

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



PROMOTORES DE LA GERMINACIÓN EN SEMILLA DE MAÍZ (*Zea mays L.*)  
BAJO DOS AMBIENTES

Tesis

Elaborada por ANADELIA ANTONIO MEDINA

como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila.

Mayo, 2023

PROMOTORES DE LA GERMINACIÓN EN SEMILLA DE MAÍZ (*Zea mays L.*)  
BAJO DOS AMBIENTES

Tesis

Elaborada por ANADELIA ANTONIO MEDINA para obtener el grado de Doctor  
en Ciencias en Agropecuarias con la supervisada y aprobada por Comité de  
Asesoría



\_\_\_\_\_  
Dra. Leticia Romana Gaytán Alemán  
Director de Tesis



\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras  
Asesor



\_\_\_\_\_  
Dr. Rubén López Salazar  
Asesor



\_\_\_\_\_  
Dr. Oscar Ángel García  
Asesor



\_\_\_\_\_  
Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno  
Asesor



\_\_\_\_\_  
Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno  
Jefe del Departamento de Postgrado



\_\_\_\_\_  
Dr. Antonio Flores Naveda  
Subdirector de Postgrado

## **Agradecimientos**

Para Dios que iluminas mi vida con fuerza por que en ti encuentro paz, para seguir adelante, porque me demuestras tu inmenso amor y compasión. Gracias por la vida gran dios.

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro unidad Laguna, mi ALMA TERRA MATER, por ser un segundo hogar donde he conocido a excelentes amigos y grandes asesores profesionales que ayudaron a formarme como profesional y como persona.

A mi apreciable asesora:

Dra. Leticia Romana Gaytán Alemán.

Por la confianza y el apoyo que me brindo desde que me conoció, además de proveerme de sus conocimientos asesoría, amistad durante el proceso del posgrado. Gracias por ser una excelente consejera.

## **Dedicatorias**

Dedico este trabajo con gran amor a mis padres y hermano cada uno de ellos me apoyo, formo en cada etapa de mi vida y camino al posgrado. Con gran cariño, respeto, reconocimiento, admiración y apoyo invaluable que me han otorgado.

A mis padres:

Sra. Fortunata Medina Medina

Sr. Agustín Antonio Del Ángel

A mi hermano:

José Agustín Antonio Medina

A mi familia hermosa que con paciencia, amor y cariño, me han apoyado integrada por mis hijos y esposo. Los amo

A mi esposo:

Aurelio Morales Rivera

A mis hijos:

Ana Margarita y Marco Aurelio

## Índice General

Planteamiento y justificación del problema .....	3
Objetivo general .....	3
Objetivos específicos.....	3
1. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	4
2.1 Perspectiva de la producción del grano de maíz a nivel mundial. ....	4
2.2 La necesidad de una germinación controlada.....	4
2.3 Germinación .....	4
2.4 Movilización de las reservas .....	5
2.5 Aceleración de la semilla .....	6
2.6 Ácido salicílico.....	6
2.7 Sustancias húmicas.....	7
2.8 Citrulina.....	7
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
3.1 Área de investigación (Experimento 1).....	9
3.1.1 Condiciones del experimento.....	9
3.1.2 Variables evaluadas .....	10
3.1.3 Análisis estadístico .....	10
3.2 Área de estudio (Experimento 2).....	11
3.2.1 Condiciones del experimento.....	11
3.2.1 Variables evaluadas .....	11
3. RESULTADOS .....	13
5. CONCLUSIÓN.....	23
6. REFERENCIAS.....	24

## Lista de figuras

- Figura 1. Comportamiento de la germinación de los genotipos blancos (G1) y amarillo (G2) con referencia a los controles, ácido salicílico (AS), citrulina (CI), ácido húmico (AH), y agua de la llave (AL), en el transcurso de los días.....13
- Figura 2. Altura del G1=MS405, durante 8 d después de la emergencia, con respecto a los controles AH=ácido húmico, CI= citrulina y AS= ácido salicílico.....17
- Figura 3. Altura del G2=Arlequín, durante 8 d después de la emergencia, con respecto a los controles AH=ácido húmico, CI= citrulina y AS= ácido salicílico.....18
- Figura 4. Altura del G3=MS-404, durante 8 d después de la emergencia, con respecto a los controles AH=ácido húmico, CI= citrulina y AS= ácido salicílico.....18

## Lista de cuadros

- Cuadro 1. Características fisicoquímicas del agua de la llave utilizada en el experimento en condiciones de invernadero.....9
- Cuadro 2. Comportamiento de las medias de los genotipos G1 y G2 (Antílope blanco, Antílope amarillo) durante la germinación y su efecto con los promotores.....14
- Cuadro 3. Comportamiento de las medias de los genotipos G1=MS 405, G2=Arlequín, G3=MS 404 y los promotores AS=ácido salicílico, CI=citrulina, AH=ácidos húmicos .....16

## RESUMEN

Promotores de la germinación en semilla de Maíz (*Zea mays L.*) bajo dos ambientes

Anadelia Antonio Medina

Para la obtención del Grado de Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Leticia Romana Gaytán Alemán

Director de la tesis

Se efectuaron dos experimentos para identificar el efecto de los promotores germinativos en diferentes genotipos de maíz. **1).** Se utilizaron 60 semillas por caja Petri/unidad experimental con tres repeticiones completamente al azar y con arreglo factorial de 2x4. Se aplicaron promotores en concentraciones 1,000 ppm directamente a las cajas Petri con ácido salicílico (**AS**), citrulina (**CI**), ácido húmico (**AH**) y agua de la llave (**AL**) con las semillas de dos genotipos (antílope blanco (**G1**) y antílope amarillo (**G2**)). Las variables fueron el porcentaje de germinación/días (PG), diámetro de radícula (DR), largo de radícula (LR), número de raíces seminales laterales (NRS). **2).** Se ejecutó un diseño factorial de 3x3 con las parcelas divididas. Se remojó la semilla por una hora, utilizando los genotipos **G1**= MS 405, **G2**=Arlequín, **G3**=MS 404 y los promotores: **AH**, **CI** y **AS**. Las variables del estudio fueron la velocidad germinación (VG), porcentaje de emergencia (EMERG), altura de la planta (ALT), clorofila (CLFI), diámetro del tallo (DMT) y los parámetros de la raíz y las hojas. En ambos experimentos se hizo un análisis de varianza y una prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Los promotores de germinación fueron altamente significativos en ambos experimentos. En el primer experimento, los ácidos húmicos mostraron un 94 % en la germinación y un mayor crecimiento de NRS; en el segundo el mejor control fue CI con 93 % en la germinación y aceleró la VG del cultivo, además tuvo efectos positivos en ALT. Por lo anterior, concluimos que en nuestro proyecto los controles o promotores AH y CI pueden acelerar efectivamente el proceso de germinación y emergencia del cultivo.

**Palabras clave:** Genotipo, Germinación, Maíz, Promotores, Raíces seminales.

## ABSTRACT

Germination promoters in corn seeds (*Zea mays* L.) under two environments

Anadelia Antonio Medina

Para la obtención del Grado de Doctor en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Leticia Romana Gaytán Alemán

Director de la tesis

Two experiments were conducted to identify the effect of germination promoters in different maize genotypes. **1).** Sixty seeds per Petri dish/experimental unit were used with three completely randomized replicates and a 2x4 factorial arrangement. Promoters at 1000 ppm concentrations were applied directly to the Petri dishes with salicylic acid (**AS**), citrulline (**CI**), humic acid (**HA**), and tap water (**AL**) with the seeds of two genotypes (White Antelope (G1) and Yellow Antelope (G2)). The variables were germination percentage/days (PG), radicle diameter (RD), radicle length (LR), and the number of lateral seed roots (NRS). **2).** A 3x3 factorial design was executed with split plots. The seed was soaked for one hour, using the genotypes G1= MS 405, G2=Arlequin, G3=MS 404, and the promoters: AH, CI, and AS. The study variables were germination speed (VG), emergence percentage (EMERG), plant height (ALT), chlorophyll (CLFI), stem diameter (DMT), and root and leaf parameters. Analysis of variance and Tukey's test ( $P \leq 0.05$ ) were performed in both experiments. Germination promoters were highly significant in both experiments. In the first one, the humic acids (AH) showed 94 % in germination, with higher NRS growth. In the second one, the best control was CI, with 93 % in germination and accelerated VG of the crop. In addition, it had positive effects on ALT. Therefore, we conclude that in our project, the AH and CI controls or promoters can effectively accelerate the process of germination and crop emergence.

**Keywords:** Genotype, Germination, Maize, Promoters, Seed roots.

## 1. INTRODUCCIÓN

La mala germinación y el largo período del brote de las semillas en campo se encuentran entre los principales problemas que afectan a los cultivos (Simlat *et al.*, 2019). La germinación involucra procesos como el embebimiento de la semilla hasta la emergencia de la raíz (Doria, 2010). Existen indicadores visuales para evaluar estos procesos (por ejemplo, la emergencia de la raíz y el cotiledón, el alargamiento del mesocotilo, la aparición de las raíces laterales de la semilla) (Sáenz y Cassab, 2021). Por ello se debe de conocer el estado de latencia o letargo, por ser la incapacidad que tiene la semilla intacta y viable de romperse mediante la absorción de agua, cumpliendo condiciones ambientales adecuadas (temperatura, humedad y concentración de gases) que activan numerosas transcripciones almacenadas en sus embriones (Varela y Arana, 2011).

