



Evaluación de dos fuentes de hierro y sus dosis para la biofortificación de trigo (*Triticum aestivium*) variedad Imbabura y San Jacinto

Beltrán Correa, Andrea Estefanía

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera Agropecuaria

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniera Agropecuaria

Ing. Landázuri Abarca, Pablo Aníbal Mgtr.

28 de febrero del 2023



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera Agropecuaria

Certificación:

Certifico que el trabajo de integración curricular: "**Evaluación de dos fuentes de hierro y sus dosis para la biofortificación de trigo (*Triticum aestivum*) variedad Imbabura y San Jacinto**", fue realizado por el/la señorita: **Apellidos, Beltrán Correa, Andrea Estefania** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de febrero del 2023



Escanned with CamScanner
**PABLO ANIBAL
LANDÁZURI ABARCA**

Ing. Landázuri Abarca, Pablo Anibal Mgtr.

C. C. 17082623484

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos

28 de febrero del 2023

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO
TESIS 2023 UTILIZACIÓN

NOMBRE DEL ALUMNO
ANDREA ESTEFANIA BELTRAN CORREA

NOMBRE DEL ARCHIVO
ANDREA ESTEFANIA BELTRAN CORREA - TESIS

SE HA CREADO EL INFORME
28 feb 2023

Resumen

Fragmentos marcados	9	3 %
Fragmentos citados o entrecomillados	9	4 %

Coincidencias de la Web

issuu.com	5	2 %
grain.org	2	1 %
una.ac.cr	2	0,9 %
utc.edu.ec	3	0,8 %
naturkhem.com	1	0,5 %
unne.edu.ar	2	0,3 %
studocu.com	1	0,3 %
researchgate.net	1	0,3 %
fbssan.org.br	1	0,3 %



ELABORADO POR:
PABLO ANIBAL
LANDAZURI ABARCA

Ing. Landázuri Abarca, Pablo Anibal Mgtr.

C. C. 17082623484



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría:

Yo, **Beltrán Correa, Andrea Estefania**, con cédula de ciudadanía No 1753072584, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Evaluación de dos fuentes de hierro y sus dosis para la biofortificación de trigo (*Triticum aestivum*) variedad Imbabura y San Jacinto**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 28 de febrero del 2023

Beltrán Correa, Andrea Estefania

C.C.: 1753072584



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera Agropecuaria

Autorización de Publicación:

Yo, **Beltrán Correa, Andrea Estefanía**, con cédula de ciudadanía No 1753072584 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Evaluación de dos fuentes de hierro y sus dosis para la biofortificación de trigo (*Triticum aestivum*) variedad Imbabura y San Jacinto** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios es de mi responsabilidad.

Sangolquí, 28 de febrero del 2023

Beltrán Correa, Andrea Estefanía

C.C.: 1753072584

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación lo dedico principalmente a Dios por el la guía en mi camino, por haberme permitido llegar hasta este punto de mi formación profesional. A mis padres Blanca y Galo por ser un gran apoyo incondicional y pilar fundamental en la persona que me he convertido, por llenar mi vida de consejos, paciencia y esfuerzo. A mi hijo Alejandro por ser la razón de quererme superar, ser mi empuje para salir adelante, darme las fuerzas que necesito y por todo su amor. A mi prima Ximena que más que todo es una hermana, darme los ánimos para no decaer en este arduo camino y brindarme las mejores sonrisas en todo momento.

Andrea Beltrán

Agradecimientos

A Dios por darme la vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas, especialmente a la Carrera de Ingeniería Agropecuaria, por brindarme los conocimientos que me han permitido convertirme en una profesional.

A mis padres por su amor, consejos y comprensión brindada durante toda mi vida.

A mis amigos Pamela, Jeniffer, Liliana, Carlos, Karla, Camilo, por su compañía, apoyo incondicional, risas compartidas, por su valiosa amistad ya que supieron llegar y actuar tanto con hechos con palabras en momentos que más los necesitaba, siempre perdurarán en mi corazón.

Al Ing. Pablo mi tutor por poner su confianza en mí durante toda esta etapa, siendo mi guía haciendo que esta investigación fuese posible, culminando esta gran etapa de mi vida con éxito.

Al Lic. Marco Taco por el tiempo, ayuda y conocimientos entregados en la fase de laboratorio.

Índice de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos.....	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Índice de contenidos	8
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras.....	13
Resumen	14
Abstract.....	15
CAPÍTULO I	16
INTRODUCCIÓN	16
Antecedentes	16
Justificación.....	18
Objetivos	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos	19
Hipótesis	19

CAPITULO II	20
REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	20
Biofortificación.....	20
Biofortificación en los alimentos.....	20
Biofortificación de cultivos.....	20
Trigo	21
Importancia del Trigo en el Ecuador.....	21
Descripción de las variedades evaluadas.....	21
INIAP-San Jacinto 2010.....	21
INIAP-IMBABURA 2014.....	22
Hierro en la planta.....	24
Fotosíntesis	24
Sistemas enzimáticos	25
Hierro de reserva.....	26
Transporte del hierro.....	26
Mecanismo de absorción de hierro	27
Síntomas de deficiencia de hierro.....	29
Fertilizantes.....	29
Importancia de los fertilizantes.....	29
Fertilización foliar.....	29
Rutas de absorción foliar	30

Fuentes de hierro	31
Quelatos de hierro	31
Sulfato ferroso	32
Masa Seca.....	33
Biodisponibilidad de hierro.....	33
CAPÍTULO III.....	34
METODOLOGÍA.....	34
Ubicación del lugar de investigación.....	34
Ubicación geográfica	34
Condiciones del invernadero.....	34
Condiciones de laboratorio	35
Métodos.....	35
Fase de campo.....	35
Fase de laboratorio.....	36
Diseño experimental	36
Variables evaluadas.....	38
CAPITULO IV	40
RESULTADOS.....	40
Altura de la planta	40
Longitud de la raíz.....	41
Peso Seco.....	42

Clorofila	43
Hierro Biodisponible	45
DISCUSIÓN	47
CAPITULO V	50
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	50
Conclusiones.....	50
Recomendaciones.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51

Índice de tablas

Tabla 1 Fases de crecimiento del trigo y cebada	24
Tabla 2 Descripción de los factores evaluados en el trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedad INIAP-SAN JACINTO 2010 y variedad INIAP-IMBABURA 2014.....	36
Tabla 3 Ecuación para la obtención de clorofila en medidas de ug/ml	39
Tabla 4 Medias \pm desviación estándar de altura en las plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedades Imbabura y San Jacinto fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	40
Tabla 5 Medias \pm Desviación estándar de la longitud de la raíz de las plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedades Imbabura y San Jacinto fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y dosis de 0mg/L^{-1} - 10mg/L^{-1} - 40mg/L^{-1}	42
Tabla 6 Medias \pm desviación estándar del peso seco de las plantas de trigo (<i>Triticum</i> <i>aestivium</i>) variedades Imbabura y San Jacinto fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y dosis de 0mg/L^{-1} - 10mg/L^{-1} - 40mg/L^{-1}	43
Tabla 7 Absorbancia de clorofila A (Ch-a), clorofila B (Ch-b) y clorofila total (Ch-t) de las plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedades Imbabura y San Jacinto, fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y dosis de 0mg/L^{-1} - 10mg/L^{-1} - 40mg/L^{-1}	43
Tabla 8 Concentración de hierro biodisponible (ppm) de las plantas de trigo (<i>Triticum</i> <i>aestivium</i>) variedades Imbabura y San Jacinto, fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y dosis de 0mg.L^{-1} - 10mg.L^{-1} - 40mg.L^{-1}	45

Índice de figuras

Figura 1 <i>Implicación del hierro en la ruta biosintética de la clorofila</i>	25
Figura 2 <i>Sistema estándar de reducción de hierro</i>	27
Figura 3 <i>Modelo de respuesta de las plantas de Estrategia II a la deficiencia de hierro</i>	28
Figura 4 <i>Esquema de las rutas de absorción foliar</i>	30
Figura 5 <i>Diferentes formas de EDDHA</i>	32
Figura 6 <i>Vista aérea del lugar de la investigación</i>	34
Figura 7 <i>Análisis del sustrato para la determinación de macro y micronutrientes</i>	35
Figura 8 <i>Croquis del diseño experimental</i>	37
Figura 9 <i>Medición de altura de plantas de trigo variedad Imbabura y San Jacinto</i>	38
Figura 10 <i>Plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedad Imbabura con tratamientos de E.D.D.H.A y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$</i>	40
Figura 11 <i>Representación de la altura en plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedad San Jacinto con tratamientos de E.D.D.H.A y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$</i>	41
Figura 12 <i>Cantidad de clorofila A (Ch-a), clorofila B (Ch-b) y clorofila total (Ch-t) de las plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedad San Jacinto y variedad Imbabura</i>	44
Figura 13 <i>Concentración de hierro biodisponible de las plantas de trigo (<i>Triticum aestivium</i>) variedad Imbabura y San Jacinto</i>	45

Resumen

La biofortificación es un proceso por el cual se incrementa la concentración de elementos esenciales en la parte comestible de los productos cosechados mediante la intervención agronómica. En la presente investigación se evaluó la biofortificación foliar con dos fuentes de hierro en plantas de Trigo (*Triticum aestivium*) variedades Imbabura y San Jacinto a nivel de maceta a fin de conocer la mejor fuente y dosis (E.D.D.H.A de hierro y Sulfato de hierro), dosis (0,10 y 40 mg. l⁻¹) en la que se bioacumula el hierro en el trigo. La investigación se realizó en el invernadero de Horticultura de la Hacienda El Prado IASA I, ubicada en el cantón Rumiñahui, parroquia Selva Alegre, mediante un experimento completamente al azar (DCA), con doce tratamientos y tres repeticiones por fertilizante, cada ocho días se evaluaron las variables agronómicas (largo de raíz, altura de plantas), mientras que las de laboratorio (peso seco, absorción de clorofila y bioacumulación de hierro) se realizaron a los 90 días de la siembra. Se usó una prueba de comparación de Duncan para la validación estadística.

Los resultados de la investigación mostraron que el T6 (E.D.D.H.A, 40 mg. l⁻¹) con 5,10 ppm para la variedad San Jacinto y el T9 (FeSO₄, 40 mg. l⁻¹) con 5,01 ppm para la variedad Imbabura presentaron la mayor bioacumulación de hierro en las plantas de trigo.

Palabras clave: Biofortificación foliar, micronutriente, bioacumulación de hierro.

