



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**ÁREA ACADÉMICA DE QUÍMICA
LICENCIATURA DE QUÍMICA EN ALIMENTOS**

**EFFECTO DEL ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CON ABONOS
VERDES SOBRE LA PRODUCCIÓN DE CEBADA MALTERA**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN QUÍMICA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

**RODRÍGUEZ SÁNCHEZ IRENE ALEJANDRA
JIMÉNEZ SÁNCHEZ EDUARDO**

DIRECTORES:

**ALMA DELIA ROMÁN GUTIÉRREZ
FABIOLA ARACELI GUZMÁN ORTIZ**

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, 2018.





Mineral de la Reforma, Hgo., a 18 de octubre de 2018

Número de control: ICBI-D/826/2018
Asunto: Autorización de impresión.

M. EN C. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este medio le comunico que el Jurado asignado a los Pasantes de Licenciatura en Química en Alimentos **Eduardo Jiménez Sánchez** e **Irene Alejandra Rodríguez Sánchez**, quienes presentan el trabajo de titulación **"Efecto del enriquecimiento de suelos con abonos verdes sobre la producción de cebada maltera"** después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación firman de conformidad los integrantes del Jurado:

- PRESIDENTE: M. en C. Juan Homero Roldán Rojas
- PRIMER VOCAL: Dra. Alma Delia Román Gutiérrez
- SEGUNDO VOCAL: Dr. Benito Flores Chávez
- TERCER VOCAL: Dra. Fabiola Araceli Guzmán Ortiz
- SECRETARIO: Dr. Enrique Cruz Chávez
- PRIMER SUPLENTE: Dra. Reyna Nallely Fallán Cortés
- SEGUNDO SUPLENTE: M. en Q. Emmanuel Pérez Escalante

Sin otro particular, reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

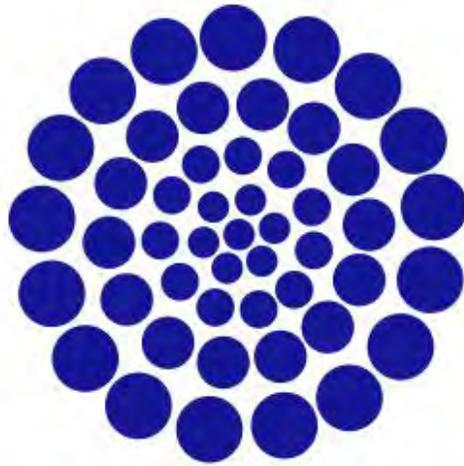
Dr. Oscar Roldán Suárez Castillo
Director del ICBI



ORSC/SEPC



www.uaeh.edu.mx



CONACYT

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Este trabajo de investigación se realizó con el apoyo del proyecto de cátedras CONACYT 1232 de **“Nuevos productos innovadores que impacten a la salud del consumidor y a la industria alimentaria”**

Parte de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación fueron presentados en XX Congreso Nacional De Ciencia y Tecnología de Alimentos y V Congreso Internacional Sobre Innovación y Tendencias en Procesamiento de Alimentos 2018 llevado a cabo en Monterrey, Nuevo León.



El cual se realizará los días miércoles 23, Jueves 24 y Viernes 25 de Mayo de 2018. En el auditorio Dr. Reyes Tamez Guerra de la Facultad de Ciencias Biológicas, Unidad B.

Rodríguez-Sánchez, I. A., Jiménez-Sánchez, E., Guzmán-Ortiz, F. A., & Román-Gutiérrez, A. D. (Mayo de 2018). Enriquecimiento de suelos a través del uso de abonos verdes y su efecto en cebada maltera (*Hordeum Vulgare L.*). XX CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS/ V CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE INNOVACIÓN Y TENDENCIAS EN PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS. Nuevo León, Monterrey, México.

Jiménez-Sánchez, E., Rodríguez-Sánchez, I. A., Guzmán-Ortiz, F. A., & Román-Gutiérrez, A. D. (Mayo de 2018). Mejoramiento en la producción de ceiba maltera (*Hordeum Vulgare L.*) mediante el uso de abonos verdes. XX CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS/ V CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE INNOVACIÓN Y TENDENCIAS EN PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS. Nuevo León, Monterrey, México.

DEDICATORIAS

Quiero dedicar esta tesis a mis padres quienes siempre me motivaron a seguir adelante y apoyaron incondicionalmente en todos los momentos durante mi carrera, porque sin ustedes nada de esto hubiera podido ser posible.

A mis hermanas (Berenice y Jacqueline) por ayudarme y acompañarme durante los procesos creativos en mi carrera. Y a mi hermano porque gracias a él tuve que hacer un esfuerzo doble para concentrarme en mis estudios.

A mi abuelita Lupita por todo el amor y apoyo que siempre recibí de ella. A mis abuelitos (Luz y Francisco) por su apoyo, amor y buenos deseos que recibí de ellos.

A mis tías de las cuales siempre recibí apoyo y comprensión, motivándome a nunca rendirme y superarme para ser alguien en la vida.

A la memoria de mi abuelo Santos Jiménez (†) por su ejemplo de cariño y respeto.

A mi madre Esther Sánchez Mejía por su amor, cariño y apoyo incondicional. Así como por sus regaños.

A mi padre Jesús Gerardo Jiménez Jiménez por su cariño y por los sacrificios que realiza diariamente.

A mi hermana Maleny Jiménez Sánchez por apoyarme y escuchar siempre lo que le tengo que decir.

A mi Abuela Marcelina Fructuosa Jiménez Tapia por su ejemplo de cariño y respeto

AGRADECIMIENTOS

A nuestras asesoras, la Dra. Alma Delia Román Gutiérrez y la Dra. Fabiola Araceli Guzmán Ortiz por sus enseñanzas, su ayuda, paciencia durante la duración de este proyecto, pero sobre todo su asesoramiento y sus consejos, para hacer de este un gran trabajo.

A los sinodales: M. en C. Juan Homero Roldán Rojas, Dra. Reyna Nallely Falfán Cortés, al M. en Q. Emmanuel Pérez Escalante por sus valiosas observaciones. En especial a los doctores Enrique Cruz Chávez y Benito Flores Chávez por sus consejos y su ayuda durante el desarrollo de este proyecto.

Me gustaría agradecer nuevamente a mis padres por darme la oportunidad de estudiar y por apoyarme en las decisiones que he tomado y por creer en mí. A mi mamá por desvelarse conmigo y ayudarme en momentos estresantes de la carrera. A mi papá por ir por mi cuando salía demasiado noche y apoyarme siempre.

A todos los profesores de la carrera por ayudarme y contribuir en mi formación personal y profesional. Especialmente a la Dra. Alma Delia, por creer en nosotros y permitirme ser parte de su equipo, por todo su apoyo y comprensión durante todo este tiempo.

A mis compañeros y amigos Alma, Oscar, Maribel, Julio y Eduardo, por ser parte de mi vida, por todos los momentos, trabajos, desvelos y prácticas de laboratorio que compartimos, porque siempre llevare un poco de ustedes conmigo. Y especialmente agradezco a Julio por ayudarnos en la realización de este proyecto. Y a Lalo por ser parte de este proyecto y apoyarme siempre.

A Jacqueline por ayudarme en la elaboración de varios de mis productos para la escuela, a Berenice por ayudarme a probar mis productos.

A Vianey por ayudarme por brindarme tu apoyo y motivarme a echarle ganas a la escuela.

A mi tía Lulú y Rocío por ser parte de mi vida porque ustedes siempre fueron como otra mamá para mí, y han estado en todos los momentos de mi vida acompañándome y apoyándome en todo.

A mis amigos y colegas: Oscar, Alma (Palma) y Maribel, por todos esos buenos momentos que hemos pasado juntos, y por todo el cariño y respeto demostrado durante estos años

A mi mejor amigo y compañero durante 8 años Julio Cesar de la Cruz Méndez por su apoyo, comprensión y amistad.

A ti Alejandra Rodríguez Sánchez por todos estos años.

A mis padres por su apoyo y sacrificio durante todos estos años y a mi hermana por ser parte importante de mi vida.

A los chicos de BAFF por su amistad durante todos estos años (Alfonso, Ana Lilia, Mayela, Vladimir, Rodrigo y Julio Cesar (otra vez))

Índice

ÍNDICE.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	VII
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- ANTECEDENTES	2
3.- MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 LOS CEREALES.....	4
3.1.1 <i>La cebada</i>	5
3.1.1.1 Clasificación de la cebada	6
3.1.1.2 Producción de cebada	8
3.1.1.3 Condiciones óptimas para la siembra de cebada.....	8
3.1.1.4 Variedades de cebada	10
3.1.1.5 Época de siembra	10
3.1.1.6 Requerimientos	11
3.1.1.7 Nutrimientos	12
3.1.1.8 Crecimiento y desarrollo del cultivo	13
3.2 SUELO.....	14
3.2.1 <i>Características físicas del suelo</i>	16
3.2.2 <i>Calidad del suelo</i>	19
3.2.2.1 BIOMASA MICROBIANA.....	21
3.3 ALTERNATIVAS SUSTENTABLES	22
3.4 AGRICULTURA SUSTENTABLE.....	23
3.5 ABONOS VERDES.....	24
3.5.1 <i>Ciclo del nitrógeno</i>	27
4.- OBJETIVOS	30
4.1 OBJETIVO GENERAL	30
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
5.- JUSTIFICACIÓN	31
6.- HIPÓTESIS	31
7.- METODOLOGÍA Y DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	32

7.1 LOCALIZACIÓN.....	33
7.1.1 <i>Clima</i>	34
7.1.2 <i>Geología del área de estudio</i>	34
7.2 RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA	35
7.2.1 <i>Preparación de las muestras de suelos</i>	35
7.2.2 <i>Caracterización del suelo</i>	36
7.2.2.1 Determinación de textura	36
7.2.2.2 Determinación de pH y conductividad eléctrica	38
7.2.2.3 Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico.....	40
7.2.2.4 Densidad aparente del suelo	41
7.2.2.5 Densidad real del suelo.....	42
7.2.2.6 Porcentaje de porosidad del suelo.....	43
7.2.2.7 Materia orgánica y porcentaje de carbono orgánico del suelo	43
7.2.2.8 Determinación de nitratos, Ca ²⁺ y K ⁺	45
7.3 DISEÑO DE TRATAMIENTOS Y SELECCIÓN DE ABONOS	46
7.3.1 <i>Siembra y elaboración de abono verde</i>	47
7.3.2 <i>Determinación del nitrógeno total</i>	48
7.3.3 <i>Siembra de cebada</i>	49
7.4 EVALUACIÓN DE INDICADORES AGRONÓMICOS Y DE RENDIMIENTO	49
7.4.1 <i>Germinación de la cebada</i>	50
7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	50
8.- RESULTADOS Y DISCUSIONES	51
8.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	51
8.1.1 <i>Textura</i>	51
8.1.2 <i>Capacidad de Intercambio Catiónico</i>	53
8.1.3 <i>pH</i>	54
8.1.4 <i>Iones intercambiables y conductividad eléctrica</i>	55
8.1.5 <i>Densidad, porosidad y materia orgánica</i>	56
8.2 SIEMBRA DE LEGUMINOSAS	58
8.3 NITRÓGENO TOTAL Y NO ₃ EN EL SUELO.....	61
8.4 INDICADORES AGRONÓMICOS DE LA CEBADA	63
9.- CONCLUSIONES	68
10.- PERSPECTIVAS	69
REFERENCIAS	70

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros y especificaciones para la cebada maltera	7
Tabla 2. Principales características agronómicas de las variedades de cebada.....	10
Tabla 3. Condiciones para la producción de cebada en el estado de Hidalgo	11
Tabla 4. Métodos para la determinación de biomasa microbiana.	22
Tabla 5. Alternativas sustentables para la producción de alimentos.	23
Tabla 6. Algunos abonos empleados para mejorar el cultivo.	25
Tabla 7. Clasificación del suelo según valor de pH.	39
Tabla 8. Clasificación de la fertilidad del suelo de acuerdo a la CIC	41
Tabla 9. Clasificación del suelo de acuerdo a la concentración de iones.....	45
Tabla 10. Nomenclatura de los diferentes tratamientos usados para cebada.....	46
Tabla 11. Resultados de la prueba de textura con el hidrómetro de Bouyoucos	51
Tabla 12. Componentes de la muestra de suelo de Almoloya, Hidalgo.	52
Tabla 13. Concentración de iones, pH y CE de los diferentes tratamientos.....	56
Tabla 14. Densidad aparente y real, porosidad, MO y CO de los tratamientos.....	58
Tabla 15. Evolución del crecimiento de los abonos verdes en el suelo de Almoloya.	59
Tabla 16. Cantidad de nitrógeno total y nitratos en las muestra de suelo.	62
Tabla 17. Indicadores agronómicos de la cebada en los diferentes tratamientos.	63
Tabla 18. Producción y germinación de la cebada en cada tratamiento.	66

Índice de figuras

Figura 1. Representación de las partes del grano de cebada.	4
Figura 2. Estructura de una espiga de cebada.....	7
Figura 3. Representación gráfica de las etapas de crecimiento de la cebada.	14
Figura 4. Porcentajes de constituyentes del suelo	15
Figura 5. Horizontes del suelo.....	16
Figura 6. Esquema del ciclo del nitrógeno	28
Figura 7. Localización geográfica del municipio de Almoloya, Hidalgo	33
Figura 8. Geología del municipio de Almoloya.	34
Figura 9. Suelo recolectado en Almoloya (a). Suelo Acondicionado (b).....	35
Figura 10. Triángulo de textura del suelo	38
Figura 11. Localización del tipo de suelo (porcentajes obtenidos en color verde)....	52
Figura 12. Evaluación del crecimiento de la cebada con respecto al tiempo	65

Resumen

En los últimos años, la sobreexplotación de los suelos agrícolas y el uso de fertilizantes químicos han causado que el rendimiento y la producción de cebada maltera disminuyan en cada temporada de siembra en el estado de Hidalgo. Por lo anterior los agricultores han buscado alternativas para mejorar los suelos y aumentar la producción del cultivo. Los abonos verdes han surgido como una alternativa amigable con el medio ambiente ayudando a incrementar los niveles de nitrógeno y materia orgánica en los suelos y promoviendo un incremento en el rendimiento del cultivo. En este trabajo se evaluó el efecto que tiene los abonos verdes sobre el suelo de cultivo y su influencia sobre la producción de cebada maltera, para ello se utilizaron 3 leguminosas frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), alfalfa (*Medicago sativa*) y soya (*Glycine max*) como abonos verdes. Cada una de ellas fue sembrada e incorporadas posteriormente al suelo, se realizaron análisis químicos y físicos del suelo antes y después de la incorporación de estos abonos verdes. Por último, se sembró cebada variedad Josefa midiendo periódicamente sus indicadores agronómicos. Se obtuvo que el tratamiento T06 compuesto por alfalfa (*Medicago sativa*) y soya (*Glycine max.*) produjo un aumento en algunas características del suelo como lo son la porosidad (52.26 ± 1.54 %), la materia orgánica (3.38 ± 0.06 %) y el nitrógeno total (0.089 ± 0.004 %) en comparación con el tratamiento control (TC) ($44.56 \pm 0.49\%$, $2.64 \pm 0.18\%$ y $0.073 \pm 0.004\%$ respectivamente). En cuanto a los indicadores agronómicos de la cebada, en el T06 se obtuvo el mayor crecimiento del tallo (40.2 ± 0.49 cm.), un mayor tamaño de espiga (18.42 ± 1.53 cm.), así como una mayor cantidad de granos (1095) al final del ciclo de crecimiento de la cebada. Estos resultados sugieren que el tratamiento compuesto por alfalfa (*Medicago sativa*) y soya (*Glycine max.*) se presenta como una alternativa para el mejoramiento de algunas características fundamentales del suelo lo que a su vez llega a influir a la producción de cebada maltera.

1.- Introducción

La cebada es uno de los cereales con mayor producción a nivel nacional después del maíz, trigo y arroz. La cual es usada para la elaboración de piensos para ganado y de alimentos para consumo humano como el pan y como ingrediente principal en la elaboración de cerveza. Este cereal representa una parte fundamental de la economía del estado de Hidalgo, el ocupando el segundo lugar de producción anual de cebada maltera a nivel nacional. Sin embargo, de acuerdo con datos de SAGARPA entre los años 2000 y 2016 se ha registrado una menor producción de cebada maltera, debido a la utilización y sobreexplotación de los suelos durante más de 40 años. Lo que ha originado un deterioro de la calidad del suelo y como consecuencia una afectación en su capacidad productiva.

Entre las alternativas viables para el mejoramiento de suelos se encuentran los abonos verdes. Estos son aquellas plantas, que se incorporan en el suelo con el propósito de mejorar la fertilidad, proporcionar carbono orgánico, materia orgánica y nitrógeno a los suelos, estos deben encontrarse preferentemente en estado de floración. Son usados para fertilizar correctamente a los cereales y alcanzar la producción del grano requerido, ya que la utilización constante de fertilizantes químicos ha ocasionado que la producción agrícola disminuya y el suelo bloquee la asimilación de los nutrientes

Por todo lo anterior este trabajo tuvo como objetivo la evaluación del efecto que presentó el uso de abonos verde sobre la producción de cebada maltera mediante indicadores de calidad del suelo e indicadores agronómicos en la cebada para mejorar su producción.

2.- Antecedentes

El uso de abonos verdes se ha presentado como una alternativa natural ante la disminución progresiva de nutrientes que presentan los suelos de cultivo debido al monocultivo y al uso de fertilizantes químicos en exceso.

Sin embargo, el estudio de su efecto sobre los suelos dedicados al cultivo empezó desde los años noventa. Rice, Olsen, Blederbeck y Slinkard (1993) evaluaron los efectos de la adición de abonos verdes (enredaderas, lentejas y alfalfa) en cultivos de cebada. Consistió en la siembra separada de leguminosas durante tres años y la siembra de cebada en años subsiguientes, con la incorporación de las leguminosas en diferentes meses del año, mostrando que la fijación de nitrógeno que presentan las plantas disminuye después de dos años y presentando un aumento de la materia seca y de nitrato en los suelos tratados con los abonos verdes.

De la misma forma Stopes, Millington y Woodward, (1996) compararon la cantidad de nitrógeno fijado y la cantidad de materia seca en el suelo a partir del uso de abonos verdes, los cuales fueron tres tipos diferentes de trébol (rojo, blanco y verde) en un periodo de crecimiento entre seis meses y dos años. Así como la producción que tiene el grano (en este caso el trigo) en verano y en invierno.

Encontrando que después de un año del tratamiento con abonos verdes el trébol rojo fue el que tuvo una mayor fijación de nitrógeno en comparación con los demás tratamientos y que la producción en invierno del trigo fue mayor en los tratamientos con el trébol rojo y blanco que con el trébol verde.

Arshad y Gill (1997) también reportaron un mayor contenido de nitrógeno en el suelo y en granos después de usar abonos verdes. Los tratamientos se realizaron durante tres años usando un sistema de rotación de cultivos entre cebada, canola y trigo.

Entre otros de los usos que se ha buscado para los abonos verdes además de la integración de nitrógeno y de materia orgánica. Destaca el uso que se le ha dado para combatir algunas enfermedades en la papa (Larkin & Griffin, 2007) en donde se

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

encontró que los abonos verdes a partir mostaza pueden llegar a inhibir entre el 80 y el 100% algunos patógenos de la papa como: *Rhizoctonia solani*, *Phytophthora erythroseptica*, *Phythium ultimatium*, *Sclerotinia sclerotirium* y *Fusarium sambucinum*. Mientras que otros cultivos como la canola, rábano, nabo y mostaza pueden tener un efecto de inhibición ante *Rizoctonia solani* entre el 40 y el 83%.

Por otra parte, Zhang y Fang (2007) mostraron que mediante el uso de abonos verdes, fertilizantes químicos y métodos de labranza se pudo recuperar una zona de producción de ladrillos en donde el suelo tenía poca fertilidad y pobres condiciones en la provincia de Zhejiang en el sureste de China. La aplicación de abonos verdes incrementó la cantidad de carbono, nitrógeno y de biomasa microbiana.

Lee *et al.* (2010) utilizaron los abonos verdes (arveja) para disminuir el flujo de metano producido por la siembra intensiva de arroz en Corea, así como para aumentar la producción de arroz. Encontrando que, si bien no disminuyó la producción de metano, esta se mantuvo aumentando la producción de arroz comparando con un fertilizante químico utilizado en ese sistema de cultivo.

De la misma forma Zhijian *et al.* (2016) realizó un estudio similar en cultivos de arroz intensivo, sustituyendo parcialmente un fertilizante comercial con abonos verdes, llegando a la conclusión si el fertilizante es sustituido por abonos verdes entre un 20 y un 40% el cultivo incrementó su productividad.

Actualmente se busca aumentar las opciones que tienen los agricultores, además de utilizar leguminosas que tradicionalmente han sido utilizados como abonos verdes, como son soya, frijol, trébol y alfalfa. Se han buscado alternativas como el lupino (*Lupinus luteus L.*) (Pietrzykowski, Gruba, & Gregory , 2017) o las lentejas de agua (Yao *et al.*, 2017) cuya presencia en aguas eutrofizadas afecta la vida marina.

