

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Producción de Huitlacoche *Ustilago maydis* por Inoculación Inducida en Diferentes Variedades de Maíz en Metepec, Hidalgo.

Por:

**SUSANA YÁÑEZ ISLAS**

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Saltillo, Coahuila, México

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Producción de Huitlacoche *Ustilago maydis* por Inoculación Inducida en Diferentes Variedades de Maíz en Metepec, Hidalgo.

Por:

**SUSANA YÁÑEZ ISLAS**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

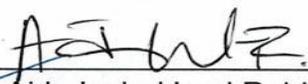
**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Aprobada por el Comité de Asesoría:

  
Dr. Alonso Méndez López  
Asesor Principal Interno

  
Dra. Miriam Sánchez Vega  
Asesor Principal Externo

  
Dra. Silvia Yudith Martínez Amador  
Coasesor

  
Dra. Aida Isabel Leal Robles  
Coasesor

  
Dr. José Antonio González Fuentes  
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Junio, 2022



### **Declaración de no plagio**

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar el autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior, me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

  
\_\_\_\_\_  
**Susana Yáñez Islas**

Asesor Principal

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alonso Méndez López**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por brindarme la oportunidad y brindarme todas las facilidades para estudiar mi carrera profesional

A mi asesor de tesis, Dr. Alonso Méndez López. Por su apoyo, confianza y enseñanzas que me brindo durante el desarrollo de la investigación, por su experiencia profesional y sobre todo por la gran ayuda en el impulso y aplicación de mis ideas.

A mis maestros de la carrera por brindarme sus conocimientos, particularmente al Dr. Víctor Manuel Reyes, Gerardo Galindo, Dr. Fabiola.

A las increíbles personas que conocí en el internado Femenil Hidalgo (cuarto 2), Belem, Feliciano, Aranza, Mariana, Marcela, Alison, Diana; porque formaron parte de este camino recorrido dándome ánimos en momentos complicados y ayudaron a adaptarme a un lugar nuevo, con sus risas, ocurrencias y esa actitud tan amigable, por todo eso y más gracias.

A las primeras amistades que hice al ingresar a la Universidad, Besy, Karina y Samuel, por su gran amistad y por estar siempre a pesar de ser de otras carreras. Siempre es bueno contar con una buena y sincera amistad como la de ustedes.

A mis amigos de la carrera, Dante, Marcos, Gil, María Luisa, por la amistad y compañerismo durante nuestros estudios.

## DEDICATORIA

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para entrar en el bello y maravilloso mundo del saber”

A mis padres **Carolina Islas Gómez** y **Epifanio Yáñez Neri**, quienes han sido unos padres sencillos que a la distancia continuaron pendientes brindando su apoyo incondicional, y gracias a eso me han dado la motivación necesaria para continuar en este gran camino. Con todo eso y mucho más me han ayudado a ser una mejor persona y a valorar lo que se tiene, a que a pesar de las adversidades siempre hay que ser positivos y seguir adelante.

Gracias a ustedes mis padres por tanto cariño.

## INDICE DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INDICE DE CONTENIDO</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1. Objetivos</b> .....	<b>16</b>
1.1.1. Objetivo general.....	16
1.1.2. Objetivos específicos .....	16
<b>1.2. Hipótesis</b> .....	<b>16</b>
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1. Generalidades de los hongos</b> .....	<b>17</b>
2.1.1. Basidiomycetes.....	18
2.1.2. Carbones .....	18
<b>2.2. Huitlacoche <i>Ustilago maydis</i></b> .....	<b>19</b>
2.2.1. Clasificación taxonómica.....	20
2.2.2. Ciclo biológico.....	21
2.2.3. Agente etológico .....	23
2.2.4. Importancia económica .....	24
2.2.5. Composición nutrimental.....	26
<b>2.3. Interacción biotrófica maíz-<i>Ustilago maydis</i></b> .....	<b>27</b>
<b>2.4. Diversidad genética de cepas</b> .....	<b>28</b>
<b>2.5. Sintomatología de la enfermedad</b> .....	<b>29</b>
<b>2.6. Importancia del maíz</b> .....	<b>30</b>
2.6.1. Taxonomía del maíz.....	33
<b>2.7. Características de los maíces utilizados</b> .....	<b>34</b>