Abstract

Biofortification is a process by which the concentration of essential elements in the edible part of harvested products is increased through agronomic intervention. In the present investigation, foliar biofortification with two sources of iron in wheat plants (*Triticum aestivium*) Imbabura and San Jacinto varieties was evaluated at pot level in order to know the best source and dose (E.D.D.H.A of iron and iron sulfate), doses (0.10 and 40 mg. l⁻¹) in which iron bioaccumulates in wheat. The research was conducted in the Horticulture greenhouse of the Hacienda El Prado IASA I, located in the Rumiñahui canton, Selva Alegre parish, using a completely randomized experiment (DCA), with twelve treatments and three replicates per fertilizer, every eight days the agronomic variables (root length, plant height) were evaluated, while the laboratory variables (dry weight, chlorophyll absorption and iron bioaccumulation) were carried out 90 days after planting. A Duncan's comparison test was used for statistical validation.

The results of the research showed that T6 (E.D.D.H.A, 40 mg. l⁻¹) with 5.10 ppm for the San Jacinto variety and T9 (FeSO₄, 40 mg. l⁻¹) with 5.01 ppm for the Imbabura variety presented the highest iron bioaccumulation in wheat plants.

Keywords: Foliar biofortification, micronutrient, iron bioaccumulation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El hierro es el nutriente inorgánico con más amplia distribución entre los seres vivos, este nutriente participa en gran cantidad de reacciones óxido reducción, de control de la síntesis y de regulación de la actividad en cientos de enzimas, así como en el control de vías metabólicas como del ciclo del ácido tricarboxílico, el transporte de electrones, la fosforilación oxidativa, la fijación de nitrógeno y el metabolismo del lactato, piruvato y acetato o encapsulado de proteínas, existen múltiples y muy finos mecanismos para regular su absorción y utilización celular Martínez *et al.*, (2008).

En los años 90 se inició el Plan Nacional de Nutrición y Alimentación el cual se acordó elaborar un plan alimentario del país considerando desde la fertilidad de la tierra y el efecto biológico en los seres humanos en verdadera cadena en diferentes esferas, ahora en diferentes circunstancias los programas sufrieron rupturas, por lo cual se requiere una nueva integración Paredes *et al.*, (2009).

La biofortificación busca respuestas para el hambre y la desnutrición en soluciones basadas en tecnologías específicas que son restrictas a un conjunto limitado de culturas alimentarias. Por otro lado, cuando se defiende la Soberanía y la Seguridad alimentaria y nutricional, se busca acercar el debate a la nutrición y la biodiversidad Fórum Brasileiro de Soberanía y Seguridad Alimentaria y Nutricional (FBSSAN, 2016).

La Revolución Verde que a partir de la década de 1960 se centró en obtener nuevas variedades de unos cuantos cultivos alimenticios como arroz, trigo y maíz, aumentó el consumo de calorías en los países en desarrollo, y ayudó a destruir la diversidad en los campos de cultivo. Aunque a menudo se le da el crédito de haber resuelto el hambre mundial, sesenta años más tarde, 821 millones de personas sufren desnutrición y dos mil millones sufre

malnutrición, según lo señala la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) GRAIN (2019).

Estudios realizados en Estados Unidos muestran que los alimentos actuales contienen menores niveles de hierro, zinc, proteínas, calcio, vitamina C y otros nutrientes en relación al pasado Davis, (2009).

En el año 1996 el MSP inicia el PIM (Programa Integrado de Micronutrientes) y se organiza el Comité Nacional de Micronutrientes, que las prioridades iniciales fueron yodo, hierro y vitamina A, pero recientemente hay la inclusión del zinc y cobre Paredes *et al.*, (2009).

En Ecuador existen pocos estudios, tal es el caso de la investigación donde se evaluó la fertilización foliar y edáfica con hierro y zinc en diferentes cultivares de arroz sobre la concentración en el grano en la región Amazónica, se evaluó las características agronómicas y contenido de hierro y zinc, mostró una mejora proporcional en las características agronómicas con las aplicaciones y presentó una concentración de hierro en el grano de arroz de la variedad INIAP-16 con 3,03 mg. l⁻¹ VALERO, (2015).

En otro estudio se evaluó el efecto de la fertilización foliar y edáfica con hierro y zinc para la biofortificación agronómica del tubérculo de papa en diferentes variedades, se midió características agronómicas, contenido de hierro y zinc, materia seca en pulpa y cáscara; resultando un mayor contenido de hierro y zinc en la cáscara que en la pulpa sin afectar el rendimiento de las variedades de papa Gavilánez, (2015).

Finalmente se realizó otro estudio donde se evaluaron tres fuentes de hierro en la biofortificación foliar en rye grass perenne variedad Amazon se evaluaron variables agronómicas como altura, número de macollos y vigor de rebrote y variables de laboratorio como análisis de materia seca y fresca, macro y micro nutrientes, bromatológico, clorofila y biodisponibilidad de hierro; dando como resultado una mayor bioacumulación de hierro en el pasto al segundo corte con 5,33 mg.kg⁻¹ Díaz, (2019).

Justificación

La OMS identifica la deficiencia de Hierro como uno de los 10 riesgos más amenazantes para la salud que contribuyen sustancialmente a las tasas de mortalidad general con énfasis en la mortalidad infantil. Se habla de aproximadamente 200 millones de menores de 5 años en el mundo aún no alcanzan su potencial cognoscitivo, motriz y socio-emocional por las carencias de micronutrientes Paredes *et al.*, (2009).

El problema de deficiencias micronutrientes/hambre oculta es un problema fundamental en América Latina y el Caribe (ALC) para combatir las deficiencias de micronutrientes se enmarca en la Iniciativa Regional apoyada por el convenio con MI (The Micronutrient Initiative). Se reitera que Ecuador es un país prioritario: aunque su renta promedio anual lo clasifica como país de mediano ingreso, los indicadores reflejan la realidad social y de salud observadas en países de bajos ingresos Paredes *et al.*, (2009).

Entre el 40 y 60% de niños en vías de desarrollo sufren de anemia por deficiencia de hierro, además tienen problemas para alcanzar su potencial mental. Así mismo, la prevalencia mundial de anemia en embarazadas alcanza más del 40% y más del 30% en las mujeres en edad fértil, la desnutrición crónica infantil afecta al 27,2% de los menores de 2 años en Ecuador, esta problemática repercute en la productividad del país y tiene un impacto a lo largo de la vida de las personas Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, 2021).

Para contrarrestar este problema la biofortificación agronómica en la presente investigación es una alternativa viable y potencial para contrarrestar la deficiencia de micronutrientes probablemente la suplementación con micronutrientes, los programas de complementación con alimentos ajustados a las necesidades y requerimientos nutricionales de la población a la que están dirigidos, la fortificación de alimentos Salomón *et al.*, (2011).

En el cual se evaluará con dos fuentes de hierro vía foliar para determinar la mejor dosis con la mayor acumulación de hierro en dos variedades de trigo (Imbabura y San Jacinto), ya que la harina de trigo es alimento de consumo general y excelente vehículo para la fortificación con

hierro, por lo que fortificarlo vía foliar le permitirá completar los nutrientes necesarios que no pudo adquirirlo del suelo, y aumentaría sustancialmente los valores para cubrir los requerimientos de la población en riesgo.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la biofortificación con hierro en trigo (*Triticum aestivium*) variedad Imbabura y San Jacinto a nivel de maceta para establecer la variedad, dosis y fuente de fertilizante más adecuada.

Objetivos Específicos

Establecer la mejor fuente, dosis y bioacumulación de hierro en forma foliar sobre plantas de trigo variedades Imbabura y San Jacinto.

Evaluar las variables agronómicas, fisiológicas sobre plantas de trigo variedades Imbabura y San Jacinto.

Hipótesis

H₀: La aplicación de diferentes dosis de fuentes de hierro a través de la biofortificación foliar no incrementan la asimilación del nutriente en el trigo (*Triticum aestivium*) en las variedades Imbabura y San Jacinto.

H₁: La aplicación de diferentes dosis de fuentes de hierro a través de la biofortificación foliar incrementan la asimilación del nutriente en el trigo (*Triticum aestivium*) en las variedades Imbabura y San Jacinto.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Biofortificación

La biofortificación es un proceso mediante el cual se incrementa la concentración de elementos esenciales en la parte comestible de los productos cosechados mediante la intervención agronómica, mejoramiento genético o ingeniería genética, tiene como objetivo mejorar el estado nutricional de los cultivos, al producir alimentos con alto valor nutricional en elementos minerales deficientes en la dieta de la población mundial Márquez *et al.*, (2015)

Biofortificación en los alimentos

No todos los alimentos ofrecen una buena biodisponibilidad de sus micronutrientes, el objetivo de la biofortificación es desarrollar plantas con un mayor contenido de nutrientes biodisponibles, con mejores características nutricionales ya que estos cultivos contribuyen a la seguridad alimentaria y nutricional de los individuos, familias y comunidades. La biofortificación se considera un método eficaz y económico para que las poblaciones de bajos ingresos puedan tener acceso a nutrientes como hierro y zinc, beta-carotenos, que han sido aplicados a cultivos de cereales como el arroz, el maíz y el trigo Restrepo *et al.*, (2020).

Biofortificación de cultivos

La biofortificación de cultivos actualmente se ha encaminado a cultivos tradicionales, que ocupan un nicho en el mercado e importancia agrícola, desde cultivos hortícolas hasta frutales, lo que implica aumentar los rasgos de las características organolépticas (sabor, textura, apariencia, etc.) y en perspectivas futuras de la biofortificación gira entorno al enriquecimiento de alimentos en compuestos activos naturales como carotenoides Trujillo *et al.*, (2022).

Trigo

El trigo junto con el arroz y la cebada, es el cereal de mayor importancia en Ecuador, en el país se cultiva cerca de 28.890 hectáreas, cuyos rendimientos están alrededor de 0.6 a 3 tn/ha. Ecuador importa el 98% de los requerimientos internos del trigo y tan solo el 2% (900 TM) es producido a nivel local Basantes, (2015).

Importancia del Trigo en el Ecuador

Según Vallejos (2019). El Ecuador a nivel de Latinoamérica registra la productividad más baja (0.7 TM/ha), mientras que, el rendimiento promedio a nivel mundial es superior a 1.3 TM/ha, esto se presencia en países que gozan de latitudes altas.

Básicamente se puede determinar que el Ecuador es un país dependiente de trigo, por sus varios usos y la importancia que tiene en la alimentación diaria de las personas y su riqueza en vitamina E, aun así, su producción es mínima ya que la población ecuatoriana depende del trigo importado para poder cubrir la demanda nacional, en comparación con las cantidades que se importa, debido a varias razones tanto sociales como agrícolas.

Descripción de las variedades evaluadas

INIAP-San Jacinto 2010

Origen

Esa una variedad de trigo panadera originado en el centro internacional de mejoramiento del maíz y trigo, en 1998 ingresó al Ecuador y fue seleccionado en el Centro Experimental Santa Catalina INIAP SAN JACINTO 2010 fue evaluado en varias localidades de la Sierra Centro Norte Falconí *et al.*, (2010).

Características morfológicas

Las características morfológicas que presenta la variedad de trigo INIAP SAN JACINTO 2010 son: número de macollos 6, número de granos por espiga 46, espiga tipo barba y compacta, el tipo de grano es oblongo, el color de grano blanco, su tallo es tolerante al vuelco,

con una altura de la planta 88 cm, el tamaño de espiga de 10 cm, y una longitud de la raíz entre 1,2-1,5m Falconí *et al.*, (2010).