También se han buscado combinaciones entre leguminosas (fijadoras de nitrógeno) y crucíferas (disminuyen la lixiviación de nitratos) (Couëdel, Alleto, Tribouillois, & Justes, 2018) obteniendo una buena relación entre estos dos cultivos.

3.- Marco Teórico

En este apartado se realizó una revisión de las características y propiedades del suelo. Así como los principales aspectos de la cebada, sus sistemas de cultivo y su impacto en la alimentación humana.

3.1 Los cereales

Los cereales son organismos vivos capaces de germinar y dar origen a una nueva planta que podrá completar su ciclo de vida dando lugar a nuevos frutos, pertenecen a la familia de las herbáceas angiospermas monocotiledóneas de la familia de las gramíneas, estos se pueden definir como frutos farináceos o bien frutos secos y enteros, su inflorescencia es una pequeña espiga llamada también espiguilla, formada por una o más flores protegidas por unas brácteas denominadas como glumas. Los cereales suelen ser considerados como ubicuos ya que son capaces de crecer en climas diversos que van desde los semiáridos hasta los fríos (López del Val & Martínez de Icaya, 2005; Etaio Alonso, 2008).

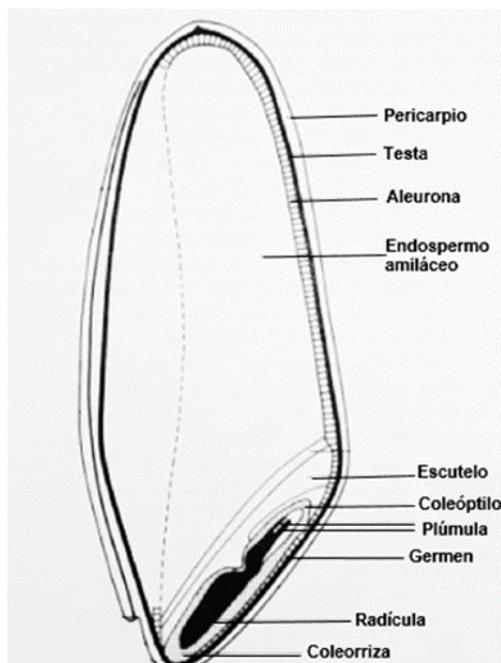


Figura 1. Representación de las partes del grano de cebada.

Fuente: Modificado a partir de (MacGRegor, 1993).

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Los cereales constituyen uno de los principales alimentos que forman parte de la dieta humana cuyo consumo se considera como básico, llegan a contener entre 70-76% de glúcidos principalmente en forma de almidón, de 8-12% de proteínas, 2-4% lípidos y 10-15% de agua. Los principales cereales consumidos y producidos son: arroz, avena, cebada, centeno, maíz, mijo, trigo, triticale y sorgo. El grano del cereal está conformado por las siguientes partes (esquematisado en la Figura 1):

- Glumillas (cascarilla)
 - Lemma
 - Palea
 - Cariópside
 - Pericarpio
 - Epicarpio
 - Mesocarpio
 - Endocarpio
 - Testa*
 - Endospermo
 - Capa de aleurona
 - Gránulos de almidón
 - Germen
 - Escutelo
 - Coleóptilo
 - Plúmula
 - Coleorriza
 - Radícula
- } Salvado

(Barroeta, 2003; López del Val & Martínez de Icaya, 2005; Etaio Alonso, 2008)

3.1.1 La cebada

La cebada junto con el trigo pertenece a la familia de las Gramíneas (*Gramineae*), perteneciente al género *Hordeum*. Es una planta de hojas estrechas y color verde claro

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

cuya espiga está localizada en cada uno de los tallos fértiles de la planta, está compuesto por dos hileras de raquis o raquillas, en una especie de cáliz en donde se sujetan a través de la triada de espiguillas (dos laterales y una central) y la raquilla se sujeta de la espiga mediante nudos (Alcasena Gurupegui, 2012; Guerrero García, 1999).

El grano de cebada es de un color amarillo pálido con una estructura fibrilar similar a la del trigo, se considera un grano cubierto debido a la presencia de una glumilla adherida cubriendo el grano, esta cáscara constituye del 10-14% del peso, protege al pericarpio (18%), al endospermo (78.5%) y al germen (3.5%),

Es un alimento rico en carbohidratos (almidón y fibra), destaca la presencia de algunos aminoácidos tales como; ácido glutámico, prolina y leucina. En cuanto al contenido de minerales se encuentran presentes el hierro, fósforo, zinc y potasio, y entre las vitaminas destacan todas las del grupo B. (Ospina Machado, 2001; Sala & Barroeta, 2003; Villacrés, 2008).

3.1.1.1 Clasificación de la cebada

La cebada puede clasificarse dependiendo de la cantidad de espiguillas que quedan fecundadas en los raquis de la cebada (Figura 2): si se desarrollan las espiguillas centrales se considera de dos carreras o dísticas, si se desarrollan las tres espiguillas se refiere a una de seis carreras o hexásticas y por último se encuentran las irregulares las cuales pueden ser de cuatro carreras.

Para la producción de cerveza son empleadas la cebada de dos y seis carreras. La cebada de dos carreras pertenece a la especie *Hordeum distichon*, la de seis a la *Hordeum vulgare* y la irregular a la *Hordeum irregulare*.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

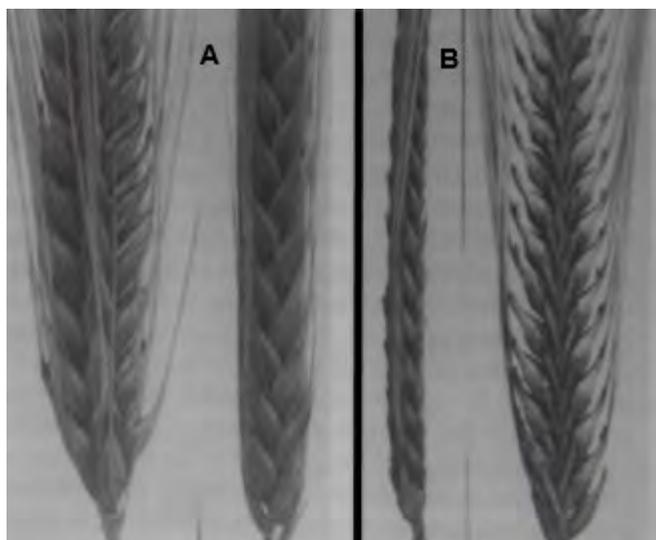


Figura 2. Estructura de una espiga de cebada.

A: Vista de frontal y lateral espiga hexástica. B: vista frontal y lateral de una espiga díastica. (Cortesía de la Asociación Americana de Cebada Maltera) Fuente: (Newman & Newman, 2008)

Así mismo, de acuerdo con la NMX-FF-043-SCFI-2003 la cebada maltera se puede clasificar en:

- **Grado México**
- **Grado México no clasificado**

La primera debe de cumplir con los parámetros y especificaciones mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros y especificaciones para la cebada maltera

Parámetros	Especificaciones
Humedad entre 11.5 y 13.5%.	Germinación mínima de 85%.
Grano de tamaño para uso maltero 85%.	Grano dañado, máximo 10%.
Granos desnudos y/o quebrados 5%.	Mezcla de otras variedades, máximo 10%.
Impurezas 2%.	Peso hectolítrico 56 kg/hL.

Fuente: NMX-043-SCFI-2003

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Mientras que el denominado grado México no clasificado, es constituido por la cebada que no cumple con las especificaciones señaladas. Sin embargo, puede ser comercializada mediante un acuerdo entre las partes teniendo en cuenta la calidad del producto.

3.1.1.2 Producción de cebada

Actualmente la cebada es el cuarto cereal más cultivado en el mundo después del trigo, arroz y maíz. Es utilizado como materia prima para la producción de cerveza, productos de panadería y alimento para animales.

Entre el 2016 y 2017 Rusia fue el primer país productor de este cereal con 17.55 millones de toneladas, seguido por Australia, Ucrania y Canadá con 13.00, 9.87 y 8.84 millones respectivamente. Por otra parte, México tiene una producción de 980 mil toneladas (USDA, 2018).

En México la cebada es un cultivo de gran importancia económica y social, en especial para las zonas de los valles altos del país, debido a que los agricultores prefieren la cebada sobre otros cereales debido a que su ciclo vegetativo es corto y que presenta resistencia a la sequía, bajas temperaturas y a la salinidad (Roldán-Rojas, Guzmán-Ortiz, & Román-Gutiérrez, 2016)

Guanajuato es el principal productor nacional de cebada, seguido por Hidalgo, Tlaxcala y Estado de México. Hidalgo representa el 45% de la producción nacional anual de cebada de temporal, concentrándose principalmente en los municipios de Almoloya, Apan y Emiliano Zapata (SIAP, 2015).

De esta producción el 30% se emplea para el forraje y la producción de alimentos para animales, el 1% se utiliza para alimentación humana y el restante (69%) se utiliza para la elaboración de cerveza (SIAP, 2015)

3.1.1.3 Condiciones óptimas para la siembra de cebada

Antes de realizar la siembra se requiere cumplir ciertos aspectos relacionados con el suelo para así favorecer el crecimiento y buen desarrollo del grano, como son: la

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

elección del suelo y el desmezcle¹. Una vez definido el suelo en el que se sembrará el grano se procede a la preparación del terreno, la cual consiste en varias etapas:

- Subsuelo: esta etapa solo se recomienda si el terreno elegido presenta una capa dura que impida realizar la siembra correctamente, el desarrollo de raíces impide el almacenamiento de agua. Para ello es necesario romper dichas capas e incorporar materia orgánica (estiércol y/o abonos verdes).
- Barbecho: en esta etapa se exponen plagas que se puedan encontrar en el suelo a condiciones adversas del medio ambiente, esto nos permite tener una mayor captación de agua, conservar mejor la humedad de las lluvias y una fijación adecuada de la raíz al suelo. Esta labor debe de realizarse inmediatamente después de haber recogido la cosecha anterior.
- Rastreo: en este se dan uno o dos pasos de rastra para lograr que el suelo quede blando eliminando los terrones que se hayan quedado o formado durante el barbecho.
- Nivelación: se realiza con el fin de evitar encharcamientos durante el desarrollo del cultivo, sellar el suelo, conservar humedad captada, favorecer la distribución de la semilla y mejorar conducción del agua de riego (García-Rodríguez *et al.*, 2008).

Cuando se han cumplido los requisitos de preparación del suelo se procede a la siembra, para ello existen dos tipos de técnicas:

- Al voleo: consiste en esparcir manualmente de manera uniforme la semilla en el terreno, para después tajarla con un paso ligero de rastra.
- Con máquina sembradora: consiste en sembrar a doble hilera o doble surco, para distribuir de manera uniforme la semilla, asegurando una buena cantidad de plantas en el terreno (INIFAP, 1997, 2008)

¹ Práctica que consiste en eliminar plantas enfermas, de otra variedad o cultivo y malezas.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

El método más recomendado (así como el más usado) es el sembrado con maquina sembradora de precisión, ya que permite el ahorro de semillas, así como un control de la cantidad y la posición de estas en el suelo.

3.1.1.4 Variedades de cebada

Entre los diferentes tipos de cebada cultivada en el Estado de Hidalgo sobresalen las variedades: Esmeralda, Esperanza y Puebla. La diferencia entre ellas se debe principalmente a los tiempos en donde la floración da comienzo y la madurez de la planta se presenta, tal y como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Principales características agronómicas de las variedades de cebada

Variedad	Días a floración	Días a Madurez	Altura de la planta (cm)
Esmeralda	50-60	92-115	90
Esperanza	50-70	100-115	75
Puebla	50-70	96-112	80

Fuente: (INIFAP, 1997; Peña-Herrera, 2011)

3.1.1.5 Época de siembra

Para poder obtener una buena producción y una buena calidad en la cebada bajo condiciones de temporal, se debe tomar en cuenta las propiedades del suelo, la época de siembra y el ciclo de cultivo de las variedades a sembrar.

Estas épocas dependen de la presencia de lluvias para apoyar al crecimiento de la cebada y de heladas al final del ciclo de cultivo. Se deben tomar en cuenta algunas recomendaciones sobre las fechas de siembra (Tabla 3) debido a que si la siembra se realiza demasiado pronto existe el riesgo de que haya un bajo rendimiento, así como una baja calidad producida por coincidir con la época seca en el verano. Sin embargo, si se siembra demasiado tarde se tiene el riesgo de perder la cosecha por la presencia de heladas.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Tabla 3. Condiciones para la producción de cebada en el estado de Hidalgo

Ambiente de producción	de Lluvia (mm)	Distribución de la lluvia	Textura del suelo	Fecha de siembra
Muy buena producción	< 600	Buena	Arcilloso/arenoso	20 mayo - 27 junio
Buena producción	500-600	Buena	Arcilloso/arenoso	15 junio - 17 julio
Media productividad	450-500	Regular	Todo tipo de suelo	1 julio - 5 agosto
Baja productividad	< 450	Mala	Todo tipo de suelo	17 julio - 20 agosto

Fuente: Modificado de (INIFAP, 1997; Gil *et al.*, 2016)

3.1.1.6 Requerimientos

La cebada requiere de ciertas condiciones para un buen desarrollo en todas sus etapas. El cultivo no presenta grandes exigencias climáticas, aunque crece mejor en climas frescos y moderadamente secos, con precipitaciones entre 400 y 600 milímetros (mm) anuales y pueden desarrollarse en altitudes entre los 1800 a los 3000 metros sobre el nivel del mar.

Para la germinación del grano es necesario una temperatura mínima de 6 °C, florece a los 16 °C y madura a los 20 °C además puede tolerar bajas temperaturas pudiendo soportar hasta -10 °C (INIFAP, 2008).

La cebada puede tener buenas producciones en suelos poco profundos y pedregosos siempre y cuando tenga un buen suministro de agua durante su desarrollo. Su crecimiento no es viable en suelos demasiado arcillosos ni demasiado compactos debido a que dificultan la germinación y el crecimiento de la planta, además puede tolerar la salinidad en el suelo y un pH de 6 a 8.5.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Los suelos arcillosos, húmedos y con tendencia a encharcarse son desfavorables para la cebada, sin embargo, pueden obtenerse buenas producciones si se trabaja el suelo adecuadamente (SAGARPA, Planeación agrícola nacional 2017-2030, 2017).

3.1.1.7 Nutrimientos

La calidad de cebada puede verse afectada por la presencia o ausencia de nutrientes que le resultan necesarios para tener un crecimiento deseado. Las variedades que se siembran en el estado de Hidalgo son utilizadas principalmente para la elaboración de malta, sin embargo, independientemente del producto que se busque obtener, las cantidades de nitrógeno, fósforo y potasio serán clave para no afectar el rendimiento potencial o la calidad del grano (Gómez, Zamora, & Arreola, 2006).

- **Nitrógeno:**

El nitrógeno ayuda al crecimiento de la cebada y puede variar con el período de crecimiento del cultivo, la variedad el nitrógeno disponible en el suelo, que está relacionado con el nitrógeno residual del cultivo anterior y con las condiciones climáticas.

Sin embargo, el exceso de este nutriente produce un encamado (es decir el tallo no tiene la fuerza para mantenerse en pie) en la planta, es decir una condición en la que una planta no puede mantenerse erguida debido a que el tallo no es lo suficientemente fuerte (FAO, 2001).

Así mismo, el exceso de nitrógeno disminuye la calidad en cebada destinada a la producción de cerveza. Ocurre al contrario en la cebada destinada a la alimentación de ganado, cuya riqueza en proteínas es mayor cuando las proporciones de nitrógeno han sido mayores en el abonado (Prieto-Mendez, 2011).

- **Fósforo:**

El fósforo es absorbido sobre todo al comienzo de la vegetación, estando su absorción ligada también a la del nitrógeno. Incrementa el rendimiento en grano de la cebada, así como su resistencia al frío (Kumar Sharma, 2017)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- **Potasio:**

El potasio por su parte aumenta la calidad cervecera y la resistencia al encamado. También ayuda en la síntesis de almidones, la activación de enzimas y en la síntesis de proteínas (Maathuis & Sanders, 1994; Marshnet, 1995; Kumar Sharma, 2017).

3.1.1.8 Crecimiento y desarrollo del cultivo

La planta de cebada tiene diversas etapas de desarrollo:

- Desarrollo y germinación de la semilla
- Etapa de macollaje
- Etapa de encañado
- Etapa de espigadura
- Etapa de llenado de granos

La etapa de desarrollo y germinación está determinada por el clima, la disponibilidad de agua, los nutrientes presentes y el tipo de suelo en el que se haya sembrado. En la etapa de macollaje se presenta un desarrollo de hojas secundarias a partir de nudos en el tallo. Por su parte en la etapa de encañado se produce un rápido crecimiento de los tallos, pudiendo alcanzar una altura entre los 0.6 y los 1.5 metros (Aguilar & Schwentesius, 2004).

La etapa de espigadura comienza con la salida de la espiga a través de la vaina. Primero emerge la punta de la espiga y posteriormente se da un alargamiento gradual de ésta, hasta que alcanza la posición más alta de la planta. La espiga presenta un raquis que tiene de 10 a 30 nudos; su color puede variar desde verde rojizo a negruzco (Dendy & Dobraszczyk, 2004).

Al comienzo de la etapa de llenado los granos presentan un contenido mayormente acuoso; luego de alcanzar su máxima longitud van aumentando gradualmente la densidad de su contenido, el cual, primeramente, se torna lechoso y posteriormente pastoso.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

El grano sigue creciendo hasta alcanzar la madurez fisiológica; que se produce cuando los granos alcanzan un 40% de humedad; en ese momento el último nudo interno se presenta seco y las plumas han ido perdiendo su color verde.

Una vez lograda la madurez fisiológica, solo resta que las semillas pierdan humedad hasta llegar a un 14% (grano duro), para que así puedan ser trilladas en óptimas condiciones; la humedad dependerá de la variedad y fecha de siembra. En la Figura 3 se encuentran las etapas de crecimiento en la planta de cebada (Agriculture and Horticulture Development Board, 2016).



Figura 3. Representación gráfica de las etapas de crecimiento de la cebada.

Fuente: Agriculture and Horticulture Development Board, 2016

3.2 Suelo

El suelo es considerado como la capa superficial de la corteza terrestre, el cual ha sufrido cambios y transformaciones debido a factores biológicos, físicos y químicos (Casas-Flores, 2011). El suelo está dividido en tres principales fases, fase sólida, líquida y gaseosa. En la Figura 4 se muestran los componentes principales del suelo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

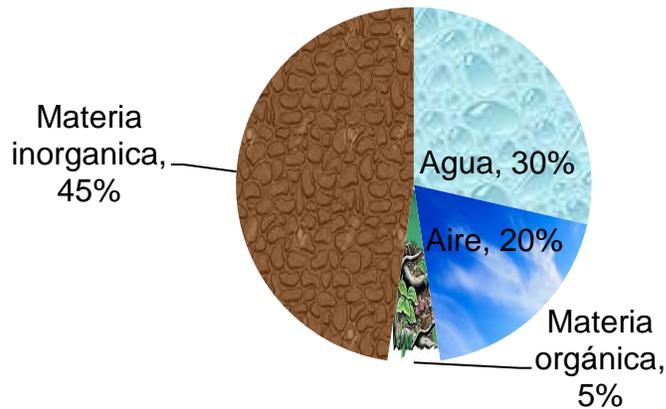


Figura 4. Porcentajes de constituyentes del suelo

Fuente: esquematizado a partir de (Adams, 1995; Núñez Solís, 2000)

- Fase sólida, esta se divide a su vez en dos partes:
 - La parte inorgánica está compuesta de los fragmentos de rocas y minerales productos de la meteorización. El suelo a su vez se puede clasificar de acuerdo al tamaño de partícula en grava (mayor a 2 mm), arena (entre 2 mm y 0.02 mm), limo (entre 0.02 mm y 0.002 mm) y arcillas (menor a 0.002 mm) (Jordán-López, 2005).
 - La parte orgánica está compuesta principalmente por materia orgánica procedente de restos de seres vivos en mayor o menor grado de descomposición.
Esta materia orgánica le permite al suelo retener más agua, además de favorecer su aireación. De esta parte del suelo las plantas pueden extraer su alimento para nutrirse y alcanzar su máximo desarrollo (Casas-Flores, 2011).
- Fase líquida: hace referencia al agua que se encuentra en los poros del suelo, si los poros son demasiado pequeños no puede ser absorbida por las raíces, sin embargo, si los poros son demasiado grandes tampoco puede ser absorbida porque se escurre debido a la gravedad.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Fase gaseosa: esta hace referencia al aire que ocupa los poros grandes y aquellos poros en las que el agua se ha consumido, su composición es similar a la del aire atmosférico, pero con una mayor proporción de CO₂ debido a la actividad biológica que se produce en el suelo. En la Figura 4 se muestran los componentes principales del suelo.

3.2.1 Características físicas del suelo

Estas características son permanentes por lo que no pueden ser modificadas por acción humana. Algunas de estas características son:

- Profundidad: Se entiende por profundidad del suelo a las diferentes capas u horizontes (Figura 5) que presenta a diferentes niveles. Estos niveles se dividen del horizonte A al D (FAO, 2016).

