2	Fertilización química

3.3.2 Tratamientos

Tabla 4.

Fertilización que se utilizará en la remolacha forrajera

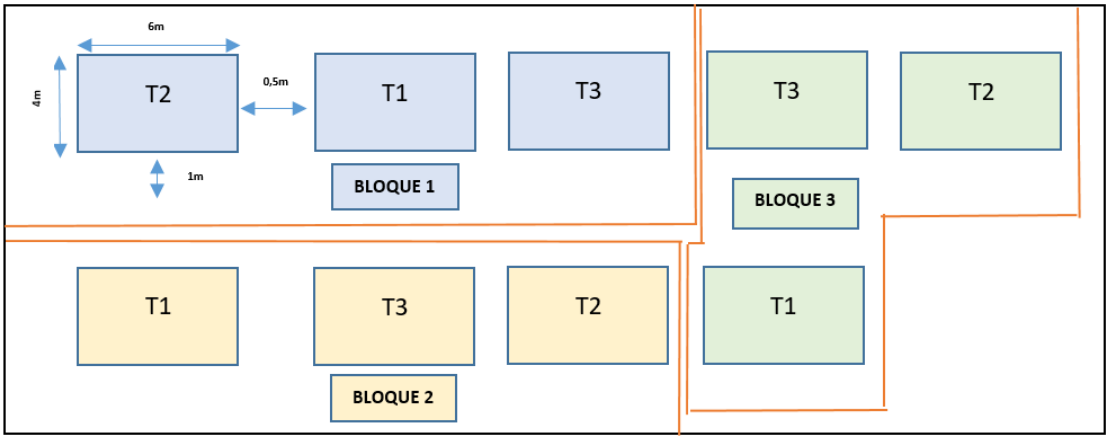
Niveles	Tipos de fertilización
0	Testigo (control negativo)
1	Fertilización orgánica (eco bonaza, roca fosfórica)
2	Fertilización química (nitrato de potasio, carbonato de calcio, fosfato di amónico, sulfato de amonio, sulfato de magnesio)

3.3.3 Diseño experimental

La siguiente investigación se estructuró bajo un Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) conformado por tres bloques y 3 niveles. Cada unidad experimental estuvo integrada por 42 plantas.

Figura 2.

Diseño experimental utilizado en la investigación en el desarrollo productivo de remolacha forrajera.



3.3.4 Características del experimento

En la tabla 5 se presenta las diferentes caracteristicas que se presentó en el proyecto de invetigación.

Tabla 5.

Caracteristicas del experimento

Bloques	*3*
Niveles	*3*
Unidades experimentales	*9*
Área total del experimento	*330m^2*

3.3.4.1 Características de la unidad experimental

A continuación se detallan las características que presentó cada unidad experimental como se muestra en la tabla 6 y el figura 3.

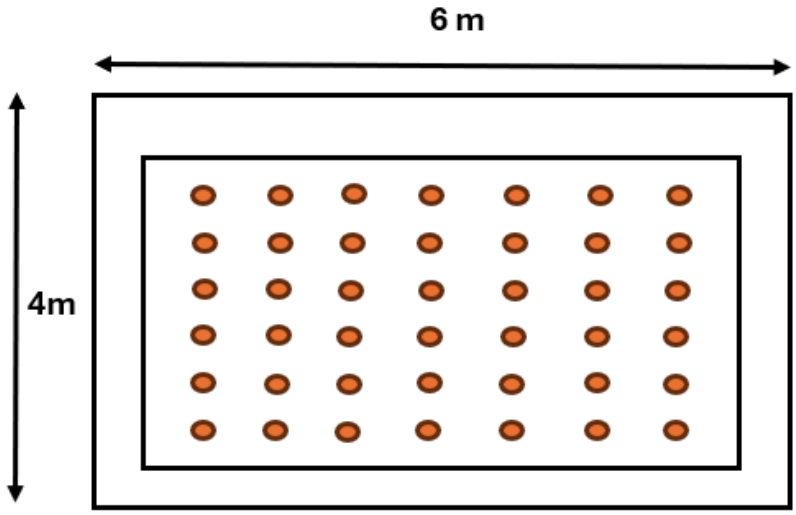
Tabla 6.

Características del experimento

Datos	**Medidas**
Forma	Rectangular
Ancho	10 m
Largo	36 m
Área parcela neta	24 m2
Número de plantas por parcela	42
Número total de plantas por ensayo	378
Distancia entre plantas	0.50 cm
Distancia entre surcos	0.80 cm
Área total	

Figura 3.

Diseño de la unidad experimental que se evaluó



3.3.5 Análisis estadístico

Para el análisis se utilizó el programa InfoStat® versión 2018, se llevó a cabo un análisis de varianza con la prueba de comparación de medias LSD Fisher al 5% para aquellas variables que cumplían con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Para los datos que no cumplían estos criterios, se aplicó la prueba no para métricas de Friedman.

3.3.6 Variables evaluadas

Para evaluar el efecto de la fertilización en el comportamiento agronómico de remolcaha forrajera, se evaluaron las siguientes variables.

3.3.6.1 Altura de la planta.

Esta variable se va a medir (cm) a los 15 días post-siembra cuando la planta ya presenté hojas verdaderas, posteriormente cada 15 días hasta el día de la cosecha, se utilizará una cinta métrica. (Todas las plantas)

3.3.6.2 Clorofila.

La variable clorofila se evaluó mediante mediciones realizadas cada 15 días. Para ello, se seleccionaron 15 plantas por bloque experimental previamente determinadas. En cada planta se registraron lecturas en dos hojas completamente desarrolladas, utilizando un medidor portátil de clorofila. Los datos obtenidos permitieron estimar el estado nutricional y fisiológico de las plantas durante el periodo de evaluación.

3.3.6.3 Número de hojas.

La variable número de hojas se evaluó cada 15 días en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. En cada unidad experimental se realizó el conteo directo del total de hojas presentes por planta al momento de la evaluación. Los datos obtenidos permitieron determinar la dinámica de crecimiento vegetativo durante el periodo de estudio.

3.3.6.4 Longitud del bulbo.

La variable longitud del bulbo se evaluó al momento de la cosecha en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. La medición se realizó desde la base de la corona hasta la punta de la raíz principal, considerando su eje longitudinal. Los valores obtenidos permitieron determinar el desarrollo morfológico del órgano de reserva al final del ciclo productivo.

3.3.6.5 Longitud del bulbo con raíz.

La variable longitud del bulbo sin raíz se evaluó al momento de la cosecha en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. La medición se realizó desde la base de la corona hasta el extremo inferior del bulbo, excluyendo la raíz principal. Los datos obtenidos permitieron determinar el tamaño efectivo del órgano de reserva destinado a la cosecha.

3.3.6.6 Diámetro del bulbo.

La variable diámetro del bulbo se evaluó al momento de la cosecha en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. La medición se realizó en la parte media del bulbo, perpendicular a su eje longitudinal, utilizando una cinta métrica flexible. Los datos obtenidos permitieron determinar el grado de desarrollo y uniformidad del órgano de reserva.

3.3.6.7 Grados Brix.

La variable sólidos solubles totales (Brix) se determinó al momento de la cosecha en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. Para ello, se extrajo una muestra representativa del jugo del bulbo y se realizó la lectura mediante un refractómetro. Los valores expresados en grados Brix permitieron estimar el contenido de azúcares solubles presentes en el órgano de reserva.

3.3.6.8 Peso del bulbo con materia verde.

La variable peso del bulbo con materia verde se determinó al momento de la cosecha en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. Para ello, se registró el peso fresco del bulbo

inmediatamente después de la recolección, incluyendo el contenido total de humedad, utilizando una balanza digital previamente calibrada. Los datos obtenidos permitieron cuantificar la biomasa fresca del órgano de reserva al final del ciclo productivo

3.3.6.9 Peso bulbo.

La variable peso del bulbo se determinó al momento de la cosecha en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. El peso se registró utilizando una balanza digital previamente calibrada. Los valores obtenidos permitieron evaluar el rendimiento individual y el desarrollo del órgano de reserva al final del ciclo del cultivo.

3.3.6.10 Longitud de las hojas.

La variable longitud de hojas se evaluó cada 15 días en las 15 plantas seleccionadas por bloque experimental. La medición se realizó desde la base del pecíolo hasta el ápice de la lámina foliar, utilizando una cinta métrica. Los datos obtenidos permitieron determinar el crecimiento vegetativo y el desarrollo foliar durante el periodo de evaluación.

3.3.6.11 Costo de producción por kilogramo de materia seca.

La variable costo de producción por kilogramo de materia seca se determinó mediante el cálculo del costo total de producción del cultivo dividido para el rendimiento total de materia seca obtenido al final del ciclo productivo. Para ello, se consideraron todos los costos directos e indirectos asociados al proceso productivo. Este indicador permitió evaluar la eficiencia económica del sistema en términos de producción de biomasa seca. Finalmente, el costo de producción se determinó aplicando la siguiente fórmula:

$$CP_{ms} = \frac{CT}{RMS} \quad (1)$$

3.4 Manejo del experimento

Las actividades que se llevaron a cabo durante la etapa de desarrollo de remolacha forrajera fueron las siguientes como se muestra en la Figura 4.

Figura 4.

Manejo del experimento



Nota. A: Análisis de suelo. B: Preparación del suelo. C: Delimitación del terreno. D: Surcado. E: Trasplante. F: Fertilización. G: Monitoreo. H: Riego. I: Control de malezas. J: Registro de datos y cosecha. y K: Bromatológico

3.5 Métodos de producción de remolacha forrajera

3.5.1 Análisis de suelo

Tras la selección del predio para el ensayo, se procedió a la recolección de muestras de suelo con el fin de realizar un análisis del mismo. Se recolectaron cinco muestras de suelo de distintas ubicaciones dentro del predio, asegurando así una representación amplia y fiable de las condiciones del suelo en toda el área del ensayo. La profundidad de muestreo se estableció en no más de 20 cm, lo que corresponde a la zona de mayor actividad radicular de la mayoría de los cultivos y donde se concentran los nutrientes esenciales.

Una vez recolectadas, las muestras de suelo se mezclaron en un recipiente para homogeneizar el material, creando una muestra compuesta que representaba fielmente el suelo del predio en su conjunto. Posteriormente, se empaquetó aproximadamente 1 kg de esta mezcla compuesta para su envío a un laboratorio especializado Agrarproject - Quito. El envío de la muestra al laboratorio estuvo acompañado de un registro detallado de los datos asociados a cada muestra, incluyendo la ubicación de recolección, la profundidad y las condiciones específicas del sitio de muestreo

3.5.2 Preparacion del suelo

El suelo se preparó mediante un sistema de labranza convencional, que consistió en una pasada de arado seguida de dos rastradas, con el objetivo de obtener una superficie uniforme y adecuada para la siembra. Posteriormente, se realizó la surcada utilizando una surcadora, manteniendo una distancia de 80 cm entre surcos.

Las unidades experimentales tuvieron una superficie de 24 m², establecidas en un terreno con condiciones homogéneas de suelo. Entre parcelas se dejaron caminos de 1 m de ancho, los cuales facilitaron las labores de manejo y la toma de datos durante el desarrollo del experimento.