Características agronómicas

La variedad INIAP SAN JACINTO 2010 cuenta con las siguientes características agronómicas: su ciclo del cultivo dura entre 160-170 días, los días de espigamiento entre 80-85, el peso de 1000 granos es de 43 gramos y su resistencia a la sequía es tolerante Falconí *et al.*, (2010).

Reacción a enfermedades

INIAP SAN JACINTO 2010 al ser una semilla mejorada tiene una resistencia a las siguientes enfermedades: roya amarilla (*Puccinia triformis*), roya de la hoja (*Puccinia triticina*), y fusarium de la espiga (*Fusarium spp*): con una resistencia parcial Falconí *et al.*, (2010).

Características de calidad

Las características de calidad de esta variedad son: peso hectolítrico (kg/hl): 75-79, contiene proteína entre el 11-12 %, con una buena aptitud panadera y su rendimiento harinero es entre el 70-75 % Falconí *et al.*, (2010).

Rendimiento

Usando tecnología usada por el INIAP, el rendimiento de INIAP SAN – JACINTO 2010 es de 4.0 t/ha Falconí *et al.*, (2010).

Zonificación

Se adapta a zonas de producción de cereales ubicadas entre los 2200 y 3000 m de altitud, en los cantones Guaranda, Chimbo, San Miguel y Chillanes (Bolívar), Alausí y Chunchi (Chimborazo), Antonio Ante, Urcuquí y Cotacachi (Imbabura) Falconí *et al.*, (2010).

INIAP-IMBABURA 2014

Origen

Es una línea de trigo harinero desarrolla en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) en México, registrado con el nombre de TINAMOU, fue introducida a

Ecuador en el año de 1999 en el vivero 10TH HRWSN (High Rainfall Wheat Screening Nursery), en el año 2000 hasta el 2004 estuvo formando parte en la Estación Experimental Santa Catalina, y en el 2009 fue evaluado en varias localidades de la Sierra ecuatoriana en campos de productores Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2014).

Características morfológicas

Las características morfológicas que presenta la variedad son: 300 número de espigas por m², 45 granos por espiga, el tipo de espiga es compacta, su grano es oblongo y rojo, tallo resistente al acame, una altura de planta de 105 cm, la espiga llega a medir hasta 11 cm, y la longitud de raíz entre 1-1,5 m INIAP, (2014)

Características agronómicas

Entre las características agronómicas de la variedad INIAP-IMBABURA 2014 son: entre 160-180 días de ciclo del cultivo, 85 días al espigamiento y 45 gramos de peso de 100 granos INIAP, (2014).

Reacción a enfermedades

Al ser una semilla mejorada tiene una resistencia a las siguientes enfermedades: roya amarilla (*Puccinia triformis*), roya de la hoja (*Puccinia triticina*), y fusarium de la espiga (*Fusarium spp*) una resistencia parcial INIAP, (2014).

Características de calidad

Las características de calidad de esta variedad poseen: 12,7% de proteína, 3,6% de fibra, 80,2% extracto libre de nitrógeno, 79,5 kg/Hl de peso hectolítrico y un buen rendimiento harinero del 72% INIAP, (2014).

Rendimiento

Usando tecnología usada por el INIAP, el rendimiento de INIAP-IMBABURA 2014 es de 4.0 t/ha INIAP, (2014).

Zonificación

Ha mostrado una buena adaptación en todas las zonas trigueras de las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Chimborazo y Azuay, en altitudes comprendidas entre 2000-300 m, con precipitaciones de 400 a 500 mm distribuidas durante el ciclo de cultivo, especialmente en la fase de macollamiento y espigamiento INIAP, (2014).

Tabla 1

Fases de crecimiento del trigo y cebada

	Crecimiento		Espigado		Maduración			Ciclo total, días
	Germinación	Macollado	Encañado	Espigado	Grano lechoso	Grano pastoso	Grano duro	Zona
No. días	10	25	30	20	25	20	25	
Acumulado	10	85 días			155 días			160-180

Nota. Tomado de Basantes, (2015).

Hierro en la planta

Según Heeren, (2021). El hierro es un micronutriente esencial en las plantas, pues cumple un rol activo en la regulación de funciones importantes como la respiración mitocondrial, fotosíntesis, asimilación del nitrógeno, regulación hormonal, entre otras.

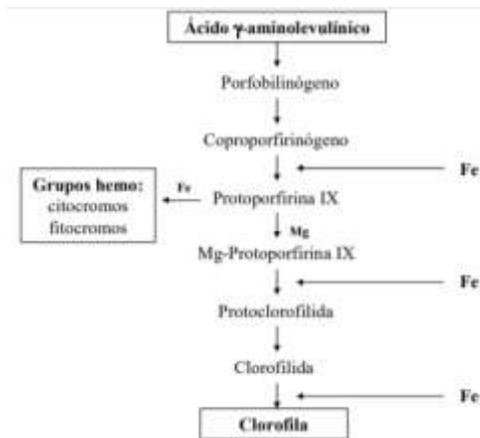
Fotosíntesis

El hierro juega un papel importante en el proceso de la fotosíntesis, ya que participa en varios pasos de la ruta biosintética de la misma, regula la actividad del sistema enzimático para la formación de la protoclorofila y de otros pigmentos fotosintéticos. La biosíntesis de las clorofilas es un proceso en el que la primera fase del aminoácido ácido glutámico es convertido en ácido gaminolevulínico, algunas enzimas de los cloroplastos pueden insertar Mg^{2+} en el centro del tetrapirrol, dando como resultado final la clorofila, o bien Fe^{2+} para sintetizar grupos hemo, de esta manera la deficiencia de Fe provoca una reducción de los productos de los tetrapirroles involucrados en la síntesis de pigmentos fotosintéticos, sobre todo de clorofilas y

por eso, los pigmentos amarillos (xantofilas y carotenos) predominan en las plantas deficientes de Fe, y son los responsables del amarillamiento foliar Hansen *et al.*, (1996).

Figura 1

Implicación del hierro en la ruta biosintética de la clorofila



Nota. Tomado de Martínez, (2012).

Sistemas enzimáticos

El hierro se presenta en las plantas formando parte de un buen número de sistemas enzimáticos importantes para el metabolismo de las mismas, que se pueden dividir en complejos hémicos (o hemoproteínas) y no-hémicos, dependiendo de si el ion Fe en la proteína está unido a un anillo de porfirina o no respectivamente, como en proteínas no-hémicas con enlace Fe-S, en la ferredoxina y enzimas reductasas, nitrogenasas, sulfatos y nitritos reductasas, el hierro forma parte estructural de los citocromos, citocromo oxidasa, catalasa, peroxidasa y ferredoxina. Se encuentra tanto en sistemas respiratorios como fotosintetizadores, aproximadamente, el 75 % del hierro celular está asociado con los cloroplastos Martínez, (2012).

El hierro tiene la capacidad de formar complejos octaédricos con distintos ligandos, con una gran variación en el potencial redox de Fe (II)/Fe (III) dependiendo del ligando, la alta afinidad de este micronutriente por distintos ligandos, como fosfatos o ácidos orgánicos hace

menos probable que Fe^{2+} o Fe^{3+} sean muy fundamentales en el transporte a corta o larga distancia en las plantas Juárez *et al.*, (2022).

Hierro de reserva

El hierro libre puede interaccionar con el oxígeno para formar aniones superóxido (O_2^-), que dañan las membranas al degradar los componentes lipídicos no saturados, las células vegetales limita este daño con el almacenamiento del excedente de hierro en un complejo hierro-proteína llamado “fitoferritina” localizado fundamentalmente en las hojas, esta proteína de reserva $[(\text{FeO}\cdot\text{OH})_8(\text{FeO}\cdot\text{OPO}_3\text{H}_2)]$ está formada por 24 subunidades idénticas que forman una esfera hueca con una masa molecular de 480 kDa, la fitoferritina constituye la principal reserva de Fe de la planta y supone el 12-23% del Fe total de la planta en materia seca. En términos cuantitativos, el 65% del Fe presente en las hojas de las plantas está asociado a proteínas; y de esta cantidad, el 35% se acumula en la fitoferritina, el 10% está unido a hemoproteínas y otro 20% a sistemas enzimáticos no-hémicos, dentro de la hoja, el 80% del Fe se localiza en el cloroplasto Heeren, (2021).

Transporte del hierro

El hierro reducido Fe^{2+} , es transportado al interior de la célula mediante un transportador férrico denominador IRT1, se trata de una proteína que se localiza en la membrana plasmática y funciona principalmente como un transportador de alta afinidad que regula la absorción de Fe^{2+} en la raíz. Fox, *et al.*, (1996) observaron un aumento de la absorción de Fe^{2+} en *Pisum sativum* inducida por la deficiencia de Fe, utilizando un quelato enriquecido en ^{59}Fe , y sugirieron el aumento de la actividad de una proteína transportadora de Fe^{2+} en la plasmalema Rellán, (2011).

Mientras que el hierro en forma Fe^{3+} necesita ser reducido en la superficie de las raíces antes de ser transportado al citoplasma, sin embargo, en este estado no es soluble y por ende no puede ser asimilado por las plantas, lo que puede llevar a una deficiencia de hierro. El cloroplasto es el destino final de una gran parte del Fe en la planta, el transporte de Fe hacia el

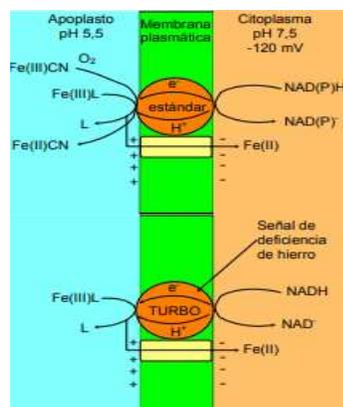
interior del cloroplasto es activo y dependiente de la luz, una vez el Fe alcanza su destino final, si no va a ser utilizado se almacena en forma de proteína no tóxica, fitoferritina, pudiendo liberarse según las necesidades de la planta, otro destino del Fe podría ser la mitocondria, que es el orgánulo donde se generan proteínas con enlace Fe-S Rellán, (2011).

Mecanismo de absorción de hierro

De los dos estados de oxidación en el que se presenta el hierro, Fe^{2+} y Fe^{3+} , la planta asimila preferiblemente el Fe^{2+} , para la toma del Fe^{2+} la planta se ve obligada a realizar un proceso donde interviene una enzima reductasa (Fig. 2) situada en la membrana plasmática de la raíz, la cual es capaz de reducir aceptores externos de electrones de alto potencial como el ferrocianuro (+360 mV) y posiblemente O_2 (+280 mV), ésta enzima alcanza su mayor actividad a pH entre 4 y 5. En situaciones que se da una carencia de hierro las plantas superiores han desarrollado una serie de mecanismos para aumentar la disponibilidad de Fe en la dilución del suelo, dichas plantas se dividen en dos grupos dependiendo del modelo de respuesta que desarrollen bajo éste déficit de Estrategia I y de Estrategia II Mengel & Kirkby, (2000).