2.7.1.	Faisán.....	34
2.7.2.	Albatros.....	35
2.7.3.	Niebla.....	35
2.7.4.	Euros .....	35
2.7.5.	Zarcos.....	36
2.7.6.	A7573 .....	36
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1.	Localización geográfica y descripción del sitio de experimental.....	36
3.2.	Características del lote del experimento .....	37
3.3.	Manejo del cultivo .....	38
3.4.	Establecimiento del experimento.....	39
3.5.	Selección de cepas y preparación e incremento del inóculo .....	40
3.6.	Procedimiento de inoculación .....	41
3.7.	Variables a evaluar.....	42
3.8.	Análisis estadístico.....	42
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
4.1.	Análisis de varianza .....	44
4.2.	Comparación de medias.....	44
4.2.1.	Grosor de mazorca .....	45
4.2.2.	Largo de mazorca .....	47
4.2.3.	Peso de mazorca .....	48
4.2.4.	Incidencia del hongo en mazorcas .....	50
4.2.5.	Severidad de la infección de <i>U. maydis</i> en mazorcas de maíz .....	51
4.3.	Análisis de correlación entre variables .....	53
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>55</b>
<b>VI.</b>	<b>LITERATURA CONSULTADA.....</b>	<b>56</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Composición nutrimental del huitlacoche con base a lo reportado en distintos estudios. (Rodríguez et al. 2021).....	26
<b>Cuadro 2.</b> Cuadrados medios del análisis de varianza, para las variables obtenidas en la evaluación de la susceptibilidad de híbridos de maíz a <i>U. maydis</i> . Metepec, Hidalgo, México, 2021. ....	44
<b>Cuadro 3.</b> Comparación de medias de Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ), entre las variables evaluadas para determinar la susceptibilidad de híbridos de maíz a <i>U. maydis</i> . Metepec, Hidalgo, México, 2021. ....	45
<b>Cuadro 4.</b> Correlación entre variables evaluadas para determinar la susceptibilidad de híbridos de maíz a <i>U. maydis</i> . Metepec, Hidalgo, México, 2021.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representación esquemática del ciclo de vida de <i>Ustilago maydis</i> . Izquierda; se muestra la germinación de las teliosporas con la formación del promicelio y las cuatro basidiosporas (Fuente: Maldonado, 2019). .....	22
<b>Figura 2.</b> Algunos Ustilaginales que causan carbones en cultivos de importancia económica (Fuente: Cabrera <i>et al.</i> , 2012). .....	23
<b>Figura 3.</b> Ubicación geográfica del terreno donde se estableció el experimento. ....	38
<b>Figura 4.</b> Representación gráfica del procedimiento de desarrollo del cultivo .....	39
<b>Figura 5.</b> Inoculación de <i>U. maydis</i> por inyección en jilotes de maíz.....	41
<b>Figura 6.</b> Promedio de grosor de mazorcas inoculadas con huitlacoche.....	46
<b>Figura 7.</b> Medias de la longitud de mazorcas inoculadas con huitlacoche. ....	47
<b>Figura 8.</b> Medias del peso de mazorcas (g) inoculadas con huitlacoche.....	49
<b>Figura 9.</b> Medias de la incidencia presentada en mazorcas inoculadas con huitlacoche. ....	50
<b>Figura 10.</b> Medias de la severidad de huitlacoche en mazorcas inoculadas con <i>U. maydis</i> . .....	52

## RESUMEN

El huitlacoche es el resultado de la infección de un basidiomiceto parásito para el maíz llamado *Ustilago maydis*, formador de agallas en los granos de maíz, que incrementa su volumen y forma una masa negra de teliosporas, la cual es considerado en algunas regiones de México, como un alimento de alto valor nutricional, por su alto porcentaje proteico comparado con el grano de maíz sin esta infección, con sabor único y atractivo en la cocina mexicana. El presente trabajo está enfocado en identificar un genotipo comercial de maíz que sea altamente productivo y con características idóneas para la producción de huitlacoche, adaptado a las condiciones climáticas del Municipio de Metepec, Hidalgo. Se trabajó con un grupo de seis genotipos comerciales de la región. Para la evaluación del experimento se consideraron cinco variables, las cuales se mencionan a continuación: Grosor de la mazorca, largo de la mazorca, peso de mazorca, porcentaje de incidencia y porcentaje de severidad. El híbrido con mayor susceptibilidad a la cepa patogénica de *U. maydis* para la producción de huitlacoche mediante inoculación artificial bajo las condiciones geográficas y ambientales del municipio de Metepec, Hidalgo, México fue Faisán, ya que presentó los valores más altos, e idóneos en los análisis realizados, entre los que destacan incidencia y severidad.