3.5.3 Delimitación del terreno

Una vez preparado el terreno se delimitará las parcelas con sus respectivos surcos ubicando las áreas de separación con sus dimensiones, las unidades experimentales tuvieron una superficie de 24 m², establecidas en un terreno con condiciones homogéneas de suelo. Entre parcelas se dejaron caminos de 1 m de ancho, los cuales facilitaron las labores de manejo y la toma de datos durante el desarrollo del experimento¡

3.5.4 Surcado

Para el surcado se utilizó una distancia de 1m entre surcos con dirección contraria la pendiente para evitar la erosión del suelo.

3.5.5 Transplante

Esta labor se efectuó cuando las plántulas alcanzaron el estado fenológico de 3 a 4 hojas verdaderas, con el propósito de evitar cualquier tipo de estrés fisiológico durante el proceso. En cada bloque experimental se establecieron 42 plántulas, conforme al diseño experimental definido para el estudio.

3.5.6 Fertilización

La aplicación de fertilizantes se inició 15 días después del trasplante de las plántulas, una vez que estas se encontraban plenamente establecidas en el campo. Este periodo permitió asegurar un adecuado enraizamiento y adaptación de las plantas antes de la incorporación de los nutrientes correspondientes a cada tratamiento.

3.5.7 Monitoreo

Esta actividad consistió en realizar visitas periódicas al área experimental con el fin de detectar oportunamente cualquier signo o síntoma de presencia de plagas o enfermedades. De esta manera, fue posible aplicar las medidas de control necesarias a tiempo y prevenir pérdidas significativas en el cultivo.

3.5.8 Riego

El sistema de riego empleado fue por aspersión, iniciando el mismo día del trasplante de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.). Durante las dos primeras semanas, el riego se aplicó cada dos a tres días, con el objetivo de favorecer el adecuado establecimiento de las plántulas. A partir de la tercera semana, la frecuencia de riego se ajustó conforme a los requerimientos hídricos y condiciones climáticas del cultivo, garantizando un suministro óptimo de agua durante todo el ciclo vegetativo.

3.5.9 Control de malezas

El control de malezas se realizó de forma manual, con una frecuencia de dos veces al mes, y posteriormente durante la labor de aporque. Esta práctica tuvo como objetivo mantener el área del cultivo libre de competencia por nutrientes, agua y luz, además de prevenir la proliferación de plagas y enfermedades asociadas a la presencia de malezas.

3.5.10 Aporque

El aporque se realizó de forma manual a los dos meses después de la siembra. Esta labor consistió en la ruptura de la costra superficial del suelo y el acercamiento de tierra al tallo de las plantas, con el propósito de mejorar la aireación del suelo, facilitar el desarrollo radicular y promover un crecimiento óptimo del cultivo de remolacha forrajera

3.5.11 Registro de datos

Se realizó el registro de las variables altura de planta, contenido de clorofila y número de hojas cada 15 días, a partir del establecimiento del cultivo. Estas mediciones permitieron evaluar el desarrollo vegetativo y la respuesta de la remolacha forrajera frente a los diferentes tratamientos de fertilización aplicados.

3.5.12 Cosecha

La cosecha se realizó de forma manual, extrayendo las plantas mediante un jalón directo para desprender completamente la raíz del suelo. Posteriormente, se procedió a la evaluación de las

variables agronómicas correspondientes, las cuales fueron: longitud del bulbo sin raíz, longitud total del bulbo con raíz, diámetro del bulbo, grados Brix, peso del bulbo con materia verde (MV), peso del bulbo y longitud de hojas. Estas mediciones permitieron determinar el efecto de los tratamientos de fertilización sobre el crecimiento y rendimiento de la remolacha forrajera.

3.5.13 Análisis bromatológico

Se realizará un análisis bromatológico para determinar el contenido nutricional de la remolacha forrajera, para esto se tomará porciones de tres partes de la planta (alta, media baja) hasta completar un 1kg el mismo que se colocará en una funda de papel, debidamente identificado y rotulado; posteriormente se enviará al laboratorio las muestras de la remolacha forrajera para determinar sus respectivos contenidos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Longitud del bulbo

El resultado del análisis de varianza (ANOVA) indica que no existió diferencia estadística (p = 0.4129) entre los tratamientos evaluados para la variable longitud del bulbo (sin raíz). Este hallazgo demostraría que la elongación del bulbo no se encuentra condicionada por la fuente de fertilización.

Tabla 7.

Longitud del bulbo de remolacha forrajera con diferentes niveles de fertilización

Nivel	Longitud del bulbo	E.E.
N0	49.37	±2.17[a]
N1	45.72	±2.41[a]
N2	47.99	±2.33[a]

Nota: los superíndices con letras iguales no presentan diferencia estadística (p>0.05), E.E: error estándar

La tabla 7 muestra que no existe diferencia entre los niveles de fertilización al compartir todas las medias un mismo literal (a). Sin embargo, de forma numérica se observa que el N0 mostraría un desarrollo superior al resto de niveles con una media de 49.37 cm de longitud de bulbo.

El desarrollo longitudinal homogéneo observado entre todos los tratamientos halla su sustento biológico en que la elongación de la raíz es una variable macro-morfológica fuertemente regulada por los factores genéticos heredables propios de la variedad. Este comportamiento coincide con lo reportado por Jiménez et al. (2020), quienes sostienen que ciertas características estructurales y morfológicas de anclaje en raíces forrajeras alcanzan un plateau o umbral fisiológico máximo; una vez alcanzado este límite genotípico, la adición de macronutrientes o la variación en las fuentes de fertilización no generan una respuesta lineal en la longitud, debido a que la planta prioriza fronteras celulares preestablecidas.

Fisiológicamente, el hecho de que el nivel testigo (N0) haya registrado numéricamente la mayor longitud se explica por lo expuesto por Chauca (2012) en ecosistemas andinos. Ante la escasez o ausencia de nutrientes de rápida disponibilidad en la capa superficial, las plantas de

raíz forrajera activan mecanismos morfológicos de compensación, priorizando la tasa de elongación celular del órgano subterráneo hacia los horizontes más profundos del perfil del suelo en busca de humedad y elementos móviles. No obstante, este estiramiento basal ocurre a expensas del grosor del Bulbo.

Esta hipótesis se amarra perfectamente con el fenómeno de crecimiento alométrico detectado en el tratamiento de química balanceada (N2). Aunque el nivel N2 no difirió en longitud, tus resultados globales demostraron que fue ampliamente superior en peso neto y diámetro. Al respecto, Concepción (2021) menciona que cuando el cultivo dispone de nutrientes de alta solubilidad, los fotoasimilados excedentes sintetizados en el aparato foliar no se destinan a la elongación vertical del bulbo, sino que se translocan para el llenado volumétrico y la expansión celular lateral. Como complementan Brar et al. (2015), una nutrición mineral balanceada optimiza el volumen y el peso neto del órgano de reserva (llenado del bulbo), pero mantiene la longitud restringida dentro de los rangos genotípicos estables de la especie.

Por otra parte, la respuesta del nivel N1 (fertilización orgánica), que obtuvo numéricamente la menor longitud (45.72 cm), se asocia a la dinámica de mineralización lenta de las enmiendas estables. Según Muñoz et al. (2015), los abonos orgánicos no estimulan un crecimiento vertical acelerado en los ejes principales durante las etapas iniciales de establecimiento, sino que promueven la ramificación de raíces secundarias y una estructura celular más compacta que estabiliza las dimensiones estándar del órgano de almacenamiento.

Finalmente, la variabilidad interna expresada a través del coeficiente de variación (27.67%) se atribuye a las propiedades físicas y mecánicas del suelo de la Granja "La Pradera" en Chaltura. Conforme el bulbo se expande, factores edáficos locales como la resistencia a la penetración, la compactación y la presencia de micro-terrones ejercen una presión hidrostática y mecánica directa sobre el ápice radicular. Tal como señala Quintero (2006), estas limitantes mecánicas provocan ligeras variaciones azarosas en la forma y longitud final de las raíces forrajeras en el campo, manifestándose de manera independiente a los tratamientos químicos u orgánicos aplicados.

4.2 Longitud del bulbo con raíz

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) demostraron que no existieron diferencias estadísticas significativas ($p = 0.3100$) para la variable longitud del bulbo con raíz de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) por efecto del factor nivel de fertilización. Este resultado inferencial conlleva a determinar que el crecimiento en longitud total del sistema radicular no depende de las fuentes de nutrición aplicadas en el ensayo. La media general observado para

esta variable fue de 31.60 cm, registrando un coeficiente de variación del 25.22%, lo que demuestra un desarrollo morfológico homogéneo y un control experimental adecuado entre las unidades evaluadas en la parroquia de Chaltura. Con base en la prueba de separación de medias de LSD Fisher presentada en la Tabla 8, se confirmó que todos los regímenes nutricionales evaluados pertenecen al mismo rango de significancia estadística, siendo clasificados unánimemente dentro del grupo literal "A".

Tabla 8.

Longitud de la remolacha forrajera con raíz expresados en cm

Nivel	Media	E.E.
0	31.32	±1.46[a]
1	30.53	±1.45[a]
2	32.96	±1.34[a]

La estabilidad dimensional observada en la longitud del bulbo con raíz frente a los distintos tratamientos se relaciona con el hecho de que el sistema radicular de la planta conserva una alta resiliencia morfológica, independientemente de la carga nutricional externa. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Jiménez et al. (2020), quienes señalan que el crecimiento longitudinal de la raíz pivotante está más condicionado por la estructura física, la textura y la porosidad intrínseca del suelo que, por la acción directa de la fertilización química u orgánica, limitando la penetración vertical una vez alcanzada la base compacta del horizonte cultivable.

Fisiológicamente, el hecho de que el nivel N2 (química balanceada) haya presentado numéricamente el mayor valor de longitud, aunque sin significancia estadística, se asocia con lo expuesto por Brar et al. (2015). Estos autores indican que, en condiciones de suficiencia de nutrientes de rápida disponibilidad, la planta no requiere extender desproporcionadamente su longitud radicular principal en busca de recursos, logrando un equilibrio funcional donde el tratamiento con mayor biomasa aérea no necesariamente manifiesta raíces principales más largas que el tratamiento control. Esta independencia entre el crecimiento foliar y la longitud radicular es una característica adaptativa de cultivos que priorizan la estabilidad del anclaje antes de iniciar el llenado del órgano de reserva.

Asimismo, los resultados evidenciaron la ausencia de variación estadística entre el nivel orgánico (N1) y el testigo (N0). Al respecto, Muñoz et al. (2015) mencionan que los abonos orgánicos promueven una mejora paulatina en las propiedades biológicas de la rizosfera, estimulando preferencialmente el desarrollo de raíces secundarias y pelos absorbentes en lugar de forzar la elongación del eje principal o pivotante. Esto explica por qué la arquitectura y la capacidad de absorción radicular total pueden optimizarse sin alterar de manera drástica las dimensiones longitudinales macroscópicas del cultivo.