Figura 2

Sistema estándar de reducción de hierro

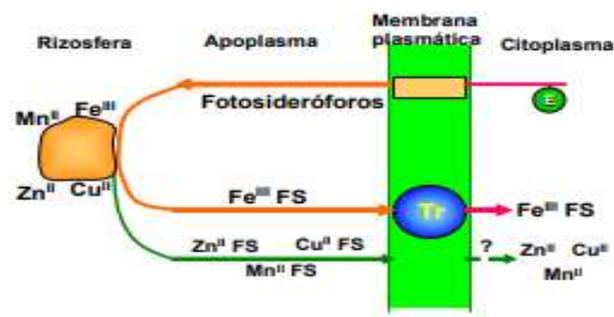


Nota. Tomado de Mengel & Kirkby, (2000).

La Estrategia II está confinada a gramíneas y caracterizada, por un aumento inducido por la deficiencia de hierro, de la liberación de aminoácidos no proteicos, los denominados fitosideróforos, la liberación sigue un ritmo diurno característico (Fig. 3) y es rápidamente reducida con el aporte de hierro, el ritmo diurno en la liberación de fitosideróforos en las plantas deficientes en Fe está relacionado inversamente con el volumen de un tipo particular de vesículas en el citoplasma de las células corticales. En la membrana plasmática de las células radiculares de las gramíneas está presente, como un segundo componente de la Estrategia II, Juárez *et al.*, (2022).

Figura 3

Modelo de respuesta de las plantas de Estrategia II a la deficiencia de hierro



Nota. Sistema de transporte altamente específico para los complejos Fe^{3+} -fitosideróforo (Transportador "Tr") Tomado de Juárez *et al.*, (2022).

Por otro lado, se evidencia que el microbiota del suelo tiene un importante papel en la adquisición de Fe de manera directa, los microorganismos pueden cambiar la estructura de las raíces y liberar protones (H^+) para reducir el Fe, de manera indirecta, inducen en la planta una respuesta de deficiencia de Fe lo que genera que la planta libere más sideróforos, desarrolle pelos radiculares y acidifique la rizosfera Cuenca *et al.*, (2016).

Síntomas de deficiencia de hierro

La deficiencia de Fe se expresa como una clorosis intravenosa en las hojas nuevas, toman coloraciones que van desde amarillo verdoso hasta verde muy claro (casi blanco), mientras que las nervaduras se conservan verdes formando una red muy fina, esta clorosis se debe a que el hierro es necesario para la producción de clorofila responsable del color verde en las hojas, si el déficit es severo además de la clorosis aparece necrosis marginal, que compromete tanto a las hojas nuevas como a las más desarrolladas o viejas Ferreyra *et al.*, (2008).

Rivera *et al.*, (2009) evaluaron la respuesta de árboles cloróticos de naranjo Valencia (*Citrus sinensis*) y de limón Italiano (*Citrus lemon*) mediante la aplicación foliar de compuestos férricos en solución, la aspersion individual de sulfato ferroso 0.25% quelato FeEDTA 0.25% y citrato férrico 0.25% los cuales produjeron un aumento de concentración foliar de Fe, pero no corrigió la clorosis, sin embargo el Sulfato ferroso asperjado con aceite llamado citrolina emulsionada (0.5%) incrementó significativamente el reverdecimiento de las hojas y la concentración de Fe.

Fertilizantes

Importancia de los fertilizantes

Los nutrientes que necesitan las plantas se toman del aire y del suelo, pero si uno de los nutrientes necesarios no está disponible o es escaso, el rendimiento de los cultivos es reducidos, con el fin de obtener altos rendimientos los fertilizantes son necesarios para proveer a los cultivos con los nutrientes del suelo que están faltando, debido al uso de los fertilizantes los rendimientos de los cultivos pueden duplicarse o aún más triplicarse Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2022).

Fertilización foliar

La fertilización foliar es una práctica para suministrar nutrientes a los cultivos, especialmente en etapas donde las demandas de nutrientes son altas o cuando existen

limitantes en el suelo para la fertilización edáfica, los fertilizantes foliares deben tener alta solubilidad y no ser tóxicos, por lo que es necesario saber identificarlos para elegir la mejor fuente, forma, época y sitio de aplicación Fertilab, (2022).

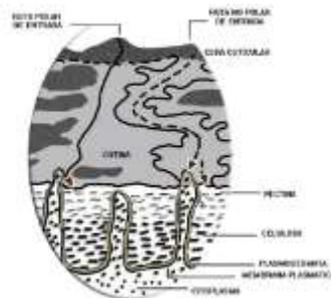
Santos & Aguilar, (1999) indican que la fertilización foliar es la nutrición a través de las hojas, utiliza como un complemento a la fertilización al suelo, bajo este sistema de nutrición la hoja juega un papel importante en el aprovechamiento de los nutrientes, y en la absorción de los iones. Los factores que influyen en la fertilización foliar pueden clasificarse en tres grupos: a la planta, al ambiente y la formulación foliar, varios trabajos de fertilización foliar han demostrado su bondad en la respuesta positiva de los cultivos.

Rutas de absorción foliar

La absorción de nutrientes se da mayormente en la cutícula debido a su mayor intercepción de las gotas de agua, su elevada superficie de contacto y su composición química es considerada la ruta predominante en el proceso de absorción foliar, existen dos rutas de absorción de nutrientes (Fig. 5): la primera ruta se denomina acuosa y la segunda es considerada lipídica. En la ruta acuosa luego de atravesar la capa epicuticular en la superficie de la hoja, el nutriente se mueve por las secciones donde se encuentran los componentes polares. Por el contrario, en la ruta lipídica los solutos no polares atraviesan la barrera cuticular por difusión molecular a través de los componentes lipofílicos Murillo *et al.*, (2013).

Figura 4

Esquema de las rutas de absorción foliar



Nota. Tomado de Murillo *et al.*, (2013).

Fuentes de hierro

Quelatos de hierro

Los quelatos son productos de alta estabilidad capaces de mantener los iones metálicos rodeados de una molécula orgánica (agente quelante) de modo que queden salvaguardados del entorno que favorece su precipitación en forma de hidróxido insoluble y no disponible para la planta Córdoba, (2014).

Tipos de Quelatos

Quelatos Fe-EDTA

Este quelato de hierro disponibles en el mercado es el más débil, por esta razón generalmente solo es recomendado para aplicación foliar, ya que en los depósitos de abono no es lo suficientemente estable, aparte de EDTA existen otras variables como el HEDTA, cuyas características son similares WALCO, (2022).

Quelatos Fe-DTPA

DTPA es el quelato más utilizado para cultivos en sustrato, esto se debe a que la mayoría de los cultivos, el pH está por debajo de 7,5, rango en el que el DTPA se encuentra estable y disponible para la planta, de forma líquida hay dos tipos: Fe-DTPA 3% y Fe-DTPA 6%DTPA 6%, la diferencia entre uno y otro es que el DTPA 3% contiene sodio, mientras que el DTPA 6% contiene amonio, se suele recomendar el uso de DTPA 6% dado que en muchos cultivos el sodio es una sal que con el tiempo se acumula y puede causar problemas, sin embargo, DTPA 6% el costo de producción es más elevado ya que DTPA 6% es mayor que DTPA 3% QUIMASA, (2022).

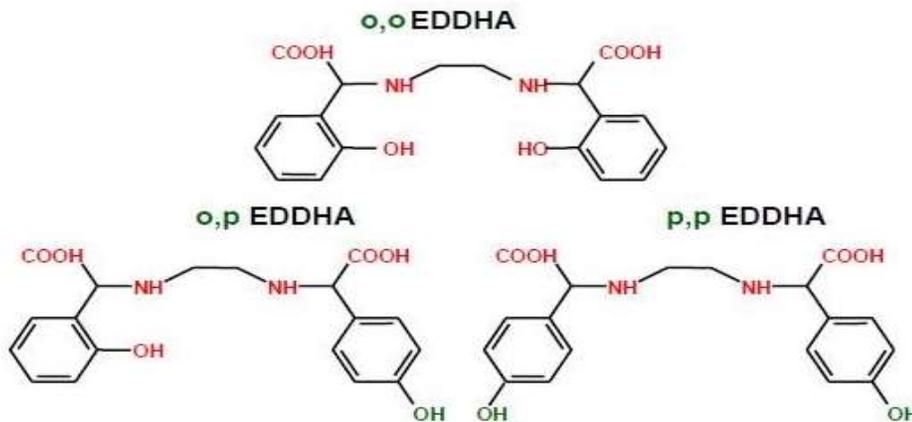
Quelatos Fe-EDDHA

Cuando el pH de un cultivo está alrededor o por encima de 6,5, es recomendable el uso parcial o total de EDDHA, este quelato se mantiene estable hasta niveles de pH incluso por encima de 10, la síntesis de EDDHA da lugar a la formación de isómeros posicionales, con tres

posiciones diferentes en función del lugar que ocupa el grupo hidroxilo (Fig. 6) Álvarez & Abadía, (2006).

Figura 5

Diferentes formas de EDDHA



Nota. Tomado de Álvarez & Abadía, (2006).

De las distintas formas, el de arriba orto-orto EDDHA el cual es el más estable, los otros dos son orto-para y para-para respectivamente, debido a que todos los tipos de EDDHA en el mercado están compuestos de las formas de quelato como aparecen representados, es recomendable elegir el producto con el mayor porcentaje de orto-orto Álvarez & Abadía, (2006).

Sulfato ferroso

Es un producto 100% soluble usado como fuente de abonamiento y fertilización del hierro biodisponible y asimilable por las plantas a través de las raíces y de las hojas, bajo la forma de Fe^{2+} , da un aporte importante de azufre el cual es requerido por las plantas en cantidades parecidas a las del fósforo y es tan importante como el nitrógeno en la determinación de la cantidad y calidad de biomasa de un cultivo Ferrosalt, (2022).

Masa Seca

La acumulación de masa seca refiere a la absorción de macro y micro nutrientes como: hierro, fósforo, potasio, nitrógeno, calcio, magnesio, zinc, manganeso, cobre y boro. Existe una correlación directa entre los nutrientes absorbidos por las plantas y su masa seca, es decir a mayor absorción de nutrientes presenta mayor porcentaje de masa seca Hewstone, (1999).