Además, la germinación se asocia principalmente con cambios coordinados en el metabolismo primario y secundario, como la formación de compuestos fenólicos. Sin embargo, al final de este proceso, la raíz emergerá de la cubierta de la semilla porque a partir de este punto y su posterior desarrollo, la plántula emerge por encima del suelo (nacimiento) (Pita y Pérez, 1998). Existen investigaciones que mencionan que para asegurar la germinación y obtener información en etapas de absorción de agua para algunas especies se puede hacer uso de bioestimuladores, fitohormonas, aminoácidos, ácidos fúlvicos.

En este sentido, algunas sustancias catalogadas como fitohormonas como jasmonato, óxido nítrico, otras como los brasinoesteroides, auxinas, ácido salicílico y ácido giberélico favorecen el crecimiento de las plantas (Mcsteen y Zhao, 2008). Por otro lado, se sabe que los tratamientos químicos previos a la germinación aumentan la germinación al movilizar las reservas y reducir el ácido abscísico (Bautista-Rodríguez *et al.*, 2017), que influye en la latencia. Por ejemplo, los granos de cereales, el tejido coleorriza, que recubre la raíz embrionaria (Anh *et al.*, 2019), previniendo la aparición de la radícula.

La citrulina puede considerarse como un tratamiento químico, aunque se conocen pocos estudios que la utilizan para estimular la germinación, de acuerdo con Song *et al.* (2020) es un componente que aumenta los niveles del aminoácido arginina y mejora el equilibrio

del nitrógeno, eliminando los radicales hidroxilos y protege del daño oxidativo en las enzimas celulares. Otros componentes químicos son las sustancias húmicas (HS), las cuales son pequeñas moléculas heterogéneas autoensambladas por enlaces hidrógeno y componen el material orgánico del suelo, que proporcionan la transferencia de las moléculas orgánicas e inorgánicas, así como las interacciones de absorción con proteínas, incluidos los aminoácidos (Giachin *et al.*, 2017). Además, son bioestimulantes porque promueven la filtración de nutrientes iónicos y la eficacia en el uso de nutrientes, catalizando el carbono para liberar energía y el metabolismo de los aminoácidos (Popa *et al.*, 2022). Por otro lado, Chitnis *et al.* (2014) mencionaron que en la germinación debe haber un equilibrio con la hormona giberelina (GA). Sin embargo, existen otras hormonas vegetales implicadas, tal es el caso del ácido salicílico (AS) en semillas dicotiledóneas que regulan el nivel celular reduciendo el daño oxidativo, mejorando la viabilidad, siendo sintetizadas por enzimas antioxidantes además de movilizar proteínas de almacenamiento (Rajjou *et al.*, 2006).

Así mismo, otras variables a tomar en cuenta son las propiedades fisicoquímicas del suelo. En este sentido, Zetina-Lezama *et al.* (2017) y Tosquy-Valle *et al.* (2020) mencionaron que los suelos ácidos son de clima tropical y se encuentran en sur de nuestro país. Tal es el caso del estado de Veracruz donde se presentan suelos con reacción extremadamente ácida, tipo cambisol dístrico, específicamente en la zona de Juan Rodríguez Clara e Isla, con pobre materia orgánica, nitrógeno inorgánico y textura tipo arena migajosa. Por lo anterior, el progreso y la producción de los cultivos se ve limitada (Morales-Rivera *et al.*, 2015). El efecto de algunos estimulantes sobre el crecimiento de la germinación del maíz en suelos ácidos aún no se comprende completamente, por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de diferentes promotores de la germinación evaluando tres genotipos de maíz en diferentes condiciones.

### **Planteamiento y justificación del problema**

Durante los últimos 40 años, la investigación agrícola en las naciones en vías de desarrollo se ha dedicado a aumentar la productividad de cereales, ya que el cambio climático en los últimos 30 años, estadísticamente ha perdurado, con variaciones de temperatura extremas y limitando la disponibilidad del agua. Los diferentes tipos de maíz que crecen en la Región Lagunera son afectados dependiendo del genotipo y del medio ambiente. Por esta razón decidimos realizar evaluaciones de genotipos del maíz y promotores que promovieran la germinación en dos ambientes (de invernadero y suelo ácido).

### **Objetivo general**

Evaluar el alcance de los diferentes promotores de la germinación sobre diferentes genotipos de maíz y sobre dos ambientes distintos.

### **Objetivos específicos**

- Analizar el alcance de los promotores de la germinación (ácido salicílico, citrulina, ácido húmico y agua de llave) sobre la germinación de diferentes genotipos de maíz.
- Evaluar el porcentaje de germinación de los genotipos de maíz en los dos ambientes con respecto a los diferentes controles.
- Evaluar el porcentaje de emergencia de los genotipos de maíz en los suelos ácidos con la aplicación de los controles.
- Evaluar el desarrollo de la plántula de acuerdo con los diferentes tratamientos establecidos.

## **1. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Perspectiva de la producción del grano de maíz a nivel mundial.**

Entre los granos de cereales más utilizados se incluye el maíz (*Zea mays L.*) siendo el tercero a nivel mundial, por encima de *Triticum aestivum L.* y *Oryza sativa L.*, alimentos básicos en la alimentación humana de América Latina, entre ellos México. Actualmente se cuenta con una producción mundial del 57.35 % de maíz y los principales países que lo producen son Estados Unidos (USA) y China (35.42 % y 21.93 % respectivamente), donde los rendimientos son superiores a 10 t/ha. México cultiva alrededor de 7 millones de hectáreas de maíz con un promedio de 3.33 t/ha, produciendo 23 millones de toneladas, pero el consumo nacional se estima en 39 millones, una cifra difícil dado que el consumo per cápita osciló entre 123 kilogramos en 2000 y 196 kg en el 2018. En este sentido, la población creció en un millón de personas por año, donde en el 2018 existió un total de 125 millones (Santillán-Fernández *et al.*, 2021).

### **2.2 La necesidad de una germinación controlada**

Uno de los métodos más efectivos para mejorar el proceso de la germinación es controlar el proceso (Ding y Feng, 2019), interviniendo en los mecanismos necesarios para activar los brotes necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Mirsari y Smith, 2014). Para promover la germinación se han utilizado tratamientos prebrotación que incluyen bioestimulantes y fitohormonas. Entre los primeros, se incluyen sustancias húmicas, microorganismos derivados de plantas y animales, donde la inoculación microbiana mejora la germinación y el crecimiento radicular (Calvo *et al.*, 2014; Hasanuzzaman y Responses, 2019). Además, el control de la germinación de semillas puede ayudar a la supervivencia de las variedades, por ser una etapa crítica donde tienden a perder rápidamente la germinación por lo que algunas son tratadas con productos químicos (Farajollahi *et al.*, 2014).

### **2.3 Germinación**

Las semillas son el principal mecanismo reproductivo y consisten principalmente en embriones y compuestos de almacenamiento (carbohidratos, proteínas, lípidos) rodeados

por una cubierta y sus características, que varía entre especies en términos de tipo, proporción de reservas. En las últimas etapas de desarrollo, las plantas están inactivas hasta que se crean condiciones favorables para la germinación (Pita y Pérez, 1998). El crecimiento en la germinación puede mejorar las propiedades nutricionales con el contenido de diferentes metabolitos, y especialmente, los péptidos y los aminoácidos porque se producen actividades biológicas (Torres *et al.*, 2018).

Por otro lado, el proceso de germinación es una unidad reproductiva de las semillas para garantizar la existencia de todas las plantas y la clave básica para la agricultura moderna. Por lo tanto, el equilibrio entre la fabricación de alimentos y la población mundial es de importancia básica, porque la germinación es el comienzo de los productos agrícolas (Copaland y McDonald, 2001).

Entonces, la germinación de cereales integrales permite la producción de alimentos germinados. Sin embargo, es necesario controlar las condiciones ambientales y el momento de la germinación para determinar la calidad de la germinación. Las condiciones de temperatura y humedad subóptimas o la germinación descontrolada limitan la producción de semillas germinadas. Dado lo anterior, la respuesta de las poblaciones de semillas a la germinación puede variar en términos de: a) germinación (la proporción de semillas que pueden germinar bajo ciertas condiciones óptimas); (b) distribución del tiempo de germinación (tasa de germinación, velocidad o forma de la curva); c) tiempo de germinación de la primera semilla; d) media del tiempo de germinación de la muestra o población; e) homogeneidad, simultaneidad o sincronía de germinación (cambio en el tiempo medio de germinación) (González-Zertuche y Orozco-Segovia, 1996).

#### **2.4 Movilización de las reservas**

La germinación produce una reactivación bioquímica con el desarrollo del embrión, donde el endospermo transfiere nutrientes y actúa como tejido de absorción y digestión (Debouza *et al.*, 2021). Con la activación de los primeros procesos las mitocondrias son activadas, estimulando la glucólisis y continuado por el ciclo de Krebs, donde actúan enzimas, hormonas, y algunas moléculas específicas del ARN mensajero para la síntesis de ARNm, ARNt, ARNr y ADN.