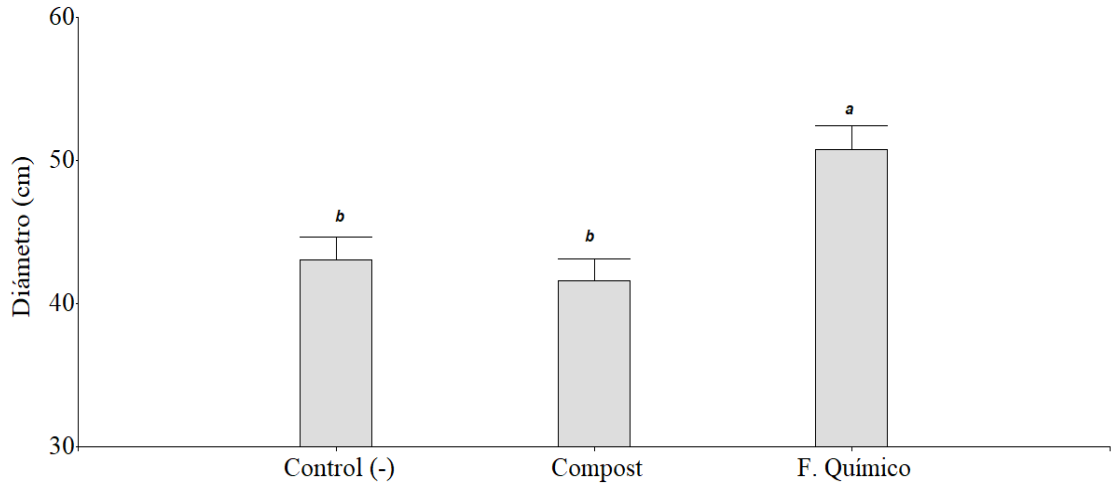
Finalmente, los datos demuestran que hacia el término del ciclo fenológico la longitud con raíz tiende a estabilizarse en torno a la media general del ensayo. Chauca (2012) afirma que una vez alcanzado un umbral nutricional y de humedad óptimo en el suelo, la elongación vertical de la cofia y el eje radicular se detiene debido a una regulación fisiológica interna de la planta asociada a la madurez morfológica. Esto genera que los diferentes tratamientos converjan en tamaños similares al momento de la cosecha, independientemente de la fuente de fertilizante que haya abastecido el sistema en el suelo de la parroquia de Chaltura (Quintero, 2006).

4.3 Diámetro del bulbo

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) demostraron que existieron diferencias estadísticas altamente significativas ($p = 0.0002$) para la variable diámetro del bulbo de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) por efecto del factor nivel de fertilización. Este hallazgo inferencial confirma que el desarrollo transversal y el calibre del órgano de reserva dependen de manera directa de las fuentes de nutrición aplicadas en el sistema. La media general del ensayo para esta variable fue de 45.15 cm, registrando un coeficiente de variación del 24.84%, lo que refleja una fluctuación esperada para variables de rendimiento dimensional evaluadas bajo condiciones de campo en la parroquia de Chaltura.

Figura 5.

Comparación del diámetro del bulbo entre tratamientos



La respuesta marcadamente positiva del diámetro del bulbo hacia la fertilización mineral se relaciona con el incremento en la disponibilidad inmediata de macronutrientes esenciales en el suelo durante las fases de mayor requerimiento fisiológico del cultivo. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Castillo (2020), quien menciona que el diámetro del órgano de reserva es una de las variables morfológicas más plásticas y sensibles a la fertilización, puesto que refleja de manera directa la capacidad de la planta para translocar y acumular sustancias de reserva en sus tejidos de almacenamiento secundario.

Fisiológicamente, el hecho de que el nivel N2 promoviera un calibre significativamente superior en los bulbos concuerda con lo descrito por Malavia y Guerrero (2019). Los fertilizantes de alta solubilidad proporcionan un flujo continuo y rápido de nitrógeno y potasio en la rizosfera; estos elementos actúan como cofactores osmóticos fundamentales que estimulan una división y expansión celular más acelerada en los tejidos cambiales del bulbo durante sus etapas críticas de desarrollo, resultando en un crecimiento alométrico horizontal superior en comparación con plantas deficientes o con baja disponibilidad de nutrientes.

Asimismo, los resultados evidenciaron que el nivel N1 (fertilización orgánica) quedó relegado al grupo inferior "b", sin marcar diferencias estadísticas frente al testigo (N0). De acuerdo con Salazar et al. (2018), este fenómeno se atribuye a la lenta tasa de mineralización y liberación de nutrientes que caracteriza a las enmiendas orgánicas estables en zonas de altitud andina, cuya disponibilidad asincrónica no logra cubrir la curva de demanda máxima del cultivo de remolacha forrajera durante el ciclo evaluado en Chaltura. Como consecuencia, el tejido celular

no recibe el estímulo hídrico y osmótico necesario para inducir una expansión transversal relevante, comportándose de manera homóloga a la ausencia de fertilización.

De igual manera, los resultados coinciden con lo reportado por Chirinos (2021), quien encontró que las variables de grosor y volumen neto de almacenamiento son fuertemente dependientes de la concentración de la solución del suelo y del aporte mineral balanceado, donde la nutrición química optimiza el diámetro comercial y el rendimiento energético de la especie. Finalmente, esta respuesta diferencial corrobora lo expuesto por Aparicio (2023), quien indica que, a diferencia de las variables de longitud vertical (las cuales están gobernadas principalmente por la genética y la resistencia física del suelo), el calibre transversal es una variable altamente maleable determinada por la nutrición, donde el llenado eficiente del bulbo se estabiliza positivamente cuando la planta alcanza un plano nutricional óptimo antes de la madurez de cosecha.

4.4 Grados Brix

Para la variable sólidos solubles totales (°Brix), la evaluación previa de los supuestos demostró que los datos no presentaron una distribución normal según la prueba de Shapiro-Wilk modificada ($p < 0.0001$). Por tal motivo, se procedió a evaluar el comportamiento de la variable mediante la alternativa no paramétrica de la prueba de Kruskal-Wallis. El análisis estadístico determinó que el factor nivel de fertilización no ejerció un efecto estadísticamente significativo sobre el contenido de azúcares solubles en el cultivo ($p = 0.6548$). La media general registrado al momento de la cosecha para esta variable de calidad fue de 6.87° Brix, denotando una marcada homogeneidad cualitativa entre las unidades de muestra evaluadas en la parroquia de Chaltura. Al aplicar la prueba de comparación múltiple no paramétrica de Kruskal-Wallis detallada en la Tabla 9, se ratificó que todos los regímenes nutricionales evaluados compartieron de forma unánime el mismo rango de significancia estadística, perteneciendo al grupo literal "a".

Tabla 9.

Grados Brix de la remolacha forrajera en el día de la cosecha

Nivel	Medias	E.E.
0	7.00	±1.57[a]
1	6.88	±1.47[a]
2	6.73	±1.66[a]

Al realizar la interpretación analítica de la Tabla 9, se observa que, desde una perspectiva estrictamente numérica, el nivel testigo N0 (control) exhibió el promedio sutilmente más alto con 7.00 ± 1.57° Brix, seguido en orden decreciente por el nivel N1 (fertilización orgánica) con 6.88 ± 1.47° Brix y el nivel N2 (fertilización química) con 6.73 ± 1.66° Brix. Sin embargo, el análisis estadístico inferencial confirma que estas ligeras variaciones aritméticas no poseen relevancia estadística, clasificando a todos los tratamientos en un único grupo homogéneo. Esto demuestra que los regímenes nutricionales aplicados en el suelo no indujeron alteraciones sustanciales en la concentración de azúcares solubles en el tejido cosechado.

La notable estabilidad observada en los grados Brix a través de los diferentes niveles de fertilización sugiere que la síntesis y acumulación de carbohidratos no estructurales en la remolacha forrajera (Beta vulgaris L.) es un parámetro fisiológico fuertemente ligado a su potencial genotípico y a las condiciones de radiación solar ambiental de la parroquia de Chaltura, antes que a la carga de nutrientes minerales u orgánicos aplicada al suelo.

Fisiológicamente, la concentración de azúcares disueltos en el jugo vacuolar celular actúa como un mecanismo osmorregulador adaptativo. Al respecto, Loel et al. (2014) sostienen que el contenido de azúcares en Beta vulgaris L. es un indicador de calidad interna endógeno altamente canalizado genéticamente que tiende a mantenerse constante bajo regímenes de fertilización diferenciados, siempre y cuando el cultivo no sea sometido a condiciones de estrés hídrico severo o salinidad extrema que fuercen una concentración artificial de solutos por deshidratación tisular.

Resultados análogos fueron reportados por Pytlarz et al. (2020), quienes reafirman que mientras la fertilización nitrogenada (predominante en el nivel N2) impacta significativamente en variables de crecimiento alométrico como el diámetro, volumen y peso fresco, la acumulación final de grados Brix depende en mayor medida de la tasa fotosintética neta diurna

y de la eficiencia enzimática de la sacarosa sintasa en la translocación de fotoasimilados desde las hojas fuente hacia el parénquima de reserva durante la etapa de maduración fenológica.

Este comportamiento explica por qué, a pesar de que el nivel químico (N2) estimuló divisiones celulares que resultaron en calibres y diámetros marcadamente superiores, la calidad interna e hidrocarbonada medida en °Brix fue equivalente a la del tratamiento control (N0). El fenómeno se fundamenta en un efecto de dilución fisiológica descrito por Märländer et al. (2003), donde el mayor volumen de agua acumulado en las vacuolas de los bulbos del nivel N2 compensó el incremento total de carbohidratos sintetizados, equilibrando la concentración porcentual de sólidos solubles y equiparándola con los tratamientos de menor desarrollo general (N0 y N1).

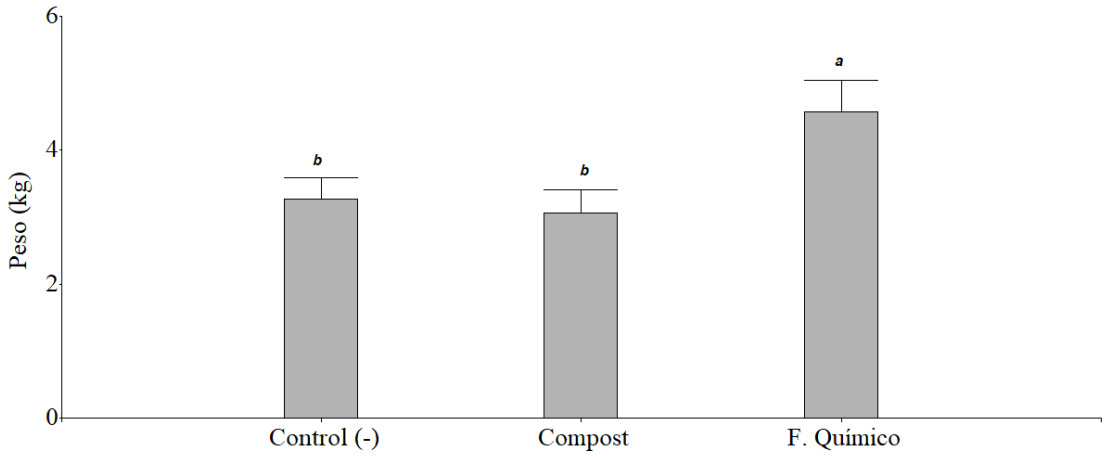
Finalmente, los resultados coinciden con lo reportado por Kenter y Hoffmann (2009), quienes postulan que las especies forrajeras de base radicular cultivadas bajo condiciones climáticas estables tienden a regular de forma autónoma su madurez química, estabilizando los niveles de azúcares en rangos óptimos para la palatabilidad ganadera, de forma independiente a la tasa de absorción de macronutrientes del agroecosistema local.