Biodisponibilidad de hierro

La biodisponibilidad del hierro es la proporción de este nutriente utilizado por el organismo para satisfacer los procesos metabólicos normales, constituyéndose en un factor determinante en el “status” del hierro que depende, entre otros factores, del contenido de Fe de los alimentos, de su coeficiente de absorción de la acción combinada de otros nutrientes en la dieta, ya sea como facilitadores o inhibidores de la absorción, así también como las reservas corporales de hierro. Independientemente de la cantidad de este elemento contenido en los alimentos, su absorción depende directamente del tipo de Fe que este contenga, así el hierro hemínico proveniente de los alimentos de origen animal, especialmente aquellos que contienen hemoglobina y/o mioglobina donde se encuentra enlazado al anillo porfirínico (complejo Fe-porfirina) posee una biodisponibilidad que oscila entre el 10 – 25% en cambio el hierro no hemínico presente en los alimentos de origen vegetal, en especial en cereales y frutas, se encuentra en forma de sales y su rango de absorción varía entre el 1 – 5% Fuenmayor *et al.*, (1997).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Ubicación del lugar de investigación

La presente investigación se realizó en el invernadero de las instalaciones de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA I, de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Ubicación geográfica

Geográficamente el área de estudio se encontró en las coordenadas de las instalaciones de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA I, son latitud $0^{\circ}23'04.56''S$, longitud $78^{\circ}24'57.20''O$, altitud 2719 m.s.n.m.

Figura 6

Vista aérea del lugar de la investigación



Nota. Tomado de Google Maps (2022).

Condiciones del invernadero

Las condiciones del invernadero donde se realizó el ensayo tuvieron una temperatura mínima: $10^{\circ}C$, temperatura máxima: $35^{\circ}C$, humedad relativa: 40-60% y luz par: $1500 \mu mol \cdot m^{-2} s^{-1}$ Villarreal, (2018).

Condiciones de laboratorio

El laboratorio de química donde se realizó la fase de germinación in vitro, tuvo una temperatura promedio de 13 °C, temperatura máxima de 22 °C y temperatura mínima de 8 °C Villarreal, (2018).

Métodos

Fase de campo

Preparación de semilleros

Para la siembra del trigo se mezcló sustrato de turba rubia importada (NPK + Micro+ Humectante) más pomina en relación 3:1 una vez ya colocado el sustrato en los semilleros, se procedió a sembrar las semillas de trigo variedades INIAP-SAN JACINTO 2010 e INIAP-IMBABURA 2014 en un semillero, los cuales fueron colocados en la cámara húmeda del invernadero de Horticultura, y fueron regados pasando un día.

Preparación de sustrato y siembra en macetas de trigo

Para la siembra del ensayo definitivo, el trigo fue sembrado en una mezcla de tierra negra y pomina relación 70:30. Luego se realizó un análisis químico del sustrato, donde se determinó el contenido N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Cu, Fe, Mn. Se preparó la cantidad suficiente de sustrato para 36 macetas de 3.5 litros, luego a los 19 días se trasplantaron 10 plántulas de trigo (*Triticum aestivium*) por maceta, la mitad con la variedad INIAP-SAN JACINTO 2010 y el resto con la variedad INIAP-IMBABURA 2014, en cada maceta a una profundidad de 0.5 cm.

Figura 7

Análisis del sustrato para la determinación de macro y micronutrientes

N° muestra	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Zn	Cu	Fe	Mn
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)	(ppm)
22-2321	0,38	0,06	0,05	0,47	0,19	0,06	0,1	30,1	23,0	10692	436

Nota. Resultados de análisis del sustrato en la Subestación Santa Catalina del INIAP.

A los 25 días en la etapa de macollaje se aplicaron los tratamientos vía foliar a primera hora de la mañana con atomizadores de 1 litro. Noventa días después del trasplante (DDT) se recolectaron hojas, las cuales fueron almacenadas en fundas de papel, para luego ser analizadas en laboratorio.

Fase de laboratorio

Esta fase comprendió la preparación de tratamientos, medición de clorofila, análisis de Fe²⁺ biodisponible en hoja de trigo (*Triticum aestivium*) variedad INIAP-SAN JACINTO 2010 y variedad INIAP-IMBABURA 2014.

Diseño experimental

Factores de estudio

Los factores de estudio fueron: fuentes de hierro, variedad y dosis.

Tabla 2

*Descripción de los factores evaluados en el trigo (*Triticum aestivium*) variedad INIAP-SAN JACINTO 2010 y variedad INIAP-IMBABURA 2014.*

Fuentes de hierro	Variedad	Dosis (mg L⁻¹)
		0
E.D.D.H.A	V1	10
	Imbabura	40
		0
E.D.D.H. A	V2	10
	San Jacinto	40
		0
FeSO ₄ *7H ₂ O	V1	10
	Imbabura	40
		0
FeSO ₄ *7H ₂ O	V2	10
	San Jacinto	40

Nota. Elaboración propia.

Tratamientos a comparar

Los tratamientos se obtuvieron de relacionar las fuentes de hierro (E.D.D.H.A, FeSO₄*7H₂O de hierro), con las dos variedades, tres dosis (0 mg/l, 10 mg/l y 40 mg/l) y con tres repeticiones (2x3x2) con un total de 36 unidades experimentales.

Análisis estadístico

El experimento se dispuso bajo un diseño completamente al azar (DCA) con tres repeticiones y se adoptó el siguiente modelo matemático:

$$Y_{ij} = \mu + D_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = Producción de plantas de trigo

μ = media general

D_i = Efecto del i ésima dosis de Fe (hierro) en la biofortificación

ε_{ij} = Error experimental.

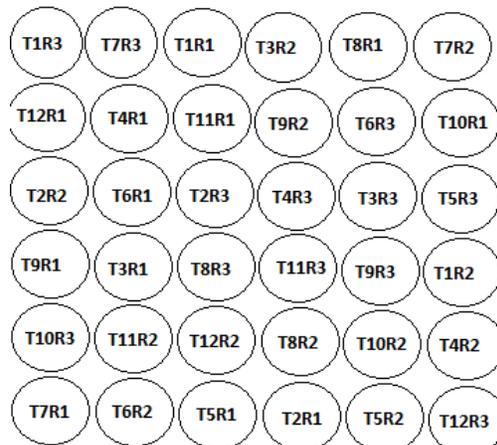
Características de las unidades experimentales

Se contó con 36 unidades experimentales representadas cada una de las macetas con sustrato homogéneo y 10 plántulas de trigo (*Triticum aestivium*) variedad INIAP-SAN JACINTO 2010 y 10 plántulas variedad INIAP-IMBABURA 2014, dispuestas a 5 cm entre maceta.

Croquis experimental

Figura 8

Croquis del diseño experimental



Nota. Tratamientos y repeticiones del cultivo de trigo (*Triticum aestivium*).

Análisis funcional

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANAVA) a un nivel de confiabilidad del 95% ($p \leq 0,05$) entre las variedades, fuente y dosis además se realizó una comparación de medias (DUNCAN) en el software estadístico INFOSTAT.

Variables evaluadas

Altura de la planta

La altura se tomó desde la base de la planta hasta la parte apical de la planta, se tomó con un flexómetro, cada ocho días.

Figura 9

Medición de altura de plantas de trigo variedad Imbabura y San Jacinto



Nota. Medición de plantas de trigo con flexómetro. Autoría propia.

Longitud de raíz

La longitud de raíz se determinó al finalizar la investigación con el retiro y lavado de raíces de cada uno de los tratamientos, la medición se tomó con un flexómetro.

Peso seco

Las muestras de peso fresco fueron sometidas al secado en estufa por un tiempo de 24 horas a una temperatura de 100°C a fin de extraer todo el contenido de agua del trigo.

Clorofila

La medición de clorofila se realizó a los 59 días DDT, se pesó 0.25 g de materia fresca y se maceró en 2,5 ml de etanol al 96%, luego se aforó a 8 ml y se dejó reposar por 24 horas a una temperatura de -4°C, transcurrido este tiempo en un cuarto oscuro se centrifugó a 10 000 revoluciones por 15 minutos, y se separó el sobrenadante en tubos falcon y se leyeron las muestras a 645 nm (clorofila a) y 663 nm (clorofila b) en el espectrofotómetro.

La clorofila total se obtuvo con las siguientes ecuaciones como se muestra en la tabla 3:

Tabla 3

Ecuación para la obtención de clorofila en medidas de ug/ml

Solventes	Ecuaciones
95 % Etanol	Ch-a=13,36 ^a ₆₆₃ -5,19 ^a ₆₄₅ Ch-b=27,43 ^a ₆₄₅ -8,12 ^a ₆₆₃

Nota. a=Absorción, Ch-a Clorofila a, Ch-b= Clorofila b.

Tomado de Sumanta *et al.*, (2014).

Biodisponibilidad de hierro en hoja

Para la determinación de hierro ferroso (Fe²⁺) se pesó 2 g de materia fresca previamente lavados y cortados en trozos de 2 mm, estos se colocaron en tubos de ensayo con 7 ml al 1.5% (p/p) de la solución de 1,10-fenantrolina, los cuales se mantuvieron por 16 horas, las muestras se centrifugaron a 9200 revoluciones por minuto (r.p.m) durante 20 minutos, y la concentración de Fe²⁺ fue determinada a 510 nm en el espectrofotómetro.

Los valores de ppm de Fe²⁺ se obtiene con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{y + 0,0347}{0,0424}$$

CAPITULO IV
RESULTADOS

Altura de la planta

Para la variable altura de planta, se encontraron efectos significativos para la interacción Variedad y Fuente ($F_{4,60}=7,99$; $p=0,01$). Las plantas de trigo variedad Imbabura con una fuente de $FeSO_4$ presentaron mayor altura que el resto de plantas de trigo. (Tabla 4).

Tabla 4

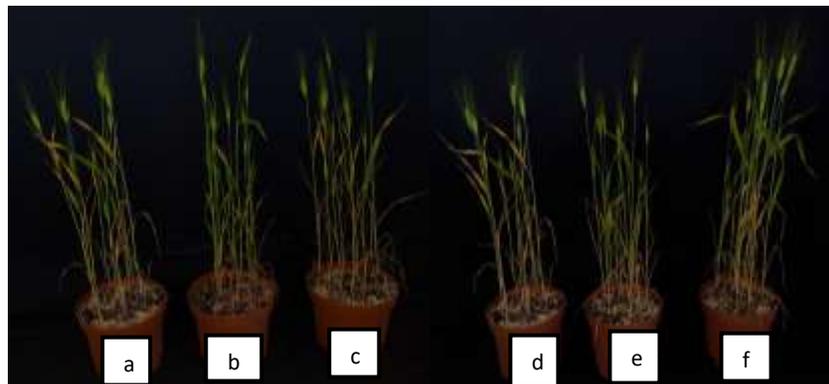
*Medias \pm desviación estándar de altura en las plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedades Imbabura y San Jacinto fuentes de E.D.D.H.A y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$.*

VARIEDAD	FUENTE	Medias (cm)
Imbabura	SULFATO	30,67 \pm 3,88 a
San Jacinto	EDDHA	27,27 \pm 2,67 b
San Jacinto	SULFATO	26 \pm 2,64 b
Imbabura	EDDHA	25,38 \pm 4,97 b
San Jacinto	TESTIGO	28,61 \pm 5,65 ab
Imbabura	TESTIGO	27,61 \pm 2,39 ab

Nota. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p>0,05$) con $n=9$.