En una etapa posterior, con un retraso en la síntesis de ADN, se rompen los cromosomas, y ocurren mutaciones o cambios de bases nitrogenadas (secado). Por otro lado, se llevan a cabo procesos de elongación celular, síntesis de proteínas por absorción, hidrólisis con liberación de péptidos y grupos amino (Matilla, 2008; Ali y Elozeiri, 2017). Cuando se da la rotura de la testa entra el oxígeno, incrementa y activa la respiración celular y aumenta el aporte de energía por el incremento de mitocondrias, la activación enzimática y la síntesis proteica del ARNm prealmacenado. Este proceso es seguido por la transcripción y translación del nuevo ARNm donde los genes involucrados en la germinación son activados, haciendo una movilización de reservas, glúcidos, proteínas, lípidos, hormonas, enzimas e hidratos de carbono dentro de las vacuolas, cotiledones y en el endospermo. Por consiguiente, inicia el último proceso, donde existe una disminución de la respiración causado por el agotamiento de las reservas y con ello el crecimiento activo de la plántula (multiplicación celular) (Gómez-Maqueo y Gamboa-deBuen, 2016).

### **2.5 Aceleración de la semilla**

Existen tres indicadores visuales de germinación: 1) enraizamiento, que toma de 2 a 3 d en lugares cálidos y húmedos, pero también puede tomar de 1 a 2 semanas en suelos más secos y/o más fríos (<10°C); 2) la aparición del coleóptilo, esto puede ocurrir en 1 d o unos días dependiendo de la temperatura del suelo, esta estructura vegetal dura es la encargada de allanar el camino a través del suelo para la aparición de las plantas debido a la elongación de los cotiledones; y 3) la aparición de raíces de semillas laterales que con la temperatura adecuada (32 a 35°C) y la humedad, pueden aparecer tres estructuras casi en el mismo día. En suelo fresco, la aparición del coleóptilo y las raíces laterales de las semillas puede retrasarse hasta una semana después de la aparición de las raíces (Nielsen, 2016).

### **2.6 Ácido salicílico**

El ácido salicílico (AS) está presente en los tejidos vegetales considerado como una hormona vegetal, también llamado compuesto fenólico, por que mejora el incremento y la producción de la planta (Raskin, 1992; Dawood *et al.*, 2019). Cuando se aplica en bajas concentraciones, en etapa de germinación y plántula, actúa como un regulador endógeno

de procesos fisiológicos y bioquímicos, actuando en la absorción y transporte de iones, la permeabilidad en la membrana y la fotosíntesis. Además, en plántulas de maíz incrementa la dimensión de las raíces, independientemente de las condiciones de cultivo y en el frijol en bajas concentraciones aumenta la germinación (Dawood *et al.*, 2019; Haas *et al.*, 2015; Rodríguez-Larramedí *et al.*, 2017).

Por el contrario, El-Mergawi (2019) mencionó que el ácido salicílico tuvo un efecto inhibitorio en la germinación de las semillas analizadas cuando se usaron a 20 mM sobre los ácidos hidroxibenzoico, protocatéchuico, salicílico, vanílico y ferúlico, con efectos inhibitorios en la germinación de *Phalaris minor* y con mejores resultados a dosis mayores. Por otro lado, Ozpinar *et al.* (2017) demostró que el ácido salicílico impide el crecimiento de la raíz y el tallo en semillas de *Triticum aestivum L.* (trigo), *Zea mays L.* (maíz), *Cicer arietinum L.* (garbanzo) en altas dosis 100 mM, 200 mM y aumentan el crecimiento en bajas 0,1 mM dosis.

## **2.7 Sustancias húmicas**

Las sustancias o ácidos húmicos (AH) mejoran el crecimiento temprano, reduciendo la aplicación de fertilizantes, mejorando la absorción de macro y micronutrientes, a mayor capacidad de intercambio catiónico, hay mayor disponibilidad de fósforo interfiriendo, con la precipitación del fosfato de calcio (Canellas *et al.*, 2015; du Jardin, 2015). Las SH de origen de leonardita, estimulan el crecimiento de las plantas, así como el metabolismo del nitrógeno y el depósito de sustancias fenólicas (Conselvan *et al.*, 2017). En este sentido, una revisión de Olk *et al.* (2018) mencionó que estas benefician el crecimiento de las raíces, el metabolismo de las proteínas, fotosíntesis, respiración, absorción de agua y nutrientes, presentando mayor resistencia en suelo salino, tolerancia al frío y absorción de metales pesados.

## **2.8 Citrulina**

Se conocen pocos estudios sobre su uso para estimular la germinación, sin embargo, Song *et al.* (2020) mencionaron que es un componente que aumenta los niveles del aminoácido arginina y mejora el equilibrio del nitrógeno, eliminando los radicales hidroxilos, protege del daño oxidativo en las enzimas celulares. La citrulina, se ha usado en el metabolismo

y transporte de *Arabidopsis thaliana* y *Cucurbitaceae*. Además, Sarropoulou *et al.* (2016) menciona en trabajos realizados con portainjertos de cereza existieron efectos directos sobre el enraizamiento *in vitro* influyendo en el contenido de clorofila, la biosíntesis y el metabolismo del azúcar, así como la acumulación de prolina en las hojas, así como en las raíces derivado del uso de la citrulina.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Área de investigación (Experimento 1)

El experimento se realizó en octubre del 2019 en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Laguna, ubicada en Torreón, Coahuila con coordenadas geográficas en 25°31'11N y 103°25'57 W, con una altitud de 1,123 m sobre el nivel del mar. Su clima de acuerdo con Köppen, modificado por García (2004) es tipo BWh, desierto caliente con temperatura máxima 40 °C y temperatura mínima 6 °C con una precipitación media de 250 mm.

#### 3.1.1 Condiciones del experimento

Se utilizaron sesenta semillas de maíz con genotipos de antílope blanco (G1) y genotipo de antílope amarillo (G2). Se tamizaron para detectar semillas dañadas, posteriormente se desinfectaron con una concentración de hipoclorito de sodio de 10 ml/l por 15 min, luego se enjuagó con agua potable (FAO, 2001). Para observar porcentaje de germinación se colocaron en cajas Petri junto con los promotores: ácido salicílico (AS), citrulina (CI), ácido húmico (AH) en forma de aspersion durante 3 d consecutivos a una concentración de 1,000 ppm y como control agua de la llave (AL).

**Cuadro 1.** Características fisicoquímicas del agua de la llave utilizada en el experimento en condiciones de invernadero.

Elementos químicos	ppm
Fierro (Fe <sup>3</sup> )	0
Zinc (Zn <sup>+</sup> )	0.02
Cobre (Cu <sup>+</sup> )	0.03
Manganeso (Mn <sup>+</sup> )	0.01
Boro (B <sup>+</sup> )	0.99
Sodio (Na <sup>+</sup> )	120
Potasio (K <sup>+</sup> )	13
Calcio (Ca <sup>+</sup> )	288

Magnesio (Mg <sup>+</sup> )	29
Nitratos (NO <sub>3</sub> )	23.03
Fosforo de fosfatos	0.08
Fosforo Diacino (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	0.25
Sulfato de SO <sub>4</sub>	643.6
Carbonatos (CO <sub>3</sub> )	0
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )	170.83
Cloruros (Cl)	198.52
<b>Parámetros físicos</b>	
pH	7.80
Conductividad eléctrica mS/cm	2.21
Relación de absorción de sodio	1.8
Sodio intercambiable (%)	0.38

### 3.1.2 Variables evaluadas

Las variables medidas durante la germinación fueron porcentaje de germinación (PG), diámetro de raíz (DR), longitud de raíz (LR), raíces laterales de semilla (RS). Las semillas con una longitud de raíz mayor o igual a 2 mm se consideraron germinadas con base en la tasa de germinación. El porcentaje de germinación (Caroca *et al.*, 2016) se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$PG = [(\text{Número de semillas germinadas}) / (\text{Número de semillas sembradas})] \times 100$$

Para DR y LR se utilizó un vernier Truper CALDI-6MP y se contó el número de brotes secundarios (RS).

### 3.1.3 Análisis estadístico

Se utilizó un método de factorización 2x4 completamente al azar con 3 repeticiones. Cada placa Petri actuó como una unidad experimental, donde genotipo G1, G2 y promotores: AS, CI, AH y AL sirvieron como factores de estudio. Se efectuaron análisis de varianza y

comparación de medias con la prueba (Tukey;  $p < 0,05$ ). Todos los análisis se realizaron utilizando el paquete estadístico SAS (SAS, 2009).

### **3.2 Área de estudio (Experimento 2)**

El segundo ensayo se realizó en primavera y verano en el Instituto Tecnológico Juan Rodríguez Clara, ubicado en el municipio de Juan Rodríguez Clara, Veracruz con las coordenadas geográficas 18° 01' 6.1" N y 95° 94' 1.7" O., a una altitud de 133 m. De acuerdo con Köppen, el clima es cálido, semihúmedo (AW0), con una temperatura promedio de 24.5 °C y una precipitación promedio anual de 1,100 mm. Además, con un tipo de suelo cambisol dístico (FAO-UNESCO; 1977) de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana con clasificación agronómica PROY-NOM-021-RECNAT-2000, con textura arena gruesa o migajosa y pH ácido fuerte (Tosquy-Valle *et al.*, 2020).