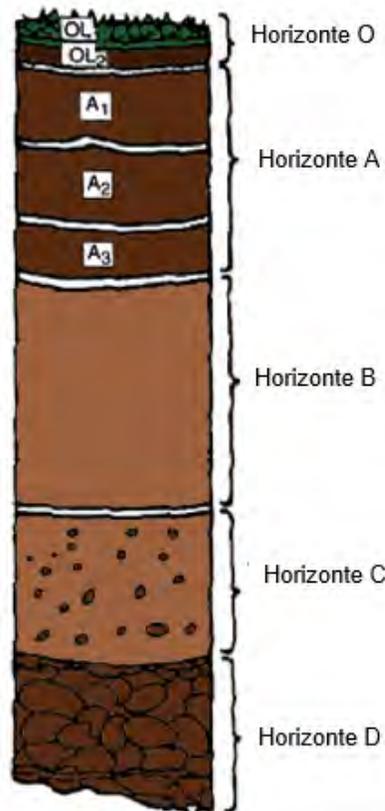


Figura 5. Horizontes del suelo.

Fuente: Modificado a partir de (FAO, 1992)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Horizonte O: compuesto de materia orgánica sin descomponer como hojarasca y otros residuos orgánicos. Se divide en 2 subniveles OL₁ y OL₂ cuya diferencia radica en que en la segunda la materia orgánica está parcialmente descompuesta.
- Horizonte A: presenta un color oscuro en comparación con los demás horizontes debido al alto contenido de materia orgánica, sin embargo, es pobre en minerales.

Es una capa muy importante debido a que proporciona los elementos nutritivos a la planta; si este horizonte se encuentra muy desarrollado (tiene una gran extensión) presenta subdivisiones:

- Horizonte A₁: se encuentra en la superficie del horizonte y presenta materia orgánica en descomposición.
- Horizonte A₂: es una zona rica en humus
- Horizonte A₃: predominan los minerales en lugar del humus.
- Horizonte B: Se acumulan las sales minerales provenientes del horizonte A y se caracteriza por una mayor cantidad de arcilla y un color más claro.
- Horizonte C: Constituido por roca madre en proceso de meteorización, es decir lo conforman fragmentos de roca madre rodeado de suelo de tipo arenoso.
- Horizonte D: Presenta la roca madre si alterar.

(Jordán López, 2005; FAO, 1992)

- Color: esta propiedad física depende de los componentes del suelo y varía con el contenido de humedad, materia orgánica y el grado de oxidación de los minerales presentes. Se utiliza para evaluar indirectamente algunas propiedades del suelo tales como la concentración de minerales o determinar el tamaño de los diversos horizontes (FAO, 2016).
- Textura: se refiere a la composición inorgánica del suelo por tamaño de partícula; existen diversos tipos de clasificaciones, sin embargo, la más aceptada establece la textura en términos de arena, limo y arcilla.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

El porcentaje de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como textura del suelo. Los suelos están conformados por más de un tipo de fracción las cuales se encuentran distribuidos en mayor o menor proporción (Paz-Ferreiro, 2006).

- Gravas y piedras: son partículas sólidas de un tamaño entre los 2 mm y los 7 cm (gravas) o de mayor tamaño como en el caso de las piedras. Cuando la cantidad de piedras y/o grava es muy abundantes puede afectar las propiedades del suelo, así como dificultar su manejo.
- Arena: son partículas sólidas que tienen un tamaño entre 2 y 0.2 mm. Es la fracción más grande en el suelo, y está compuesto principalmente por granos de cuarzo, las partículas se mantienen separadas entre sí, su capacidad de intercambio catiónico es baja y su principal función es la composición de la matriz del suelo.
- Limo: partículas minerales entre los 0.2 y 0.002 mm. Está constituido por partículas finas, similares al talco, y al igual que la arena las partículas se mantienen separadas entre sí y su capacidad de intercambio catiónico es baja.
- Arcilla: es la fracción más pequeña del suelo, tiene un tamaño inferior a 2 μm . Se diferencia de las fracciones anteriores por estar compuesta por minerales originados por meteorización. Poseen una alta capacidad de intercambio catiónico y no se comportan como granos individuales en el suelo (Jordán-López, 2005; Paz-Ferreiro, 2006).

Los suelos pueden agruparse en tres tipos distintos dependiendo de la textura predominante, suelos pesados (arcillosos), medios (limosos) y ligeros (arenosos). Así mismo los suelos que poseen una composición equilibrada entre arena, limo y arcilla se les conoce como suelos francos.

- Estructura: se define como el arreglo de las partículas del suelo, no solo las fracciones granulométricas como la arena, arcilla y limo, sino también toma en cuenta los agregados o elementos estructurales formados por estas fracciones (García, Hill, Kaplán, Ponce de León, & Rucks, 2004).

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Porosidad: Hace referencia a los huecos que dejan entre sí las partículas sólidas de suelo, estos huecos pueden ser:
 - Poros: huecos irregulares que favorecen la circulación de agua y aire.
 - Canales: huecos que son formados por la actividad de la fauna en el suelo.
 - Fisuras o grietas: huecos que se forman en consecuencia de los movimientos del suelo.

En este espacio poroso se pueden observar macroporos, mesoporos y microporos. En los primeros el agua circula libremente y no es retenida; por lo tanto, los macroporos son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, además de ser el principal espacio donde se desarrollan las raíces.

Los segundos y los terceros se encargan de la retención de agua, misma que es aprovechable por las plantas. Las características porosas del suelo dependen tanto de su estructura como de su textura. Por ejemplo los suelos arcillosos tienen un gran número de poros (mesoporos y microporos), mientras que los suelos arenosos, tienen pocos poros, pero de un mayor tamaño (macroporos). (García, Hill, Kaplán, Ponce de León, & Rucks, 2004; Jordán-López, 2005).

3.2.2 Calidad del suelo

La calidad del suelo se puede interpretar como la utilidad del suelo para un propósito específico en una escala amplia de tiempo (Carter *et al.*, 1997). Sin embargo también reconoce algunas de las funciones del suelo como: promover la productividad del sistema sin perder propiedades físicas, químicas y biológicas; atenuar contaminantes ambientales y patógenos; y favorecer la salud de plantas animales y humanos (Doran & Parkin, 1994; Karlen *et al.*, 1997).

La calidad del suelo se puede evaluar mediante indicadores que reflejen las condiciones que conllevan información acerca de los cambios en el suelo (Dumanski, Gameda, & Pieri, 1998), los indicadores que son usados con mayor frecuencia son los

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

indicadores físicos, químicos y biológicos, los cuales deben de cumplir ciertas condiciones tales como:

- Integrar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.
- Reflejar los atributos de sostenibilidad que se desean medir.
- Ser accesible y aplicables a condiciones de campo.
- Ser reproducibles.
- Ser fáciles de entender.
- Ser sensitivas a condiciones de clima y manejo.
- Ser sensitivas a cambios del suelo.
- Describir procesos del ecosistema.

Los indicadores disponibles para evaluar la calidad del suelo varían dependiendo del tipo, uso, función y factores de formación del suelo, algunos indicadores usados para evaluar los cambios que ocurren en el suelo respecto al tiempo son:

- **Indicadores físicos**
 - **Textura:** retención y transporte de agua y nutrientes. Erosión del suelo.
 - **Profundidad del suelo superficial:** estimación del potencial productivo y de la erosión.
 - **Infiltración y densidad aparente:** potencial de lixiviación, productividad y erosión.
 - **Capacidad de retención de agua:** relacionado con el contenido de humedad, transporte y erosión; humedad aprovechable, textura y materia orgánica.
- **Indicadores químicos**
 - **Materia orgánica (carbono y nitrógeno total):** fertilidad del suelo, estabilidad y erosión. Potencial productividad.
 - **pH:** límites para la actividad química y biológica, para el crecimiento de las plantas y actividad microbiana.
 - **Conductividad eléctrica:** define la actividad vegetal y microbiana.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- **Fósforo, nitrógeno y potasio extraíbles:** disponibilidad de nutrientes para la planta. Indicadores de la calidad ambiental.
- **Capacidad de intercambio catiónico:** se refiere a un proceso en el que partículas sólidas del suelo adsorben iones de una fase acuosa, desorbiendo al mismo tiempo cantidades equivalentes de otros iones. Este fenómeno se debe a diversas propiedades coloidales, como la presencia de carga eléctrica y una gran área superficial, presentes en fracciones del suelo como en las arcillas.

Gracias a esta propiedad los cationes aplicados como fertilizantes presentan interacciones con los cationes intercambiables en el suelo y pasan a formas absorbibles siendo protegidos del lavado, pero aún disponibles para la planta (Fassbender, 1968; Gliessman, 2002; Porta, López-Acevedo, & Poch, 2014).

- **Indicadores biológicos**

- **Carbono y nitrógeno de la biomasa microbiana:** potencial catalizador microbiano. Reposición de Carbono y nitrógeno.
- **Respiración, humedad y temperatura:** medida de la actividad microbiana. Estimación de la biomasa.
- **Nitrógeno mineralizable:** productividad del suelo. Suministro de N.

(Navarro-García & Navarro-García, 2013)

3.2.2.1 Biomasa microbiana

La biomasa microbiana es el componente vivo del suelo o parte viva de la materia orgánica, está constituida principalmente por bacterias y hongos, no se incluyen macrofauna y raíces de plantas, la biomasa tiene diferentes funciones como:

- Asimilar el nitrógeno mineral proveniente de la mineralización de amonio y nitrato.
- Regular la transformación de la materia orgánica.
- Conducir la transformación de nutrientes.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Sustancia con capacidad de cementación de los componentes del suelo.

La biomasa microbiana forma parte importante porque nos sirve de indicador temprano de las variaciones de la materia orgánica encontrada en los suelos (Paz-Ferreiro, 2006; Sawchik, 2001).

Existen diversos métodos para la determinación de la biomasa del suelo los cuales se dividen en directos e indirectos (Tabla 4).

Tabla 4. Métodos para la determinación de biomasa microbiana.

Métodos directos	Métodos indirectos
Gravimetría	Componentes celulares específicos <ul style="list-style-type: none">• Ácidos nucleicos• Proteínas• Lípidos• Polisacáridos• ATP
Espectrofotometría	Métodos bioquímicos <ul style="list-style-type: none">• Actividad esterasa• Actividad deshidrogenasa (DHA)
Microscopía de recuento celular en cámaras	Métodos cinéticos <ul style="list-style-type: none">• Adaptación del respirómetro de Warbug• Tasa de respiración• Tasa de desaparición del sustrato
Microscopía mediante epifluorescencia Método de siembra	Fisicoquímicos indirectos

Fuente: Arnáiz, Isac, & Lebrato, 2000

3.3 Alternativas sustentables

Las alternativas sustentables o sostenibles surgen con la necesidad de lograr una buena conservación, administración y producción de productos alimenticios. Este tipo de producción de alimentos tiene la ventaja de ser más naturales y libres de químicos dañinos. De acuerdo a las necesidades se han implementado diferentes alternativas sustentables para la producción de alimentos como se muestra en la Tabla 5, las cuales han ayudado a la obtener una mejor producción de alimentos.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Tabla 5. Alternativas sustentables para la producción de alimentos.

Alternativa	Objetivo	Especies	Técnicas	Referencias.
Acuicultura sustentable	Dedicada a plantas y organismos acuáticos.	<ul style="list-style-type: none"> • Trucha • Cangrejo de barro <i>Scylla Serrata</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de flujos continuos y cerrados de recirculación. • Estanques de tierra. 	(Sapto P. Putro, 2015)
Ganadería sustentable	Conservar la tierra y los animales sin degradar el medio ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> • Cerdos chinos • Ovinos • Caprinos 	<ul style="list-style-type: none"> • Pastoreo al aire libre. 	(Kaufmann, 2015)
Agricultura sustentable	Mejorar el suministro de alimentos obteniendo mayores ingresos para los agricultores.	<ul style="list-style-type: none"> • Cereales • Aceite de palma • Plátanos 	<ul style="list-style-type: none"> • Abonos verdes • Utilización de microorganismos como pesticidas e inhibidores de crecimiento de hongos. 	(De Fries <i>et al.</i> , 2016)
Agricultura orgánica	Eliminar los agroquímicos y mejorar el medio ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> • Maíz • Frijol • Café 	<ul style="list-style-type: none"> • Huerta ecológica a nivel urbano. 	(Wollni & Andersson, 2013; Mercati, 2016)

3.4 Agricultura sustentable

La agricultura sustentable involucra componentes ecológicos, técnicos y sociales, los cuales permiten obtener una producción de alimentos. La agricultura sustentable ayuda a mejorar el suministro de alimentos y proteger el medio ambiente, originando mayores ingresos para los agricultores, así como un cultivo resistente a los cambios climáticos. Con esto se pretende que las cosechas puedan adquirir los nutrientes necesarios para el consumo humano y que se obtenga una producción eficiente (De Fries *et al.*, 2016).

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

La agricultura sustentable en comparación a la convencional es llevada a cabo mediante el uso de abonos verdes y sin el uso de fertilizantes químicos. Los abonos verdes nos ayudan a reducir la contaminación de cultivos y brindan la materia orgánica necesaria al cultivo.

3.5 Abonos verdes

La función principal que tienen los abonos verdes es complementar la nutrición del cultivo a través de la fijación del nitrógeno libre, ayudando al aumento en el rendimiento del cultivo, transfiriendo nutrimentos del subsuelo a la capa arable y actuando como un pesticida natural (Zhijian *et al.*, 2016)

Así mismo ayudan a la textura del suelo, evitan enfermedades en el cultivo e incrementa la actividad de microorganismos tales como hongos micorrízicos y bacterias rizobiales en el suelo (Janzen & Schaalje, 1992; Cherr, Scholberg, & McSorley, 2006; Riley *et al.*, 2008).

Estos microorganismos representan un papel fundamental en los ecosistemas ya que influyen en la productividad que tiene el cultivo así mismo inhiben el crecimiento de otros microorganismos patógenos que pueden afectar a la planta (Demir & Akkopru, 2007). Los hongos micorrízicos ayudan a la absorción de fósforo mientras que las bacterias rizobiales ayudan a la fijación de nitrógeno (Scheublin & Vander Heijden, 2006).

Esta fijación biológica de nitrógeno está presente en los nódulos, los cuales se encuentran en las raíces de las leguminosas. Estos nódulos son colonizados por bacterias gram-negativas del género *Rhizobium* (Scheublin, 2006) encontradas en el suelo, esta relación simbiótica consiste en que las bacterias obtienen nutrientes de la planta, mientras que reducen el dinitrógeno atmosférico para beneficio de esta. (Dixon & Kahn, 2004; Udvardi & Pool, 2013).

Algunas características que se buscan en un cultivo que puede ser usado como abono verde son (SAGARPA, 2015):

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Que su etapa de desarrollo sea rápida.
- Tenga más hojas que tallos para que su descomposición sea rápida.
- Que se adapte a diferentes tipos de suelo
- Que sea preferentemente una planta fijadora de nitrógeno.

Los abonos verdes generalmente crecen hasta una etapa anterior a su floración para después ser cortados durante la etapa de barbecho en la que también son reintegrados al suelo (Cormack, Sheperd, & Wilson, 2003; Stopes, Millington, & Woodward, 1996) a una profundidad que no exceda los 10 cm. (SAGARPA, 2015) y posteriormente se debe dejar transcurrir de tres a cuatro semanas para sembrar los cultivos. El barbecho no solo se realiza para el control de malezas sino que también ayuda a mantener una alta fijación de nitrógeno (Dahlin & Stenberg, 2010).

Sin embargo, debido a la acumulación de nitrógeno fácilmente degradable de proveniente de los abonos verdes, si se realiza este barbecho de manera repetida y durante mucho tiempo existe el riesgo de que una proporción de nitrógeno proveniente de los abonos verdes puedan perderse tanto por emisiones gaseosas (en forma de NH_3 , N_2O , NO y N_2), escorrentía o mediante lixiviación (en forma de NO_3^- y nitrógeno orgánico soluble) (Askengard, Olesen, & Kristensen, 2005; Korsæth, 2012; Larsson *et al.*, 1998; Möller & Stinner, 2009).

Los abonos verdes pueden ser de origen animal o vegetal, en el primer caso es común emplear el estiércol de origen animal, sin embargo, los abonos más empleados en este tipo de agricultura son los abonos vegetales, principalmente leguminosas, pudiendo emplearse diferentes tipos como las que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Algunos abonos empleados para mejorar el cultivo.

Planta	Origen	Ciclo (días)	Efectos /cultivo	Referencias
Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	Sonora, Estado de México, Puebla, Hidalgo, Michoacán, Jalisco etc.	54	• Aumentar la productividad de la tierra, el grano y la biomasa	(Riseman & Chapagain, 2014)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Haba <i>(Vicia faba)</i>	Puebla, Tlaxcala, Edo. De México y Veracruz.	50	<ul style="list-style-type: none"> • Estimulación de actividad microbiana del suelo. • Mejora estructura del suelo. • Enriquecimiento del suelo con nitrógeno. • Renovación del humus del suelo. 	(Weber, Hack, & Bleiholder, 1998; García Moreno & Gordillo Rivero, 2015)
Soya <i>(Glycine max)</i>	Campeche, Chiapas, Chihuahua, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Quintana Roo, Sonora, Veracruz y Yucatán.	25-30	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa la cosecha. • Reduce la cantidad de nitrógeno fijado por bacterias. 	(Guamán-Jiménez, 1991; Thompson & Troeh, 2002)
Frijol <i>(Phaseolus vulgaris L.)</i>	Aguascalientes, Sinaloa, Morelos, Veracruz y Tabasco.	38	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor fijación • Vínculo cereal-leguminosa ha sido la base de la alimentación de las grandes culturas 	(Fernández, Gepts, & López, 1986; Lara-Flores, 2015)
Alfalfa <i>(Medicago sativa)</i>	Guanajuato, Chihuahua, Baja California, Coahuila, Durango, Hidalgo,	35	<ul style="list-style-type: none"> • Enriquece el suelo. • Aporta importantes cantidades de nitrógeno. 	(Horra-Ruiz, Serrano-Comino, & Carlevaris-Muñiz, 2008; SAGARPA, 2009)

Esta técnica presenta varias desventajas a corto plazo que debe de considerar el agricultor como: pérdidas económicas, ya que requieren un espacio de cultivo para planta y manejar los abonos verdes durante su periodo de crecimiento; y no recibe beneficio directo de la siembra de las leguminosas.

3.5.1 Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes para los cultivos, debido a su papel en la productividad de los cultivos y al crecimiento que presentan (Cerón-Rincón & Aristizábal-Gutiérrez, 2012).

La dinámica que presenta este elemento en la biosfera comprende principalmente la fijación de nitrógeno (N_2), la mineralización, la nitrificación, la desnitrificación y la oxidación anaerobia del amonio (Hu *et al.*, 2011), procesos mediados principalmente por microorganismos (Figura 6).

- **Fijación del nitrógeno:** el nitrógeno elemental (N_2) se incorpora al suelo mediante fertilizantes químicos, procesos bioquímicos mediante microorganismos o por medio de asociaciones simbióticas de éstos con plantas, como se muestra en las siguientes reacciones (1, 2, 3):



- **Mineralización:** este proceso es de gran importancia para la disponibilidad del nitrógeno en los ecosistemas terrestres, transforma el nitrógeno orgánico en materia orgánica del suelo y biomasa microbiana en nitrógeno inorgánico, lo que finalmente forma amonio, por medio de la actividad de hongos y bacterias (Verhulst *et al.*, 2015).

Este proceso está afectado por la asimilación microbiana (inmovilización) que es un proceso que controla la disponibilidad de nitrógeno para las plantas, estos microorganismos degradan los residuos del cultivo y satisfacen su demanda energética, pero a su vez utilizan el fertilizante nitrogenado para formar proteínas para su propio crecimiento (Cerón-Rincón & Aristizábal-Gutiérrez, 2012).

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

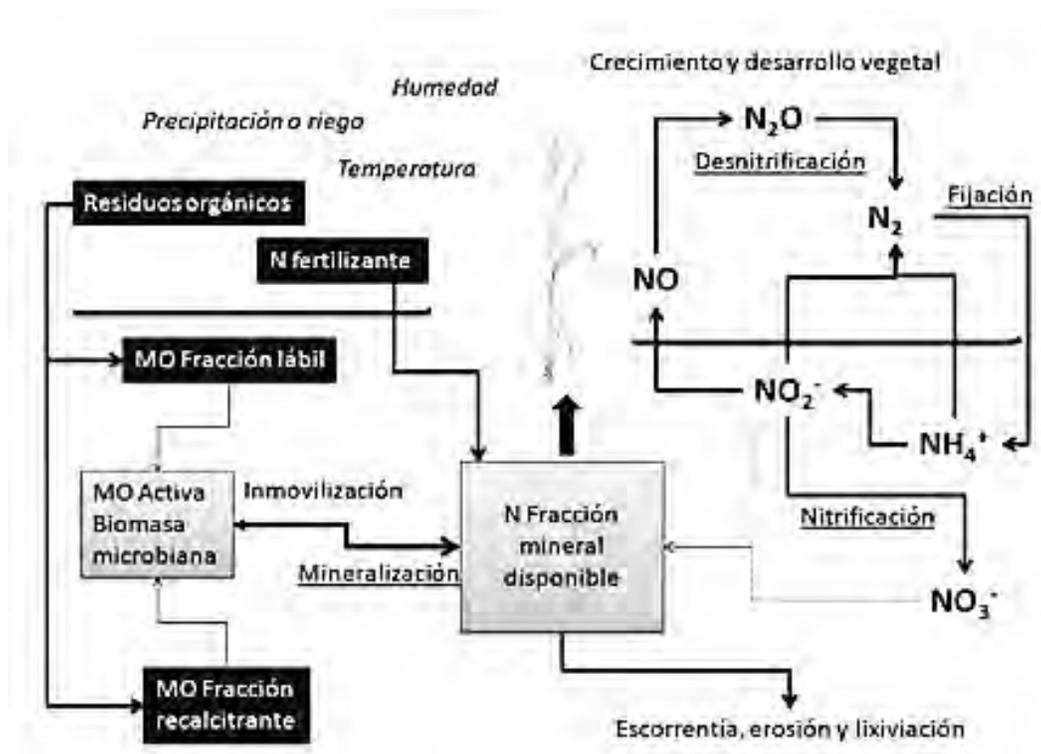


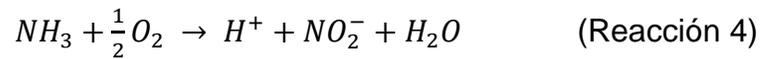
Figura 6. Esquema del ciclo del nitrógeno²

Fuente: Modificado de Cerón-Rincón & Aristizábal-Gutiérrez (2012).