4.5 Peso del bulbo con materia verde-hojas

El análisis de varianza determinó que el factor nivel de fertilización ejerce un efecto estadísticamente significativo ($p = 0.0218$) sobre la acumulación de peso con materia verde total en el cultivo de remolacha forrajera (Beta vulgaris L.). Este resultado evidencia que la producción de biomasa fresca total por planta es una variable morfológica con una alta plasticidad fenotípica ante la oferta y disponibilidad de nutrientes en el suelo. El ensayo registró una media general de 3.63 kg por planta, con un coeficiente de variación del 72.45%, lo cual refleja una fluctuación acentuada, característica común en variables cuantitativas de rendimiento evaluadas bajo condiciones de campo abierto en la parroquia de Chaltura. De acuerdo con la prueba de comparación múltiple detallada en la Figura 6, los tratamientos se segmentaron en dos rangos de significancia estadística definidos.

Figura 6.

Peso del bulbo con materia verde (hojas) expresados en kg



Al realizar la interpretación analítica (cuyos rangos se proyectan de forma gráfica en la Figura 6), el nivel N2 (fertilización química) obtuvo el mayor rendimiento promedio con 4.57 kg por planta, superando de forma categórica al tratamiento testigo N0 (3.27 kg) y al nivel orgánico N1 (3.06 kg). Matemáticamente, la aplicación mineral balanceada representó una superioridad del 39.75% en comparación con el control y del 49.34% respecto a la enmienda orgánica. El análisis inferencial agrupó a los niveles N0 y N1 en el rango estadístico inferior "b", demostrando que ambos tratamientos mantuvieron un comportamiento homólogo y que la adición de compost no generó un estímulo suficiente a corto plazo para diferenciar el peso de la biomasa respecto al suelo sin fertilizar.

La respuesta diferencial y superior observada en el nivel N2 se fundamenta en la alta solubilidad y disponibilidad inmediata de los macronutrientes esenciales (nitrógeno, fósforo y potasio) que caracterizan a las fuentes de fertilización sintéticas. Fisiológicamente, el nitrógeno disponible de forma inmediata en las primeras etapas fenológicas acelera la tasa de división celular y expande el área foliar. Esta dinámica coincide con lo reportado por Abebe y Chala (2019), quienes señalan que la nutrición mineral balanceada maximiza el índice de área foliar en las quenopodiáceas forrajeras, optimizando la intercepción de la radiación solar y, en consecuencia, incrementando el peso fresco acumulado tanto en el dosel aéreo (follaje) como en el órgano de reserva basal (bulbo).

Por el contrario, el rezago estadístico del nivel N1 (orgánico) dentro del grupo "b" responde directamente a los tiempos de descomposición y asimilación de las enmiendas sólidas estables. En suelos de zonas andinas como Chaltura, los procesos microbianos de mineralización suelen

ocurrir de forma paulatina debido a las fluctuaciones térmicas y edáficas locales. Como explican Romero y Benavides (2021), la liberación asincrónica de nutrientes desde fuentes orgánicas no logra abastecer los picos de máxima demanda metabólica en cultivos de raíces reservantes durante su fase de expansión vegetativa activa. Esto provoca que el tejido vegetal mantenga un ritmo de crecimiento volumétrico restringido, muy similar al del suelo no tratado (N0), limitando la ganancia neta de biomasa total al momento de la cosecha.

Este patrón de desarrollo alométrico, donde la fertilización química supera netamente a la orgánica en el peso de la biomasa húmeda, ha sido corroborado por Gislum et al. (2016). Estos autores afirman que, para la producción masiva de forraje verde con un alto contenido de humedad interna, las fuentes minerales solubles actúan como un disparador osmótico indispensable; la rápida absorción de sales fertilizantes regula la turgencia de las vacuolas celulares y consolida calibres y pesos netos superiores en los órganos cosechados al final del ciclo fenológico en el agroecosistema de estudio.

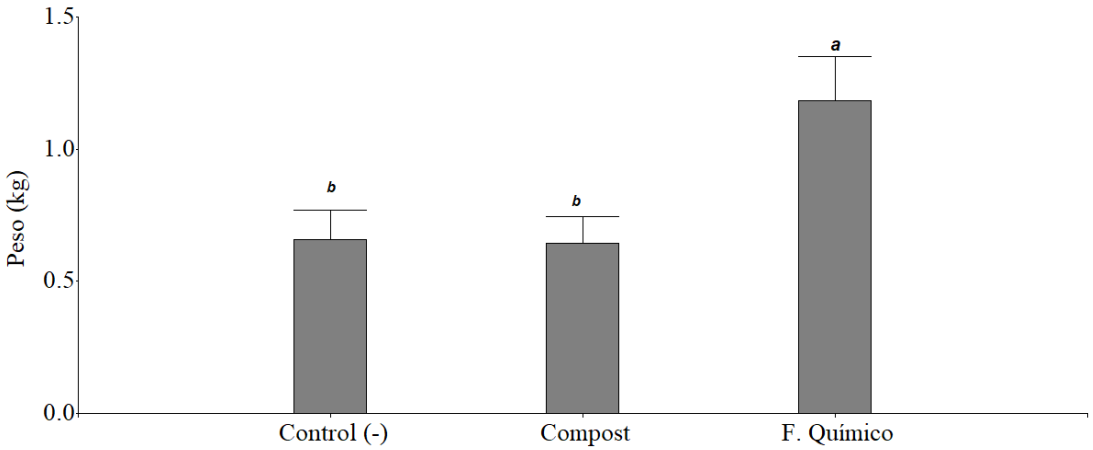
4.6 Peso del bulbo

El análisis de varianza (ANOVA) demostró que el factor nivel de fertilización ejerce un efecto altamente significativo ($p = 0.0053$) sobre la acumulación de peso neto en el bulbo de la remolacha forrajera (Beta vulgaris L.). Este resultado evidencia que la traslocación de fotoasimilados y la consecuente ganancia de masa en el órgano de reserva basal es una variable con una marcada sensibilidad fenotípica ante la oferta de nutrientes en la rizósfera. El ensayo registró una media general de 0.83 kg por bulbo, con un coeficiente de variación del 107.47%. Esta elevada fluctuación porcentual es un comportamiento metodológicamente esperado en variables biológicas de rendimiento subterráneo evaluadas bajo condiciones de campo abierto, donde micro variaciones edáficas y la competencia intraespecífica acentúan la heterogeneidad del peso individual de las raíces.

.

Figura 7.

Peso del bulbo de la remolacha forrajera expresados en Kg



Al realizar la interpretación analítica (cuyos rangos se proyectan gráficamente en la Figura 7), el nivel N2 (fertilización química) obtuvo el mayor rendimiento volumétrico con un promedio de 1.18 ± 0.11 kg por bulbo, superando de forma categórica al testigo N0 (0.66 kg) y al nivel orgánico N1 (0.64 kg). Desde una perspectiva matemática, la nutrición mineral soluble duplicó prácticamente el peso del órgano de reserva, alcanzando una superioridad del 78.78% en relación con el control y del 84.37% respecto a la enmienda orgánica. El análisis inferencial agrupó a los niveles N0 y N1 en el rango estadístico inferior "b", demostrando que ambos tratamientos mantuvieron un comportamiento homólogo y que la aplicación de compost no generó un estímulo suficiente para diferenciar el peso neto de la raíz respecto al suelo sin fertilizar.

La respuesta diferencial y marcadamente superior observada en el nivel N2 se fundamenta en la alta solubilidad y disponibilidad inmediata de los macronutrientes esenciales en especial nitrógeno y potasio que caracterizan a los fertilizantes sintéticos. Fisiológicamente, la sincronía entre la oferta de nutrientes y las etapas críticas de desarrollo del cultivo expande el aparato fotosintético. Esta dinámica coincide con lo reportado por Abebe y Chala (2019), quienes señalan que una nutrición mineral balanceada maximiza el índice de área foliar en las quenopodiáceas forrajeras, optimizando la intercepción de la radiación solar y, en consecuencia, incrementando el flujo de carbono fijado que es direccionado hacia el sumidero o depósito de almacenamiento que representa el bulbo basal.

Por el contrario, el rezago estadístico del nivel N1 (orgánico) dentro del grupo "b" responde de forma directa a la cinética de descomposición y mineralización de las enmiendas sólidas estables. En los suelos de la parroquia de Chaltura, los procesos microbianos que transforman

las fracciones orgánicas en iones asimilables para la planta suelen ocurrir de forma paulatina debido a las condiciones térmicas y edáficas locales. Como explican Romero y Benavides (2021), la liberación asincrónica de nutrientes desde fuentes orgánicas no logra abastecer los picos de máxima demanda metabólica en cultivos de raíces reservantes durante su fase de expansión celular activa. Esto provoca que la planta mantenga un ritmo de almacenamiento de carbohidratos restringido, muy similar al del suelo no tratado (N0), limitando la ganancia neta de biomasa en el bulbo al momento de la cosecha.

Este patrón de desarrollo alométrico, donde la fertilización química supera netamente a la orgánica en el peso fresco de los órganos de reserva, ha sido corroborado por Gislum et al. (2016). Estos autores afirman que, para la producción masiva de forrajes suculentos con un alto contenido hídrico celular, las fuentes minerales solubles actúan como un disparador osmótico indispensable; la rápida absorción de sales disueltas regula el potencial osmótico vacuolar, permitiendo una mayor entrada de agua y consolidando de esta manera calibres y pesos netos marcadamente superiores en los bulbos cosechados al término del ciclo fenológico.

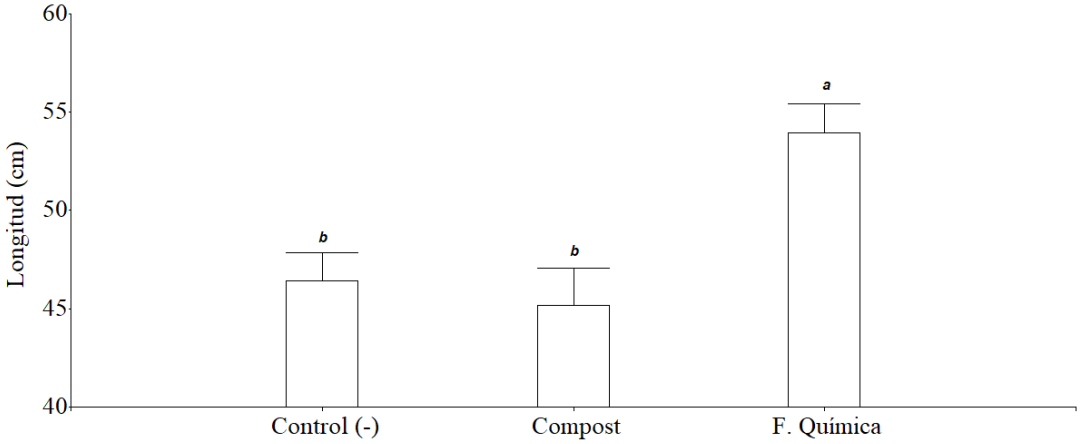
4.7 Longitud de las hojas

La variable longitud de la hoja presentó una distribución normal de acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk ($p = 0.2160$), validando el uso de la estadística paramétrica. El análisis de varianza (ADEVA) determinó efectos altamente significativos del factor nivel de fertilización sobre esta característica morfológica ($p = 0.0007$), lo que demuestra que la elongación del aparato foliar responde de forma directa a la naturaleza de las fuentes nutricionales aplicadas. El ensayo registró una media general de 48.51 cm.