#### **3.2.1 Condiciones del experimento**

El experimento se realizó en un terreno con un área de 1,800 m<sup>2</sup> con fecha de siembra 11 de junio de 2021. Las semillas se empaparon con el inoculante durante 1 h y posterior al arreglo experimental se roció con la herbicida atrazina. Los datos de precipitación se recolectaron utilizando un pluviómetro portátil y las temperaturas máximas y mínimas diarias (°C) se recolectaron electrónicamente por medio de un Data logger (Measurement Computing Corporation, modelo USB-500). Se realizó el diseño de parcelas divididas con un diseño factorial 3 x 3 con 3 repeticiones. Los factores estudiados fueron los genotipos G1=MS 405, G2=Arlequín, G3=MS 404 y los promotores AS=ácido salicílico, CI=citrulina, SH=sustancias húmicas. Se realizaron análisis de varianza y comparación de medias (Tukey;  $p < 0.05$ ). Los datos se analizaron utilizando el paquete estadístico SAS (SAS, 2009).

#### **3.2.1 Variables evaluadas**

Las variables medidas fueron porcentaje de germinación (EMERG), factor de velocidad de germinación (VG) (Sobarzo-Bernal *et al.*, 2021), volumen de raíz (VR), volumen de tallo y hoja (VTYH) con el método de flotabilidad en cm<sup>3</sup> donde las raíces se sumergieron

en un cilindro lleno de agua desplazada expresado en  $\text{cm}^3$  (Angulo-Castro *et al.*, 2017), longitud de la raíz (LR) en cm, área foliar (AF) en  $\text{cm}^2$ , clorofila (CLFI), número de hojas (NH). Se midió EMERG a partir del tercer día después de la siembra y se determinó diariamente la germinación de semillas (PE). La germinación de plántulas (TE) se determinó utilizando las fórmulas sugeridas por Martínez *et al.* (2010):

$$\text{PE} = \frac{\text{Número de semillas emergidas} \times 100}{\text{Número total de semillas}}$$

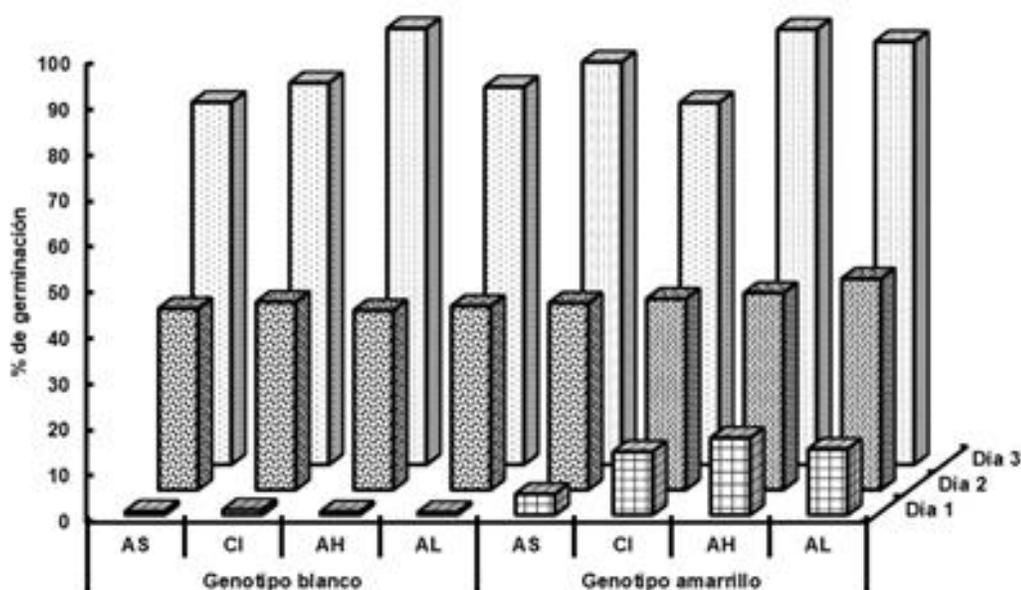
$$\text{TE} = \frac{N_1 * T_1 + N_2 * T_2 + N_3 * T_3 + \dots + N_n * T_n}{\text{Número total de semillas emergidas}}$$

Donde: N = número de partículas que aparecen consecutivamente y T = tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba hasta el final del período de medición.

Para VR y VTYH, se usó un tubo sumergido de 50 ml; para LR se utilizó un flexómetro en cm y se contó el número de raíces con base en el área foliar (AF), se midió el largo y ancho de la hoja (Berdjour *et al.*, 2020), para el medidor de clorofila CLFI en LEAAF CHL (FT Green LLC ® , USOS) (Mendoza-Tafolla *et al.*, 2019; Mendoza-Tafolla *et al.*, 2022).

### 3. RESULTADOS

El comportamiento de germinación con respecto a los genotipos G1 (Antílope Blanco) y G2 (Antílope amarillo) en los días 1, 2 y 3 es diverso, en este sentido, se puede observar que el G1 con los controles AS, CI, AH, y AL no muestran diferencia en los días 1 y 2, solo en el día 3, donde presentó un ligero incremento con el control AH del 95 %, mientras que para el G2 fueron estadísticamente iguales los controles en el día 2. Sin embargo, en este genotipo al día uno mostró un incremento en CI, AH y AL, y al día 3 incrementó el porcentaje de germinación con los controladores AS, AH y AL 88, 95 y 92 % (Figura 1).



**Figura 1.** Comportamiento de la germinación de los genotipos blancos (G1) y amarillo (G2) con referencia a los controles, ácido salicílico (AS), citrulina (CI), ácido húmico (AH), y agua de la llave (AL), en el transcurso de los días.

El comportamiento de las medias con respecto a la germinación, diámetro de la radícula, largo de radícula y número de raíces seminales nos muestra que al día 1 de la germinación para el genotipo G1 no tuvo diferencia con los diferentes promotores. Por otro lado, para

el G2 fue estadísticamente igual con respecto a CI, AH, y AL y diferente para AS. Para la germinación en el día 2, no existe diferencia estadísticamente significativa con los genotipos y promotores de crecimiento. Sin embargo, para la germinación del día 3 fue diferente para G1 con el promotor AH y en G2 fue diferente con en AS y CI, pero similar en AH y AL mostrando un ligero aumento (95 y 87 %). Para DR en el G1 se muestra diferencia solamente con el control AH y en el G2 con los promotores AS y CI que fueron iguales a AL, pero diferentes con el promotor AH. En el largo de radícula (LR) para G1 fue diferente solo en AS y para el G2 con los controles AS y CI que fueron iguales a AL, pero diferentes con el promotor AH. Con respecto a las raíces seminales (RS) se puede observar que la media entre genotipos fue similar con todos los promotores, pero diferente para AH (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Comportamiento de las medias de los genotipos G1 y G2 (Antílope blanco, Antílope amarillo) durante la germinación y su efecto con los promotores.

Variable		AS	CI	AH	AL	Media
% Germinación del día 1	G1	0.7667 <sup>a</sup>	1.13 <sup>a</sup>	0.66 <sup>a</sup>	0.56 <sup>a</sup>	0.78 <sup>b</sup>
	G2	4.56 <sup>b</sup>	13.76 <sup>a</sup>	16.76 <sup>a</sup>	14.30 <sup>a</sup>	12.35 <sup>a</sup>
	Media	2.66 <sup>b</sup>	7.45 <sup>a</sup>	8.71 <sup>a</sup>	7.43 <sup>a</sup>	
% Germinación del día 2	G1	39.33 <sup>a</sup>	41.00 <sup>a</sup>	39.33 <sup>a</sup>	40.00 <sup>a</sup>	39.91 <sup>b</sup>
	G2	41.00 <sup>a</sup>	41.66 <sup>a</sup>	43.00 <sup>a</sup>	46.00 <sup>a</sup>	42.91 <sup>a</sup>
	Media	40.16 <sup>a</sup>	41.33 <sup>a</sup>	41.16 <sup>a</sup>	43.00 <sup>a</sup>	
% Germinación del día 3	G1	79.00 <sup>b</sup>	83.00 <sup>b</sup>	95.33 <sup>a</sup>	82.33 <sup>b</sup>	84.91 <sup>a</sup>
	G2	87.66 <sup>b</sup>	79.00 <sup>c</sup>	94.66 <sup>a</sup>	92.33 <sup>ab</sup>	88.41 <sup>b</sup>
	Media	83.33 <sup>b</sup>	81.00 <sup>c</sup>	95.00 <sup>a</sup>	87.33 <sup>b</sup>	