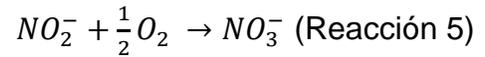
- **Nitrificación:** es importante en la naturaleza debido a que el nitrógeno es absorbido por las plantas principalmente como nitrato (NO_3^-) (Manahan, 1994). El proceso biológico que consiste en la oxidación del amonio (NH_4^+) a nitrito (NO_2^-) y posteriormente a nitrato (NO_3^-) (Verhulst *et al.*, 2015). La nitrificación es catalizada por dos géneros de bacterias *Nitrosomonas spp.* y *Nitrobacter spp.* (Freitag *et al.*, 2005) donde los microorganismos del género *Nitrosomonas spp.* catalizan la primera reacción (Reacción 4):

² Los recuadros negros son las entradas al sistema, los grises son fracciones disponibles; sin recuadros son los procesos y productos que influyen en el esquema (MO lábil: materia orgánica disponible como fuente energética que mantienen las características químicas originales; MO recalcitrante: fracción húmica, constituida por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos y huminas (Galatini, 2002; Martínez, Fuentes, & Acevedo, 2008))

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES



Y la oxidación de nitritos a nitratos es catalizada por el género *Nitrobacter spp.* (Reacción 5):



- **Desnitrificación:** es el mecanismo por el que el nitrógeno fijado es devuelto a la atmósfera por medio de procesos de respiración microbiana. Consiste en la reducción del NO_3^- a productos gaseosos como dióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido nitroso (N_2O) (Yúfera & Carrasco, 1973).

Esta reacción ocurre por la acción de bacterias, principalmente del género *Pseudomonas denitrificans*, *Achromobacter*, *Micrococcus* y algunos *Bacillus* (Zumft, 1997).

4.- Objetivos

4.1 Objetivo general

Determinar el efecto del uso de abonos verde sobre la producción de cebada maltera mediante indicadores de calidad del suelo e indicadores agronómicos en la cebada para mejorar su producción.

4.2 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades del suelo de cultivo antes y después de la aplicación de abonos verdes a través de parámetros físicos (Densidad, textura, porosidad) y químicos (Materia orgánica, intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica, iones intercambiables) para determinar el efecto del uso de abonos verdes.
- Medir los indicadores agronómicos de la cebada maltera (tamaño de tallo, tamaño de espiga, número de granos totales y porcentaje de germinación) para conocer su rendimiento y viabilidad de producción.

5.- Justificación

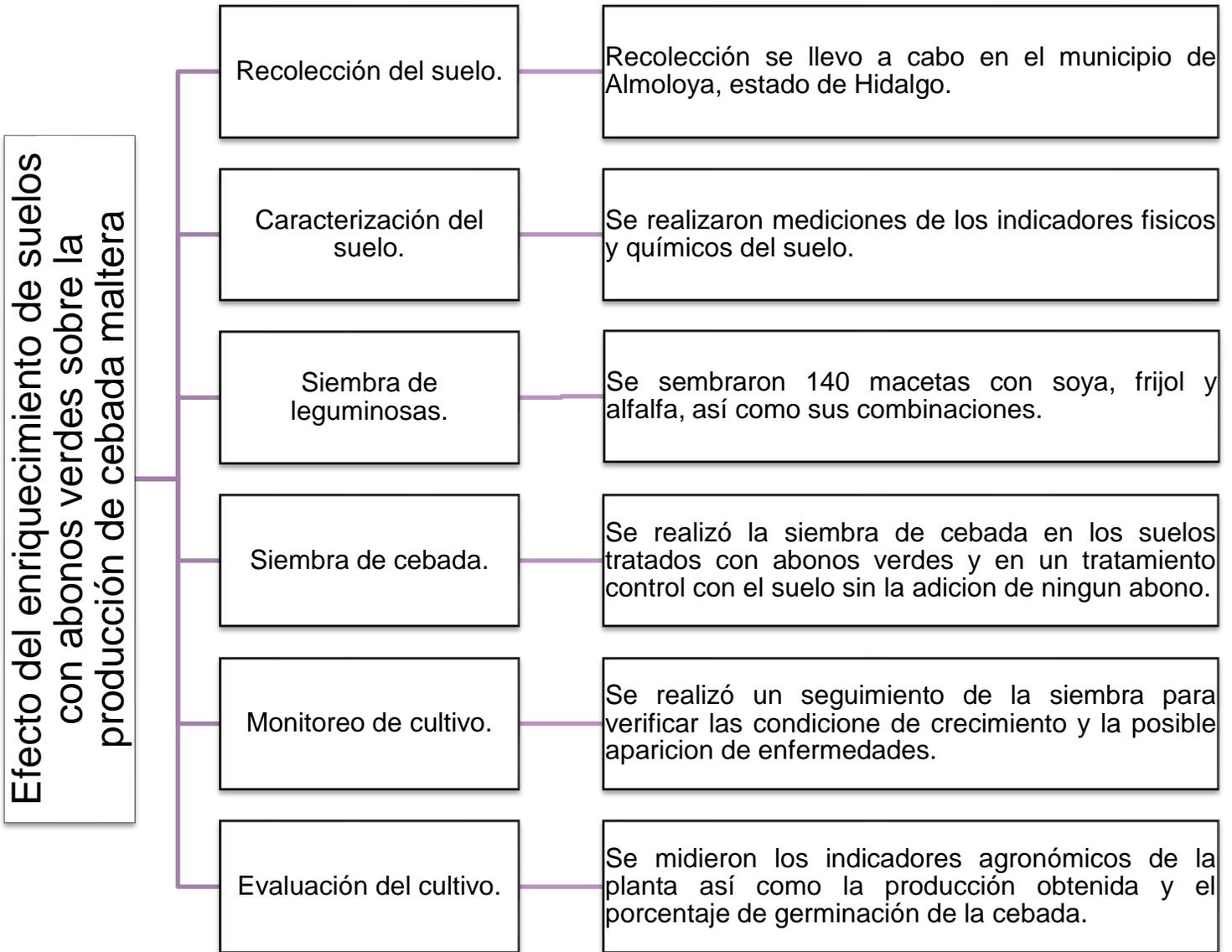
El cultivo de cebada es uno de los principales cereales consumidos en México, siendo el estado de Hidalgo el segundo productor de cebada a nivel nacional. Sin embargo, en los últimos años se ha registrado una disminución en el rendimiento del grano debido a prácticas de cultivo intensivas, cultivos sucesivos y al uso de fertilizantes químicos.

Es por ello que se busca evaluar el efecto que tiene el uso de abonos verdes sobre los suelos de cultivo y el rendimiento del grano para evidenciar los beneficios que puede tener esta técnica sobre la producción de cebada maltera.

6.- Hipótesis

El uso de abonos verdes, permitirá obtener mejores propiedades físicas y químicas en suelos de cultivo y el aumento en la producción de cebada.

7.- Metodología y descripción del área de estudio



ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

7.1 Localización

El área de estudio se localiza en la porción sur del estado de Hidalgo en el municipio de Almoloya (Figura 7), al límite con el estado de Puebla y Tlaxcala. Sus coordenadas geográficas son: 19°42'12" latitud norte, 98°24'12" longitud oeste y una altitud entre 2600 y 3300 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2009).

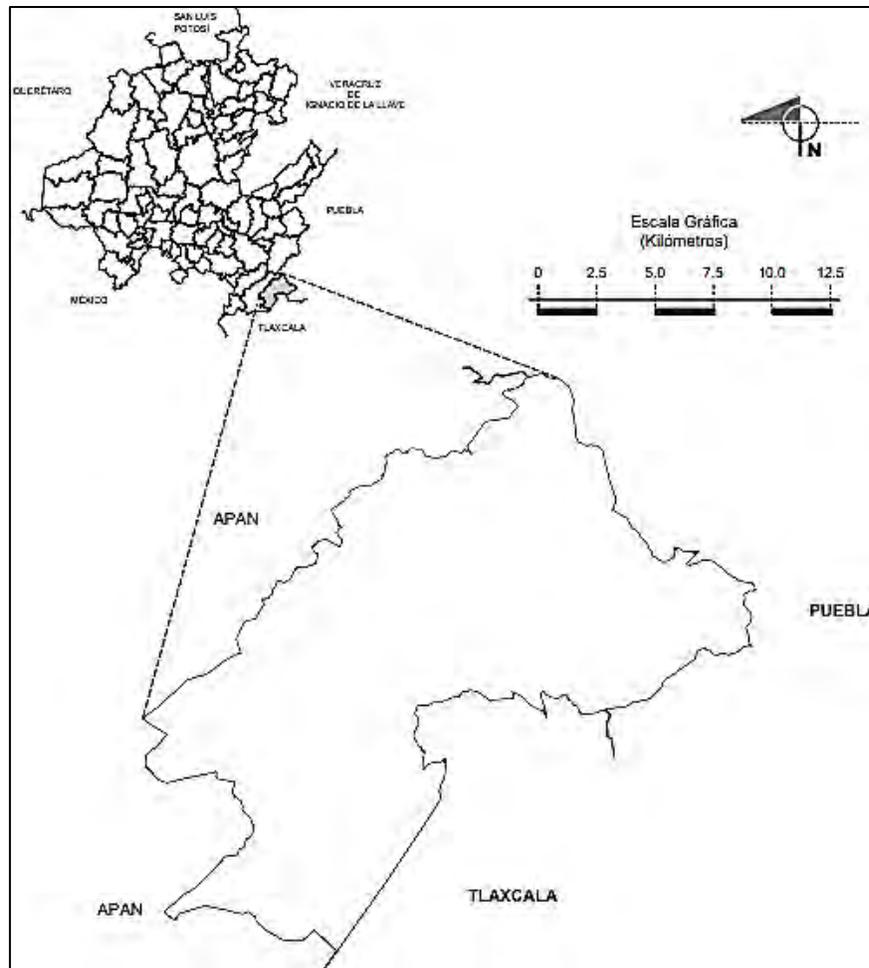


Figura 7. Localización geográfica del municipio de Almoloya, Hidalgo

Fuente: Modificada a partir de INEGI (2009)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

7.1.1 Clima

Tiene un clima sub húmedo templado con lluvias en verano (entre 500 y 700 mm de precipitación anuales) de humedad media y un rango de temperaturas entre los 10 y los 14 °C (INEGI, 2018).

7.1.2 Geología del área de estudio

El área donde está situado el municipio de Almoloya está formada por rocas ígneas extrusivas (o volcánicas) principalmente toba ácida (30.85%) seguido por andesita (17%), basalto (16%) y riolita (10%) (INEGI, 2009). Y con un suelo dominante formado por phaeozems (suelos oscuros y ricos en materia orgánica, son suelos porosos y fértiles utilizados para la agricultura (FAO, 2008)) (49%), seguidos por vertisoles (suelos arcillosos que forman grietas anchas y profundas cuando se secan (FAO, 2008)) (22.85%) y en menor medida andosoles (14%), leptosoles (11%) y umbrisoles (2%) (INEGI, 2009). La geología del municipio de Almoloya se muestra en la Figura 8.

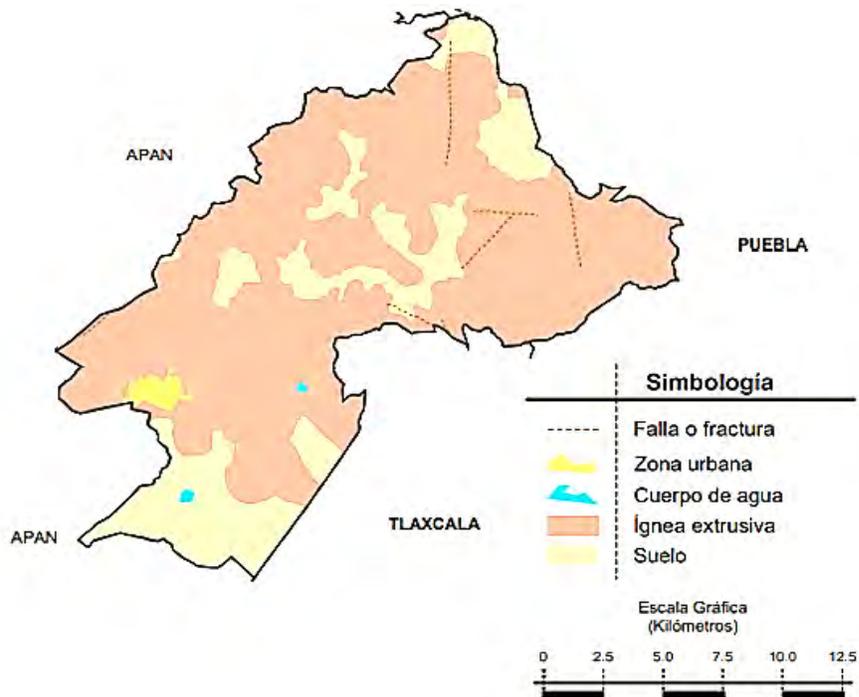


Figura 8. Geología del municipio de Almoloya.

Fuente: (INEGI, 2009)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

7.2 Recolección de la muestra

Se llevó a cabo un muestreo de tipo zigzag tal y como lo sugiere la NOM-021-RECNAT-2000. Se comenzó en un lado de la parcela escogiendo al azar un punto de partida, teniendo un metro de distancia entre los puntos de muestreo se cavó a una profundidad entre 25 y 30 cm con la ayuda de una barreta y una pala.

Una vez obtenidas las muestras se colocaron en una tina de plástico y se homogeneizó. Con el suelo que se obtuvo se rellenaron 20 costales con capacidad de 20 kg, este suelo se utilizó tanto para el análisis de suelo como para la siembra de leguminosas y la cebada. Por último, se identificaron los costales con la fecha de recolección.

7.2.1 Preparación de las muestras de suelos

De acuerdo a lo que sugiere el Manual de técnicas de análisis de suelos (Fernández-Linares et al., 2006) previo a la caracterización, el suelo se secó en charolas al sol durante 48 horas.

En la Figura 9a observamos el suelo que se recolectó de las parcelas de Almoloya, debido a que la muestra presentaba aglomeraciones, hojarasca, raíces y piedras fue necesario homogeneizarla mediante un tamiz con un tamaño de poro de 2 mm (Figura 9b).



Figura 9. Suelo recolectado en Almoloya (a). Suelo Acondicionado (b)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

La importancia de este tratamiento previo radica en que estas aglomeraciones provocan que las raíces no se fijen adecuadamente en el suelo y por lo tanto no absorban adecuadamente los nutrientes lo que afectaría el crecimiento tanto de las leguminosas como de la cebada (Rucks, *et al*, 2004; SAGARPA, 2015).

Una vez que el suelo estuvo seco y limpio se reservó para su posterior análisis y para su uso en la siembra de las leguminosas y de la cebada.

7.2.2 Caracterización del suelo

Para el análisis del suelo anterior a la siembra se llevó una caracterización de las muestras recolectadas de acuerdo a lo que presenta la NOM-021-RECNAT-2000 para el análisis y clasificación del suelo.

7.2.2.1 Determinación de textura

Se pesaron 50 g de suelo previamente tamizado a través de un tamiz con un tamaño de poro de 2 mm y se colocaron en un vaso de precipitado de 250 mL

Se adicionaron 10 mL de una solución dispersante³ y agua destilada hasta que el líquido alcance unos centímetros sobre el fondo. Se dispersó la muestra mezclándola durante cinco minutos y posteriormente la mezcla fue vertida en una probeta de 1000 mL teniendo cuidado de no dejar ninguna partícula en el vaso completando con agua destilada hasta 1000 mL.

Después se agitó la probeta tapada durante un minuto, a los 40 segundos del cese se le introdujo un hidrómetro de Bouyoucos y se registró la medida del densímetro y la temperatura. Por último, se repitió la medición de hidrómetro de Bouyoucos y de la temperatura después de 2 horas (NOM-021-RECNAT-2000, 2002).

³ Mezcla de 3.7 g de hexametáfosfato sódico ((NaPO₃)₆) y 0.794 g de carbonato de sodio (Na₂CO₃) en 30 mL de agua destilada

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Se calculó la proporción de los componentes del suelo mediante la Ecuación 1, 2 (Modificadas a partir de (Medina-González, García-Coronado, & Núñez-Acosta, 2007)), 3 y 4

Ecuación 1: Proporción de arcilla y limo

$$AL\% = \frac{C_1 + [(T_c - t_1) * 0.36]}{pm} * 100$$

Ecuación 2: Proporción correspondiente a la arcilla

$$A\% = \frac{C_2 + [(T_c - t_2) * 0.36]}{pm} * 100$$

Ecuación 3: Proporción de limo

$$L\% = AL\% - A\%$$

Ecuación 4: Calculo del porcentaje de arena

$$Ar\% = 100 - AL\%$$

Dónde:

AL%= porcentaje de limo más arcilla.

A%= porcentaje de arcilla.

L%= Porcentaje de limo

Ar%= porcentaje de arena

0.36= factor de corrección

Tc= Temperatura de uso del hidrómetro (20°C)

C1 y C2= medida del hidrómetro a los 40 segundos y a las 2 horas respectivamente

T1 y T2= temperatura registrada a los 40 segundos y a las 2 horas respectivamente

Posterior a la obtención de la proporción que tienen los componentes en el suelo se determinó la textura de la muestra mediante el uso del triángulo de textura que presenta la FAO (2016) (Figura 5).

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Para la obtención del tipo de suelo mediante el triángulo de textura se toman en cuenta cada uno de los lados ya que cada uno de ellos representa el porcentaje de cada componente (arcilla, limo y arena).

Se coloca una marca en uno de los lados (depende del componente a medir) y se dibuja una línea recta apoyándose con las líneas que tiene el propio triángulo de la textura. Este proceso se realiza para cada uno de los componentes y, el punto en donde las 3 líneas se interceptan corresponde a una clasificación del suelo.

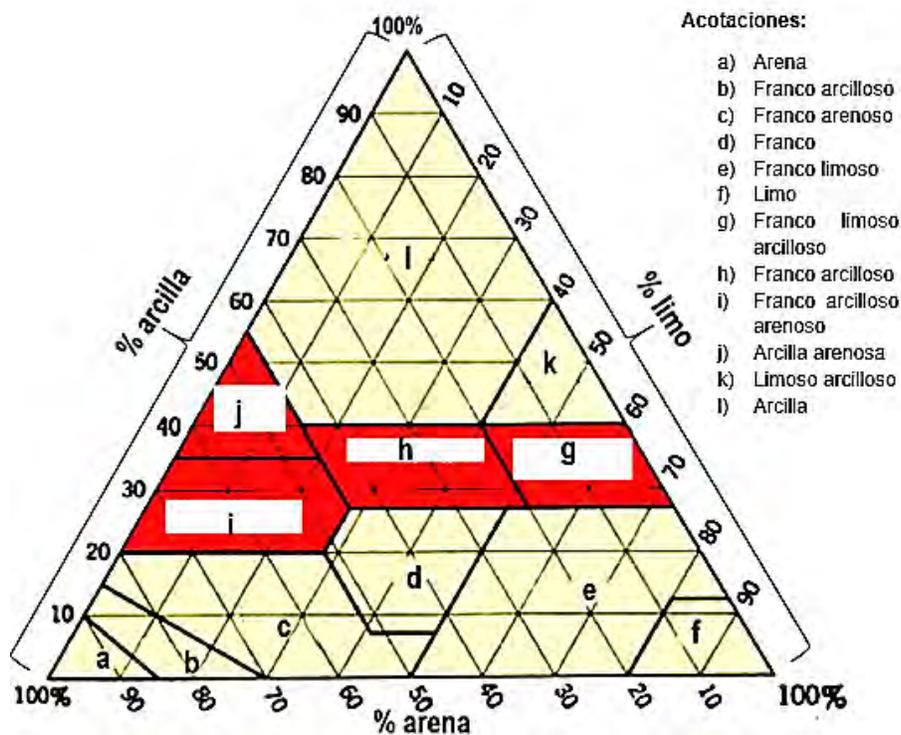


Figura 10. Triángulo de textura del suelo

Modificado a partir de: FAO (2016)

7.2.2.2 Determinación de pH y conductividad eléctrica

El pH es una de las mediciones más comunes e importantes en los análisis químicos rutinarios del suelo, debido a que el pH influye en las reacciones biológicas y químicas que suceden en el suelo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Por otra parte, la conductividad eléctrica indica la concentración de sales que tiene el cultivo, el conocimiento de este parámetro facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo (Barbaro, Karlanian, & Mata, 2014).