Figura 10

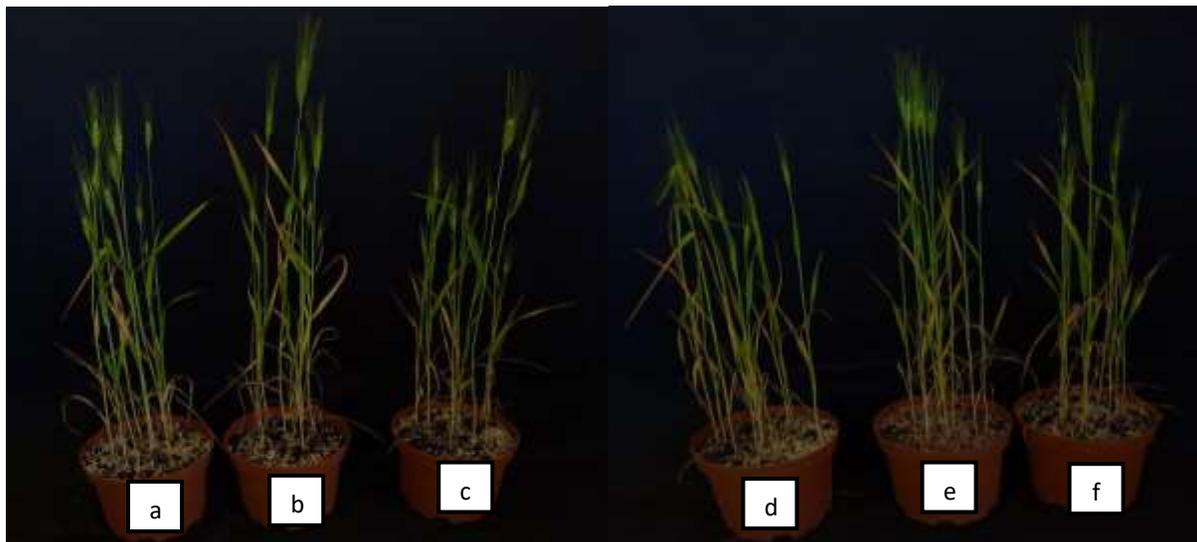
*Plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedad Imbabura con tratamientos de E.D.D.H.A y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$*



Nota. a) T4=Tratamiento con dosis de $0mg/L^{-1}$, b) T2=Tratamiento con dosis de $10mg/L^{-1}$, c) T3= Tratamiento con dosis de $40mg/L^{-1}$ de E.D.D.H.A (izquierda), d) T4=Tratamiento con dosis de $0mg/L^{-1}$, b) T7=Tratamiento con dosis de $10mg/L^{-1}$, c) T9= Tratamiento con dosis de $40mg/L^{-1}$ de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (derecha). Autoría propia.

Figura 11

Representación de la altura en plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedad San Jacinto con tratamientos de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$



Nota. a) T10=Tratamiento con dosis de 0mg/L^{-1} , b) T5=Tratamiento con dosis de 10mg/L^{-1} , c) T6= Tratamiento con dosis de 40mg/L^{-1} de E.D.D.H.A (izquierda), d) T10=Tratamiento con dosis de 0mg/L^{-1} , b) T11=Tratamiento con dosis de 10mg/L^{-1} , c) T12= Tratamiento con dosis de 40mg/L^{-1} de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (derecha). Autoría propia

Longitud de la raíz

Para la variable longitud de raíz se encontraron efectos significativos para la interacción triple variedad*fuente*dosis sobre la longitud de raíz de las plantas de trigo ($F_{3,40}=4,5$; $p=0,02$) la longitud de raíz de las plantas de trigo en la interacción con la variedad Imbabura y San Jacinto, E.D.D.H. A y FeSO_4 a las dosis de 0-10-40 mg/L^{-1} . Las plantas de trigo variedad Imbabura Sulfato, 40 mg/L^{-1} , presentó mayor longitud de raíz que el resto de plantas de trigo. (Tabla 5)

Tabla 5

*Medias ± Desviación estándar de la longitud de la raíz de las plantas de trigo (Triticum aestivium) variedades Imbabura y San Jacinto fuentes de E.D.D.H.A y FeSO₄*7H₂O y dosis de 0mg/L⁻¹ -10mg/L⁻¹ - 40mg/L⁻¹*

VARIEDAD	FUENTE	DOSIS	MEDIAS (cm)
San Jacinto	FeSO ₄	0	25,67±2,52 b
San Jacinto	FeSO ₄	10	28,67±5,03 ab
San Jacinto	FeSO ₄	40	26±3 b
San Jacinto	EDDHA	0	29±3 ab
San Jacinto	EDDHA	10	25,67±2,08 b
San Jacinto	EDDHA	40	36,67±15,01 ab
Imbabura	FeSO ₄	0	27±1 b
Imbabura	FeSO ₄	10	30±4 ab
Imbabura	FeSO ₄	40	38,67±1,15 a
Imbabura	EDDHA	0	25,67±8,14 b
Imbabura	EDDHA	10	31,67±2,08 ab
Imbabura	EDHHA	40	26,33±5,51 b

Nota. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p>0,05$) con $n=3$.

Peso Seco

Para la variable peso seco se encontró efectos significativos para la interacción triple variedad*fuente*dosis sobre el peso seco de las plantas de trigo ($F_{3,40}=0,02$; $p=0,98$) el peso seco de las plantas de trigo en la interacción San Jacinto E.D.D.H.A 40mg/L⁻¹, San Jacinto FeSO₄ 0mg/L⁻¹, Imbabura E.D.D.H.A 10mg/L⁻¹ presentaron mayor porcentaje de masa seca que el resto de plantas de trigo. (Tabla 6)

Tabla 6

*Medias ± desviación estándar del peso seco de las plantas de trigo (*Triticum aestivium*)*

*variedades Imbabura y San Jacinto fuentes de E.D.D.H.A y FeSO₄*7H₂O y dosis de 0mg/L⁻¹ -*

10mg/L⁻¹- 40mg/L⁻¹

VARIEDAD	FUENTE	DOSIS	MEDIAS (g)
San Jacinto	SULFATO	40	3,25±0,66
San Jacinto	SULFATO	10	3,01±0,09
San Jacinto	SULFATO	0	3,01±0,26
San Jacinto	EDDHA	40	3,22±0,20
San Jacinto	EDDHA	10	2,62±0,89
San Jacinto	EDDHA	0	3,06±0,11
Imbabura	SULFATO	40	2,96±0,96
Imbabura	SULFATO	10	2,91±0,66
Imbabura	SULFATO	0	2,89±0,32
Imbabura	EDDHA	40	2,47±0,42
Imbabura	EDDHA	10	2,27±0,13
Imbabura	EDDHA	0	2,58±0,90

Nota. Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes (p>0,05) con n=3.

Clorofila

Tabla 7

Absorbancia de clorofila A (Ch-a), clorofila B (Ch-b) y clorofila total (Ch-t) de las plantas de trigo

*(*Triticum aestivium*) variedades Imbabura y San Jacinto, fuentes de E.D.D.H.A y FeSO₄*7H₂O*

y dosis de 0mg/L⁻¹-10mg/L⁻¹- 40mg/L⁻¹

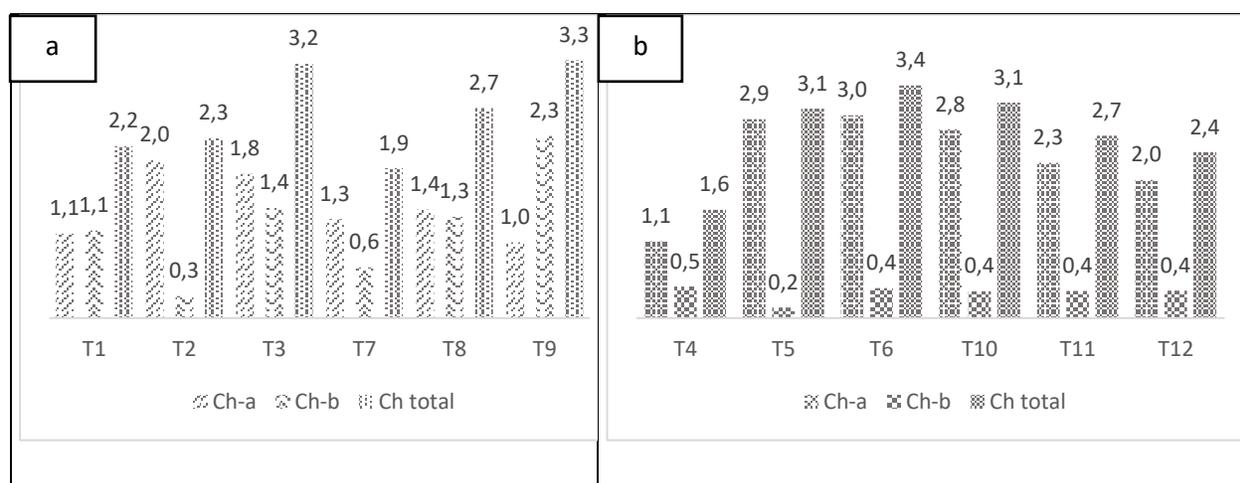
VARIEDAD	FUENTE	DOSIS	Ch-a	Ch-b	Ch total
Imbabura	Testigo S	0	1,26556	0,64657	1,91
Imbabura	FeSO ₄	40	2,3237	0,9667	3,29
Imbabura	FeSO ₄	10	1,38696	1,29328	2,68
Imbabura	Testigo E	0	1,07737	1,11731	2,19
Imbabura	EDDHA	10	2,01622	0,27966	2,30

VARIEDAD	FUENTE	DOSIS	Ch-a	Ch-b	Ch total
Imbabura	EDDHA	40	1,83832	1,40736	3,25
San Jacinto	Testigo S	0	2,75189	0,39087	3,14
San Jacinto	FeSO ₄	10	2,26641	0,39463	2,66
San Jacinto	FeSO ₄	40	2,01699	0,40057	2,42
San Jacinto	Testigo E	0	1,11879	0,46097	1,58
San Jacinto	EDDHA	10	2,90327	0,15321	3,06
San Jacinto	EDDHA	40	2,95604	0,43672	3,39

Nota. Sulfato= S, EDDHA=E.

Figura 12

Cantidad de clorofila A (Ch-a), clorofila B (Ch-b) y clorofila total (Ch-t) de las plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedad San Jacinto y variedad Imbabura



Nota. a) Variedad Imbabura, T1: Testigo, T2: dosis de 10mg. L⁻¹ E.D.D.H.A, T3: dosis de 40mg. L⁻¹ E.D.D.H.A, T7: Testigo, T8: dosis de 10mg. L⁻¹ FeSO₄, T9: dosis de 40mg. L⁻¹, b) Variedad San Jacinto T4: Testigo, T5: dosis de 10mg. L⁻¹ E.D.D.H.A, T6: dosis de 40mg. L⁻¹ E.D.D.H.A, T10: Testigo, T11: dosis de 10mg. L⁻¹ FeSO₄, T12: dosis de 40mg. L⁻¹; Ch-a: Clorofila A, Ch-b: Clorofila B.