En la Figura 8 se detalla el comportamiento de la longitud foliar expresada en cm al momento de la cosecha. Mediante la prueba de comparación de medias de LSD de Fisher ($p < 0.05$), el nivel N2 (químico) se ubicó en el rango estadístico superior con un promedio de 53.94 ± 2.82 cm (Grupo "a"), superando por casi 8 cm de diferencia a los tratamientos N1 y N0. Los niveles N1 (orgánico) y N0 (testigo) alcanzaron longitudes de 45.96 ± 2.96 cm y 45.62 ± 2.92 cm, respectivamente; el análisis inferencial los agrupó en el mismo rango estadístico inferior (Grupo "b"), confirmando que no existieron diferencias significativas entre ellos.

Figura 8.

Longitud de hojas expresadas en cm



El mayor desarrollo foliar observado en el nivel N2 es un indicador de un vigor vegetativo estimulado por la asimilación acelerada de nutrientes de síntesis química. Fisiológicamente, la longitud de la hoja es una variable biométrica ligada a la plasticidad del dosel fotosintéticamente activo.

Esta respuesta coincide con lo planteado por Hoffmann *et al.* (2018), quienes sostienen que un suministro óptimo y balanceado de nitrógeno soluble en las fases de establecimiento estimula la división y expansión celular en el tejido mesófilo, incrementando la longitud foliar y, por ende, optimizando la capacidad de intercepción de la radiación solar para la posterior manufactura de fotoasimilados.

Por otro lado, la similitud estadística entre el nivel orgánico (N1) y el testigo sin fertilizar (N0) expone la lenta cinética de liberación de los abonos estables. Como señalan Malnou *et al.* (2008), las formas moleculares complejas presentes en el compost orgánico requieren de una tasa de mineralización que muchas veces no coincide con el periodo crítico de diferenciación celular foliar en las quenopodiáceas. Esto explica por qué el nivel N1 no logró la concentración umbral de nitrógeno nítrico y amoniacal requerida en la solución del suelo para inducir una elongación foliar superior a la del suelo nativo.

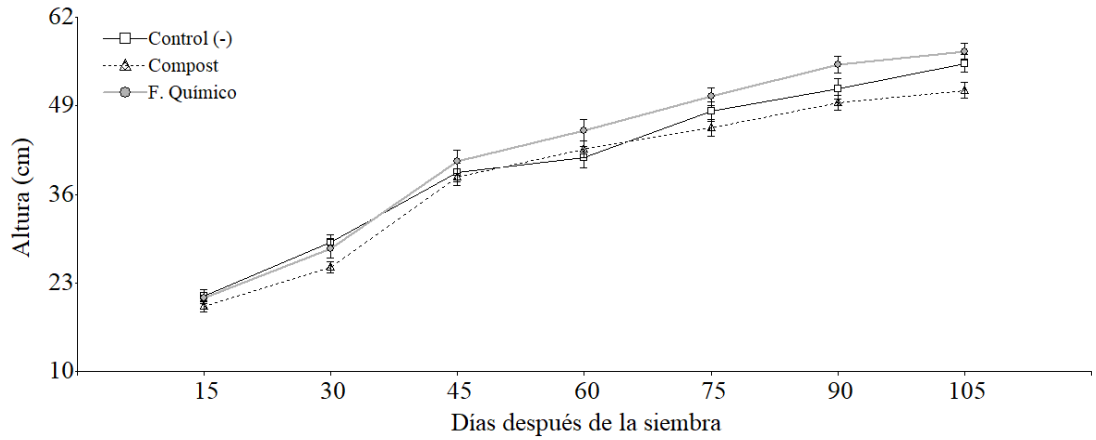
Esta ventaja morfológica del tratamiento mineral sobre el orgánico en variables de crecimiento alométrico ha sido fundamentada de igual manera por Tsialtas y Maslaris (2012), quienes argumentan que la disponibilidad inmediata de elementos esenciales promueve una arquitectura foliar más robusta. En este sentido, el alargamiento del limbo y el pecíolo en el nivel N2 funcionó como el motor fisiológico principal del cultivo, permitiendo una mayor superficie de captación lumínica que se tradujo de forma proporcional en el llenado y peso final de los bulbos de reserva.

4.8 Altura de la planta

La variable altura de la planta presentó una distribución normal de acuerdo con la prueba de Shapiro-Wilk modificada (p = 0.4497), validando metodológicamente el uso de la estadística paramétrica mediante un análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas en el tiempo. El ANOVA determinó efectos estadísticamente significativos para la interacción entre los días después de la siembra y el nivel de fertilización, así como efectos altamente significativos de forma independiente para el factor principal Nivel de fertilización (p < 0.0001). El ensayo registró una media general acumulada de 36.96 cm y un coeficiente de variación general del 17.06%, lo cual denota una excelente homogeneidad experimental en el desarrollo longitudinal del dosel en la parroquia de Chaltura.

Figura 9.

Altura de la planta con relación a días después del trasplante (cm)



Al realizar la interpretación analítica (cuyo comportamiento dinámico e interacción temporal a los 15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 dds se ilustra en la Figura 5), el nivel N2 (fertilización química) se posicionó de manera contundente en el rango superior "a" con un promedio general de 41.22 ± 0.69 cm. Esto representó una superioridad matemática del 18.61% en comparación con el testigo (N0) y del 18.10% con respecto al nivel N1 (fertilización orgánica). Los niveles N1 y N0 compartieron el rango inferior "b", demostrando un comportamiento homólogo entre sí. El factor tiempo evidenció una evolución progresiva del crecimiento, iniciando con una media general de 18.23 cm a los 15 dds hasta alcanzar el pico de máxima elongación a los 105 dds con un promedio de 54.48 cm.

La respuesta de la altura de la planta a través del tiempo describió una curva de crecimiento sigmoidal típica de las especies de raíces reservantes. La clara ventaja numérica y estadística

del nivel N2 responde de manera directa a la sincronía entre la asimilación de nutrientes de alta solubilidad y las fases de máxima división celular activa del cultivo. El aporte inmediato de nitrógeno y fósforo mineral actúa de forma directa sobre el meristemo apical, estimulando la elongación de los tejidos de soporte y el alargamiento de los entrenudos. Esta dinámica morfológica concuerda con lo descrito por Jaggard et al. (2009), quienes explican que una alta disponibilidad de nitrógeno nítrico en las primeras fases fenológicas acelera la tasa de expansión foliar y vertical de las quenopodiáceas, permitiendo establecer un dosel aéreo vigoroso antes de entrar a las fases críticas de almacenamiento metabólico.

Por otra parte, la interacción significativa detectada entre los factores temporales y los nutricionales demuestra que las divergencias entre los tratamientos se acentuaron a medida que el cultivo avanzó en su ciclo biológico y aumentó su demanda energética, abriéndose la brecha a favor del fertilizante sintético a partir de los 45 dds. De acuerdo con lo planteado por Milford et al. (1985), el crecimiento longitudinal del aparato vegetativo en la remolacha alcanza su velocidad máxima y su posterior estabilización justo antes del inicio de la bulbificación intensiva. En este punto (correspondiente a los 105 dds en esta investigación), los sumideros fisiológicos cambian drásticamente y los fotoasimilados producidos en las hojas se redirigen prioritariamente hacia el parénquima de reserva del bulbo subterráneo, deteniendo la ganancia de altura vertical.

Finalmente, el hecho de que el nivel N1 (orgánico) quedara rezagado en el grupo inferior "b" sin superar al testigo sin fertilizar (N0) ratifica las limitaciones de transferencia de masa que caracterizan a las enmiendas compostadas estables. Como sostienen Lovera et al. (2020), en los suelos de la región andina las bajas tasas de mineralización inicial de la materia orgánica restringen el flujo de nutrientes asimilables durante la fase de crecimiento exponencial del cultivo. Esto impidió que el nivel N1 generara un estímulo cinético superior al crecimiento natural del suelo testigo de la Granja "La Pradera", consolidando alturas finales estadísticamente equivalentes a la ausencia de fertilización.

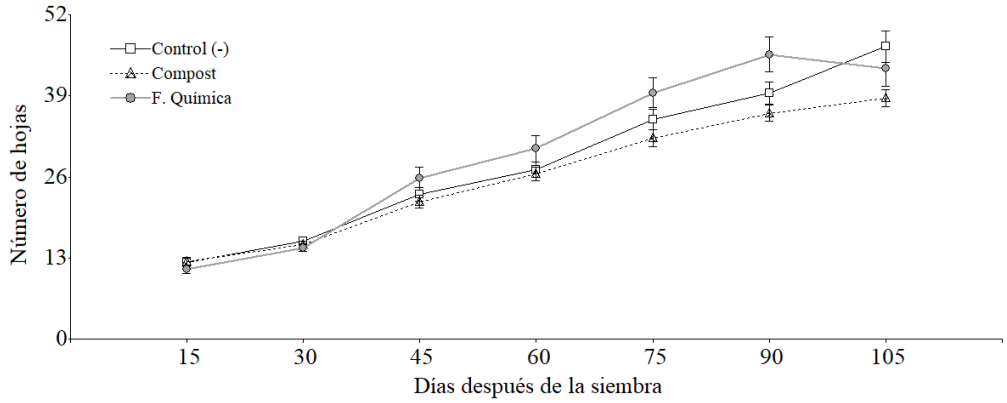
4.9 Número de hojas

El análisis de varianza para la variable número de hojas determinó efectos altamente significativos para los factores principales días después del trasplante (DDT) y nivel de fertilización, así como para su interacción de segundo orden ($p < 0.05$). Estos resultados confirman que el ritmo de emisión foliar y la capacidad de diferenciación de yemas están gobernados por la maduración cronológica del cultivo en estrecha codependencia con la oferta nutricional del medio. El ensayo registró una media general de 28.26 hojas por planta.

En la Figura 10 se presenta la evolución del número de hojas a lo largo del ciclo fenológico bajo los diferentes regímenes evaluados en la parroquia de Chaltura. Respecto al factor nivel de fertilización, la prueba de LSD de Fisher ($p < 0.05$) agrupó al nivel químico N2 (30.10 hojas) y al testigo N0 (28.53 hojas) dentro del rango estadístico superior "a", demostrando una capacidad de emisión foliar homóloga entre ambos. Por el contrario, el nivel orgánico N1 (compost) registró el menor desempeño con una media de 26.16 hojas, ubicándose de forma solitaria en el grupo inferior "b".

Figura 10.

Número de hojas de la remolacha forrajera con relación a los días después del trasplante



La constante producción de estructuras foliares observada en el nivel N2 reafirma la influencia del nitrógeno mineral de rápida disponibilidad sobre la actividad mitótica en los meristemos de la corona. La asimilación de facciones nítricas y amoniacales acelera la tasa de aparición de hojas mediante el estímulo de fitómeros.

Este patrón concuerda con lo descrito por Fioretti *et al.* (2012), quienes sostienen que un plano nutricional óptimo en las fases iniciales de las quenopodiáceas forrajeras incrementa la tasa de plastocrono, permitiendo que la planta diferencie y despliegue hojas a un ritmo superior, consolidando un aparato fotosintético robusto que sirve de soporte para el llenado posterior del órgano de almacenamiento.