Para la preparación de la muestra se pesaron 10 g del suelo previamente tamizado a través de un tamiz con un tamaño de poro de 2 mm y libre de materia orgánica.

Se colocó en un vaso de precipitado de 250 mL y se agregó un poco de agua hasta cubrir por completo la muestra, una vez tenida la mezcla se realizó una agitación con ayuda de un agitador magnético durante 5 minutos.

Una vez concluida la agitación se dejó reposar unos segundos, se tomó una alícuota de 1 mL y se vertió en un potenciómetro HORIBA LAQUA twin B-712, del mismo modo se tomó una alícuota de 1 mL y se midió la conductividad eléctrica con ayuda de un medidor de conductividad HORIBA LAQUAtwin EC-33 (García-Santiago *et al.*, 2017; Mishra *et al.*, 2017).

Posterior a la medición se registró el valor de pH utilizando el criterio señalado por la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación del suelo según valor de pH.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: (Boulding, 1995; NOM-021-RECNAT-2000, 2002)

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

7.2.2.3 Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico

Para la determinación se pesaron 2 g de suelo previamente tamizado y se colocó en un tubo de centrifuga de 50 mL, después de le añadió al tubo 25 mL de una solución de intercambio A⁴ y se agitó con una varilla de vidrio durante 2 minutos.

Se centrifugó el tubo durante 5 minutos a 3000 rpm y una vez terminada la centrifugación se separó el sobrenadante del precipitado, reservando este último en el tubo.

Se añadieron 25 mL de la solución de intercambio B⁵ al precipitado del tubo y se agitaron con una varilla de vidrio durante 2 minutos, posteriormente se centrifugó durante 5 minutos a 3000 rpm, después se separó el precipitado del sobrenadante, reservando este último.

Se tomaron 10 mL del sobrenadante, los cuales fueron vertidos en un matraz Erlenmeyer de 250 mL para su posterior dilución con 100 mL de agua destilada. Se añadió al matraz 10 mL de solución tampón⁶ y 6 gotas del indicador de negro de ericromo T y se tituló con una solución de EDTA 0.05 N (Primo-Yúfera & Carrasco-Dorrién, 1987), posteriormente se calculó la CIC a partir de la ecuación 5.

Ecuación 5: cálculo del intercambio catiónico (Primo-Yúfera & Carrasco-Dorrién, 1987)

$$CIC = \frac{(M - N) * C * FD * 100}{P}$$

Dónde:

⁴ Se disolvieron 62 g de BaCl₂•2H₂O en 500 mL de agua destilada, después se añaden 25 mL de trietanolamina, ajustando el pH a 8.1 por adición de HCl 1N y por último aforar a un litro.

⁵ Se disolvieron 12.5 g de MgSO₄•7H₂O en agua destilada y aforar a un litro.

⁶ Mezclar 30 mL de una solución de NH₄Cl 1 N con 150 mL de NH₄OH 1N

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

CIC=capacidad de intercambio catiónico en Cmol/kg.

M= mL de solución complejante empleados para valorar 10 mL de solución de intercambio B.

N= mL de solución complejante empleados para valorar 10 mL de extracto de suelo.

P= peso en g de la muestra de suelo.

FD=Factor de dilución (2.5)

C= Concentración de EDTA (0.05 N)

Una vez obtenida la capacidad de intercambio catiónico se comparó con la tabla presentada en la NOM-021-RECNAT-2000 de la clasificación del suelo de acuerdo a su capacidad de intercambio catiónico (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de la fertilidad del suelo de acuerdo a la CIC

Clase	CIC (Cmol/kg)
Muy alta	>40
Alta	25-40
Media	15-25
Baja	5-15
Muy baja	>5

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000

7.2.2.4 Densidad aparente del suelo

Para la densidad aparente, tal y como lo sugiere Guevara (2012) se pesó una probeta de 10 mL vacía, una vez pesada se llena hasta los 10 mL con suelo y se golpeó ligeramente 10 veces sobre una franela en una superficie plana, posteriormente se agregó más suelo hasta llegar nuevamente a los 10 mL y por último se tomó el peso de la probeta llena. Una vez se tienen todas las mediciones se utilizó la ecuación 6

Ecuación 6: Cálculo de la densidad aparente del suelo (Guevara, 2012)

$$DAP = \frac{PB_2 - PB_1}{v}$$

Dónde:

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

DAp= densidad aparente

PB₂= peso de la bureta con el suelo

PB₁= peso de la bureta vacía

V= volumen de la bureta

7.2.2.5 Densidad real del suelo

En el caso del cálculo de la densidad real de la muestra se realizó de acuerdo a lo presentado por Reyes-Jaramillo (1996). Se utilizó un picnómetro de 10 mL el cual fue pesado vacío, posteriormente se le introdujeron 5 g de suelo con ayuda de una cucharilla y se pesó nuevamente.

Se agregó un poco de agua al picnómetro, se agitó suavemente durante unos minutos y se dejó reposar hasta que ya no hubiera burbujas de aire.

Una vez terminado el reposo se llenó el picnómetro con agua y nuevamente se pesó. Por último el picnómetro se llenó de agua y se volvió a pesar

Ecuación 7: Fórmula usada para el cálculo de la densidad real de la muestra de suelo

$$DR = \frac{S}{S + A - (s + a)}$$

Dónde:

S=Peso del suelo

A= peso del agua

(s+a)= peso del suelo y el agua mezclados

7.2.2.6 Porcentaje de porosidad del suelo

Este parámetro hace referencia al espacio dentro del suelo que está ocupado por aire y/o agua dependiendo de la disposición de las partículas sólidas (Flores-Delgadillo & Alcalá-Martínez, 2010).

Se calculó mediante una relación entre la densidad aparente y la densidad utilizando la Ecuación 8.

Ecuación 8: Calculo del porcentaje de porosidad mediante las 2 densidades calculadas previamente (Reyes-Jaramillo, 1996)

$$P\% = \left(1 - \frac{DAp}{DR}\right) * 100$$

Dónde:

P%= Porcentaje de porosidad

DAp= Densidad aparente

DR= Densidad relativa

7.2.2.7 Materia orgánica y porcentaje de carbono orgánico del suelo

La determinación de materia orgánica se realizó mediante el método Walkey y Black como se encuentra en la NOM-021-RECNAT-2000.

Se pesaron 0.2 g de suelo previamente tamizado colocándolos en un matraz Erlenmeyer de 250 mL, se agregaron 5 mL de una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) 1 N y posteriormente se le adicionó 10 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Se debe de agitar durante 1 minuto y posteriormente dejarlo reposar durante 30 minutos.

Una vez pasado los 30 minutos, adicionar 100 ml de agua destilada después se agregaron 5 mL de ácido fosfórico (H_3PO_4) y 5 gotas de indicador de difenilamina para posteriormente titular esta mezcla con sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) con una

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

concentración de 0.5 N hasta que aparezca un color verde esmeralda, se anotan los mL gastados para llegar al vire de la muestra y se calcula el contenido de materia orgánica mediante el uso de la Ecuación 10.

Se debe de tomar en cuenta que se deben hacer blancos para confirma la normalidad del sulfato ferroso (Ecuación 9), para ello se repiten los pasos anteriores, si agregar la muestra de suelo. En el caso del porcentaje de carbono orgánico en la muestra se realizó un cálculo a partir del porcentaje de materia orgánica (Ecuación 11).

Ecuación 9: Normalidad real del sulfato ferroso (Jackson, 1982)

$$NR = \frac{VT * NT}{mL \text{ de } FeSO_4 \text{ gastado en el blanco}}$$

Dónde:

VT= volumen teórico (10 mL)

NT= normalidad teórica (0.5N)

Ecuación 10: cálculo del porcentaje de materia orgánica

$$M.O\% = \frac{DPa - (Vg * NR)}{(PM)} * 0.69$$

Dónde:

DPa= Dicromato de potasio agregado

Vg= mL de FeSO₄ gastado

NR= Normalidad real

PM= Peso de la muestra

0.69= Constante (Jackson, 1982)

Ecuación 11: Porcentaje de carbono orgánico en la muestra (modificada a partir de la NOM-021-RECNAT-2000).

Rodríguez Sánchez & Jiménez Sánchez

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

$$CO\% = \frac{MO\%}{1.724}$$

Dónde:

CO%= porcentaje de carbono organico

MO%= porcentaje de materia orgánica

1.724=constante (Jackson, 1982)

7.2.2.8 Determinación de nitratos, Ca^{2+} y K^+

Para esta determinación se siguió la metodología presentada por García-Santiago *et al.* (2017) y Mishra *et al.* (2017).

Previo a la determinación se prepararon las muestras de suelo, se pesaron 10 g de suelo previamente tamizado a través de un tamiz con tamaño de poro de 2 mm posteriormente se colocó en un vaso de precipitado de 250 mL y se agregó un poco de agua hasta cubrir por completo la muestra, posteriormente se agitó con ayuda de un agitador magnético durante 5 minutos.

Al concluir la agitación se dejó reposar unos segundos y se tomó una alícuota de 1 mL y se vertió en un medidor de nitratos HORIBA LAQUAtwin B-742, un -medidor de ion Ca^{2+} HORIBA LAQUAtwin B-751 y por último un medidor de K^+ HORIBA LAQUAtwin B-731.

Posterior a la medición de bases intercambiables se utilizó la Tabla 9 para determinar si la cantidad de estos iones es baja, media o alta.

Tabla 9. Clasificación del suelo de acuerdo a la concentración de iones.

Clase	Ca^{2+}	K^+
	Cmol/kg	
Muy baja	< 2	< 0.2
Baja	2-5	0.2 – 0.3
Media	5-10	0.3 – 0.6

Rodríguez Sánchez & Jiménez Sánchez

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Alta > 10 > 0.6

Fuente: modificado a partir de la NOM-021-REANACT-2000

7.3 Diseño de tratamientos y selección de abonos

Las plantas que fueron utilizadas como abonos verdes se seleccionaron de acuerdo a características de raíz, tiempo de crecimiento y capacidad de fijación de nitrógeno como componente principal en mejoramiento de fertilidad del suelo (Fernández, Gepts, & López, 1986; Guamán-Jiménez, 1991; Thompson & Troeh, 2002; Lara-Flores, 2015; Horra-Ruiz, Serrano-Comino, & Carlevaris-Muñiz, 2008)

Se usaron macetas con capacidad de 4 Kg con medidas de 21 cm de diámetro y 16 cm de profundidad. Se prepararon un total de 7 tratamientos (T1-T7: Suelo-abonos verdes-semilla de cebada) con un control (TC: Suelo-semilla de cebada) (Tabla 10).

Previamente se adiciono en el fondo, una capa de dos cm de altura de gravilla, con la finalidad de minimizar las pérdidas durante los procesos de riego. Los riegos se realizaron una vez a la semana, adicionando 250 mL de agua por maceta.

Tabla 10. Nomenclatura de los diferentes tratamientos usados para cebada.

Clave	Tratamiento
T01	Frijol + Cebada
T02	Soya + Cebada
T03	Alfalfa + Cebada
T04	Frijol-soya +Cebada
T05	Frijol-alfalfa + Cebada
T06	Alfalfa-soya + Cebada
T07	Frijol-soya-alfalfa + Cebada
TC	Solo cebada

El número de macetas a montadas fueron 160 (7 tratamientos y 1 control con 20 réplicas cada uno), tomando en cuenta la densidad de siembra utilizada para frijol (40

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

kg/ha) (García-Álvarez, González-Rivas, & Mena-Hernández, 2013) (Jiménez-Galindo & Acosta-Gallegos, 2013), soya (50 kg/ha) (Ochoa-Espinoza, Cantúa-Ayala, Montoya-Coronado, & Aguilera-Molina, 2011), alfalfa (40 kg/ha) (Montemayor-Trejo *et al.*, 2012).

Se adicionaron 30 g por maceta de cada leguminosa, en el caso de los tratamientos compuestos por 2 leguminosas fueron adicionados 15 g por cada una de ellas por último en el caso del tratamiento con 3 leguminosas se agregaron 10 g por cada leguminosa.

En cuanto a la siembra de cebada se tomó en cuenta la densidad de siembra que presenta García-Rodríguez *et al.* (2008) así como la densidad de siembra utilizada por los productores llegando a 120 kg/ha correspondiendo a un sistema de siembra de tipo voleo sembrando 5 g por cada maceta.

7.3.1 Siembra y elaboración de abono verde

Se llevó a cabo el cultivo inicial de las leguminosas con semillas certificadas (frijol, soya y alfalfa) usando 30 g de leguminosa por tratamiento (en el caso de los tratamientos con dos leguminosas 15 g por leguminosa, mientras que el tratamiento con las tres leguminosas se colocaron 10 g de cada una) y como sustrato el suelo previamente caracterizado realizando riegos cada semana con 250 mL de agua.

Posteriormente al inicio de floración se extrajeron las plantas de raíz, se cortaron en trozos pequeños y se incorporaron al mismo suelo de la maceta, de forma homogénea; después se dejaron por 40 días para su degradación en el sustrato de la maceta.

Se debe considerar que los ciclos de las plantas que se incorporaron como abonos verdes pueden tener tiempos variables de crecimiento de acuerdo a los factores ambientales y fertilidad del sustrato inicial (40-55 días).

Estos abonos crecieron en condiciones de invernadero a riego considerado para la leguminosa. La siembra se realizó el 17 de febrero del 2017 y el corte de estas se llevó a cabo entre el 3 y el 7 de abril del 2018.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

7.3.2 Determinación del nitrógeno total

Para la determinación de nitrógeno inorgánico se utilizó el método Kjeldahl descrito en la NOM-021-RECNAT-2000 con modificaciones de acuerdo a lo presentado en el Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados (Fernández-Linares *et al.*, 2006).

Esta medición se realizó en 2 tiempos: al principio del tratamiento, con el suelo sin modificaciones y con el suelo después de haber sido sometido al tratamiento con abonos verdes.

Se pesaron 0.2 g de suelo (previamente tamizado y triturado con un mortero de cuarzo) y se colocaron en un matraz kjeldahl al cual se le adicionaron 2 gramos de una mezcla de catalizadores⁷ y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado.

Los tubos se colocaron en un digestor y gradualmente se calentaron hasta alcanzar 400 °C; la digestión fue detenida cuando la mezcla obtuvo un color azul claro/turquesa, después se taparon los tubos kjeldahl y se enfriaron. Posteriormente se adicionaron 25 mL de agua destilada y se mezcló vigorosamente hasta disolver los cristales formados.

Se transfirió el líquido a un matraz Erlenmeyer de 500 mL y se le añadieron 15 mL de NaOH al 30%, se colocó a la salida del destilador un matraz Erlenmeyer con 10 mL de una solución de H₃BO₃ con indicador⁸ y se inició la destilación hasta alcanzar aproximadamente 30 mL. La muestra destilada se tituló con una solución de ácido sulfúrico a una concentración de 0.01 N hasta que la coloración cambió de verde claro a un rosado fuerte.

Se realizó la preparación de un blanco con todos los reactivos necesarios excepto la muestra. Para calcular la concentración de nitrógeno total se utilizó la ecuación 12

⁷ Mezcla de 10 g de K₂SO₄ y 1 g de CuSO₄•5H₂O.

⁸ Pesar 20 g de H₃BO₃ y disolverlos en 750 mL de agua destilada. Una vez disuelto agregar 20 mL de una mezcla de indicadores: 0.99 g de verde de bromocresol y 0.066 g de rojo de metilo disueltos en 100 mL de alcohol etílico al 96%. El pH de la mezcla debe de ser aproximadamente 5,

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Ecuación 12: Determinación de nitrógeno de acuerdo al Manual de técnicas de análisis de suelo

$$\text{Nitrógeno (\%)} = \frac{(T - B)(N)(1.4)}{S}$$

Dónde:

T= mL de ácido clorhídrico gastados en la valoración de la muestra

B= mL de ácido clorhídrico gastados en la valoración del blanco

N= Normalidad del ácido clorhídrico

S= peso de la muestra

1.4= factor de conversión (Fernández-Linares *et al.*, 2006)

7.3.3 Siembra de cebada

Una vez pasado el tiempo de incorporación de los abonos verdes (40 días), se procedió a la siembra del grano en la maceta, y se supervisó su germinación.

Durante la siembra y en general durante todo su desarrollo no se utilizaron fertilizantes químicos, pesticidas y se mantuvo un riego una vez a la semana con 250 mL de agua. Se utilizaron semillas certificadas de cebada (*Hordeum vulgare*) variedad “Esmeralda”, provenientes de la unión estatal de productores de cebada del estado de Hidalgo, por lo tanto, estas semillas no pasarán por ningún proceso previamente a la siembra.

7.4 Evaluación de indicadores agronómicos y de rendimiento

Durante el desarrollo de la planta se realizó un monitoreo cada 3 semanas observando los cambios que se presentaron entre el tratamiento control y los tratamientos con abonos (longitudes de partes aéreas).

A todas las plantas que llegaron al final del cultivo (120 días) se les realizó una medición de la parte aérea (cm). Así mismo, se realizó de igual manera la medición de factores relevantes en producción como: número de espigas de la planta, número de granos en cada espiga, longitud de la espiga, peso de semillas obtenidas por planta y peso total.

7.4.1 Germinación de la cebada

La germinación de la cebada es una prueba importante para evaluar la viabilidad de la semilla y detectar si es apta o no para el proceso de malteado (Ma, Bykova, & Igamberdiev, 2017). Para el proceso de germinación se seleccionaron al azar 30 semillas de cebada de cada uno de los diferentes tratamientos, se colocó una capa de algodón de 0.5 cm. de espesor en cajas

Petri de plástico posteriormente se colocaron 10 semillas en cada una de las cajas teniendo cuidado que las semillas estuvieran distribuidas uniformemente. Una vez acomodadas las semillas, estas fueron regadas con una pequeña cantidad de agua y colocadas a una temperatura de 25 °C durante 48 horas (ISTA, 1976; Efolliott & Thames, 1983; Ma, Bykova, & Igamberdiev, 2017).

Una vez concluidas las 48 horas se contaron las semillas germinadas de cada una de las cajas Petri y se determinó el porcentaje de germinación mediante la Ecuación 13.

Ecuación 13: Cálculo para determinar el porcentaje de germinación en las muestras de cebada.

$$G\% = \left(\frac{SC}{ST} \right) * 100$$

Dónde:

G%: porcentaje de germinación

SC: semillas que presentaron crecimiento después de las 24 hrs.

ST: semillas totales.

7.5 Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con una comparación de media utilizando la prueba de Tukey mediante el programa MiniTab versión 17 (2015) para Windows.

8.- Resultados y discusiones

8.1 Caracterización del suelo

De acuerdo con la metodología descrita anteriormente se obtuvieron los diferentes resultados descritos a continuación.

8.1.1 Textura

La Tabla 11 presenta los resultados obtenidos durante la prueba de textura en el suelo, se observan las variables C1 y C2 que corresponden a la densidad registrada a los 40 segundos y a las 2 horas de iniciada la determinación, respectivamente. En la Tabla 11 también se encuentran registrados las variables t1 y t2 que corresponden a las temperaturas en los mismos tiempos presentados anteriormente.

Tabla 11. Resultados de la prueba de textura con el hidrómetro de Bouyoucos

Tiempo	Parámetro	Densidad (g/L)	Parámetro	Temperatura (°C)
40 seg.	C1	26.27±0.25	t1	17.16 ±0.21
2 hrs.	C2	13.34 ±1.15 g/L	t2	18.53 ±0.25

Los resultados están expresados como la media de determinaciones por triplicado ± la desviación estándar.

Con estos resultados se aplicaron las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 para determinar los porcentajes de cada componente presente en el suelo. En la Tabla 12 se encuentran representados los porcentajes correspondientes a cada componente presente en la muestra de suelo. Posteriormente se utilizó el triángulo de textura (Figura 11) con el que se determinó el tipo de suelo.

El suelo usado en este trabajo presenta una textura propia de un suelo tipo franco arcilloso arenoso. Este resultado indica que el suelo no cuenta con el equilibrio óptimo entre arcilla, limo y arena. Es por ello que en los suelos cebaderos de la región de Almoloya con cada temporada de siembra el rendimiento se ve afectado debido a la compactación del suelo provocado por este desequilibrio.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Ruiz-Cobos (2016) menciona que los suelos que presentan una textura franco arenoso arcilloso o arcillo arenoso tienden a ocasionar que el suelo se comprima cuando son regadas, formando aglomeraciones y endurecimiento del suelo. Esto provoca dificultades en la germinación de la planta y la obtención de agua y nutrientes.

Tabla 12. Componentes de la muestra de suelo de Almoloya, Hidalgo.