En la figura 12 se observa el contenido de clorofila en las plantas de trigo, la variedad San Jacinto tuvo un efecto significativo con una concentración de 3,4 µg/. mL⁻¹ con dosis de 40mg.L⁻¹ E.D.D.H. A y la variedad Imbabura, con una concentración de 3,3 µg/. mL⁻¹ con dosis de 40mg.L⁻¹ FeSO₄ que presentaron la mayor concentración de clorofila que el resto de tratamientos.

Hierro Biodisponible

Tabla 8

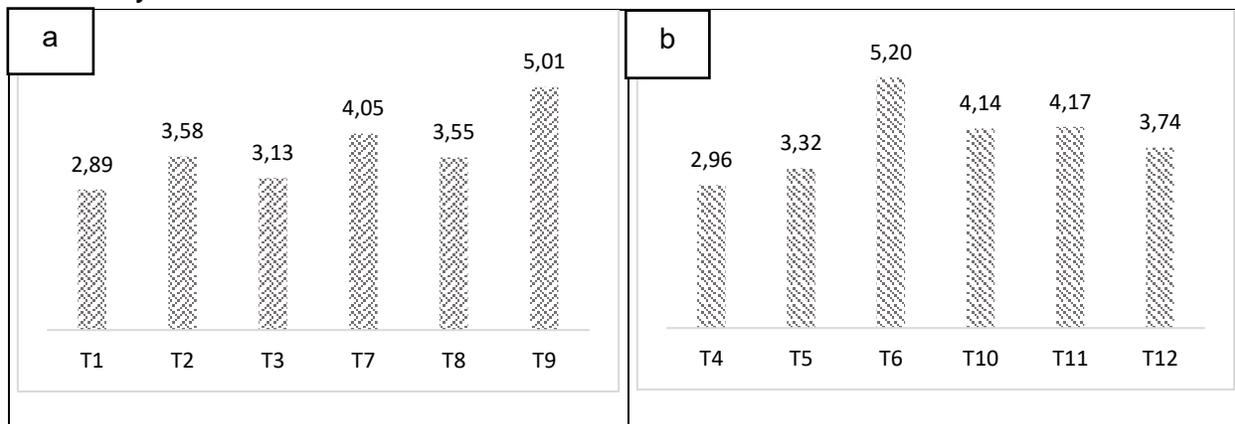
Concentración de hierro biodisponible (ppm) de las plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedades Imbabura y San Jacinto, fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y dosis de 0mg.L^{-1} - 10mg.L^{-1} - 40mg.L^{-1}

Tratamientos	Hierro biodisponible (ppm)
San Jacinto EDDHA 0	2,89
San Jacinto EDDHA 10	3,32
San Jacinto.EDDHA.40	5,20
San Jacinto. FeSO_4 .0	4,14
San Jacinto. FeSO_4 .10	4,07
San Jacinto. FeSO_4 .40	3,74
Imbabura.EDDHA.0	3,55
Imbabura.EDDHA.10	3,58
Imbabura.EDDHA.40	3,13
Imbabura. FeSO_4 .0	2,96
Imbabura. FeSO_4 .10	4,05
Imbabura. FeSO_4 .40	5,01
Agua Riego	2,33

Nota. La interacción de los tres factores en las plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedades Imbabura y San Jacinto, fuentes de E.D.D.H.A y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y dosis de 0mg.L^{-1} - 10mg.L^{-1} - 40mg.L^{-1} , tuvieron un efecto en la bioacumulación de Fe^{2+} , la variedad San Jacinto E.D.D.H.A 40mg.L^{-1} presentó mayor bioacumulación de Fe^{2+} que el resto de tratamientos. (Tabla 8)

Figura 13

Concentración de hierro biodisponible de las plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedad Imbabura y San Jacinto



Nota. a) Variedad Imbabura, T1: Testigo, T2: dosis de 10mg.L^{-1} E.D.D.H.A, T3: dosis de 40mg.L^{-1} E.D.D.H.A, T7: Testigo, T8: dosis de 10mg.L^{-1} FeSO_4 , T9: dosis de 40mg.L^{-1} FeSO_4 , b) Variedad San Jacinto, T4: Testigo, T5: dosis de 10mg.L^{-1} E.D.D.H.A, T6: dosis de 40mg.L^{-1} E.D.D.H.A, T10: Testigo, T11: dosis de 10mg.L^{-1} FeSO_4 , T12: dosis de 40mg.L^{-1} FeSO_4 .

En la figura 13 se observa la biodisponibilidad de hierro en las plantas de trigo, la variedad San Jacinto obtuvo la mayor biodisponibilidad de hierro con 5,20 ppm en dosis de 40mg. L⁻¹ FeSO₄, mientras que la variedad Imbabura obtuvo la mayor biodisponibilidad de hierro con 5,01 ppm en dosis de 40mg. L⁻¹ E.D.D.H.A a comparación que el resto de tratamientos.

DISCUSIÓN

El hierro es un elemento que desempeña un papel importante en los procesos de la respiración mitocondrial, fotosíntesis asimilación de nitrógeno entre otras, estas funciones están relacionadas con la dosis de aplicación de Fe. Esto se evidenció en este experimento en la altura se puede destacar en el tratamiento T9 (variedad Imbabura, FeSO_4 40mg. L^{-1}) en comparación al resto de los tratamientos. De acuerdo a los datos obtenidos en la investigación existen tratamientos los cuales arrojan resultados que están por debajo de media, como mencionan Falconí *et al.*, (2010) e INIAP, (2014) que registraron valores entre 88 cm en la variedad San Jacinto y 105 cm para la variedad Imbabura. (Tabla 4)

Mengel & Kirkby, (2000) mencionan que, la longitud de la raíz se ve influenciada por varios factores, uno de los principales es el contenido de nutrientes, al igual por la absorción de Fe mediante las células radiculares, su expresión está inducida en la epidermis radicular, esto se evidenció en el presente experimento el cual se obtuvo los mejores resultados en el tratamiento T9 (variedad Imbabura, FeSO_4 40 mg. L^{-1}), presentó mayor longitud de raíz que el resto de plantas de trigo, de acuerdo a los datos obtenidos en el experimento, como menciona Falconí *et al.*, (2010) e INIAP, (2014) en la cual se registran valores entre 1-1.5 m en la variedad San Jacinto y 1.2-1.5 m para la variedad Imbabura. (Tabla 5) debido a que el experimento se realizó a nivel de maceta la raíz al no tener el espacio como en campo, no se desarrolló lo suficiente para alcanzar su longitud determinada por los autores antes mencionados, afectando de igual manera la altura de la planta.

El porcentaje de peso seco se evaluó al término de la investigación a los 90 días después de la siembra, el cual se obtuvo los mejores resultados en los tratamientos: T12 (variedad San Jacinto FeSO_4 , 40 mg. L^{-1}), T6 (variedad San Jacinto E.D.D.H.A 40 mg. L^{-1}) presentaron mayor peso seco que el resto de plantas de trigo. La absorción de nutrientes acumulados en las plantas de trigo fueron los componentes que delimitaron el peso seco en los tratamientos Hewstone, (1999). (Tabla 6)

La presencia de hierro favorece a la síntesis de la clorofila y al correcto desarrollo de la planta, la concentración de Fe juega un papel importante en la formación de protoclorofila y en la síntesis de pigmentos fotosintéticos, los cuales son los encargados de dar la coloración verde a las plantas, y la disminución de Fe provoca la reducción de tetrapirroles dando la clorosis férrica según Hansen *et al.*, (1996). De acuerdo a los datos obtenidos en el experimento se obtuvo la mayor concentración de clorofila 3,4 ug/ml el T6 (E.D.D.H.A, 40 mg. L⁻¹ variedad San Jacinto), a comparación del resto de los tratamientos, lo mismo sucede al comparar resultados con el estudio de Rivera *et al.*, (2009) quienes reportaron que en la aplicación de quelato Fe-EDTA aumentó 0.25% de Fe en cítricos, dado cuando una planta le falta hierro en su alimentación, la producción de clorofila no es normal, siendo el primer trastorno que aparece, una pérdida de color verde de las hojas jóvenes con lo cual adquieren un color amarillo característicos (clorosis), lo que prueba la participación del hierro en la síntesis de la clorofila.

Las concentraciones de clorofila que presentaron las variedades de trigo en este experimento se deben a la adición de Fe vía foliar y se observaron los valores más altos en la concentración de clorofila A que clorofila B en la mayoría de los tratamientos, esto se evidencia en la mayoría de estudios enfocados en la determinación de clorofila, Casierra *et al.*, (2012) en un estudio revelaron que la concentración de clorofila B fue más elevado en plantas bajo sombra a comparación de plantas que crecieron a plena exposición.

La biodisponibilidad de hierro ferroso se realizó al término de la investigación, el cual se obtuvo la mayor concentración el T6 (E.D.D.H.A, 40 mg. L⁻¹ variedad San Jacinto) con 5,10 ppm, T9 (FeSO₄, 40 mg. L⁻¹ variedad Imbabura) con 5,01 ppm. De acuerdo a los datos obtenidos en la investigación existen tratamientos con resultados similares a los obtenidos por Díaz (2019), quien registró valores entre 5,33 ppm en pasto rye grass en hojas y raíz, al segundo corte con la aplicación de FeSO₄ en una dosis de 25 ppm de Fe (Tabla 9).

El trigo biofortificado representa una oportunidad para demostrar la importancia económica, agronómica de este cultivo en el país, y sobre todo como estrategia nutricional humana para disminuir los índices de desnutrición crónica del mismo, dado que aporta con un gran porcentaje de proteínas, carbohidratos y fibra, tanto como la biofortificación en el cual se obtienen alimentos ricos en elementos necesarios para la nutrición, este cultivo biofortificado mediante vía foliar con quelato y sulfato de Fe, el cual puede ser cosechado e ingerido.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La aplicación del T6 (E.D.D.H.A, 40mg. L⁻¹) sobre las plantas de trigo (*Triticum aestivium*) variedad San Jacinto se consideró como el mejor tratamiento por la mayor concentración de hierro con 5,10 ppm, absorción de clorofila 3,4 ug/ml⁻¹ y longitud de raíz 36,67cm y masa seca 3,45 g.
- Para la variedad San Jacinto la fuente de Hierro con mayor bioacumulación fue Fe-E.D.D.H.A, 40mg. L⁻¹ con 5,10 ppm, mientras que para la variedad Imbabura la mejor fuente de absorción de Fe fue el FeSO₄, 40mg.L⁻¹ con 5,01 ppm.
- La mayor altura se presentó en la variedad Imbabura bajo el efecto de FeSO₄, 40mg.L⁻¹, y para la variedad San Jacinto E.D.D.H.A, 40mg.L⁻¹ respectivamente.
- La mayor concentración de clorofila se obtuvo con la aplicación de Fe-E.D.D.H.A 40mg.L⁻¹ en las plantas de trigo variedad San Jacinto con 3,4 ug/ml, junto con la variedad Imbabura con la aplicación de FeSO₄, 40mg.L⁻¹ con 3,3 ug/ml⁻¹.