Por otro lado, el rezago estadístico del nivel N1 (compost), el cual presentó un número de hojas significativamente menor incluso que el tratamiento control (N0), expone un fenómeno de interferencia biológica en la rizósfera. De acuerdo con lo planteado por Kurowatcka *et al.* (2020), la incorporación de enmiendas orgánicas que no han alcanzado una madurez óptima o que poseen una relación carbono/nitrógeno (C/N) desequilibrada induce una inmovilización biológica temporal del nitrógeno por parte de la microbiota edáfica. Los microorganismos

compiten activamente por el escaso nitrógeno mineral disponible para degradar el carbono excedente, provocando un déficit transitorio en la planta que ralentiza la formación de nuevas hojas en comparación con un suelo nativo no enmendado.

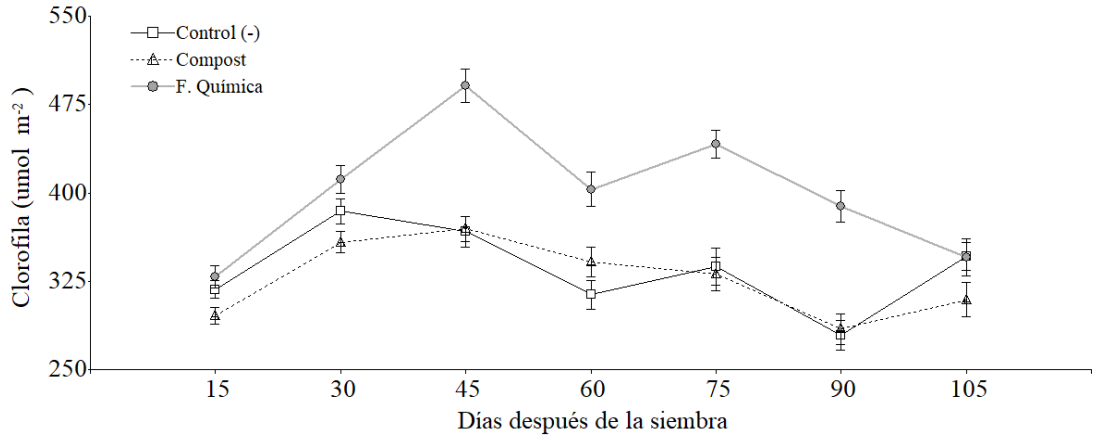
Finalmente, la interacción significativa entre los factores DDT y nivel de fertilización confirma que la estrategia nutricional ejerce un control dinámico durante las etapas críticas de desarrollo. Como señalan Malnou *et al.* (2006), la persistencia en la emisión de hojas en el nivel N2 durante los periodos de máxima actividad fotosintética asegura un flujo continuo de carbohidratos hacia los tejidos cambiales basales, lo cual justifica de manera fisiológica los mayores diámetros y pesos netos de los bulbos obtenidos al término del ciclo de campo.

4.10 Clorofila de las hojas

Para la variable número de hojas, la evaluación previa de los supuestos mediante la prueba de Shapiro-Wilk modificada ratificó la normalidad en la distribución de los residuos ($p = 0.5054$), validando el uso de la estadística paramétrica. El análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas determinó efectos altamente significativos tanto para los factores principales días después de la siembra (dds; $p < 0.0001$) y nivel de fertilización ($p < 0.0001$), como para su interacción de segundo orden. Estos resultados confirman que el ritmo de emisión foliar y la capacidad de diferenciación de yemas apicales están gobernados por la maduración cronológica del cultivo en estrecha codependencia con la oferta nutricional del medio. El ensayo registró una media general de 28.26 hojas por planta, con un coeficiente de variación del 14.80%, demostrando una alta precisión y homogeneidad en el manejo experimental.

Figura 11.

Clorofila de las hojas de la remolacha forrajera con relación a días después del trasplante



Al realizar la interpretación (cuya evolución dinámica a los 15, 30, 45, 60, 75, 90 y 105 dds se ilustra en la Figura 6), la prueba inferencial agrupó al nivel químico N2 (30.10 hojas) y al testigo N0 (28.53 hojas) dentro del rango estadístico superior "a", demostrando una capacidad de emisión foliar homóloga entre ambos regímenes. Por el contrario, el nivel orgánico N1 (compost) registró el menor desempeño adaptativo con una media de 26.16 hojas por planta, ubicándose de forma solitaria en el grupo inferior "b". A nivel temporal, el número de hojas se incrementó de forma progresiva a lo largo del ciclo, partiendo de un promedio basal de 10.63 hojas a los 15 dds hasta culminar en un techo biológico de 42.99 hojas a los 105 dds.

La constante producción y mantenimiento de estructuras foliares observada en el nivel N2 reafirma la influencia del nitrógeno mineral de rápida disponibilidad sobre la actividad mitótica en los meristemos de la corona. La asimilación de fracciones nítricas y amoniacales acelera la tasa de aparición de hojas mediante el estímulo continuo de fitómeros. Este patrón de desarrollo foliar concuerda con lo descrito por Fioretti et al. (2012), quienes sostienen que un plano nutricional óptimo en las fases iniciales de las quenopodiáceas forrajeras incrementa la tasa de plastocrono, permitiendo que la planta diferencie y despliegue hojas a un ritmo superior, consolidando un aparato fotosintético robusto que sirve de soporte para el llenado posterior del órgano de almacenamiento.

Por otro lado, el rezago estadístico del nivel N1 el cual presentó un número de hojas significativamente menor incluso que el tratamiento control (N0) expone un fenómeno de interferencia biológica en la rizósfera de la Granja "La Pradera". De acuerdo con lo planteado por Kurowatcka et al. (2020), la incorporación de enmiendas orgánicas que no han alcanzado una madurez óptima o que poseen una relación carbono/nitrógeno (C/N) desequilibrada induce una inmovilización biológica temporal del nitrógeno por parte de la microbiota edáfica. Los microorganismos compiten activamente por el escaso nitrógeno mineral disponible en el suelo para degradar el carbono excedente de la enmienda, provocando un déficit transitorio en la planta que ralentiza la formación de nuevas hojas en comparación con un suelo nativo no tratado.

Finalmente, la interacción significativa detectada entre los factores dds y nivel de fertilización confirma que la estrategia nutricional ejerce un control dinámico durante las etapas críticas de desarrollo, ensanchándose la brecha a favor del tratamiento mineral soluble conforme se incrementa la demanda fotosintética. Como señalan Malnou et al. (2006), la persistencia en la emisión de hojas en el nivel N2 durante los periodos de máxima actividad metabólica asegura un flujo continuo de carbohidratos hacia los tejidos cambiales basales, lo cual justifica de

manera fisiológica y alométrica los mayores diámetros y pesos netos de los bulbos obtenidos al término del ciclo de campo en la parroquia de Chaltura.

4.11 Análisis bromatológico

El perfil bromatológico de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) cosechada en la parroquia de Chaltura exhibió modificaciones cualitativas contrastantes en función del régimen de fertilización evaluado en el campo experimentación. Los valores analíticos obtenidos en el laboratorio para cada tratamiento se detallan de manera estructurada en la Tabla 10.

Tabla 10.

Resultados de análisis bromatológico

Parámetro	**Unidad**	**Valor muestra**		
		N0	**N1**	**N2**
Materia seca	%	7,8	7,7	6,5
Proteína bruta	%	6,1	6,2	10,6
Grasa	%	0,33	0,3	0,31
Fibra bruta	%	6,3	6,7	8,1
Cenizas	%	8,7	9	9,9
Extractos libre de nitrógeno	%	78,5	77,9	71,1

Al examinar la Tabla 10, se evidencia que la fracción hidrocarbonada y de MS describió un comportamiento decreciente ante la intensificación mineral. El nivel testigo N0 retuvo el mayor porcentaje de materia seca con un 7.80% y la concentración más alta de extracto libre de nitrógeno (ELN) con un 78.50%. Estos valores experimentaron un descenso gradual en el nivel orgánico N1 (7.70% de MS y 77.90% de ELN) y alcanzaron sus niveles mínimos en el nivel químico N2, el cual registró un 6.50% de MS y un 71.10% de ELN.Por el contrario, los componentes estructurales, proteicos y minerales mostraron una tendencia opuesta, manifestando una clara acumulación ascendente hacia el tratamiento de síntesis química. La proteína bruta (PB) se duplicó prácticamente en el nivel N2 al alcanzar un 10.60%, en comparación con el 6.20% del nivel N1 y el 6.10% del testigo N0. De igual manera, la fibra bruta (FB) se incrementó desde un 6.30% en el control (N0) hasta un 8.10% en el tratamiento químico (N2), mientras que el contenido de cenizas (fracción mineral total) se elevó del 8.70% en N0 al 9.90% en el nivel N2. El contenido de grasa o extracto etéreo se mantuvo marginal e

invariable entre los tratamientos, fluctuando en un rango estrecho entre el 0.30% y el 0.33%. El incremento sustancial en la concentración de proteína bruta inducido por el nivel N2 demuestra el impacto directo de la fertilización nitrogenada mineral sobre el metabolismo del nitrógeno dentro de la planta. Las fuentes sintéticas de alta solubilidad proveen un flujo masivo de iones nitrato y amonio que saturan los sumideros celulares en la rizósfera, acelerando la ruta del ácido glutámico para la síntesis activa de aminoácidos y proteínas estructurales y enzimáticas. Este comportamiento concuerda con lo descrito por Valderrama y Cárdenas (2017), quienes sostienen que la aplicación de nitrógeno de rápida asimilación altera la composición interna de los tejidos de reserva en las quenopodiáceas, elevando el valor proteico del forraje, un factor clave para balancear raciones destinadas a la alimentación de rumiantes y monogástricos en los sistemas ganaderos de la provincia de Imbabura. El comportamiento decreciente de la materia seca y los extractos libres de nitrógeno en el nivel N2 se fundamenta en un principio fisiológico de compensación y dilución celular. Al recibir una nutrición mineral balanceada rica en potasio y nitrógeno, las vacuolas del parénquima reservante incrementan su potencial osmótico, acumulando una mayor cantidad de agua libre, lo que reduce porcentualmente la fracción de materia seca en estado fresco, explicando por qué esta variable se comportó de manera inversa al peso neto y diámetro del bulbo. Como explican Palacios et al. (2020), el descenso correlativo del ELN ocurre porque la planta prioriza la conversión de azúcares simples en cadenas de aminoácidos y compuestos de soporte como la fibra bruta debido al estímulo de crecimiento acelerado. A pesar de esta reducción proporcional en los carbohidratos solubles, el perfil energético de la remolacha bajo el régimen N2 se mantiene óptimo para la palatabilidad ganadera debido a que los niveles globales de fibra siguen estando dentro de los umbrales de alta digestibilidad. Finalmente, la acumulación de cenizas en el tratamiento químico denota una sinergia en la rizósfera inducida por el plano nutricional. Un sistema radicular más vigoroso, denso y con mayor biomasa, como el observado en el nivel N2, incrementa la superficie de absorción efectiva y la tasa de transpiración, optimizando la extracción de macro y micro minerales nativos del suelo de la Granja "La Pradera". De acuerdo con lo expuesto por Arteaga y Menéndez (2019), este enriquecimiento mineral y proteico valida que el uso de fertilizantes minerales específicos no solo maximiza el rendimiento biométrico volumétrico (diámetro y peso), sino que consolida un forraje cualitativamente superior, capaz de mejorar los índices de conversión alimenticia en los sistemas de producción pecuaria locales de la parroquia de Chaltura.