Componente	Porcentaje (%)
Arcilla	27.74
Limo	26.85
Arena	45.41

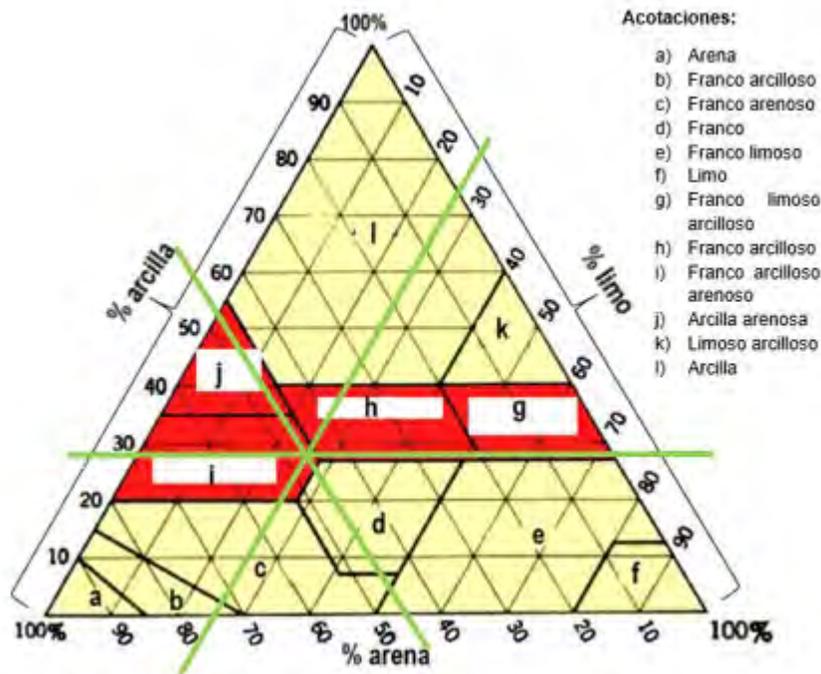


Figura 11. Localización del tipo de suelo (porcentajes obtenidos en color verde).

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

De acuerdo con Pieri (1995) la textura ideal para suelos destinados a la agricultura debe corresponder a un suelo con un porcentaje de arena, limo y arcilla entre un 30 y un 40%, es decir un suelo de tipo franco arcilloso el cual presenta un equilibrio entre estos 3 componentes (Figura 13, zona h). Caso contrario es la muestra del suelo de Almoloya, la cual se encuentra en la zona i (Figura 13), representando el desequilibrio entre los componentes.

Estos cambios en la textura del suelo además de tener un efecto negativo en el cultivo modifican la porosidad, el escurrimiento de agua y el contenido de materia orgánica presente (Tiessen, 1994; Reeves, 1997). Senbayram *et al.* (2015) mencionan que las deficiencias en la textura que presentan los suelos de cultivo pueden estar relacionadas con el uso intensivo a los que son sometidos y/o al uso de fertilizantes químicos.

La textura que presenta la muestra de suelo no es la ideal para el uso agrícola. Debido a esto se produce una retención de agua en suelo la cual dificulta que esta sea absorbida por la planta y formando encharcamientos, lo que genera el crecimiento de hongos afectando la producción de cebada.

8.1.2 Capacidad de Intercambio Catiónico

Aplicando la ecuación 5 se determinó la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la muestra de suelo cebadero de la región de Almoloya siendo de 19.38 Cmol/kg. La NOM-021-RECNAT-2000 menciona que la CIC que corresponde a un suelo fértil se encuentra entre 25 y 40 Cmol/kg. Esto indica que la CIC que presenta la muestra de suelo corresponde a un suelo medianamente fértil.

La muestra de suelo de la parcela evaluada presentó una mayor CIC en comparación con los presentados por Prieto-Méndez *et al.* (2012) para suelos de la región de Almoloya. Estos resultados pueden deberse a las diferencias entre los componentes del suelo (arcilla, limo y arena) que presentaron las parcelas evaluadas por Prieto-Méndez y la parcela evaluada en este estudio.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Dixon (2000) y Pierzynki *et al.* (1994) atribuyen a la textura del suelo como uno de los factores que influye en la CIC. Mencionan que una CIC media/baja se debe a la cantidad de arcillas y limo presentes en el suelo. Esto afecta la capacidad que el suelo presenta para liberar y absorber iones utilizados para la planta como nutrientes. Lo que llega a provocar que la planta no presente un crecimiento adecuado y que no tenga el rendimiento esperado.

De la misma forma algunos trabajos mencionan que los suelos agrícolas con una capacidad de intercambio catiónico bajo o medio presentan una cantidad de materia orgánica menor en comparación con suelos que tienen una capacidad de intercambio catiónico alto (Meyer y Arp, 1994; Li *et al.*, 1998; Johnson, 2002). Esta relación se debe a que en el suelo la fuente predominante de sitios de intercambio es la materia orgánica.

La CIC depende de la cantidad de MO y arcilla, por lo que si estos se ven afectados por prácticas agrícolas intensivas la CIC se verá afectada. Lo que llega a influir tanto en la nutrición del cultivo como en su rendimiento.

8.1.3 pH

En la Tabla 13 se muestra el pH obtenido de las muestras de suelo cebadero antes y después de la aplicación de los abonos verdes. El suelo sin tratamiento con abonos verdes presentó un pH de 6.9, lo cual es considerado como un suelo neutro de acuerdo a lo establecido por la NOM-021-RECNAT-2000. El pH presentó una disminución después de la aplicación de los abonos verdes en todos los tratamientos. El suelo con el tratamiento T06, presentó el valor más bajo de pH (6.2), correspondiendo a un suelo moderadamente ácido.

Álvarez (2006), Pulido *et al.* (2009), y Vera *et al.* (2009) reportaron que el intervalo de pH donde la cebada puede crecer adecuadamente va desde 5 hasta 8.5. Por lo que el suelo cebadero originario de Almoloya entra en un rango de pH donde la cebada puede crecer adecuadamente.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

La disminución de pH que presentaron las muestras de suelo después de ser tratados con abonos verdes puede indicar un aumento en la materia orgánica del suelo. Johnson (2002) y Pulido *et al.* (2009) reportaron que un pH moderadamente ácido en suelos agrícolas se debe a la materia orgánica presente en el suelo. Debido a que esta materia orgánica contiene una gran cantidad de grupos carboxilos lo que provoca una alta densidad de sitios ionizados y una liberación de H^+ lo que produce una disminución en el pH del suelo.

8.1.4 Iones intercambiables y conductividad eléctrica

En la Tabla 13 se observa la conductividad eléctrica (CE) obtenida de las muestras de suelo agrícola de la región de Almoloya. Se tiene que el TC presentó la mayor CE con 268 $\mu\text{s}/\text{m}$, mientras que con el T07 se obtuvieron 63 $\mu\text{s}/\text{m}$ siendo esta muestra la menor. Esto puede deberse al mayor contenido de iones (Ca^{2+} y K^+) que presentó el TC en comparación con los demás tratamientos.

Estos resultados indican que después de la aplicación de los abonos verdes, las leguminosas pudieron absorber estos iones. Lo que provoca una modificación en la conductividad eléctrica.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 la muestra de suelo cebadero antes de la aplicación de abonos verde presenta un contenido de iones muy bajo. De la misma manera Estrada-Herrera *et al.* (2017) reportaron resultados similares, obteniendo una cantidad de iones bajos en suelos agrícolas que son utilizados intensivamente.

Varios autores mencionan que la absorción de iones que tienen las leguminosas puede llegar a provocar deficiencias en algunos iones presentes en el suelo (William & Baker, 1992; Kurdali *et al.*, 2002; Sudduth *et al.*, 2003; Grzebisz *et al.*, 2013; Zörb *et al.*, 2014; Xue *et al.*, 2018). De acuerdo con Grzebisz *et al.* (2013) estas deficiencias pueden llegar a afectar el crecimiento de los cultivos.

La CE y la cantidad de iones que presenta el suelo después de la aplicación de abonos verdes se debe a la absorción que presentan las leguminosas en el suelo. Los problemas que tiene el suelo con respecto a su conductividad eléctrica y a la cantidad

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

de iones pueden modificarse mediante la adición de algunos fertilizantes orgánicos como lo son los restos de cosechas anteriores o la composta.

Tabla 13. Concentración de iones, pH y CE de los diferentes tratamientos.

	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{s/m}$)	Ca ²⁺ (Cmol/kg)	K ⁺ (Cmol/kg)
Tratamiento				
TC	6.9	268	0.19	0.123
T01	6.5	79	0.065	0.03
T02	6.4	119	0.095	0.033
T03	6.6	133	0.08	0.033
T04	6.5	140	0.075	0.051
T05	6.4	110	0.07	0.031
T06	6.2	145	0.085	0.043
T07	6.4	63	0.055	0.02

8.1.5 Densidad, porosidad y materia orgánica

En la Tabla 14 se muestran los resultados de densidad aparente (DA) de las muestras de suelo. Se observó que los tratamientos no tuvieron efecto significativo ($p>0.05$) sobre la densidad aparente.

Estos resultados indican una densidad aparente media de acuerdo a los valores máximos y mínimos obtenidos por Márquez *et al.* 2004, Bronik y Lal (2005) y Pulido *et al.* (2009) para esta región en el estado de Hidalgo (entre 1.50 y 1.05 g/mL).

La densidad aparente (DA) tiene una relación con otras características del suelo como la porosidad y la materia orgánica. Si la DA aumenta, la compactación se incrementa y limita el crecimiento de raíces, la obtención de nutrientes y la absorción de agua. Por lo que podría ser considerada como una forma rápida de conocer el estado del suelo de cultivo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

El porcentaje de porosidad más alto significativamente ($p < 0.05$) fue observado en T06 y T01, este último no presentó diferencia significativa ($p > 0.05$) con T02, T03, y T04.

Esta diferencia tal y como lo menciona González-Barrios *et al.* (2011) y Meza-Pérez *et al.* 2003 puede deberse a la cantidad de materia orgánica presente en el suelo después de la aplicación de abonos verdes. Ya que el porcentaje de porosidad que presentan los suelos de cultivo está relacionado tanto con la materia orgánica como con la cantidad de carbono en el suelo

De acuerdo con Osuna-Ceja *et al.* (2006), Li *et al.* (2009), así como Muhammad y Rattan, (2009) la porosidad debajo del 50% afecta la captación y retención de agua del suelo, lo que puede llegar a influir en la producción del cultivo.

En la Tabla 14 están presentes los resultados de la materia orgánica y la cantidad de carbono presente en las muestras de suelo, donde se presentó una diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en la cantidad de materia orgánica y en la cantidad de carbono orgánico. Estos resultados presentan similitud con los reportados por Estrada-Herrera *et al.* (2017) para suelos agrícolas que tienen un uso intensivo.

Este menor contenido de materia orgánica en el TC puede estar influenciado por el nitrógeno fijado durante la aplicación de los abonos verdes. Xu *et al.* (2013) y Mohanty *et al.* (2011) mencionan que una fijación deficiente de nitrógeno puede influir en la cantidad de materia orgánica en el suelo, lo que a su vez llega a afectar la inmovilización del nitrógeno para su posterior aprovechamiento por la planta.

Como se observó, la DA, porosidad y MO se encuentran relacionadas por lo que es importante conocer los cambios que tiene la DA o la porosidad ya que presentan una opción para conocer rápidamente el estado general del suelo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Tabla 14. Densidad aparente y real, porosidad, MO y CO de los tratamientos.

	Densidad aparente (g/mL)	Densidad real (g/mL)	Porosidad (%)	Materia orgánica (%)	Carbono orgánico (%)
TC	1.25 ± 0.01 ^a	2.25	44.56 ± 0.49 ^c	2.65 ± 0.67 ^b	1.54 ± 0.67 ^b
T01	1.20 ± 0.01 ^a	2.31	48.66 ± 1.56 ^{ab}	3.02 ± 0.06 ^{ab}	1.75 ± 0.06 ^{ab}
T02	1.25 ± 0.09 ^a	2.3	45.77 ± 3.75 ^{bc}	2.80 ± 0.31 ^{ab}	1.62 ± 0.31 ^{ab}
T03	1.20 ± 0.04 ^a	2.24	46.63 ± 1.73 ^{bc}	2.58 ± 0.18 ^b	1.50 ± 0.18 ^b
T04	1.22 ± 0.05 ^a	2.23	45.52 ± 2.32 ^{bc}	2.80 ± 0.18 ^{ab}	1.62 ± 0.18 ^{ab}
T05	1.24 ± 0.03 ^a	2.27	45.21 ± 1.3 ^{bc}	2.95 ± 0.12 ^{ab}	1.71 ± 0.12 ^{ab}
T06	1.25 ± 0.04 ^a	2.62	52.26 ± 1.54 ^a	3.32 ± 0.06 ^a	1.92 ± 0.06 ^a
T07	1.22 ± 0.02 ^a	2.29	46.68 ± 1.01 ^{bc}	2.57 ± 0.12 ^b	1.51 ± 0.12 ^b

Los resultados están expresados como la media de determinaciones por triplicado ± la desviación estándar (excepto densidad real).

8.2 Siembra de leguminosas

En la Tabla 15 se encuentra el crecimiento que presentaron las leguminosas durante las 7 semanas desde su siembra hasta antes de su floración. En el primer día se sembraron las leguminosas distribuyéndolas en cada una de las macetas y fueron regadas con 250 mL.

A partir de la primera semana el T01 empezó a presentar los primeros brotes en la mayoría de las macetas, mientras que los demás tratamientos solo presentaban brotes en algunas. Durante la segunda semana se observó que los tratamientos del T02 al T06 presentaron sus primeros brotes. Durante este periodo el suelo comenzó a formar aglomerados causando que las semillas no pudieran absorber por completo el agua.

De la misma forma en las macetas se formaron zonas húmedas debido a la retención de agua, causado por la textura del suelo. Esto afectó tanto al suelo como a algunas semillas, lo que originó la aparición de moho, el cual fue eliminado removiendo dicha zona de la maceta.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Durante la tercera semana el T01 presentó una planta más desarrollada y abundante a comparación de los demás tratamientos. Los cuales presentaron sus primeros brotes como en el caso de los T02 y T03.

A partir de la cuarta semana se observó que el T01 presentó una abundante cantidad de plantas en crecimiento. Mientras que en los tratamientos que contenían frijol, se observó que esta leguminosa destacó desarrollándose más y creando un efecto competitivo influyendo en el crecimiento de las leguminosas con las que se encontraba. El T07 tardó más en presentar un crecimiento, siendo esta semana en donde los brotes se comenzaron a presentar.

Durante la quinta semana se mostró un notable y abundante desarrollo de las leguminosas en los tratamientos con frijol (T04 y T05). Mientras que el T07 presentó sus primeras plantas en desarrollo. Con esto se pudo observar que este tratamiento presentó mayor efecto competitivo al tener la mezcla de las tres leguminosas (frijol, soya y alfalfa).

Para la sexta semana la mayoría de los tratamientos presentó un abundante crecimiento. El T07 fue el tratamiento en donde hubo un menor crecimiento de las leguminosas, así como una menor cantidad.

Para la séptima semana las leguminosas se extrajeron de raíz evitando que el suelo de las macetas entrara en contacto con el suelo del invernadero. Se cortaron en trozos pequeños y posteriormente fueron reincorporados al suelo tratando de emular el proceso de barbecho utilizado en los campos de cultivo.

Posteriormente se dejaron 30 días sin uso ni riego para la desintegración de las plantas para su aprovechamiento en la siembra de cebada.

Tabla 15. Evolución del crecimiento de los abonos verdes en el suelo de Almoloya.

Día	Imagen	Tratamiento	Observaciones
------------	---------------	--------------------	----------------------

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

7		T01	Se presentaron los primeros brotes del frijol. También se pudo observar las aglomeraciones formadas después del riego.
14		De abajo hacia arriba: T01, T02. T03. T04. T05. T06 y T07	El T01 presentó crecimiento más rápido que los demás tratamientos. El T03 y el T06 muestran sus primeros brotes, mientras que el T02 no presenta ningún brote.
18		De izquierda a derecha: T01 y T02	Se observó una diferencia entre el crecimiento del T01 y el T02. Mientras que el T02 presentó sus primeros brotes, el T01 presenta un crecimiento ya avanzado.
28		De izquierda a derecha: T01, T02. T03. T04. T05. T06 y T07	Se observó el crecimiento abundante del T01, así como en los tratamientos en los que está leguminosa se encuentra. Siendo esta la dominante en dichas mezclas.
42		De izquierda a derecha: T01, T02, T03, T04 y T05	Se observó un crecimiento tardío de las leguminosas en los tratamientos 2 y 7.
49		Derecha e izquierda T01	Se muestra el ejemplo del corte y la incorporación de las leguminosas en el suelo.

Durante este periodo también se observó el efecto que tuvo la textura del suelo en los cultivos, debido a que, al ser un suelo de tipo franco arcilloso arenoso al ser regado con agua se comprimió y se endureció, lo que afectó la salida de los brotes del suelo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Herridge & Rose (2000) sugieren que la rapidez que tiene el frijol en su crecimiento se debe a que los requerimientos para su germinación y su maduración no son tan exigentes como los que presentan la soya o la alfalfa.

Por otra parte, Mohanty *et al.* (2011), así como Meza-Pérez & Geissert-Kientz (2003) mencionan que el crecimiento de los cultivos (en este caso las leguminosas) está relacionado tanto con la clase de raíz que presenta la planta como con la porosidad que tiene el suelo utilizado para el cultivo.

Debido a que si el suelo presenta una compactación que afecte el crecimiento de las raíces también se verá afectada la producción y el desarrollo del cultivo.

8.3 Nitrógeno Total y NO_3 en el suelo

En la Tabla 16 se encuentran las cantidades de nitrógeno total del suelo cebadero procedente de Almoloya Hidalgo, en donde el T07 presentó la mínima cantidad de nitrógeno total, mientras que en el T06 obtuvo la mayor.

Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre las cantidades de nitrógeno total medido en los diferentes tratamientos.

De acuerdo con lo presentado en la NOM-021-RECNAT-2000, la cantidad de nitrógeno total en las muestras las clasifica dentro de los suelos volcánicos con un bajo contenido de nitrógeno, inclusive antes de la aplicación de los abonos verdes.

De la misma forma en la Tabla 16 se encuentra la cantidad de nitratos para cada uno de los tratamientos, teniendo que el T06 presentó la mayor concentración de nitratos, mientras que el T07 la menor.

Estos resultados sugieren una menor fijación de nitrógeno en los suelos del T07 debido posiblemente al efecto competitivo que tuvieron las 3 leguminosas utilizadas en este tratamiento (frijol, alfalfa y soya).

Kai-yun *et al.* (2015) y Abaidoo & Kessel, (1989) mencionan que algunas leguminosas presentan comportamientos competitivos lo que puede perjudicar la fijación de

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

nitrógeno que tienen, la cantidad de agua y nutrientes que absorben. Lo que perjudica el crecimiento y la producción que puede tener el cultivo.

Tabla 16. Cantidad de nitrógeno total y nitratos en las muestra de suelo.

	Nitrógeno total (%)	NO₃ (ppm)
TC	0.073 ± 0.004 ^a	110
T01	0.067 ± 0.023 ^a	51
T02	0.070 ± 0.008 ^a	69
T03	0.081 ± 0.008 ^a	54
T04	0.078 ± 0.004 ^a	92
T05	0.073 ± 0.012 ^a	91
T06	0.089 ± 0.004 ^a	130
T07	0.065 ± 0.012 ^a	28

Ejemplo de ello es el T07, compuesto por la mezcla de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), alfalfa (*Medicago sativa*) y soya (*Glycine max.*) en el cual se obtuvo una menor cantidad de nitratos en el suelo, así como un menor crecimiento de las leguminosas.

Por otro lado, tenemos que varios autores (LaRue, 1978; Herridge & Bergersen, 1988; Hardarson, Golbs & Danso, 1989; Herridge & Rose, 2000; Kai-yun X. *et al.*, 2015; Lin-Wang *et al.*, 2018) han utilizado la mezcla de alfalfa (*Medicago sativa*) y soya (*Glycine max.*) para el mejoramiento de suelos y de la producción en otros cultivos como el trigo, el arroz y la cebada. Reportando una buena fijación de nitrógeno en suelos agrícolas que presentan deficiencia de este nutriente en comparación con las leguminosas por separado.

Esto se puede ver al comparar los resultados obtenidos por el T06 y por los tratamientos T02 y T03 donde se obtuvo una mayor cantidad de nitratos en el tratamiento compuesto por las dos leguminosas en comparación con los tratamientos compuestos por las leguminosas individuales.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Povorov & Tikhonovich (2003), Russelle *et al.* (2001) y Jia *et al.* (2013) mencionan que además de la fijación de nitrógeno que presenta la mezcla de alfalfa (*Medicago sativa*) y soya (*Glycine max.*), estas dos leguminosas también presentan efectos benéficos en la materia orgánica y en la porosidad de los suelos. Este comportamiento se muestra en la Tabla 14 en donde el T06 presentó la mayor cantidad de materia orgánica y porosidad.

La disminución de nitratos que presentaron los demás tratamientos en comparación con el TC se puede deber a la ausencia de nódulos en las raíces de las leguminosas en esos tratamientos. De acuerdo con varios autores (Bliss *et al.*, 1989; Herridge & Rose, 2000; Hungria & Vargas, 2000) la ausencia de estos nódulos en leguminosas indica una deficiencia en los microorganismos presentes en el suelo.