## I. INTRODUCCIÓN

Los hongos conforman uno de los grupos más diversos de la naturaleza. Se calcula que existen unas 250,000 especies, entre las que pueden encontrarse variedades micro y macroscópicas (Paredes, 2001).

Los hongos comestibles silvestres tienen un alto valor económico y gastronómico, debido a sus propiedades nutricionales y medicinales. Son considerados como alimentos funcionales, pues además de sus propiedades nutricionales, se ha demostrado efectos benéficos para la salud que pueden ser utilizados en la prevención o tratamiento de enfermedades. Su acción terapéutica es atribuida a los compuestos bioactivos que poseen en sus cuerpos fructíferos. A nivel mundial, sólo se ha estudiado 6% de la diversidad fúngica; existe una amplia gama de hongos comestibles silvestres, que pueden ser consumidos con seguridad y que pueden ser aprovechados para el desarrollo de productos alimenticios (Cano-Estrada & Romero-Bautista, 2016).

El huitlacoche o cuitlacoche *Ustilago maydis* Cda., conocido como carbón del maíz es un hongo que en México se consume desde épocas prehispánicas; este hongo es consumido tradicionalmente como alimento o condimento el cual es producido por el basidiomiceto *U. maydis*, que afecta la parte aérea del maíz formando agallas en cualquiera de sus órganos; incluyendo mazorcas, espigas y hojas. El carbón del maíz aparece en cualquier lugar que se cultive esta planta; sin embargo, aparece con mayor frecuencia en las áreas cálidas y moderadamente secas, donde ocasiona graves daños en las variedades susceptibles (Agrios, 2005).

Generalmente se recolecta la agalla de forma manual y se vende en estado fresco, aunque ahora también, se comercializa envasado, deshidratado, liofilizado y en menor medida como extracto; existe una gran variedad de platillos para la preparación culinaria de este hongo (Paredes, 2001).

Actualmente el huitlacoche es un hongo muy popular y su consumo en México ha crecido a un ritmo acelerado en parte debido a su sabor peculiar ya sus propiedades nutraceuticas. Este hongo ha provocado gran interés por parte del agricultor para cultivarlo como un producto exótico, con mejores beneficios económicos, superiores a los obtenidos con la siembra de maíz (Méndez-López *et al.*, 2019).

El huitlacoche contiene carbohidratos, proteínas, ácidos grasos, minerales y vitaminas que contribuyen a su valor nutricional. Presenta un alto contenido de fósforos minerales como, magnesio, y calcio entre otros. Además, es rico en azúcares libres de fácil digestión como la glucosa, fructosa y su contenido de grasas saturadas y colesterol es bajo. Presenta buen aporte de aminoácidos esenciales y gran actividad antioxidante, por lo que, su consumo regular puede tener un efecto positivo en la nutrición y la salud humana (Méndez-López *et al.*, 2019). De ahí la importancia de obtener y propagar este hongo a bajos costos en medios económicos y de fácil adquisición; lo cual se traduciría en un producto más económico tanto para el productor como para el consumidor, por lo que, actualmente en diversas regiones de México se realizan siembras de maíz exclusivamente para la producción inducida de huitlacoche, donde el propósito es provocar infección por el hongo patógeno *U. maydis* y aprovechar los tumores que se desarrollan es la mazorca como hortaliza para venta en fresco o industrializado (Sánchez-Vega *et al.*, 2019; Méndez-López *et al.*, 2019).

Con el contexto anterior, se planteó la realización de la presente investigación, con la finalidad de determinar, el genotipo comercial de maíz mejor adaptado a las condiciones del municipio de Metepec, Hidalgo, que provea alta producción de huitlacoche, debido a la susceptibilidad e incidencia del hongo, con características idóneas para su comercialización en la región.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo general**

Evaluar el grado de susceptibilidad y el rendimiento de huitlacoche en seis variedades de maíz inoculados con *Ustilago maydis*, por el método artificial mediante inyección de esporas.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Determinar el grado de incidencia y severidad del hongo *U. maydis* en seis genotipos comerciales de maíz.
- Identificar la o las variedades híbridas de maíz con mayor grado de susceptibilidad y rendimiento de huitlacoche.