<b>Diámetro de radícula</b>	G1	1.38 <sup>b</sup>	1.44 <sup>b</sup>	1.69 <sup>a</sup>	1.43 <sup>b</sup>	1.48 <sup>a</sup>
	G2	1.45 <sup>b</sup>	1.61 <sup>a</sup>	1.21 <sup>c</sup>	1.51 <sup>ab</sup>	1.44 <sup>a</sup>
	Media	1.41 <sup>a</sup>	1.52 <sup>a</sup>	1.45 <sup>a</sup>	1.47 <sup>a</sup>	
<b>Largo de radícula</b>	G1	14.69 <sup>b</sup>	25.02 <sup>a</sup>	24.11 <sup>a</sup>	25.94 <sup>a</sup>	22.44 <sup>b</sup>
	G2	24.82 <sup>b</sup>	25.47 <sup>ab</sup>	19.91 <sup>c</sup>	27.15 <sup>a</sup>	24.34 <sup>a</sup>
	Media	19.76 <sup>c</sup>	25.24 <sup>a</sup>	22.01 <sup>b</sup>	26.54 <sup>a</sup>	
<b>Raíces seminales</b>	G1	0.50 <sup>c</sup>	1.36 <sup>b</sup>	2.20 <sup>a</sup>	1.23 <sup>b</sup>	1.32 <sup>b</sup>
	G2	2.26 <sup>a</sup>	2.03 <sup>a</sup>	2.20 <sup>a</sup>	2.43 <sup>a</sup>	2.23 <sup>a</sup>
	Media	1.38 <sup>b</sup>	1.70 <sup>b</sup>	2.20 <sup>a</sup>	1.83 <sup>ab</sup>	

Porcentaje de germinación de los días 1, 2 y 3, de los Genotipo 1 y 2 (G1, G2), Ácido Salicílico (AS), Citrulina (CI), Ácido Húmico (AH), Agua de la llave (AL), porcentaje de germinación (PG), diámetro de radícula (DR), largo de radícula (LR) y Numero de raíces seminales laterales (RS). Misma letra en cada columna (a, b) o por hilera (a, b y c), no son diferentes (Tukey,  $P < 0.05$ ).

Por otro lado, en el segundo experimento se puede observar en el Cuadro 3 el progreso y crecimiento vegetativo de las plantas de maíz en relación con los genotipos y los promotores. En el caso del desarrollo vegetativo, se observa que el genotipo 1 (G1=MS 405) es diferente para la variable de velocidad de germinación (VG) y emergencia (EMERG) con respecto a los genotipos G2 y G3 (G2=Arlequín; G3=MS 404) y con diferentes promotores AS=ácido salicílico, CI=citrulina, AH=ácido húmico. Para el volumen del tallo y hoja (VTYH) fue diferente en G3 con el promotor CI, pero igual que el G1 con los promotores AH, CI, AS. Para la variable CLFI los genotipos 1 y 2 presentaron el mismo patrón de comportamiento con los diferentes promotores, pero diferente con el genotipo 3 con los promotores AH y el AS. El diámetro del tallo es igual entre los promotores, pero diferentes con los genotipos, ya que con el genotipo 1 y 3 son diferentes con respecto al 2. El promotor AH fue diferente para la variable NH (número de hojas) con respecto a los otros dos (CI, AS) y en los genotipos 1 y 3 (G1=MS 405,

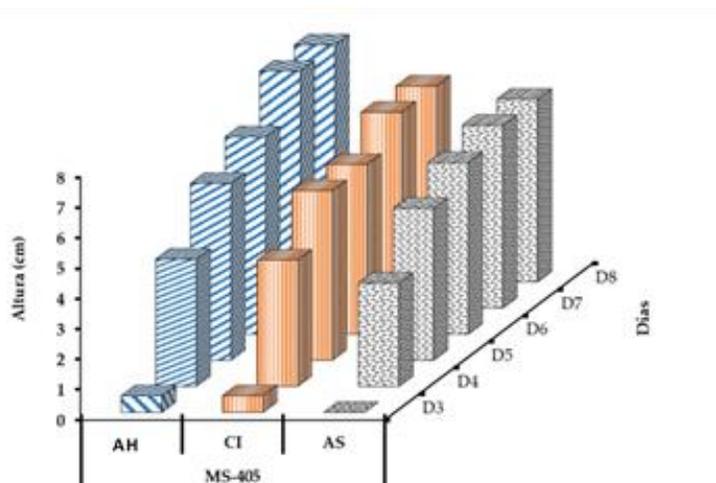
G3=MS 404) existió diferencia con respecto al 2 (G2=Arlequín). El AF (área foliar) no presentó diferencia entre los genotipos, sin embargo, respecto a los promotores fue diferente SH que CI y AS.

**Cuadro 3.** Comportamiento de las medias de los genotipos G1=MS 405, G2=Arlequín, G3=MS 404 y los promovedores AS=ácido salicílico, CI=citrulina, AH=ácidos húmicos.

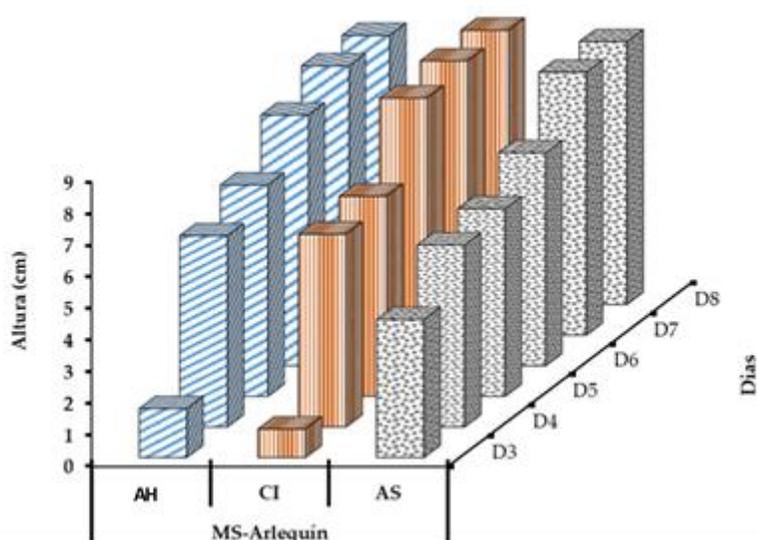
VAR	GEN	Promovedor			MEDIA
		AH	CI	AS	
VG	G1	13.75 <sup>cd</sup>	15.66 <sup>bcd</sup>	9.17 <sup>d</sup>	12.86 <sup>b</sup>
	G2	18.87 <sup>abc</sup>	18.21 <sup>abc</sup>	22.54 <sup>ab</sup>	19.87 <sup>a</sup>
	G3	22.63 <sup>ab</sup>	24.06 <sup>a</sup>	22.38 <sup>ab</sup>	23.02 <sup>a</sup>
	MEDIA	18.41 <sup>a</sup>	19.31 <sup>a</sup>	18.03 <sup>a</sup>	
EMERG	G1	60 <sup>b</sup>	84 <sup>a</sup>	60 <sup>b</sup>	68 <sup>b</sup>
	G2	90 <sup>a</sup>	93 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>	94 <sup>a</sup>
	G3	90 <sup>a</sup>	94 <sup>a</sup>	94 <sup>a</sup>	93 <sup>a</sup>
	MEDIA	80 <sup>b</sup>	90 <sup>a</sup>	85 <sup>ab</sup>	
VTYH	G1	10.1 <sup>ab</sup>	12.7 <sup>ab</sup>	6.2 <sup>b</sup>	9.6 <sup>a</sup>
	G2	15.0 <sup>a</sup>	15.0 <sup>a</sup>	12.0 <sup>ab</sup>	14.0 <sup>a</sup>
	G3	15.0 <sup>a</sup>	7.0 <sup>b</sup>	9.0 <sup>ab</sup>	10.3 <sup>a</sup>
	MEDIA	13.4 <sup>a</sup>	11.6 <sup>ab</sup>	9.1 <sup>b</sup>	
VR	G1	1.66 <sup>a</sup>	3.33 <sup>a</sup>	4.67 <sup>a</sup>	3.22 <sup>a</sup>
	G2	2.00 <sup>a</sup>	3.33 <sup>a</sup>	2.00 <sup>a</sup>	3.44 <sup>a</sup>
	G3	5.00 <sup>a</sup>	3.00 <sup>a</sup>	3.00 <sup>a</sup>	3.67 <sup>a</sup>
	MEDIA	2.89 <sup>a</sup>	3.22 <sup>a</sup>	3.22 <sup>a</sup>	
CLFI	G1	45.6 <sup>ab</sup>	51.9 <sup>a</sup>	44.0 <sup>ab</sup>	47.2 <sup>a</sup>
	G2	40.1 <sup>bc</sup>	46.7 <sup>ab</sup>	53.6 <sup>a</sup>	44.1 <sup>a</sup>
	G3	31.9 <sup>c</sup>	51.5 <sup>a</sup>	37.0 <sup>bc</sup>	40.1 <sup>a</sup>
	MEDIA	39.2 <sup>c</sup>	50.1 <sup>a</sup>	44.9 <sup>b</sup>	
DMT	G1	0.54 <sup>bc</sup>	0.77 <sup>a</sup>	0.40 <sup>c</sup>	0.57 <sup>b</sup>
	G2	0.70 <sup>ab</sup>	0.83 <sup>a</sup>	0.80 <sup>a</sup>	0.78 <sup>a</sup>
	G3	0.70 <sup>ab</sup>	0.60 <sup>abc</sup>	0.70 <sup>ab</sup>	0.67 <sup>ab</sup>
	MEDIA	0.65 <sup>a</sup>	0.73 <sup>a</sup>	0.63 <sup>a</sup>	
NH	G1	6.1 <sup>b</sup>	6.0 <sup>b</sup>	4.7 <sup>c</sup>	5.6 <sup>b</sup>
	G2	7.0 <sup>ab</sup>	7.0 <sup>ab</sup>	7.0 <sup>ab</sup>	7.3 <sup>a</sup>
	G3	8.0 <sup>a</sup>	6.0 <sup>b</sup>	7.0 <sup>ab</sup>	7.0 <sup>a</sup>
	MEDIA	7.0 <sup>a</sup>	6.3 <sup>b</sup>	6.2 <sup>b</sup>	
AF	G1	61.2 <sup>abc</sup>	63.7 <sup>abc</sup>	45.5 <sup>bc</sup>	56.8 <sup>a</sup>
	G2	51.2 <sup>abc</sup>	78.2 <sup>ab</sup>	61.9 <sup>abc</sup>	74.0 <sup>a</sup>
	G3	81.9 <sup>a</sup>	40.5 <sup>c</sup>	43.5 <sup>c</sup>	55.3 <sup>a</sup>
	MEDIA	64.8 <sup>a</sup>	60.8 <sup>ab</sup>	50.3 <sup>b</sup>	
LR	G1	20.2 <sup>b</sup>	25.7 <sup>b</sup>	23.0 <sup>b</sup>	23.0 <sup>a</sup>
	G2	21.0 <sup>b</sup>	33.7 <sup>ab</sup>	25.0 <sup>b</sup>	28.6 <sup>a</sup>
	G3	27.0 <sup>b</sup>	25.0 <sup>b</sup>	47.0 <sup>a</sup>	33.0 <sup>a</sup>
	MEDIA	22.7 <sup>b</sup>	28.1 <sup>ab</sup>	31.7 <sup>a</sup>	
ALT	G1	7.81 <sup>abc</sup>	6.46 <sup>bc</sup>	6.03 <sup>c</sup>	6.77 <sup>b</sup>
	G2	8.31 <sup>ab</sup>	8.67 <sup>ab</sup>	7.88 <sup>abc</sup>	8.29 <sup>a</sup>
	G3	9.52 <sup>a</sup>	9.98 <sup>a</sup>	7.94 <sup>abc</sup>	9.15 <sup>a</sup>
	MEDIA	8.55 <sup>a</sup>	8.37 <sup>a</sup>	7.28 <sup>b</sup>	