De acuerdo con MacKenna *et al.* (2018) esta disminución en el desarrollo de nódulos en las raíces puede ser provocada por la textura y la porosidad que presentan los suelos en donde se desarrollan las leguminosas.

Se observó un aumento en la cantidad de nitratos en el suelo en el T06. Sin embargo es necesario continuar observando los cambios que presenta el suelo en este apartado durante más de un ciclo de cultivo para tener una idea más clara acerca de los beneficios que presentan estas leguminosas en el suelo.

8.4 Indicadores agronómicos de la cebada

En la Tabla 17 se presentan los indicadores agronómicos medidos en la cebada (tamaño de espiga, número de granos y el tamaño de la cebada inicial y final) obteniendo diferencias significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.05$).

Teniendo que, de forma general el tratamiento control (TC) presentó el menor tamaño de tallo (inicial y final), menor tamaño de espiga y la menor cantidad de números en la espiga, mientras que el T06 presentó las mayores.

Tabla 17. Indicadores agronómicos de la cebada en los diferentes tratamientos.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

	Tamaño de espiga (cm)	de Número de granos por espiga	Tamaño de tallo de cebada (cm)	
			Semana 1	Semana 15
TC	3.21 ± 0.30 ^f	15.57 ± 1.23 ^f	2.52 ± 0.19 ^d	25.64 ± 0.86 ^e
T01	10.80 ± 0.42 ^e	18.31 ± 1.35 ^e	3.13 ± 0.26 ^c	32.94 ± 0.42 ^d
T02	15.37 ± 0.63 ^b	18.03 ± 1.18 ^e	3.19 ± 0.27 ^c	35.39 ± 0.66 ^b
T03	13.44 ± 0.98 ^c	21.06 ± 1.47 ^{bc}	3.61 ± 0.26 ^b	33.23 ± 0.44 ^d
T04	10.54 ± 0.74 ^e	21.33 ± 1.79 ^b	2.48 ± 0.17 ^d	34.59 ± 0.25 ^c
T05	11.42 ± 0.55 ^d	19.09 ± 1.16 ^{de}	2.67 ± 0.18 ^d	33.03 ± 0.56 ^d
T06	18.32 ± 0.79 ^a	24.61 ± 1.55 ^a	4.46 ± 0.26 ^a	40.20 ± 0.49 ^a
T07	10.81 ± 0.79 ^e	19.87 ± 1.6 ^{cd}	2.66 ± 0.16 ^d	28.36 ± 0.46 ^e

Los resultados están expresados como la media de las determinaciones ± la desviación estándar.

Estos datos nos indican que los tratamientos con abonos verdes lograron incrementar y mejorar la producción de cebada. Este incremento en el tamaño del tallo tiene un efecto en el tamaño de espiga afectando directamente al contenido de granos de cebada por espiga al final de su desarrollo. Se puede destacar que los tallos de cebada en los suelos tratados con abonos verdes presentaron un color verde brillante, con una firmeza que evitó el encamado de la planta. Mientras que el tallo del TC presentó un color verde pálido durante su desarrollo.

En la Figura 14 se observa detalladamente el crecimiento que presentó el tallo de cebada en los tratamientos durante el cultivo. El T06 presentó el mayor desarrollo de tallo desde las primeras semanas del tratamiento, manteniendo el mayor tamaño hasta el final del cultivo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

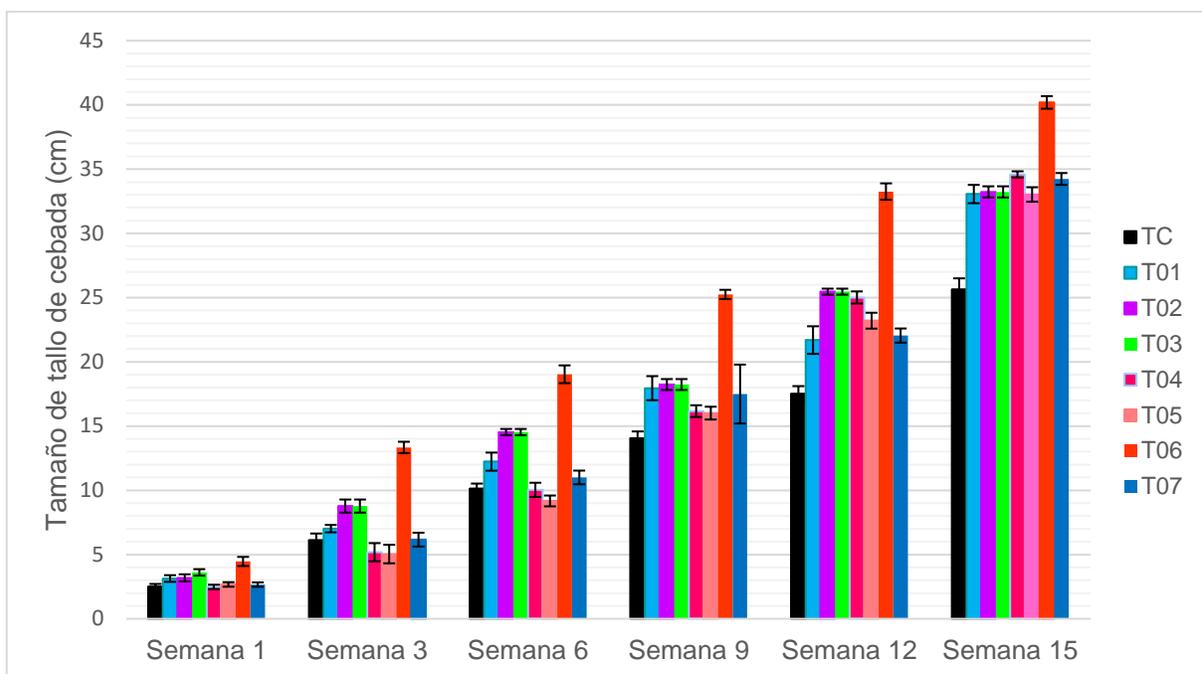


Figura 12. Evaluación del crecimiento de la cebada con respecto al tiempo

El tamaño que presentó el cultivo de cebada en el TC se debió a los porcentajes de porosidad y materia orgánica (Tabla 14). De acuerdo con varios autores (Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2009; Muhammad y Rattan, 2009; Mohanty *et al.*, 2011) las cualidades que presenta el suelo de cultivo pueden influir en el crecimiento que tiene la cebada.

De acuerdo con Janzen *et al.* (1992), Quiroga *et al.* (2006) y Olesen *et al.* (2009) las características que presenta el suelo del TC también influye en la cantidad de nutrientes que puede absorber la planta.

Las características que presentó el TC pueden llegar a afectar el crecimiento del tallo de cebada, en la espiga e influir en la cantidad de granos obtenidos al final del desarrollo de la cebada.

En la Tabla 18 se observa la cantidad de granos totales de cebada obtenidos en cada tratamiento, el peso que tienen estos granos así como su porcentaje de germinación.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

En la primera columna se muestran los granos totales cosechados por cada tratamiento. Al no adquirir los nutrientes necesarios el TC presentó granos en menor cantidad, con tamaño menor y más delgados, influyendo de esta manera en el peso de los mismos.

Mientras que el T06 fue el tratamiento que presentó la mayor cantidad de granos totales con un tamaño y color característico de la cebada. Siendo este último tratamiento el que se destacó por también registrar el mayor peso de granos en comparación con los otros tratamientos tratados con abonos verdes.

Esta diferencia en la producción del grano de cebada se puede deber a las características presentadas por el TC (porosidad, materia orgánica, y textura). López-Castañeda (2011) y González *et al.* (2010) explican que la textura llega a tener una importante influencia en el rendimiento del grano.

Shepherd *et al.* (1987) y Quiroga *et al.* (2006) mencionan que si la textura y la porosidad del suelo provocan una deficiencia en la cantidad de agua que absorbe el cultivo durante la etapa de llenado del grano, puede haber una reducción en el rendimiento que presenta el cultivo.

Esta diferencia en la producción de granos de cebada en el TC pudo deberse a una deficiencia hídrica provocado por el poco drenaje del suelo producto de la textura y la porosidad que presenta.

Tabla 18. Producción y germinación de la cebada en cada tratamiento.

	Granos totales	Peso total (g)	Germinación (%)
TC	450	10.4	96.67 ± 5.77 ^a
T01	698	21.8	96.67 ± 5.77 ^a
T02	933	30.4	96.67 ± 5.77 ^a
T03	798	22.6	91.67 ± 2.89 ^a

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

T04	989	31.2	96.67 ± 5.77 ^a
T05	985	31.6	90.00 ± 5.00 ^a
T06	1095	38.4	96.67 ± 5.77 ^a
T07	680	20.2	88.33 ± 2.89 ^a

En la tercera columna (Tabla 18) se muestran los resultados de la prueba de germinación realizada con la cebada cosechada de cada uno de los tratamientos. Donde no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($P \leq 0.05$). Los resultados muestran que en todos los tratamientos se obtuvo una capacidad germinativa mayor al mínimo establecido por la NMX-FF-043-SCFI-2003 (85%) para cebada maltera destinada a la producción de cerveza.

Estos resultados indican que la cebada cosechada con los abonos verdes, cuenta con la capacidad germinativa mínima establecida por la NMX-FF-043-SCFI-2003 para su potencial uso como malta.

9.- Conclusiones

- De acuerdo a los análisis realizados se determinó que el suelo se encuentra clasificado como franco arenoso arcilloso. Esto provoca el desarrollo de aglomeraciones y provoca una alta retención de agua lo que influyó en el crecimiento que tuvieron las leguminosas.
- El suelo presentó una deficiencia en el contenido de limo lo que indica una falta de materia orgánica provocando una disminución en la porosidad, lo que llega a influir en el desarrollo que presentan los cultivos.
- En cuanto la CIC la muestra de suelo presento una fertilidad media lo que indica que el suelo presenta un buen intercambio de iones. Sin embargo la conductividad eléctrica señaló que existía una baja concentración de iones en el suelo.
- El pH que presento el suelo se vio influenciado por la cantidad de materia orgánica que contiene, sin embargo, se encontró dentro del rango de crecimiento óptimo de la cebada.
- Durante el crecimiento de las leguminosas el tratamiento T01 presentó un mayor crecimiento en menor tiempo en comparación con los demás tratamientos usados como abonos verdes.
- A pesar de no presentar diferencias significativas en el nitrógeno total, el tratamiento compuesto por el frijol y alfalfa (T06) fue el único tratamiento que presento un aumento en el contenido de nitratos (20 ppm) en comparación con el TC.
- En la cebada se presentó un aumento en el crecimiento de tallo y espiga en comparación con el TC. Siendo el T06 el que presentó un mayor tamaño de tallo y espiga, así como una mayor cantidad de granos de cebada.
- Los resultados obtenidos indican que el tratamiento compuesto por la mezcla de soya y la alfalfa representa una buena alternativa como abono verde en suelos destinados a la agricultura.

10.- Perspectivas

- Realizar el análisis del suelo tratado con abonos verdes durante un periodo de tiempo prolongado para poder observar si existen mayores modificaciones en las características del suelo.
- Incorporar paja o tezontle en el suelo para mejorar el drenaje de agua y evitar el endurecimiento excesivo en las macetas.
- Complementar los estudios realizando un análisis microbiológico para determinar los microorganismos fijadores de nitrógeno presentes en el suelo durante las etapas del crecimiento del cultivo.
- Realizar una siembra simultánea de las leguminosas y la cebada para evaluar si existe algún efecto benéfico entre los dos cultivos y determinar que método causa mayor beneficio en la producción de cebada.
- Utilizar abonos orgánicos (estiércol de animales) en los suelos cebaderos con el fin de evaluar los beneficios que presentan en comparación con los abonos verdes.
- Evaluar el uso de plantas presentes en cuerpos de agua de la región (por ejemplo, la lenteja de agua (*Lemna minor*)) como abonos verdes para reducir el impacto económico que presenta el uso de leguminosas.
- Realizar escalamiento a nivel de campo para evaluar las diferencias que existen entre la producción en maceta y en campo y el efecto que tiene sobre la calidad y producción de la cebada.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Referencias

- Abaidoo, R., & Kessel, C. (1989). N-Uptake, N₂-fixation and rhizobial interstrain competition in soybean and bean, intercropped with maize. *Soil Biol. Biochem.*, 21(1), 155-159.
- Adams, M. (1995). *Fundamentos de química de suelos*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.
- Agriculture and Horticulture Development Board. AHDB. (2016). *Cereals & Oilseeds*. Recuperado el 20 de 08 de 2016, de <https://cereals.ahdb.org.uk/media/186381/g67-barley-growth-guide.pdf>
- Aguilar, J., & Schwentesius, R. (2004). *La producción de cebada maltera en México. Venta comparativa no capitalizada*. Reporte de investigación No. 72, Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Alcasena Gurupegui, M. (2012). *Estudio de la afección del nematodo de las agallas del cereal (Anguina sp), en cebada*. Universidad Pública de Navarra.
- Álvarez, P. A. (2006). Production systems of malting barley (*Hordeum vulgare* L.) in Zacatecas state, Mexico. *Agricultura Técnica en México*, 32(2), 181-190.
- Arnáiz, C., Isac, L., & Lebrato, J. (2000). Determinación de la biomasa en procesos biológicos. *TECNOLOGÍA DEL AGUA* (205), 45-52.
- Arshad, M. A., & Gill, K. S. (1997). Barley canola and wheat production under different tillage-fallow-green manure combinations on a clay soil in a cold, semiarid climate. *Soil & Tillage Research* (43), 263-275.
- Askengard, M., Olesen, J. E., & Kristensen, K. (2005). Nitrate leaching from organic arable crop rotations: effect of location, manure and catch crop. *Soil use Manage* (21), 181-188.
- Barbaro, L. A., Karlanian, M. A., & Mata, D. A. (21 de octubre de 2014). *Importancia del pH y la Conductividad Eléctrica (CE) en los sustratos para plantas*. Obtenido

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria:
<https://inta.gov.ar/documentos/importancia-del-ph-y-la-conductividad-electrica-ce-en-los-sustratos-para-plantas>

- Bliss, F. A., Pereira, P. A., Araujo, R. S., Henson, R. A., Kmiecik, K. A., McFerson, J., Da Silva, C. C. (1989). Registration of five high nitrogen fixing common bean germplasm lines. *Crop Sci.* (29), 240-241.
- Boulding, J. R. (1995). *Description and sampling of contaminated soils. A field guide* (Segunda Ed.). Lewis publishers.
- Carter, M. R., Gregorich, E. G., Anderson, D. W., Doran, J., Janzen, H. H., & Pierce, F. J. (1997). Concepts of soil quality and their significance. *Soil quality for crop production and ecosystem health*.
- Casas-Flores, R. (2011). *El suelo de cultivo y las condiciones climáticas*. España: Paraninfo.
- Cerón-Rincón, L. E., & Aristizábal-Gutiérrez, F. A. (julio de 2012). Dinámica del ciclo el nitrógeno y fósforo en suelos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 285-295.
- Cherr, C. M., Scholberg, J. M., & McSorley, R. (2006). Green manure approaches to crop production: a synthesis. *Agronomic Journal* (98), 302-398.
- Cormack, M. F., Sheperd, M., & Wilson, D. W. (2003). Legume species and management for stockless organic farming. *Biol. Agric. Hortic.* (21), 383-398.
- Couëdel, A., Alleto, L., Tribouillois, H., & Justes, É. (2018). Cover crop crucifer-legume mixtures provide effective nitrate catch crop and nitrogen green manure ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (254), 50-59.
- Dahlin, A. S., & Stenberg, M. (2010). Cutting regime effects the amount and allocation of symbiotically fixed N in green manure leys. *Plant Soil* (331), 401-412.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- De Fries, R., Mondal, P., Singh, D., Agrawal, I., Fanzo, J., Remans, R., & Wood, S. (01 de Julio de 2016). Synergies and trade-offs for sustainable agriculture: Nutritional yields. *Global Food Security*.
- Demir, S., & Akkopru, A. (2007). Using of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) for biocontrol of soil-borne fungal plant pathogens. *Biological control of plant diseases*, 17-37.
- Dendy, D. A., & Dobraszczyk, B. J. (2004). Cereales y productos derivados. En *Química y tecnología* (págs. 87-107; 127-130; 341-358; 380-382; 389-394). Zaragoza, España: Acribia S.A.
- Dixon, J. B. (2000). Functional roles of soil minerals. En R. Quintero-Lizaola, T. Reyna-Trujillo, L. Corlay-Chee, A. Ibáñez-Huerta, & N. E. García-Calderón, *La edafología y sus respectivas al siglo XXI* (pág. 434). México.
- Dixon, R., & Kahn, D. (2004). Genetic regulation of biological nitrogen fixation. *Nature Reviews Microbiology* (2), 621-631.
- Doran, J. W., & Parkin, B. T. (1994). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Science Society of America*, 35.
- Dumanski, J., Gameda, S., & Pieri, C. (1998). *Indicators of land quality and sustainable land management*. Washington DC: The World Bank.
- Efolliott, P., & Thames, J. (1983). *Recolección, manipuleo, almacenaje y pretratamientos de las semillas de Prosopis en América Latina*. Roma, Italia.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Romero, C., Guxmán-Plazola, R., Almaraz-Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51, 813-831.
- Etaio Alonso, I. (2008). Cereales y derivados. En V. M. Rodríguez Rivera, *Bases de la Alimentación Humana*. (págs. 5-16). España: Netbiblo.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- FAO. (1992). *Technical paper 1: Soil classification and characterization*. Obtenido de The AFNETA alley farming training manual - Volume 2: Source book for alley farming research: <http://www.fao.org/wairdocs/ilri/x5546e/x5546e04.htm>
- FAO. (2000). *Mejorando la nutrición a través de huertos y granjas familiares*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Manual de capacitación para trabajadores de campo en América Latina y el Caribe: <http://www.fao.org/docrep/V5290S/v5290s00.htm#TopOfPage>
- FAO. (2001). Trigo regado Manejo del cultivo. Roma.
- FAO. (2008). *Base referencial mundial del recurso suelo*. Obtenido de informe sobre recursos mundiales de suelo: <http://www.fao.org/3/a-a0510s.pdf>
- FAO. (2016). *Portal de suelos de la FAO*. Recuperado el 2018, de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Propiedades físicas el suelo: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/>
- Fassbender, H. W. (1968). *Química de suelos*. Turrialba, Costa Rica.
- Fernández, F., Gepts, P., & López, M. (1986). *Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (Phaseolus vulgaris L.)*. Cali, Colombia: CIAT.
- Fernández-Linares, L. C., Rojas-Avelizapa, N. G., Roldan-Carrilo, T. G., Ramírez-Islas, M. E., Zegarra-Martínez, H. G., Uribe-Hernández, R., Arce-Ortega, J. M. (2006). *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. (S. d. Naturales, Ed.) Obtenido de SEMARNAT: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CG008215.pdf>
- Flores-Delgadillo, L., & Alcalá-Martínez, J. R. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de Física de Suelos. Ciudad de México, México.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Freitag, C. A., Chang, L., Clegg, C. D., & Prosser, J. I. (2005). Influence of inorganic nitrogen management regime on the diversity of nitrite-oxidizing bacteria in agricultural grassland soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 71, 8323-8334.
- Galatini, J. A. (2002). *Contenido y calidad de las fracciones orgánicas del suelo bajo rotaciones con trigo en la región semiárida pampeana* (Vol. 30). Argentina: INTA.
- García Moreno, J., & Gordillo Rivero, A. J. (2015). *Labores culturales y recolección de los cultivos ecológicos*. España: Paraninfo.
- García, F., Hill, M., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Rucks, L. (2004). Propiedades físicas del suelo. Montevideo, Uruguay.
- García-Álvarez, N. C., González-Rivas, C., & Mena-Hernández, L. (marzo de 2013). *Recomendaciones técnicas para obtener mayor productividad del cultivo del frijol*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias : <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/3588/4035%20Recomendaciones%20T%C3%A9cnicas%20para%20obtener%20mayor%20productividad%20de%20Frijol%20en%20la%20Costera%20de%20Nayarit.pdf?sequence=1>
- García-Rodríguez, J. J., Gámez-Vázquez, F. P., Zamora-Díaz, M., Solano-Hernández, S., & Gámez-Vázquez, A. J. (Noviembre de 2008). *Guía para producir semilla de cebada maltera en surcos en el bajío*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- García-Santiago, J. C., Valdez-Aguilar, L. A., Hernández-Pérez, A., Cartmill, A. D., & Valenzuela-García, J. (2017). Depth and Duration of Flooding Affect Growth, Yield and Mineral Nutrition of Subirrigated Bell Pepper. *Hort. Science*, 52(2), 295-300.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Gil, A., Miravalles, M., Moreyra, F., & Conti, V. (2016). *Calidad industrial de la cebada cervecera: impacto de la fecha de siembra*. Obtenido de agroUNS: https://servicios.uns.edu.ar/institucion/files/1_AP_0_1424.pdf
- Gliessman, S. R. (2002). *Agroecología: procesos ecológicos en agricultura sostenible*. Costa Rica: CATIE.
- Gómez, M. R., Zamora, M. D., & Arreola, T. J. (2006). *El sistema de labranza de conservación en el cultivo de cebada de temporal en el estado de Hidalgo*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Centro, Pachuca Hidalgo, México.
- González, M., Zamora Díaz, M., & Solano Hernández, S. (2016). Evaluación agronómica y física en líneas avanzadas de cebada maltera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 159-171.
- González, A., Bermejo, V., & Gimeno, B. S. (2010). Effect of different physiological traits on grain yield in barley grown under irrigated and terminal water deficit condition. *The Journal of Agricultural Science*, 148, 319-328.
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., Sánchez-Cohen, I., López-Santos, A., & Valenzuela-Núñez, L. M. (2011). Caracterización de la porosidad edáfica como indicador de la calidad física del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29, 369-377.
- Grzebisz, W., Gransee, A., Szczepaniak, W., & Diatta, J. (2005). The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. *Journal of Plant Nutrition, Soil Science*, 176, 355-374.
- Guamán-Jiménez, R. (1991). *Morfología y Manejo del Cultivo de Soya*. Quito, Ecuador: INIAP.
- Guerrero García, A. (1999). *Cultivos herbáceos extensivos* (Sexta ed.). Mundi-Prensa.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Guevara, G. S. (12 de noviembre de 2012). *Indicadores físicos de calidad de suelos: densidad aparente*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria: <https://inta.gob.ar/documentos/densidad-aparente>
- Hardarson, G., Bliss, F. A., Cigales-Rivero, M. R., Henson, R. A., Kipe-Nolt, J. A., Longeri, L., Tsai, S. M. (1993). Genotypic variation in biological nitrogen fixation by common bean. *Plant Soil* (152), 59-70.
- Hardarson, G., Golbs, M., & Danso, S. K. (1989). Nitrogen fixation in soybean (*Glycine Max L. Merrill*) as affected by nodulation patterns. *Soil Biol. Biochem.*, 21(6), 783-787.
- Herridge, D. F., & Bergersen, F. J. (1988). Symbiotic Nitrogen Fixation. En J. R. Wilson (Ed.), *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems* (págs. 46-65). Wallingford, Reino Unido.
- Herridge, D., & Rose, I. (2000). Breeding for enhanced nitrogen fixation in crop legumes. *Field Crops Research* (65), 229-248.
- Horra-Ruiz, J. L., Serrano-Comino, F., & Carlevaris-Muñiz, J. J. (2008). En J. L. Horra-Ruiz, F. Serrano-Comino, & J. J. Carlevaris-Muñiz, *Estudio de los suelos del Campo de Calatrava (Ciudad Real) y sus condiciones de fertilidad*. (págs. 113-115). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Hu, B., Shen, L., Xu, X., & Zheng, P. (2011). Anaerobic ammonium oxidation (anammox) in different natural ecosystems. *Biochemical Society transactions*, 39(6), 1811-1816.
- INEGI. (2009). *Almoloya, Hidalgo*. Obtenido de Puntuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/13/13007.pdf
- INEGI. (2018). *Climatología*. Obtenido de Mapas: <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/climatologia/>