## **1.2. Hipótesis**

Al menos uno de los genotipos comerciales de maíz presentará alta incidencia y severidad con la inoculación artificial por medio de inyección de esporas de *U. maydis*, y con ello generar un alto rendimiento de hongo huitlacoche de alta calidad, que permita su comercialización en las condiciones agroclimáticas de Metepec, Hidalgo.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Generalidades de los hongos

Los hongos poseen un núcleo diferenciado y organelos citoplasmáticos rodeados por membranas, lo que los distingue de las bacterias, las cuales carecen de dichos elementos. Además, todas las células de los hongos están rodeadas por una pared celular rígida. Muchos hongos tienen quitina en su pared celular como el polisacárido en mayor proporción, mientras que algunos otros tienen celulosa en lugar de la quitina (Astiz, 2017).

La gran mayoría de los hongos tienen estructuras vegetativas filamentosas llamadas hifas, las cuales crecen en forma de largos brazos en toda dirección; estas son generalmente uniformes y delgadas con diámetros de 1 a 2  $\mu\text{m}$ , aunque en algunos hongos pueden alcanzar hasta 100  $\mu\text{m}$  de grosor. El conjunto de hifas forma lo que se denomina micelio (Garces, 1996).

Los hongos conforman el reino biológico denominado como Fungí. El cual posee aproximadamente 1.5 millones de miembros que impactan de diversas maneras a todas las formas de vida existentes, y con ello, a todos los ecosistemas. El impacto de los hongos en los ecosistemas se debe a que éstos pueden comportarse como organismos simbiotes, saprófitos y parásitos. Los simbiotes obtienen nutrientes a partir de una estrecha relación con organismos de otra especie y ambos son beneficiados. Los saprófitos, por su parte, se alimentan de materia orgánica muerta, mientras que los parásitos obtienen todos sus nutrientes de los tejidos vivos de otro organismo sin aportar beneficios a este último (Cuevas, 2016).

Este hongo fue introducido en Europa por los españoles (probablemente en forma accidental con maíz infectado) por lo cual durante siglos se pensó que la enfermedad era debida a una alteración fisiológica de la planta. En 1836 Unger identificó al huitlacoche como la infección por un hongo al que llamo *Ustilago zaeae*;

y en 1883-1895 Breffeld logro la infección experimental del maíz con esporas del hongo; hasta 1927 se conoció su ciclo de vida al descubrirse su estado sexual. Su nombre fue oficialmente cambiado a *U. maydis* (de Candolle, Corda) por Stevenson y Johnson en los Estados Unidos (Aguayo, 2016).

### **2.1.1. Basidiomycetes**

Los Basidiomycetes son un grupo de hongos considerados como los más evolucionados, donde se agrupan algunos de los patógenos de plantas más importantes que se reproducen sexualmente. En este caso las células encargadas de la producción de las esporas sexuales (basidiosporas) se llaman basidios y las basidiosporas se forman en la punta de ellos. En un ciclo sexual típico las basidiosporas germinan formando micelios haploides uninucleados (también llamado micelio primario) que tienen una vida breve ya que pronto se produce la plasmogamia. Este evento origina un micelio dicariótico (micelio secundario) a partir del cual se forma el cuerpo fructífero o basidioma y en cuyo himenio se formarán los basidios (Garces, 1996).

### **2.1.2. Carbones**

Son hongos patógenos de las Angiospermas que afectan a especies de importancia económica en dicotiledóneas (tales como papa, cebolla y cacahuate) y monocotiledóneas (gramíneas). Se caracterizan por producir esporas típicas de color marrón a negro (Martínez, 2013).

Los carbones pertenecen a la división Basidiomycota, clase Ustilaginomycetes, subclase Ustilaginomycetidae y se ubican sistemáticamente en dos Ordenes: Urocystales y Ustilaginales. El Orden Ustilaginales está integrado principalmente por dos géneros: *Sporisorium* y *Ustilago*. Las diferencias entre los dos carbones se deben a las preferencias de las especies que parasitan en subfamilias Poaceae; el

género *Sporisorium* infecta exclusivamente a la subfamilia Panicoideae y el género *Ustilago* infecta las subfamilias Pooideae o Chloridoideae (Astiz, 2017).