†Las variables VG, EMERG, VTYH, VR, CLFI, RESEC, DMT, NH, AF, LR, ALT, presentaron diferencias estadísticas entre los genotipos y los promotores (SH, CI, AS) ( $p \leq 0.05$ ). a, b, c: Valores medios por columna con letra distinta son estadísticamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ). VG=%, EMERG=%, VTYH=mm, CLFI=mm., DMT=mm, AF=cm<sup>2</sup>, LR=cm y ALT=cm.

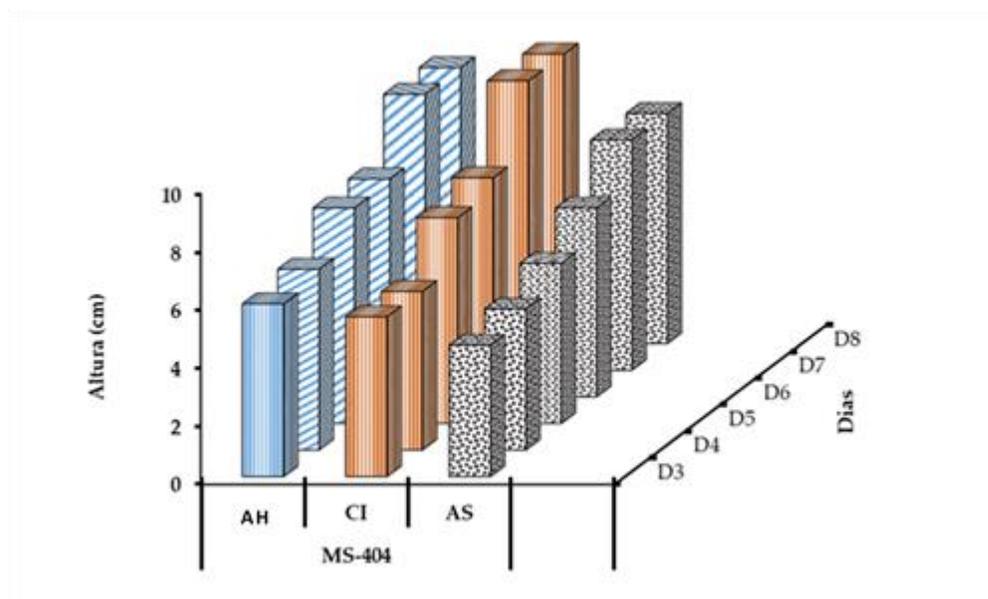
En cuanto a la altura del G1 (MS 405) durante 8 d después de la emergencia con respecto a los controles AH, CI y AS tuvo mayor velocidad de crecimiento con AH y CI, posterior del día 3, pero en AS no se observa altura de crecimiento durante los primeros días, incremento después del día 3 y presento el mismo comportamiento de altura que lo controles mencionados anteriormente (Figura 2). En la altura; G2 Arlequín después de la emergencia con respecto a los controles durante los 8 d, mostrando que CI la altura se ve afectada durante los primeros días. No obstante, alcanza una altura homogénea después del día 3. Por otro lado, con AH mostró un comportamiento similar, sin embargo, con el tratamiento de AS la velocidad de altura se puede apreciar desde los primeros días y hasta el día 8 (Figura 3). En el genotipo 3 (MS 404) la velocidad de altura de crecimiento se observa que desde los primeros días con respecto a los controles de AH, CI y AS, aunque en los últimos días se nota un ligero despunte entre el día 7 y 8 aumentando considerablemente la altura (10 y 8 cm) (Figura 4).



**Figura 2.** Altura del G1=MS405, durante 8 d después de la emergencia, con respecto a los controles AH=ácido húmico, CI= citrulina y AS= ácido salicílico.



**Figura 3.** Altura del G2=Arlequín, durante 8 d después de la emergencia, con respecto a los controles AH=ácido húmico, CI= citrulina y AS= ácido salicílico.



**Figura 4.** Altura del G3=MS-404, durante 8 d después de la emergencia, con respecto a los controles AH=ácido húmico, CI= citrulina y AS= ácido salicílico.

#### 4. DISCUSIÓN

En el primer experimento el mayor porcentaje de germinación lo tuvo el genotipo G1 y cuando se expusieron a los controles de la germinación, el ácido húmico (AH) fue el que presentó una mayor germinación para ambos genotipos (Antílope blanco y Antílope amarillo). Esto concuerda con lo que señalaron Šerá y Novák. (2011) y Rodrigues *et al.* (2017), donde evaluaron el comportamiento de tratamientos de semillas de maíz a base de producto comercial con ácido húmico, encontraron que promueve un mayor crecimiento de la plántula, además de tener mayor masa seca de brotes en maíz; influyendo de manera positiva en el índice de velocidad de emergencia hasta en una dosis de 158 ml 100 kg<sup>-1</sup> semillas. Por otro lado, en otros estudios similares con semillas de Lamb's Quarters (*Chenopodium album agg.*) encontraron las principales diferencias en la germinación y la longitud de los brotes en los primeros días del experimento (Šerá y Novák, 2011). Los resultados del presente trabajo demuestran que la germinación de las semillas varía de acuerdo con los genotipos que se utilicen.

Para el diámetro de radícula no se manifestaron diferencias entre genotipos ni entre promotores en nuestro estudio. Sin embargo, Rodríguez *et al.* (2017) mencionaron que dosis altas con ácido salicílico pueden inhibir la germinación, desarrollo y progreso de la planta. Así mismo, Pertuit *et al.* (2001) mencionaron que las sustancias húmicas con base de leonardita en dosis altas inhibieron el crecimiento de raíces y brotes.

Además, el largo de la radícula entre genotipos tuvo un mayor desarrollo del genotipo G2 y entre controles (CI y AL). En este sentido, Joshi *et al.* (2019) mencionaron sobre la importancia del transporte y el catabolismo de la citrulina en las plantas. De la misma manera, un estudio con portainjertos de cereza tuvo efectos directos en el enraizamiento *in vitro*, así como una mayor reserva de prolina en las hojas y raíces (Sarropoulou *et al.*, 2016).

Con respecto a las raíces seminales, el mayor desarrollo fue para el genotipo G2 y entre controles fue el ácido húmico quien tuvo mayor efecto. Similarmente Olk *et al.* (2018) mencionaron que los ácidos húmicos benefician el incremento y desarrollo radicular. Al igual, Qin y Leskovar, (2020) observaron una mayor biomasa de hojas, brotes y raíces

después del trasplante debido a tasas de crecimiento más rápidas en tomate, pimiento, lechuga y mejoraron las características del desarrollo de raíces del pimiento y sandía.