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- INIFAP. (1997). *Guía para cultivar cebada maltera de temporal en el estado de Hidalgo*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- INIFAP. (2008). *Guía para producir semilla de cebada maltera*. Celaya, Guanajuato, México.
- ISTA. (1976). International rules for seed testing. *Seed Science and Technology*, 4, 49-177.
- Jackson, M. L. (1982). *Análisis químico de suelos* (Cuarta ed.). Omega.
- Janzen, H. H., & Schaalje, G. B. (1992). Barley response to nitrogen and non-nutritional benefits of legume green manure. *Plant and Soil*, 142, 19-30.
- Jia, R. Z., Wang, E. T., Liu, J. H., Li, Y., Gu, J., Yuan, H. L., & Chen, W. X. (2013). Effectiveness of different Ensifer melilotu strain-alfalfa cultivar combinations and their influence on nodulation of native rhizobia. *Soil Biology & Biochemistry*(57), 960-963.
- Jiménez-Galindo, J. C., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Efecto de la densidad de cosecha en rendimiento de frijol pinto saltillo de riego en Chihuahua, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(2), 243-257.
- Johnson, C. E. (2002). Cation exchange properties of acid soils of the northeastern USA. *European Journal of Soil Science*, 53, 271-282.
- Jordán López, A. (2005). *Manual de edafología*. Universidad de Sevilla, Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química.
- Kai-yun, X., Xiang-lin, L., Feng, H., Ying-jun, Z., Li-quiang, W., Hannaway, D. B., Fadul, G. M. (2015). Effect of nitrogen fertilization on yield, N content, and nitrogen fixation of alfalfa and smooth bromegrass grown alone or in mixture in greenhouse pots. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(9), 1864-1876.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America*.
- Kaufmann, T. (10 de agosto de 2015). Sustainable livestock production: Low emission farm – The innovative combination of nutrient, emission and waste management with special emphasis on Chinese pig production. *Animal Nutrition*, 1, 104–112.
- Korsaeth, A. (2012). N, P, and K budgets and changes in selected topsoil nutrients over 10 years in a long-term experiment with conventional and organic crop rotations. *Appl. Environ. Soil Sci.* Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1155/2012/539582>
- Kumar Sharma, M. (2017). *Guía para la identificación y el manejo de las deficiencias de nutrientes en cereales*. (A. Tasistro, I. Ortiz-Monasterio, Edits., H. Altamirano Márquez, & I. Ortíz-Monasterio, Trads.) México, México: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo.
- Kurdali, F., Al-Ain, F., & Al-Shamma, M. (2002). Nodulation, dry matter production, and N₂ fixation by fababean and chickpea as affected by soil moisture and potassium fertilizer. *Journal of Plant Nutrition*, 25, 355-368.
- Lara-Flores, M. (2015). El cultivo del frijol en México. *Revista Digital Universitaria*, 16 (2).
- Larkin, R. P., & Griffin, T. S. (2007). Control of soilborne potato diseases using Brassica green manures. *Crop Protection* (26), 1067-1077.
- Larsson, L., Ferm, M., Kasimir-Klemedtsson, A., & Klemedtsson, L. (1998). Ammonia and nitrous oxide emissions from grass and alfalfa mulches. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (51), 41-46.
- LaRue, T. A. (1978). Selecting and breeding legumes for enhanced nitrogen fixation. En *Proceedings of a workshop* (pág. 23). Boyce Thompson Institute.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Lee, C. H., Park, K. D., Jung, K. Y., Ali, M. A., Lee, D., Gutierrez, J., & Kim, P. J. (2010). Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* (138), 343-347.
- Li, Y. X., Tullberg, J. N., & Freebairn, D. M. (2006). Functional relationships between soil water infiltration and wheeling and rainfall energy. *Soil & Tillage Research*, 104, 156-163.
- Li, Z., Anghel, I., & Bowman, R. S. (1998). Sorption of oxyanions by surfactant-modified zeolite. *Dispersión Sci. Technol.*, 19(6&7), 843-857.
- López del Val, T., & Martínez de Icaya, P. (2005). Cereales y azúcares. En C. Vázquez Martínez, A. I. De Cos Blanco, & C. López Nomdedeu, *Alimentación y nutrición: manual teórico-práctico* (Segunda ed., págs. 123-133). Madrid, España: Díaz de Santos.
- López-Castañeda, C. (2011). Variación en rendimiento de grano, biomasa y número de granos en cebada bajo tres condiciones de humedad del suelo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 907-918.
- López-Castañeda, C., & Richards, R. A. (1994). Variation in temperature cereals in rainforest environments. II. Phasic development and growth. *Field Crops Res.*(37), 63-72.
- Ma, Z., Bykova, N. V., & Igamberdiev, A. U. (2017). Cell signaling mechanisms and metabolic regulation of germination and dormancy in barley seeds. *The crop Journal*(5), 459-477.
- Maathuis, F. J., & Sanders, D. (1994). Mechanism of high affinity potassium uptake in roots of *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci.* (91), 9272-9276.
- MacGregor, A. W. (1993). *Barley: Chemistry and Technology*. Amer Assn of Cereal Chemists.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Manahan, E. S. (1994). *Environmental Chemistry* (Sexta Ed.). Lewis Publishers.
- Marshnet, H. (1995). *Mineral Nutrition of higher plants* (Segunda Ed.). San Diego, New York.
- Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 68-96.
- Medina-González, H., García-Coronado, J., & Núñez-Acosta, D. (2007). El método del hidrómetro: base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16(3), 19-24.
- Mercati, V. (2016). Organic agriculture as a paradigm of sustainability: Italian food and its progression in the global market. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 8, 798 – 802.
- Meyer, W. L., & Arp, P. A. (1994). Exchangeable cations and cation exchange capacity of forest soil samples: Effects of drying, storage, and horizon. *Canadian Journal of Soil Science*, 421-429.
- Meza-Pérez, E., & Geissert-Kientz, D. (2003). Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y cultivados de origen volcánico del cofre de perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*, 5(2), 57-60.
- Mishra, A., Taing, K., Hall, M. W., & Shinogi, Y. (2017). Effect of Rice Husk and Rice Husk Charcoal on Soil Physicochemical Properties, Rice Growth and Yield. *Agricultural Science*, 8, 1014-1032.
- Mohanty, M., Reddy, M. E., & Probert, R. C. (2010). Modeling N mineralization from green manure and farmyard manure from laboratory incubation study. *Ecological Modelling*, 222(3), 719-726.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Möller, K., & Stinner, W. (2009). Effects of different manouring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *Eur. J. Agron.* (30), 1-16.
- Montemayor-Trejo, J. A., Woo-Reza, J. L., Munguía-López, J., Segura-Castruita, M. A., Yescas-Coronado, P., & Frías-Ramírez, E. (31 de octubre de 2012). Producción de alfalfa (*Medicago Sativa L.*) cultivada con riego sub-superficial y diferentes niveles de fosforo. *Revista Mexicana de Ciencia Agrícola*, 3(7), 1321-1332.
- Muhammad, A., & Rattan, L. (2009). Tillage and drainage impact on soil quality: Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 104, 364-372.
- Navarro-García, S., & Navarro-García, G. (2013). Formación y constituyentes del suelo. En S. Navarro-García, & G. Navarro-García, *QUÍMICA AGRÍCOLA* (Tercera ed., págs. 46-48). Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Newman, R. K., & Newman, C. W. (2008). *Barley for Food and Health*. Estados Unidos de America: John Wiley & Sons.
- NMX-FF-043-SCFI-2003. (2003). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano -cereal- cebada maltera (*Hordeum vulgare L.* y *Hordeum distichum L.*). Especificaciones y métodos de prueba.
- NOM-021-RECNAT-2000. (31 de diciembre de 2002). *Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis.* Obtenido de <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/rn/rn021-02.pdf>
- Núñez Solís, J. (2000). *Fundamentos de edafología* (Segunda ed.). San José, Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a distancia.
- Ochoa-Espinoza, X. M., Cantúa-Ayala, J. A., Montoya-Coronado, L., & Aguilera-Molina, N. A. (julio de 2011). *Guía para producir soya en el sur de sonora.*

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias:

<http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3148/GuiaparaProducirSoyaenelSur.pdf?sequence=1>

- Olesen, J. E., Askegaard, M., & Rasmussen, I. A. (2009). Winter cereal yields as affected by animal manure and green manure in organic arable farming. *European Journal Agronomy*, 30, 119-128.
- Ospina Machado, J. E. (2001). Estructura y morfología. En J. E. Ospina Machado, *Características físico mecánicas y análisis de calidad de granos* (págs. 15-24). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Osuna-Ceja, E., Figueroa-Sandoval, B., Oleschko, K., Flores-Delgadillo, M. L., Martínez-Menes, M., & González-Cossio, F. (2006). Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*, 40, 27-38.
- Paz-Ferreiro, J. (2006). Importancia del suelo y su calidad. En J. Paz-Ferreiro, *Propiedades bioquímicas de suelos de prado de Galicia* (págs. 28-31). Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- Peña-Herrera, D. (2011). *Módulo de capacitación para capacitores, MODULO 3: Manejo integrado de los cultivos de trigo y cebada*. Quito, Ecuador: Miscelánea 189.
- Pierzynski, G. M., Sims, J. T., & Vance, G. F. (1994). *Soils and Environmental Quality*. Lewis publishers.
- Pietrzykowski, M., Gruba, P., & Gregory, S. (2017). The effectiveness of Yellow lupine (*Lupinus luteus* L.) green manure cropping in sand mine cast reclamation. *Ecological Engineering* (102), 72-79.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Poch, R. M. (2014). *Edafología, Uso y protección de suelos* (Tercera ed.). Madrid: Mundi-Prensa.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Povorov, N. A., & Tikhonovich, I. A. (2003). Genetic resources for improving nitrogen fixation in legume-rhizobia symbiosis. *Genetic Resources and Crop Evolution*(50), 89-99.
- Prieto-Méndez, J. (2011). *Causas medio ambientales que producen efecto de rechazo sobre el cultivo de cebada maltera (Hordeum distichum L.)*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área académica de Química, Pachuca, Hidalgo.
- Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Acevedo-Sandoval, O. A., & Méndez-Marzo, M. A. (2013). Indicadores e índices de calidad de los suelos (ICS) cebaderos del sur del estado de Hidalgo, México. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 83-91.
- Prieto-Méndez, J., Prieto-García, F., Román-Gutiérrez, A. D., & Acevedo-Sandoval, O. A. (2012). Análisis proximal del cultivo de cebada maltera (*Hordeum sativum* Jess) del sur del estado de Hidalgo y su relación con la calidad de suelos. *Revista científica UDO Agrícola*, 12(2), 447-455.
- Primo-Yúfera, E., & Carrasco-Dorrién, J. M. (1987). Análisis de suelos. En *Química Agrícola* (3 ed., págs. 272-276). Madrid: Alhambra.
- Pulido, M. A., Lobo, D., & Lozano, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia*, 43(3), 221-230.
- Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E., & Peinemann, N. (2006). Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pamapas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 90, 63-68.
- Reeves, D. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Research*, 43, 191-167.
- Reyes-Jaramillo, I. (1996). *Fundamentos teórico prácticos de temas selectos de la ciencia del suelo. Parte 1*. Ciudad de México: Grupo Grafico.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Rice, W. A., Olsen, P. E., Blederbeck, V. O., & Slinkard, E. (1993). The use of annual legume green-manure crops as a substitute for summerfallow in the Peace River region. *Canadian Journal of Soil Science*, 73(2), 243-252.
- Riley, H., Pommeresche, R., Eltun, R., Hansen, S., & Korsæth, A. (2008). Soil structure, organic matter and earthworm activity N a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotation, fertilizer levels and manure use. *Agric. Ecosyst. Environ.* (124), 275-284.
- Riseman , A., & Chapagain, T. (2014). Barley–pea intercropping: Effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations. *Field Crops Research*, 166, 18-25.
- Roldán-Rojas, J. H., Guzmán-Ortiz, F. A., & Román-Gutiérrez, A. D. (2016). Valoración de la Calidad de la Cebada Producida en el Estado de Hidalgo. En L. Díaz Batalla, A. C. Gómez, J. Castro Rosas, & A. Téllez Jurado, *Bioteología y alimentos en Hidalgo: Transitando a la Bioeconomía* (págs. 87-104). Ciudad de México, México: Amalgama Arte Editorial.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del suelo. Montevideo, Uruguay.
- Ruiz Cobos, J. M. (2016). *Operaciones auxiliares de preparación del terreno, plantación y siembra de cultivos agrícolas*. ic editorial.
- Russelle, M. P., Lamb, J. F., Montgomery, B. R., Elsenheimer, D. W., Miller, B. S., & Vance, C. P. (2001). Alfalfa rapidly remediates excess inorganic nitrogen at fertilizer spill site. *Journal of Environmental Quality*(71), 469-472.
- SAGARPA. (15 de diciembre de 2009). *Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*. Obtenido de Diseño de estrategias de mercado:
http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/LFALFA.pdf

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- SAGARPA. (14 de septiembre de 2015). *COUSSA: Componente de Conservación y Uso Sustentable de Suelo y Agua*. Recuperado el 2018, de Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Catalogo de obras y prácticas de conservación y uso sustentable de suelo y agua: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Paginas/tecnologiasatualcance.aspx>
- SAGARPA. (2017). *Planeación agrícola nacional 2017-2030*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Ciudad de México.
- Sala, R., & Barroeta, A. C. (2003). Cereales. En R. Sala, & A. C. Barroeta, *Manual de microscopía de piensos* (págs. 12, 28-30). Bellaterra, Barcelona, España: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Sapto P. Putro, H. H. (2015). Application Of Environmental Management On The Farming. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 297 – 306.
- Sawchik, J. (2001). Dinámica del nitrógeno en la rotación de cultivo-pastura bajo. En R. Díaz Rossello, *Siembra directa en el Cono Sur* (págs. 323-335). Montevideo, Uruguay: PROCISUR.
- Scheublin, T. R., & Vander Heijden, M. G. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi colonize nonfixing root nodules of several legume species. *New Phytologist*(156), 732-738.
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., & Thiel, H. (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant- soil continuum. *Crop & pasture Science*, 66, 1219-1229.
- Shepherd, K. D., Cooper, P. J., Allan, A. Y., Drennan, D. S., & Keatinge, J. D. (1987). Growth, water use and yield of barley in Mediterranean-type environments. *Journal of Agricultural Science*, 108, 365-378.
- SIAP. (2015). *Atlas Agroalimentario*. Recuperado el 22 de 02 de 2018, de http://nube.siap.gob.mx/publicaciones_siap/#section2015

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Stopes, C., Millington, S., & Woodward, L. (1996). Dry matter and nitrogen accumulation by three leguminous green manure species and the yield of a following wheat crop in an organic production system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*(57), 189-196.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Bolero, G. A., Bullock, D. G., & Wiebold, W. J. (2003). Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agronomic Journal*, 95, 472-782.
- Thompson, L. M., & Troeh, F. R. (2002). En L. M. Thompson, & F. R. Troeh, *Los suelos y su fertilidad* (Cuarta ed., págs. 321-322). España: Reverté.
- Tian, D., & Niu, S. (2015). A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 10, 1-10.
- Tiessen, H. (1994). The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 371, 783-785.
- Udvardi, M., & Pool, P. S. (2013). Transport and metabolism in legume-rizobia symbioses. *Annual Review of Plant Biology*(64), 781-805.
- USDA. (2018). *World Agricultural Production*. Obtenido de <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>
- Vera, J. A., Grageda, O. A., Vuelas, M. A., & Peña, J. J. (2009). Absorción de nitrógeno por el cultivo de cebada en relación con la disponibilidad de agua en el bajío, Guanajuato, México. *Terra Latinoamericana*, 20(1), 35-39.
- Verhulst, N., François, I., Grahmann, K., Cox, R., & Govaerts, B. (2015). Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación. D.F., México.
- Villacrés, E. (2008). Cebada: Usos tecnológicos, valor nutritivo importancia en la alimentación. En E. Villacrés, *La Cebada un cereal nutritivo (50 recetas para preparar)* (págs. 1-5). Quito, Ecuador: Grafistas.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Weber, E., Hack, H., & Bleiholder, H. (1998). *Compendio para la identificación de los estadios fenológicos de especies mono- y dicotiledóneas cultivadas*. Obtenido de http://www.agro.basf.es/agroportal/es/media/migrated/es/pdf_1/services/descarga.pdf
- Willey, R. W. (1979). Intercropping-its importance and research needs. Part 1. Competition and yield advantages. *Field Crop Abstract* (32), 1-10.
- William, B. G., & Baker, G. C. (1992). An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soils salinity hazard. *Australian Journal of Soil Research*, 20, 107-118.
- Wollni, M., & Andersson, C. (2013). Spatial patterns of organic agriculture adoption: Evidence from Honduras. *Ecological Economics*, 97, 120–128.
- Xu, X., Thornton, P. E., & Post, W. M. (2013). A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 22, 737-749.
- Xue, X., Nan, L., Yu-qi, W., Yi-xian, B., Jian-chuan, L., & Rui-xuan, X. (2018). Effects of non-uniform root zone salinity on growth, ion regulation, and antioxidant defense system in two alfalfa cultivars. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 434-444.
- Yao, Y., Zhang, M., Tian, Y., Miao, Z., Zhang, B., Zhao, M., . . . Yin, B. (2017). Duckweed (*Spirodela polyrhiza*) as green manure for incread in yield and reducing nitrogen loss in rice production. *Field Crops Research*(214), 273-282.
- Yúfera, P., & Carrasco, D. (1973). *Química agrícola 1, Suelos y Fertilizantes* (Primera ed.). España: Alhambra.
- Zhang, M. K., & Fang, L. P. (2007). Effect of tillage, fertilizer and green manure cropping on soil quelyty at an abandoned brick making site. *Soil & Tillage Research*(93), 87-93.

ENRIQUECIMIENTO DE SUELOS CEBADEROS CON ABONOS VERDES

- Zhijian, X., Shuxin, T., Farooq, S., Changxu, X., Jingrui, C., Dan, H., . . . Weidong, C. (2016). Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China. *Field Crops Research*, 188, 142-149.
- Zörb, C., Sembayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture - status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171, 656-669.
- Zumft, W. G. (1997). Cell biology and molecular basis of denitification. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61(4), 533-616.