## **2.2. Huitlacoche *Ustilago maydis***

El carbón común del maíz también conocido como “huitlacoche” es un hongo comestible causado por la infección de *U. maydis* en cultivos de maíz *Zea mays* L. y de su probable antecesor el “teozintle” *Zea mays* ssp. *parviglumis* (Ruiz, 2008).

Huitlacoche es el nombre étnico que se aplica a los cuerpos fructíferos jóvenes (agallas) del hongo *U. maydis*, que causa el tizón o carbón común del maíz. En México y otros países de América Latina, el huitlacoche se ha utilizado tradicionalmente como alimento humano, siendo considerado como un platillo o condimento interesante. El potencial alimenticio del huitlacoche se describe en términos de su composición química, que incluye carbohidratos, proteínas, grasas, vitaminas y minerales. Además, los aminoácidos esenciales (especialmente la lisina) y los ácidos grasos (linoleato) están presentes en el huitlacoche en niveles considerables, lo que se suma a sus atributos nutricionales (Valverde *et al.*, 2015).

Es un patógeno del maíz, muy apreciado como alimento humano en la región central de México. Actualmente seis industrias lo comercializan enlatado. El total de la producción industrial se abastece de la recolección espontánea del hongo en campos de cultivo de maíz para producción de grano (Martínez *et al.*, 2000).

La mayoría de los genotipos de maíz tienen algún grado de resistencia al ataque de *U. maydis*, como el maíz dulce siendo de los genotipos más susceptibles al patógeno. Los principales factores a considerar para la producción comercial de huitlacoche son los siguientes: (a) la cepa utilizada como inoculante; (b) el período de inoculación después de la aparición de los estigmas; y (c) las condiciones ambientales. Asimismo, el sabor, aroma, y valor nutricional del huitlacoche son factores que dependen del genotipo del maíz y del estadio de desarrollo en el que

se recolectan las agallas. Zonas cálidas y moderadamente secas con promedio temperaturas que oscilan entre 26 y 34 °C, alta humedad relativa (60-80%) y mayor precipitación (43 a 53 mm) aumentan la frecuencia de condiciones lluviosas, y esto es favorable para el crecimiento de huitlacoche. Además, altas cantidades de nitrógeno y suelos fertilizados con materia orgánica predisponer las plantas para una mejor producción (Martínez, 2008).

El huitlacoche se consume fresco y en forma casi inmediata a su recolección o cosecha, debido a su corta vida de anaquel (dos o tres días); probablemente esto se debe a que presenta un metabolismo muy activo y cambios muy rápidos, sin embargo, éstos no han sido evaluados, o por lo menos no existe información en la literatura al respecto (Martínez, 2008).

### **2.2.1. Clasificación taxonómica**

Clasificación taxonómica de *Ustilago maydis* (Gonzalez, 2016).

Reino: Fungi

Subreino: Eumycota

División: Amastigomycota

Subdivisión: Basidiomycota

Clase: Basidiomycetes

Subclase: Heterobasidiomycitidae

Orden: Ustilaginales

Familia: Ustilaginaceae

Género: *Ustilago*

Especie: *U. maydis*

Dentro de las características que tienen cada uno de los taxones que forman parte de la clasificación taxonómica de *U. maydis*, se tiene que el reino Fungi o Mycetae, no poseen clorofila, su alimentación es por absorción, son eucariontes, son pluricelulares; en la división Amastigomycota, los organismos pierden su fase móvil,