Igualmente, en nuestro estudio, al ser sometidos los genotipos a los tratamientos pregerminativos, estos presentaron diferencias altamente significativas ( $p < 0.05$ ). Para VG y EMERG, G1 presentó diferencias estadísticas significativas con el promotor CI; ya que la citrulina mejora los niveles de L-arginina, ayudando a producir óxido nítrico (Valle *et al.*, 2017). En el mismo contexto, Song *et al.*, (2020) indicaron que la citrulina, mejora el equilibrio del nitrógeno soluble porque elimina los radicales hidroxilos y protege del daño oxidativo en las enzimas celulares (Galili *et al.*, 2014). Además, al existir una mayor disponibilidad de nitrógeno soluble por la acción de la síntesis de los aminoácidos se aumenta la energía por el ATP generando un mejor desarrollo y crecimiento más rápido por los procesos fisiológicos-bioquímicos antes mencionados (Rosental *et al.*, 2014). Del mismo modo, se observaron efectos simples (Gen\*Promo) en las variables VTYH, CLFI, DMT, ALT para citrulina en los genotipos G1, G2 y G3.

Así mismo, en el Cuadro 3 mostramos el efecto del control Ácido salicílico (AS) el cual tuvo efecto para EMERG, con el genotipo 2. Respecto a estos resultados, Bijanzadeh *et al.*, (2019) y Dzib-Ek *et al.*, (2022) sugirieron que el ácido salicílico en concentraciones entre 1 y 0.01  $\mu\text{M}$  favorecen la longitud de la raíz de las plántulas y la formación de raíces secundarias en comparación con los controles, ya que aumentaron significativamente ( $p < 0.05$ ). Lo anterior se alude porque el ácido salicílico está involucrado en la regulación de diversos procesos de desarrollo y progreso de plantas, incluida la germinación de semillas, mejorando su vigor (Rangel *et al.*, 2010; Chitnis *et al.*, 2014).

Para las sustancias o ácidos húmicos (AH), en el Cuadro 3 se observó que fue estadísticamente diferente en G2 y G3 con respecto a G1 en la variable EMERG. De la misma forma para VTYH además de ser diferente para NH, AF en G3. Por lo anterior, Bijanzadeh *et al.*, (2019) mencionaron que el ácido húmico mostró efectos bioquímicos como el aumento en la absorción en la membrana celular de potasio, mayor eficiencia en el proceso fotosintético, respiración y por ende su aplicación en híbridos de maíz tuvo efectos positivos en la mejora del crecimiento de las plántulas (Figura 1-3). También se

ha reportado que los AH están relacionadas con las vías metabólicas de los metabolismos primarios del Ciclo del Ácido Tricarboxílico (TCA) o Ciclo de Krebs y los metabolismos de los aminoácidos (Popa *et al.*, 2022). Se observó que entre promotores no existe diferencia estadística significativa en la velocidad de germinación.

Estos resultados anteriores son de gran importancia para futuros estudios en la mejora de plantas, la revisión temprana y oportuna de las condiciones de cultivo para la obtención de plantas de mejor calidad y rendimiento. Conjuntamente, esta información puede ser útil en la selección de genotipos y promotores para futuros proyectos dentro de la biotecnología vegetal.

## 5. CONCLUSIÓN

Los resultados de estas investigaciones sugieren que el uso de promotores es de gran importancia para la germinación de semillas en los genotipos utilizados y sus interacciones. Se observó que el ácido húmico fue más sensible al crecimiento de raíces en los genotipos G1 y G2 (antílope blanco y antílope amarillo), mientras que una menor proporción se relacionó con la actividad de citrulina y en experimentos *in vitro* se obtuvo un 95 % de germinación para ácido húmico. Sin embargo, trabajos en *in situ* remojando la semilla durante una hora antes se tiene un efecto positivo en la tasa, el índice de germinación y el crecimiento de las plántulas. También se observaron altos niveles de germinación de citrulina a estimulación de 1,000 ppm, que permitió tasas de germinación del 94 y 93 % de los genotipos G2 y G3 (Arlequin y MS-404, respectivamente) en suelos ácidos tipo cambisol dístico. Así como el aumento de clorofila, volumen, altura del tallo y número de hojas de los mismos genotipos, observados 15 d después de la germinación. Es importante mencionar que se necesita más investigación sobre el uso de promotores de crecimiento para determinar cómo usar los estimulantes de manera adecuada para promover la germinación de semillas y garantizar una mejora del producto.

## 6. REFERENCIAS

- Ali, A.S., Elozeiri, A.A., 2017. Metabolic Processes During Seed Germination. *Advances in Seed Biology*. 8:141-166.
- Angulo-Castro, A., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Almaraz-Suárez, J.J., Delgadillo-Martínez, J., Jiménez-Fernández, M., García-Barradas, O., 2017. Crecimiento y eficiencia fotoquímica en del fotosistema ii plántulas de 2 variedades de *Capsicum inoculadas annum* L. con rizobacterias u hongos micorrícicos arbusculares. *Revista de Argentina de Microbiología*. 50(2):178-188.
- Anh, T.P., Sun, M., Tran-Nguyen, N., Park, S., Ayele, B.T., 2019. Molecular mechanisms of seed germination. *Sprouted Grains*. 1:1-24.
- Bautista-Rodríguez, E.I., Lagunes-Espinoza, L.C., Lara-Viveros, F.M., Castelán-Estrada, M., Conde-Martínez, V., 2017. Comparison of pre-germination treatments in *Lupinus spp.* and their effects on germination and related solutes. *Botanical Sciences*. 95(3):577-590.
- Berdjour, A., Yakamba, D.I., Rahman, N.A., Asomaning, O.D., Yaya, K.A., Ajala, S.O., 2020. Direct Estimation of Maize Leaf Area Index as Influenced by Organic and Inorganic Fertilizer Rates in Guinea Savanna. *Journal of Agricultural Science*. 12(6): 66-75.
- Bijanzadeh, E., Naderi, R., Egan, T.P., 2019. Exogenous application of humic acid and salicylic acid to alleviate seedling drought stress in two corn (*Zea mays L.*) hybrids. *Journal of Plant Nutrition*. 42(13):1483-1495.
- Calvo, P., Nelson, L., Kloepper, J.W., 2014. Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*. 383: 3-41.
- Canellas, L., P, Olivares, F.L., Aguiar, N.O., Jones, D.L., Nebbioso, A., Mazzei, P., Piccolo, A., 2015. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*. 196: 15-27.
- Caroca, R., Zapata, N., Vargas, M., 2016. Investigación: efecto de la temperatura sobre la germinación de cuatro genotipos de maní (*Arachis hypogaea l.*). *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*. 32(2): 94-101.

- Chitnis, V.R., Gao, F., Yao, Z., Jordan, M.C., Park, S., Ayele, B.T., 2014. After-ripening induced transcriptional changes of hormonal genes in wheat seeds: The cases of brassinosteroids, ethylene, cytokinin and salicylic acid. *PLOS ONE*. 9(1):1-14
- Conselvan, G.B., Pizzeghello, D., Francioso, O., di Foggia, M., Nardi, S., Carletti, P, 2017. Biostimulant activity of humic substances extracted from leonardites. *Plant and Soil*. 420(2): 119-134.
- Copeland, L.O., McDonald, M.B., 2001. Seed germination. In: *Principles of seed science and technology*. Seed technology. McDonald. 4:72-123.
- Dawood, M.G., Sadak, M.Sh., Bakry, B.A., El Karamany, M.F., 2019. Comparative studies on the role of benzoic, t-cinnamic, and salicylic acids on growth, some biochemical aspects, and yield of three flax cultivars grown under sandy soil conditions. *Bulletin of the National Research Centre*. 43(112).
- Debouza, N.E., Thruppoyil, S.B., Gopi, K., Zain, S., Ksiksi, T., 2021. Plant and seed germination responses to global change, with a focus on CO<sub>2</sub>: A review. *One Ecosystem*.1-34
- Ding, J., Feng, H., 2019. Controlled germination for enhancing the nutritional value of sprouted grains. *Sprouted Grains*. 5:91-112
- Doria, J., 2010. Generalidades sobre las semillas: su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*. 30(1): 74-85
- du Jardin, P., 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories, and regulation. *Scientia Horticulturae*. 196: 3-14.
- Dzib-Ek, G., Villanueva-Couoh, E., Garruña-Hernández, R., Vergara Yoisura S, Larqué-Saavedra A 2022. Efecto del ácido salicílico en la germinación y crecimiento radicular del tomate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 12(4): 735-740
- El-Mergawi, R.A., 2019. Suitability of high doses of phenolic acids for controlling *Corchorus olitorius* and *Phalaris minor* weeds. *Gesunde Pflanzen*. 71(4): 261-269.
- Farajollahi, A., Gholinejad, B., Jonaidi, J.H., 2014. Effects of different treatments on seed germination improvement of *Calotropis pérsica*. *Advances in Agriculture*. 5:1-6.
- Galili, G., Avin-Wittenberg, T., Angelovici, R., Fernie, A.R., 2014. The role of photosynthesis and amino acid metabolism in the energy status during seed development. *Frontiers in Plant Science*. 5(447):1-6.