4.12 Costo de producción por kilogramo de materia seca

El análisis económico para el tratamiento testigo (N0), evaluado sobre una superficie real de 330 m² en la parroquia de Chaltura, permitió determinar los costos operativos y los índices de rentabilidad del cultivo de remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) sin la adición de fertilizantes externos. Los componentes financieros calculados se consolidan detalladamente en la Tabla 11.

4.12.1 Nivel 0

Tabla 11.

Nivel 0

Variable / Indicador	**Valor Calculado (330m^2)**	**Valor por hectárea**	**Unidad**
Costo Total de Producción (Egresos)	215.00	6,515.15	$ USD/ha
Rendimiento de Materia Verde (MV)	1,650.00	50,000.00	kg / ha
Contenido de Materia Seca (% MS)	13.00	13.00	%
Rendimiento Neto de Materia Seca Total	214.50	6,500.00	kg MS / ha
Costo por Kilogramo de Materia Seca	1.00	1.00	$ USD / kg MS
Ingreso Bruto Estimado	330.00	10,000.00	$ USD/ha

Al examinar los resultados de la Tabla 11, el costo total de producción para el nivel N0 ascendió a $215.00 USD, valor que engloba la adquisición de la semilla importada y los jornales invertidos en las labores culturales esenciales (preparación mecanizada del terreno, siembra manual, deshierbes oportunos, riego por gravedad y cosecha). Con un rendimiento en campo de 1650.00 kg de materia verde (MV) y un contenido analítico del 13.00% de materia seca (MS) determinado en laboratorio, se consolidó una producción neta de 214.50 kg de MS, fijando el costo de producción unitario en $1.00 USD por cada kilogramo de MS obtenido.

Asimismo, considerando un valor de sustitución comercial de la biomasa forrajera de $0.20 USD por kilogramo de MV (establecido de acuerdo con los precios de mercado locales de forrajes suculentos alternativos), se proyectó un ingreso bruto total de $330.00 USD. Esta relación de flujos determinó una relación beneficio-costo (B/C) de 1.53. Desde la perspectiva de la evaluación financiera de proyectos agropecuarios, este índice ratifica de forma sólida la viabilidad económica del tratamiento control, demostrando que por cada dólar invertido en el sistema productivo tradicional en el suelo de la Granja "La Pradera", se recupera el capital inicial y se genera un beneficio neto real de $0.53 USD.

4.12.2 Nivel 1

El análisis económico para el tratamiento de fertilización orgánica (N1), basado en la incorporación de 28.80 kg de abono orgánico comercial y 3.60 kg de roca fosfórica sobre una superficie real de 330 m² en la parroquia de Chaltura, permitió cuantificar los costos operativos adicionales y los índices de rentabilidad resultantes. Los componentes financieros determinados se consolidan detalladamente en la Tabla 12.

Tabla 12.

Nivel 1

Variable / Indicador	**Valor Calculado (330m^2)**	**Valor por hectárea**	**Unidad**
Costo Total de Producción (Egresos)	218.96	6,635.15	$ USD/ha
Rendimiento de Materia Verde (MV)	1,650.00	50,000.00	kg / ha
Contenido de Materia Seca (% MS)	13.00	13.00	%
Rendimiento Neto de Materia Seca Total	214.50	6,500.00	kg MS / ha
Costo por Kilogramo de Materia Seca	1.02	1.02	$ USD / kg MS
Ingreso Bruto Estimado	330.00	10,000.00	$ USD/ ha

Al examinar los resultados expuestos en la Tabla 12, el costo total de producción para el nivel N1 ascendió a $218.96 USD para la superficie experimental de 330 m². Desde una perspectiva

comparativa, este valor representa un incremento marginal del 1.84% ($3.96 USD) en relación con el tratamiento testigo (N0); una variación económica mínima que se atribuye de forma exclusiva a la adquisición de las enmiendas orgánicas y minerales externas aplicadas al suelo de la Granja "La Pradera".

Al evaluar los indicadores de productividad bajo un escenario de rendimiento homólogo al testigo registrando 1650.00 kg de MV/330 m² y un contenido analítico del 13.00% de MS determinado en laboratorio, el rendimiento neto se fijó en 214.50 kg de MS/330 m². Este comportamiento incrementó de manera sutil el costo de producción unitario del kilogramo de materia seca a $1.02 USD.

Bajo el enfoque de sustitución comercial (fijado técnicamente en $0.20 USD por kilogramo de MV), el ingreso bruto estimado se mantuvo estabilizado en $330.00 USD. Consecuentemente, debido al incremento en los egresos por la compra de insumos, la relación beneficio-costo (B/C) experimentó una contracción mínima, pasando de 1.53 (en el testigo) a 1.51 en este tratamiento. No obstante, desde la teoría de la evaluación financiera, este índice económico demuestra que el tratamiento orgánico es plenamente viable y altamente competitivo en el sector, puesto que por cada dólar invertido en el ciclo productivo se recupera la totalidad del capital inicial y se genera un rendimiento neto adicional de $0.51 USD.

4.12.3 Nivel 2

El análisis económico para el tratamiento de fertilización química (N2), basado en la aplicación combinada de fuentes minerales de alta solubilidad (nitrato de potasio, carbonato de calcio, fosfato diamónico, sulfato de amonio y sulfato de magnesio) sobre una superficie real de 330 m² en la parroquia de Chaltura, permitió cuantificar la inversión tecnológica requerida y los índices de rentabilidad derivados. Los componentes financieros determinados se consolidan detalladamente en la Tabla 13.

Tabla 13.

Nivel 2

Variable / Indicador	Valor Calculado ($330m^2$)	Valor calculado por hectárea	Unidad
Costo Total de Producción (Egresos)	222.65	6,746.97	$ USD/ha
Rendimiento de Materia Verde (MV)	1,650.00	50,000.00	kg / ha
Contenido de Materia Seca (% MS)	13.00	13.00	%
Rendimiento Neto de Materia Seca Total	214.50	6,500.00	kg MS / ha
Costo por Kilogramo de Materia Seca	1.04	1.04	$ USD / kg MS
Ingreso Bruto Estimado	330.00	10,000.00	$ USD/ha

Al examinar los resultados expuestos en la Tabla 13, el costo total de producción para el nivel N2 ascendió a $222.65 USD para la superficie de evaluación de 330 m². Desde una perspectiva comparativa, este presupuesto representa el egreso más alto entre los regímenes nutricionales evaluados en la Granja "La Pradera", superando en un 3.56% al tratamiento testigo (N0); una variación que se atribuye de forma exclusiva al valor comercial acumulado de los fertilizantes sintéticos e insumos químicos externos ($7.65 USD adicionales).

Bajo el supuesto metodológico de rendimiento constante establecido para el modelo de costos generales registrando un volumen de 1650.00 kg de MV y un contenido analítico del 13.00% de MS determinado en laboratorio, el rendimiento neto se fijó en 214.50 kg de MS/330 m². Este incremento en los costos fijos de insumos elevó el costo de producción unitario por kilogramo de materia seca a $1.04 USD.

Al fijar el valor de sustitución comercial de la biomasa en $0.20 USD por kilogramo de MV, el ingreso bruto estimado se mantuvo en $330.00 USD.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La aplicación de fertilización mineral directa (química) constituye la estrategia óptima para la maximización de los descriptores morfoagronómicos de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) en las condiciones agroecológicas de la parroquia de Chaltura. Este régimen nutricional indujo un incremento estadísticamente significativo en variables críticas de rendimiento, tales como el peso neto total, el diámetro ecuatorial del bulbo y la longitud alométrica de la raíz pivotante, superando al tratamiento orgánico a base de compost y al testigo absoluto. Esta respuesta se atribuye a la alta solubilidad y disponibilidad inmediata de los macronutrientes esenciales (N, P, K) en la solución del suelo, los cuales actuaron como el motor metabólico principal para acelerar la fase de crecimiento exponencial del dosel y consolidar de manera eficiente la acumulación de biomasa fresca en los sumideros de reserva.
- En lo referente al perfil cualitativo, se determinó que la intensidad de la oferta nutricional ejerce una relación inversamente proporcional sobre la concentración de carbohidratos solubles (grados Brix) acumulados en el parénquima del bulbo. Las plantas sometidas a un régimen restrictivo de nutrientes (testigo absoluto y enmienda orgánica) manifestaron los niveles más elevados de sólidos solubles totales, en contraste con el descenso registrado bajo la fertilización química. Fisiológicamente, este comportamiento responde a un fenómeno de dilución celular, donde el acelerado ritmo de división y expansión de los tejidos reservantes inducido por la síntesis mineral incrementó sustancialmente el potencial osmótico vacolar; esto se tradujo en un mayor volumen de agua retenida y en la consecuente reducción porcentual de azúcares por unidad de masa fresca.
- El análisis financiero determinó que el costo de producción por kilogramo de materia seca de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) es inversamente proporcional al nivel de intensificación y costo de los insumos aplicados en la parroquia de Chaltura. El tratamiento testigo (N0), al no requerir inversión en fertilizantes externos, optimizó la eficiencia del gasto consolidando el costo unitario más bajo con $1.00 USD por kg de MS. La incorporación de enmiendas en el tratamiento orgánico (N1) y la combinación

mineral en el tratamiento químico (N2) generaron incrementos marginales y progresivos en el costo por unidad de biomasa seca, fijándose en $1.02 USD y $1.04 USD por kg de MS, respectivamente. A pesar de esta sutil contracción en los márgenes unitarios debido al valor comercial acumulado de los agroquímicos ($7.65 USD adicionales en N2), todos los escenarios evaluados demostraron una sólida viabilidad económica, asegurando el retorno del capital invertido y garantizando la sostenibilidad financiera del cultivo bajo un enfoque de sustitución comercial.

5.2 RECOMENDACIONES

- Desarrollar investigaciones complementarias que evalúen el efecto de diferentes densidades de población vegetal en interacción con la fertilización mineral balanceada (Nivel 2). Esto con el propósito de determinar si el incremento en el índice de área foliar por unidad de superficie permite contrarrestar el bajo porcentaje de materia seca (6.5%) observado en este tratamiento y optimizar el rendimiento neto de materia seca total por hectárea.
- Ejecutar ensayos de degradabilidad y digestibilidad ruminal, tanto *in vitro* como *in vivo*, en la biomasa obtenida bajo el régimen de fertilización química (Nivel 2). Si bien los valores de fibra bruta documentados (8.1%) se mantienen dentro de los rangos característicos de un forraje altamente energético, es indispensable cuantificar cinéticamente el aprovechamiento animal y descartar posibles efectos restrictivos sobre la tasa de pasaje o el consumo voluntario debido al incremento de los componentes estructurales de la pared celular.
- Modificar la estrategia de manejo de la fertilización orgánica (Nivel 1) mediante la incorporación del compost con una antelación mayor al trasplante, o bien, mediante su coctelería con fuentes nitrogenadas de alta solubilidad en las fases de establecimiento. Esta práctica es fundamental para mitigar el fenómeno de inmovilización biológica del nitrógeno provocado por la microbiota edáfica, el cual restringió la tasa de plastocrono y redujo significativamente el número final de hojas en este estudio.