no se adaptan a sistemas acuáticos tienen hifas septadas, forman grandes cantidades de micelio. En la subdivisión Basidiomycota, se tienen a los hongos que producen esporas sexuales denominadas basidioesporas o esporidias, sobre una estructura tubular o en forma de clava denominada basidio constituida por una o cuatro células, su estado diploide el basidio es muy corto, su estado dicariótico es muy prolongado, la mayoría son heterotálicas. En la clase Basidiomycetes, se tienen a varios parásitos de plantas, y no forman basidiocarpos. constituyen el segundo grupo en importancia entre los hongos superiores que se caracterizan por tener núcleo dicariótico, se diferencian de los ascomicetos por la mayor importancia y duración de la fase dicariótica, y ante todo, porque las esporas que se originan después de la meiosis no son endosporas, sino exosporas (llamadas basidiosporas) que se forman en general en número de cuatro en la superficie de la célula esporífera (denominada basidio); cuenta con alrededor de 2 000 especies fúngicas son comestibles, pero solamente muy pocas son consumidas y cultivadas a gran escala. La subclase Heterobasidiomycitidae, los individuos, forman esporas de resistencia llamadas telioesporas con pared gruesa se encuentran envueltas en grupos en una estructura llamadas soros. En estas estructuras de resistencia se produce cariogamia y meiosis después de la cual germina originando un basidio. El orden Ustilaginales, son los hongos comúnmente conocidos como carbones atacan principalmente las estructuras reproductoras. Producen poco micelio con pro micelio septado transversalmente. Forman soros o agallas contienen telioesporas café oscuras o negras. El género *Ustilago*, tiene individuos que ataca a plantas de importancia económica como: avena, trigo, cebada, maíz, entre otras. La especie *U. maydis* presenta sus teliosporas lisas con espinas o son reticuladas, atacan al maíz y al teosinte (Pimentel *et al.*, 2011).

### **2.2.2. Ciclo biológico**

El hongo *U. maydis* no es un parásito obligado, pero requiere de uno de sus dos huéspedes naturales para realizar su ciclo sexual. Solamente los dicariones y los diploides son infecciosos, lo que muestra la interrelación entre los aspectos de

sexualidad, morfogénesis y patogénesis, y revela la complejidad de los tres procesos (Ruiz, 2008).

Durante el ciclo de vida de *U. maydis* se distinguen dos fases. Una de ellas es saprofitica, durante la cual el hongo crece en forma de levaduras haploides alargadas que se reproducen por gemación (también llamadas esporidios). La gema aparece en la zona de máxima curvatura formando un ángulo de 30-45 grados con respecto a la célula madre. La gemación bipolar es común en contraste con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. El patógeno *U. maydis* no es un colonizador eficiente de nichos naturales, ya que el rango de las fuentes de carbono que puede utilizar es muy restringido (Figura 1; Ruiz, 2008).



**Figura 1.** Representación esquemática del ciclo de vida de *Ustilago maydis*. Izquierda; se muestra la germinación de las teliosporas con la formación del promicelio y las cuatro basidiosporas (Fuente: Maldonado, 2019).

La segunda fase es la micelial y patogénica, durante la cual el hongo crece en forma de hifas dicarióticas que solo se desarrollan en el interior del huésped. Esta fase se inicia con el apareamiento de dos células que comparten *loci* de apareamiento (sexuales) a y b compatibles. La cercanía de células compatibles provoca una inhibición de la gemación y la formación de filamentos delgados (tubos de

conjugación) que se dirigen el uno hacia el otro por una acción quimiotrópica, para finalmente fusionarse en el extremo apical para formar el micelio dicariótico infeccioso, el cual continúa su crecimiento y es capaz de invadir a un huésped susceptible a través de aberturas naturales, por los estomas, por los órganos florales, o activamente formando un opresorio Figura 1(Ruiz, 2008).

### 2.2.3. Agente etológico

El Orden Ustilaginales (G. Winter), con ocho familias, comprende 49 géneros y 851 especies a nivel mundial. El género *Ustilago* (Pers.) Roussel lo componen aproximadamente 200 especies que se desarrollan sobre gramíneas (Poaceae) y tienen gran importancia en la interrelación con los humanos, pues afecta a varias plantas muy utilizadas desde el principio de nuestra historia agrícola (Figura 2), como *Ustilago tritici* (Pers.) Rostr. al trigo, *U. avenae* (Pers.) Rostr. a la avena, *U. nuda* (J. L. Jensen) Kellerm. & Swingle a la cebada y *U. maydis* (DC.) Corda al maíz (Ribes, 2012).



**Figura 2.** Algunos Ustilaginales que causan carbones en cultivos de importancia económica (Fuente: Cabrera *et al.*, 2012).