- García, A.E., 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Offset Larios. México. 246.
- Giachin, G., Nepravishta, R., Margon, A., Mandaliti, W., Melino, S., Legname, G., Scaini, D., Mazzei, P., Alessandro, P., Maurizio, P., Liviana, L., 2017. The mechanisms of humic substances self-assembly with biological molecules: The case study of the prion protein. PLOS ONE. 12(11): 1-16
- Gómez-Maqueo, X., Gamboa-de Buen, A., 2016. The Dynamics of Plant Cell Wall in Muro Modifications and its Physiological Implications on Seed Germination. New Challenges in Seed Biology. Intech Open. 155-176
- González-Zertuche, L., Orozco-Segovia, A., 1996. Métodos de análisis de datos en la germinación de semillas, un ejemplo: *Manfreda brachystachya*. Boletín de la Sociedad Botánica de México 58: 15-30.
- Haas, T., Cesar, J., González, A., Saavedra, L., 2015. Efecto del ácido salicílico en el crecimiento de la raíz y biomasa total de plántulas de trigo. Terra Latinoamericana. 33(1): 63-68.
- Hasanuzzaman, M., Responses, S., 2019. Agronomic Crops. In Agronomic Crops 3.
- Joshi, V., Joshi, M., Silwal, D., Noonan, K., Rodriguez, S., Penalosa, A., 2019. Systematized biosynthesis and catabolism regulate citrulline accumulation in watermelon. Phytochemistry. 162(2):129-140.
- Martínez, S.J., Virgen, V.J., Peña, O.M.G., Santiago, R.A., 2010. Índice de velocidad de emergencia en líneas de maíz. Revista mexicana de ciencias agrícolas. 1(3): 289-304.
- Matilla, A.J., 2008. Desarrollo y germinación de las semillas. Fundamentos de Fisiología vegetal. Madrid, McGraw-Hill, Interamericana.1-22.
- McSteen, P., Zhao, Y., 2008. Plant hormones and signaling common themes and new developments. Developmental Cell. 14(4): 467-473.
- Mendoza-Tafolla, R.O., Juarez-Lopez, P., Ontiveros-Capurata, R.E., Sandoval-Villa, M., Alia-Tejacal, I., Alejo-Santiago, G., 2019. Estimating nitrogen and chlorophyll status of romaine lettuce using SPAD and at LEAF readings. Not. Bot. Horti. Agrobi. 47(3): 751-756.

- Mendoza-Tafolla, R.O., Juárez-Lopez, P., Ontiveros-Capurata, R.E., Alia-Tejagal, I., Guillén-Sánchez, D., Villegas-Torres, O.G., Chávez-Bárceñas, A.T., 2022. Estimación de la concentración de clorofila, nitrógeno y biomasa en arúgula (*Eruca sativa* Mill.) mediante mediciones portátiles no destructivas. *Bioagro*. 34(2): 151-162.
- Miransari, M., Smith, D.L., 2014. Plant hormones and seed germination. *Environmental and Experimental Botany*. 99: 110-121.
- Morales, R.A., López, C.C., Kohashi, S.J., Miranda, C.S., García, E.A., 2015. Comparación de los componentes del rendimiento en variedades de frijol en condiciones de acidez y humedad residual del suelo en el sur de Veracruz. *Terra Latinoamericana* 33(4): 309-319.
- Nielsen, R.L.B., 2016. Silk development and emergence in corn. *Purdue University Department of Agronomy Corny News Network* 1-5.
- Olk, D.C., Dinnes, D.L., Scoresby J.R., Callaway, C.R., Darlington, J.W., 2018. Humic products in agriculture: potential benefits and research challenges—a review. *Journal of Soils and Sediments*. 18(8): 2881-2891.
- Ozpinar, H., Dag, S., Yigit, E., 2017. Alleopathic effects of benzoic acid, salicylic acid, and leaf extract of *Persica vulgaris* Mill. (*Rosaceae*). *South African Journal of Botany*. 108: 102-109.
- Pertuit, A.J., Dudley, J.B., Toler, J.E., 2001. Leonardite and fertilizer levels influence tomato seedling growth. *HortScience*. 36: 913-915.
- Pita, J., Pérez, F., 1998. Germinación de semillas (hoja divulgadora). Ministerio de Agricultura Pesca Y Alimentación, secretaria general Técnica. 20.
- Popa, D.G., Lupu, C., Constantinescu-Aruxandei, D., Oancea, F., 2022. Humic Substances as Microalgal Biostimulants-Implications for Microalgal Biotechnology. *Mar. Drugs*. 20(5):327.
- Qin, K., Leskovar, D.I., 2020. Humic substances improve vegetable seedling quality and post-transplant yield performance under stress conditions. *Agriculture* 10(254):1-18.
- Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C., Job, D., 2012. Seed Germination and Vigor. *Annual Review of Plant Biology*. 63:507-533

- Rangel, S.G., Castro, M.E., Beltrán, P.E., Reyes, C.H., García, P.E., 2010. El ácido salicílico y su participación en la resistencia a patógenos en plantas. *Biológicas*. 12(2): 90–95.
- Raskin, I., 1992. Role of Salicylic Acid in Plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 43(1): 439-463.
- Rodrigues, L.A., Alves, C.Z., Rego, C.H.Q., da Silva, T.R.B., da Silva, J.B., 2017. Humic acid on germination and vigor of corn seeds. *Revista Caatinga*. 30(1):149-154.
- Rodríguez L.L., Gonzalez-Ramírez M., Gómez-Rincón M., Guevara-Hernández F., Salas-Marina Mi. A., y Gordillo-Curiel A. 2017. Efectos del ácido salicílico en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista de La Facultad de Agronomía*. 34(3):253-269.
- Rosental, L., Nonogaki, H., Fait, A., 2014. Activation and regulation of primary metabolism during seed germination. *Seed Science Research*. 24(1): 1-15.
- Sáenz, R.M.N., Cassab, G.I., 2021. Primary root and mesocotyl elongation in maize seedlings: Two organs with antagonistic growth below the soil surface. *plants*.10:1-20.
- Santillán-Fernández, A., Carmona-Arellano, M.A., Salinas-Moreno, Y., Valdez-Lazalde, J.R., Vera-López, J.E., Pereira-Lorenzo, S., 2021. Relationship between maize seed productivity in Mexico between 1983 and 2018 with the adoption of genetically modified maize and the resilience of local races. *Agriculture*. 11(8):1-15
- Sarropoulou, V., Chatzissavvidis, C., Dimassi-Theriou, K., Therios, I., 2016. Effect of asparagine, cysteine, citrulline, and glutamine on in vitro rooting and biochemical constituents in cherry rootstocks. *Biologia Plantarum*. 60(1): 1-12.
- SAS. 2009. SAS Institute. SAS/STAT®9.2. User Guide Release. Cary, NC: SAS Institute Inc. USA. 111.
- Šerá, B., Novák, F., 2011. The effect of humic substances on germination and early growth of Lamb's Quarters (*Chenopodium album* agg.). *Biologia*. 66(3):270-276.
- Simlat, M., Skrzypek, E., Warchoń, M., Maciaszek, I., Ptak, A., 2019. Evaluation on stevia rebaudiana bertonii seed germination and seedling development under phytohormones treatment. *Scientia Horticulturae*. 257: 1-13

- Sobarzo-Bernal, O., Gómez-Merino, F.C., Alcántar-González, G., Saucedo-Veloz, C., Trejo-Téllez, L.I., 2021. Biostimulant effects of cerium on seed germination and initial growth of tomato seedlings. *Agronomy*. 11(1525): 1-14.
- Song, Q., Joshi, M., DiPiazza, J., Joshi, V., 2020. Functional relevance of citrulline in the vegetative tissues of watermelon during abiotic stresses. *Frontiers in plant Science*. 11(512): 1-13.
- Torres, A., Cova, U., Valera, D., 2018. Efecto del proceso de germinación de granos de Cajanuscajan en la composición nutricional, ácidos grasos, antioxidantes y bioaccesibilidad mineral. *Revista chilena de nutrición*. 45(4): 323-330.
- Tosquy-Valle, O.H., Zetina-Lezama, R., López-Salinas, E., Ibarra-Pérez, F.J., Villar-Sánchez, B., Rodríguez-Rodríguez, J.R., 2020. Comparación de genotipos de frijol negro opaco en suelos ácidos del sur de Veracruz. *Terra Latinoamericana* 38: 91-102.
- Valle, M.R., Covarrubias, P.J., Ramírez, P.J.G., Aguirre, M.C.L., Iturriaga, F.G., Raya, P.J.C., 2017. Efecto del osmoacondicionamiento sobre la germinación del maíz tipo palomero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 8(2):1-16
- Varela, S.A., Arana, V., 2011. Latencia y germinación de semillas. Tratamientos pregerminativos. Serie técnica: "Sistemas Forestales Integrados". Área Forestal - INTA EEA Bariloche. 1-10.
- Zetina-Lezama, R., Tosquy-Valle, O.H., López-Salinas, E., Ibarra-Pérez, F.J., Morales-Rivera A 2017. Adaptación de líneas recombinantes de frijol negro a suelos ácidos del sur de Veracruz. pp. 251-259. In: Avances en investigación agrícola, pecuaria, forestal, acuícola, pesquería, desarrollo rural, transferencia de tecnología, biotecnología, ambiente, recursos naturales y cambio climático 2017. Libro Científico Núm. 1. INIFAP, CP, UV, UACH, AVC, ITBOCA, ITUG, ITSH, UPH. Medellín, Veracruz, México.