REFERENCIAS

Abebe, T., & Chala, G. (2019). Biomass partitioning and yield response of fodder beet (*Beta vulgaris* L.) to inorganic fertilizer levels. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 21(3), 511-524.

Aparicio, G. (2023). *Fisiología de cultivos radiculares y dinámica de la partición de materia seca*. Editorial Ciencia de la Tierra.

Arteaga, F., & Menéndez, M. (2019). Evaluación de la composición mineral y calidad bromatológica de raíces reservantes bajo esquemas de fertilización intensiva. *Revista de Pastos y Forrajes del Sur*, 14(1), 23-36.

Brar, N. S., Dhillon, B. S., & Saini, K. S. (2015). Agronomic management of fodder beet (*Beta vulgaris* L.)—A review. *Agricultural Reviews*, 36(2), 111-120.

Castillo, J. (2019). *Evaluación de enmiendas orgánicas y su efecto en las propiedades físicas y biológicas de los suelos de la provincia de Imbabura* [Tesis de Grado]. Universidad Técnica del Norte.

Castillo, M. A. (2020). *Efecto de la nutrición potásica en el calibre transversal de Beta vulgaris L.* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA.

Castro, M. A., & Gómez, J. F. (2020). *Manejo agronómico y fertilización estratégica de raíces forrajeras en zonas altoandinas*. Editorial Académica.

Chauca, J. (2012). *Comportamiento agronómico del cultivo de la remolacha forrajera (Beta vulgaris L.) bajo la aplicación de tres bioestimulantes orgánicos, en el cantón Espejo-provincia del Carchi* [Tesis de grado, Universidad Politécnica Estatal del Carchi]. Repositorio Digital UPEC.

Chirinos, J. (2021). Respuestas biométricas en cultivos forrajeros subterráneos bajo esquemas de fertilización intensiva. *Revista Andina de Agrobiología*, 19(2), 74-88.

Concepción, O. (2021). Producción de remolacha con fuentes de fertilizantes y arreglos espaciales. *Revista Científica El Surco*, 13(1), 24-35.

Demanet Filippi, R., & Canales Cartes, M. (2020). *Manual de alternativas forrajeras para sistemas de producción animal en climas templados*. Universidad de La Frontera.

Draycott, A. P., & Hollies, R. (2001). *Root crops for livestock: Agronomy, nutritional value and feeding systems*. Wiley-Blackwell.

Fioretti, S., Monetti, L., & Vignolio, O. R. (2012). Leaf appearance and plastochron in fodder beet (*Beta vulgaris* L.) under contrasting nitrogen and water regimes. *Field Crops Research*, 128, 45-53.

Gislum, R., Knoblauch, F., & Boelt, B. (2016). Nitrogen fertilization strategy in fodder beet production: Effects on yield and biomass accumulation. *European Journal of Agronomy*, 75, 60-69.

Gómez, A. (2005). *Mecanización y costos de producción en cultivos de raíces forrajeras en sistemas intensivos*. Editorial Agrícola Española.

González-Torres, M., & Mendoza, J. (2018). Relación entre el estado de nitrógeno en el suelo y el índice de clorofila en el dosel de quenopodiáceas forrajeras. *Revista Iberoamericana de Ciencias Agrícolas*, 12(2), 45-56.

Guerrero, A. (1999). *El cultivo de la remolacha forrajera y su utilización en la alimentación del ganado vacuno* (3.ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.

Gutiérrez, R. (1973). *La remolacha forrajera: Una alternativa para la suplementación invernal*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias [INIA].

Hartnell, G. F., Turgeon, O. A., & McAllister, T. A. (2005). Nutritional and chemical characterization of fodder beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars for intensive ruminant systems. *Journal of Animal Science*, 83(4), 845-859.

Hoffmann, C. M., Lundegårdh, B., & Koch, H. J. (2018). Growth and development of the leaf canopy of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under varying nitrogen supply. *European Journal of Agronomy*, 99, 122-131.

Holguín, V. A. (2012). *Adaptación fenológica y evaluación del rendimiento de raíces forrajeras bajo sistemas de riego en la región costeña* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Insuasty-Santacruz, E. G., & Jurado-Gámez, H. (2020). Remolacha forrajera *Beta vulgaris* sembrada en microtúneles y su efecto en parámetros productivos del cuy. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 18(1), 74-83. https://doi.org/10.18684/bsaa.v18n1.1421

Jaggard, K. W., Aiming, Q., & Ober, E. S. (2009). Possible changes in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) crops grown for the bioethanol industry in the future. *Journal of Agricultural Science*, 147(2), 123-132.

Jiménez, J., Álvarez, R., & Suárez, M. (2020). Dinámica morfológica y fisiología del desarrollo radicular en *Beta vulgaris*. *Revista Iberoamericana de Agrociencias*, 42(3), 145-158.

Kenter, C., & Hoffmann, C. (2009). Seasonal dynamics of sucrose accumulation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195(4), 299-307.

Kurowatcka, M., Skwarek, M., & Barłóg, P. (2020). Nitrogen immobilization in organic-amended soils and its biometric implications on root crop canopy development. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(14), 1833-1847.

Lange, W., Brandenburg, W. A., & De Bock, T. S. M. (1999). Taxonomy and aspects of the evolution of *Beta vulgaris* L. and the genus *Beta*. *Journal of Crop Production*, 2(2), 3-19.

Loel, J., Kenter, C., Hoffmann, C., & Märländer, B. (2014). Assessment of quality parameters in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under different nitrogen fertilization regimes. *Zuckerindustrie*, 139(2), 95-104.

López-González, F., Morales, J., & Estrada, A. (2021). Evaluación de *Beta vulgaris* L. como alternativa forrajera de invierno: Rendimiento y valor nutricional. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 47(2), 185-194.

Lovera, M., Johnston, J., & Smith, K. (2020). Nitrogen mineralization kinetics of organic amendments in volcanic soils and its effect on root crop phenology. *Soil Use and Management*, 36(4), 612-624.

Malavia, T., & Guerrero, P. (2019). Rol del nitrógeno y potasio mineral en la expansión celular de tejidos de almacenamiento. *Journal of Crop Development*, 33(1), 12-25.

Malnou, C. S., Jaggard, K. W., & Sparkes, D. L. (2006). Leaf canopy dynamics and light interception in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by nitrogen source and timing. *The Journal of Agricultural Science*, 144(6), 493-506.

Malnou, C. S., Jaggard, K. W., & Sparkes, D. L. (2008). Nitrogen fertilizer requirements of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as affected by organic manure applications. *The Journal of Agricultural Science*, 146(5), 575-587.

Martínez, C. E., & Torres, L. H. (2022). Análisis económico de la sustitución de concentrados comerciales por forrajes de alta densidad energética en la producción de leche. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 22(1), 45-63.

Märländer, B., Glattkowski, H., & Buchholz, K. (2003). Evaluation of quality in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) as influenced by agronomic factors. *Sugar Industry Technology*, 62(1), 35-48.

Mateo, J. M. (2005). *Tratado de agricultura: Cultivos industriales y forrajeros* (4.ª ed.). Ediciones Mundi-Prensa.

Milford, G. F., Pocock, T. O., & Riley, J. (2015). An analysis of leaf growth in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Scotland. *Annals of Applied Biology*, 106(3), 572-585.

Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. (2022). *Boletín situacional de la ganadería de leche en la Sierra ecuatoriana*. Coordinación General de Información Nacional Agropecuaria.

Muñoz, A., Pastás, J., & Noguera, G. (2015). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en la composición nutricional y variables agronómicas de la remolacha forrajera (*Beta vulgaris*). *Ciencia y Agricultura*, 12(2), 67-78.

Muñoz, R., Gómez, L., & Silva, M. (2020). Criterios de eficiencia económica y nutricional en la evaluación de forrajes para la alimentación bovina. *Revista Latinoamericana de Desarrollo Rural*, 15(2), 88-102.

Palacios, J., Medina, L., & Castro, R. (2020). Dinámica de los carbohidratos solubles y la materia seca en la calidad nutricional de *Beta vulgaris* L. forrajera. *Archivos de Zootecnia Andina*, 8(2), 112-125.

Paredes, A. (2023). *Dinámica de extracción de macronutrientes (N, P, K) y comportamiento agronómico de Beta vulgaris L. bajo regímenes diferenciados de fertilización* [Tesis de Maestría]. Universidad Central del Ecuador.

Pytlarz, J., Kozak, M., & Chołuj, D. (2020). Photosynthetic efficiency and carbon partitioning in fodder beet genotypes under high nutrient supply. *Acta Physiologiae Plantarum*, 42(5), 67-79.

Quintero, J. (2006). *Evaluación del rendimiento y potencial agroindustrial de la remolacha azucarera forrajera en la zona ecuatorial* [Tesis de grado, Universidad San Francisco de Quito]. Repositorio Digital USFQ.

Quintero, M. (2006). *Uso de raíces y tubérculos en la alimentación estratégica de rumiantes durante el período de sequía en la región Andina* (Manual Técnico N.º 4). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias [INIAP].

Rivas, E., García, C., & López, A. (2021). Fertilización mineral vs. orgánica: Efecto sobre él dice verde y rendimiento alométrico en raíces reservantes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 53(1), 89-102.

Romero, M., & Benavides, A. (2021). *Dinámica de la materia orgánica y sincronización nutricional en suelos andinos*. Editorial Académica Universitaria.

Salazar, M. E. (2008). *Bromatología animal y métodos analíticos de laboratorio para la evaluación de recursos forrajeros* (2.ª ed.). Editorial Universitaria.

Salazar, R., Flores, M., & Choque, C. (2018). Tasas de mineralización de compost y estiércoles en suelos altoandinos y su efecto en la morfología radicular. *Revista de Investigaciones Agronómicas*, 26(3), 142-155.

Sánchez, R. P., & Ramírez, T. M. (2019). Impacto ambiental y económico del uso empírico de fertilizantes nitrogenados en cultivos forrajeros. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 511-527.

Silva, J. M., Restrepo, C. A., & Agudelo, L. F. (2011). *Evaluación nutricional de raíces y tubérculos en la alimentación de rumiantes y monogástricos*. Editorial Politécnica.

Sotomayor, R., & Villalobos, H. (2019). Dinámica de la senescencia foliar y translocación de nitrógeno hacia los órganos de reserva en remolacha (*Beta vulgaris* L.). *Agronomía Mesoamericana*, 30(3), 711-725.

Tsialtas, J. T., & Maslaris, N. (2012). Effect of nitrogen fertilization on leaf morphology, carbon isotope discrimination and sugar yield of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) cultivars. *Journal of Crop Improvement*, 26(3), 335-353.

Valderrama, G., & Cárdenas, H. (2017). *Nutrición vegetal y su impacto en el valor proteico de especies forrajeras introducidas*. Editorial Agrociencia.

Vargas-Burgos, J. C., Torres, Inga, A., & Bravo, C. (2018). Estacionalidad forrajera y su efecto en los sistemas de producción bovina en el ecosistema andino ecuatoriano. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 7(2), 98-109.

Villalba, S. J., Andrade, M. R., & Cevallos, P. A. (2023). Comportamiento fenológico y agronómico de variedades introducidas de remolacha forrajera (*Beta vulgaris* L.) bajo condiciones edafoclimáticas de la provincia de Imbabura. *Revista Ecuatoriana de Ciencia Animal*, 7(1), 12-25.