Recomendaciones

- Usar para las plantas de trigo variedad San Jacinto la fuente E.D.D.H.A y dosis de 40mg.L⁻¹ las cuales mostraron mejor absorción de hierro a diferencia de la variedad Imbabura tratadas bajo el efecto de la fuente E.D.D.H.A y dosis de 40mg.L⁻¹.
- Probar el trigo biofortificado en la alimentación de los niños con desnutrición crónica, para disminuir el índice de desnutrición del país.
- Para el uso de una biofortificación en hierro en trigo se recomienda la variedad San Jacinto
- Realizar más estudios de biofortificación con hierro con las mismas dosis y en diferentes gramíneas o cereales, y con ello obtener mayor diversidad de productos biofortificados.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A., & Abadía, J. (2006). Evaluación química y agronómica de quelatos de hierro sintéticos. *Revista Vida Rural*.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_Vrural%2FVrural_2006_27_20_45.pdf
- Basantes, E. (2015). *Manejo de cultivos andinos del Ecuador* (Vol. 1).
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo%20Cultivos%20Ecuador.pdf>
- Casierra, F., Ávila, O. F., & Riascos, D. H. (2012). *Cambios diarios del contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas de caléndula bajo sol y sombra diurna* 17(1).
<https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/697/813>
- Córdova, F. (2014). *Dinámica del hierro en el sistema suelo-planta* [Proyecto de Maestría, Universidad Central del Ecuador].
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/5123/1/T-UCE-0004-003.pdf>
- Cuenca, M., Quiñonez, A., Forner, M., Martínez, B., & Legaz, F. (2016). *Regulación de los mecanismos de absorción del Fe en cítricos en función de diferentes genotipos y su disponibilidad en el medio de cultivo*.
https://redivia.gva.es/bitstream/handle/20.500.11939/6827/2016_Mart%C3%ADnez-Cuenca_Regulaci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Davis, D. R. (2009). Declining Fruit and Vegetable Nutrient Composition: ¿What Is the Evidence? *American society for horticultural science*, 44(1).
<https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/44/1/article-p15.xml>

- Díaz, S. (2019). *“Evaluación de tres fuentes de hierro para la biofortificación foliar en rye grass perenne (Lolium perenne) variedad Amazon”* [Trabajo de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE].
<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/15927/T-IASA%20I-005487.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Falconí, E., Monar, C., Rivadeneira, M., Ponce, L., Garofalo, J., & Abad, S. (2010). *Iniap-San Jacinto 2010* [Archivo PDF].
<https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2637/1/iniapscpl332.pdf>
- Ferreira, R., Selles, G., Ruiz, R., Gil, P., & Barrera, C. (2008). *Manejo de la clorosis férrica en palto* [en línea]. Quillota, Chile: Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. no. 181. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7212>
- Ferrosalt. (14 de enero de 2022). *Sulfato ferroso heptahidratado*.
<https://ferrosalt.com.pe/productos/division-agro/sulfatos-solubles-abonamiento-de-fundo/sulfato-ferroso-heptahidratado/#:~:text=El%20Sulfato%20Ferroso%20Heptahidratado%20de,la%20forma%20de%20Fe%20%2B%202.>
- Fertilab. (2022). *Fuentes de Fertilizantes Foliare para Aplicaciones Foliare Parte I: Sales Minerales Inorgánicas* [Archivo PDF]. <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/Fuentes-de-Fertilizantes-Foliare-para-Aplicaciones-Foliare-Parte-I-Sales-Minerales-Inorganicas.pdf>
- Fórum Brasileiro de Soberanía y Seguridad Alimentaria y Nutricional. (2016). *Biofortificación ¿Amenaza a la soberanía alimentaria?* [Archivo PDF].
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi7zriN7Mz9AhV3VTABHSFNDAwQFnoECAgQAQ&url=https%3A%2F%2Ffbssan.org.br%2Fwp-content%2Fplugins%2Fdownload->

attachments%2Fincludes%2Fdownload.php%3Fid%3D1366&usg=AOvVaw2D8if1RKvVe1
2rMP8nNJJJ

Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (09 de enero de 2021). *Desnutrición Crónica Infantil Uno de los mayores problemas de salud pública en Ecuador*.
<https://www.unicef.org/ecuador/desnutrici%C3%B3n-cr%C3%B3nica-infantil>

Fuenmayor, G., Sáenz, K., Bacines, M., Estévez, E., Rentería, D., & Robayo, A. (1997).
Cuantificación y Biodisponibilidad In vitro de Hierro en harina de trigo y pan fortificado:
Experiencia Ecuatoriana. In *Quito* (Vol. 22, Issue 1).
https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/CIENCIAS_MEDICAS/article/view/839

Gavilánez, L. (2015). *“Efecto de la fertilización foliar y edáfica con hierro y zinc para la biofortificación agronómica del tubérculo de papa (Solanum tuberosum L.)”* [Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4265/1/13T0809%20.pdf>

Google Maps. (2022). *Instituto Agropecuario Superior Andino*.
https://www.google.com/maps/place/IASA/@-0.3856369,-78.4185909,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x91d5bbbd8644851b:0xc6c8b2bb6c026969!8m2!3d-0.3856423!4d-78.4164022!16s%2Fg%2F11xpb5x_8?hl=es

GRAIN. (4 de junio de 2019). *¿Cultivos biofortificados o biodiversidad? La lucha por verdaderas soluciones para la mal nutrición está en marcha*. GRAIN. <https://grain.org/es/article/6245-cultivos-biofortificados-o-biodiversidad-la-lucha-por-verdaderas-soluciones-para-la-mal-nutricion-esta-en-marcha#:~:text=La%20lucha%20por%20verdaderas%20soluciones%20para%20la%20mal%20nutrici%C3%B3n%20est%C3%A1%20en%20mar>

- Hansen, N. C., Jolley, V. D., Berg, W. A., Hodges, M. E., & Krenzer, E. G. (1996). Phytosiderophore Release Related to Susceptibility of Wheat to Iron Deficiency. *Crop Science*, 36(6), 1473–1476. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600060009x>
- Heeren, O. (2021). *Efecto directo e indirecto del exceso de hierro (fe) disponible en el suelo sobre el desempeño del cultivo de lepidium meyenii walp. (MACA)* [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/9988/Efecto_HeerenDiaz_Oscar.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hewstone, C. (1999). *Producción de materia seca*. Agricultura técnica, 59(4) <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/33373/NR24883.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (2014). *Nueva variedad de trigo de grano rojo para zonas trigueras del Ecuador* [Archivo PDF]. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/3293/1/iniapscpl412.pdf>
- Juárez, M., Cerdán, M., & Sánchez, A. (2022). *Hierro en el sistema suelo-planta* [Archivo PDF]. In 2022. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/HIERRO.pdf>
- Márquez, C., de la Cruz, L., Castañón, G., & Sánchez, E. (2015). *La biofortificación de cultivos: una alternativa que contribuye a la seguridad alimentaria y nutricional*. Vol 3. 16-18 <https://www.researchgate.net/publication/293651973>
- Martínez, H., Casanueva, E., Rivera, J., Viteri, F., & Bourges, H. (2008). La deficiencia de hierro y la anemia en niños mexicanos. Acciones para prevenirlas y corregirlas. *Medigraphic*, 89–99. <https://www.scielo.org.mx/pdf/bmim/v65n2/v65n2a3.pdf>

- Martínez, M. (2012). *Respuestas del sistema de absorción de hierro en las raíces de los cítricos ante diferentes condiciones clorosantes del medio* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17979/tesisUPV3985.pdf>
- Mengel, K., & Kirkby, E. (2000). Principios de nutrición vegetal. In *principios de nutrición vegetal* (4th ed.). Instituto Internacional del Potasio. https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/66737/mod_resource/content/2/PRINCIPIOS%20DE%20NUTRICI%C3%93N%20VEGETAL.pdf
- Murillo, R., Piedra, G., & León, R. (2013). Absorción de nutrientes a través de la hoja. *Uniciencia*, 27(1), 2013. www.revistas.una.ac.cr/uniciencia
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2022). *Los fertilizantes y su uso* [Archivo PDF]. <https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf>
- Paredes, M., Soriano, I., Galarza, C., & Yépez, R. (5 de marzo de 2009). *Memorias del Seminario de Actualización de Micronutrientes*. https://issuu.com/ecuador.nutrinet.org/docs/memorias_seminario_micronutrientes_ecuador_08
- QUIMASA. (2022). *Quelat-Premium-Hierro-Fe-11-DTPA* [Archivo PDF]. <https://agroquimasa.com/wp-content/uploads/2020/10/Ft-Flores-Quelat-Premium-Hierro-Fe-11-DTPA.pdf>
- Rellán, R. (2011). *Transporte de hierro a larga distancia y metabolómica de la deficiencia de hierro en plantas* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. <https://repositorio.uam.es/handle/10486/6343>

- Restrepo, L., Espinoza, M., & López, B. (2020). Biofortification of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) with cyanocobalamin and amino-chelated micronutrients (Zn, Fe). *Revista Española de Nutrición Humana y Dietética*, 24(3), 247–255. <https://doi.org/10.14306/renhyd.24.3.1011>
- Salomón, N., Landriscini, M., & Miranda, R. (2011). *Trigo Biofortificado*. <https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/16140/Trigo%20Biofortificado.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Sumanta, N., Suprakash, R., & Choudhury, I. (2014). Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents. *Synlett*, 25(1), 97–101. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1340072>
- Trujillo, J. A., Alvarado, J., Pacheco, A., Cristóbal, A., & Reyes, A. (2022). Perspectivas futuras de la biofortificación de alimentos: la asociación con microorganismos del suelo future perspectives of food biofortification: The association with soil microorganisms. *Publicado Como artículo científico En Ra Ximhai*, 18(4), 175–199. DOI: 10.35197/rx.18.04.2022.08.jg
- VALERO, J. (2015). “Respuesta de cultivares de arroz a la fertilización con hierro y zinc, sobre su concentración en el grano, en la amazonia ecuatoriana.” [Tesis pregrado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/640/T-UTB-FACIAG-AGR-000114.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Villarreal, V. (2018). “Evaluación de las condiciones climáticas y fuentes de boro, para la germinación in vitro de polen en frutilla (*Fragaria × ananassa*) variedad festival.” [Trabajo de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/14539/T-IASA%20I-005444.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

WALCO. (2022). *Todo sobre los Quelatos* [Archivo PDF].

[https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_4/mod_virtuales/modulo2/6.](https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_4/mod_virtuales/modulo2/6.pdf)

pdf