El hongo *U. maydis* es biotrófico dimórfico que en su fase haploide crece en forma de levaduras unicelulares saprófitas que se dividen por gemación. La fase diploide o sexual se inicia con la fusión de dos células haploides sexualmente compatibles, las cuales se unen mediante un tubo de conjugación para dar lugar a un dicarion, el cual es filamentoso (micelio; Figura 1). Este cambio provoca que el hongo se transforme en patógeno y parásito obligado (Garcilazo, 2020). Durante su ciclo de vida, *U. maydis* alterna entre una etapa no patógena haploide similar a una levadura y una forma patógena dicariótica filamentosa que invade la planta e induce la formación de tumores. Como todos los miembros del Subdivisión Ustilaginomycotina, *U. maydis* no puede formar basidiocarpos, sino que produce teliosporas dentro de los tumores que germinan formando un basidio septado (phragmobasidium) (Brefort *et al.*, 2009).

El patosistema de *U. maydis*-maíz ha surgido como el modelo actual para los basidiomicetos fitopatógenos y como uno de los pocos modelos de una verdadera interacción biotrófica que persiste durante todo el desarrollo de los hongos dentro de la planta huésped. Esto se basa en el sistema genético altamente avanzado tanto para el patógeno como para su hospedador, la capacidad de propagar *U. maydis* en cultivo axénico y su capacidad única para inducir síntomas prominentes de enfermedades (tumores) en todas las partes aéreas del maíz en menos de una semana. El patógeno del carbón del maíz, aunque económicamente no es una amenaza, seguirá sirviendo como modelo para los hongos biotróficos obligados relacionados, como las royas, pero también para las especies del carbón estrechamente relacionadas que inducen síntomas solo en los órganos florales de sus huéspedes (Cabrera *et al.*, 2012).

#### **2.2.4. Importancia económica**

El carbón común del maíz es una enfermedad que se considera originaria del hemisferio occidental, pero en la actualidad tiene una distribución mundial pues se encuentra en cualquier parte donde se cultiva maíz (Valdez, 2008).

Hoy en día, el famoso hongo del maíz *U. maydis*, mejor conocido como huitlacoche o cuitlacoche, es considerado como una exquisitez culinaria; no obstante, su apreciación como un rico manjar es relativamente reciente. En el ámbito de la gastronomía, se ha denominado como “trufa mexicana” o “caviar azteca” (Rodríguez *et al.*, 2021).

La falta de conciencia por parte de los consumidores del valor nutricional del huitlacoche, lo convierte en un alimento subutilizado. A pesar de su creciente popularidad, su venta se ha centrado en nichos de mercado muy específicos. En ellos, su consumo se ha centrado en apreciarlo como un platillo exótico más que tomar en cuenta su aporte nutricional (Rodríguez *et al.*, 2021).

El carbón común del maíz en varias regiones de México no se considera una enfermedad, por el contrario, en la región centro se le es muy apreciado, pues se consume como hortaliza y se le conoce como huitlacoche o cuitlacoche, con características nutrimentales muy atractivas y sabor único (Paredes, 2001).

La infección natural algunas veces no es confiable, para una producción comercial ya que la aparición del hongo en el maíz depende de las condiciones ambientales y a la asociación entre la etapa en el desarrollo del hospedante durante el periodo de infección y el tejido de la planta en el cual se forman las agallas (Martínez, 2000).

En México en el año 2001 el precio por kilogramo de huitlacoche variaba en torno a \$15.00, en la época de producción natural de julio y agosto; entre \$60.00 a \$120.00 fuera de dichos meses, aunque de manera extraordinaria ha llegado a valer hasta \$380.00 el kilogramo en el mes de abril, esto supera a la producción de forraje verde. Existe una demanda creciente para los mercados de E.U.A, unión europea, Japón, llegando a alcanzar precios superiores a los 20 dólares por kilogramo como producto congelado, aunque como producto fresco se comercializa en \$11.6 dólares por kilogramo y \$3.5 dólares por mazorca (García, 2016).

## 2.2.5. Composición nutricional

El huitlacoche es un alimento con características nutrimentales esenciales para el ser humano. Se ha encontrado que el alto nivel de fibra dietaria y oligosacáridos sugieren que puede aportar un beneficio importante a la salud (Cuadro 1), ya que dichos componentes han demostrado estar directamente involucrados en disminuir el riesgo de contraer cáncer de colon. Asimismo, las concentraciones elevadas de compuestos fenólicos de este hongo proporcionan una alta actividad antioxidante; dichos componentes bioactivos están relacionados con la disminución de la incidencia de enfermedades crónicas degenerativas (Aguayo, 2016).

**Cuadro 1.** Composición nutricional del huitlacoche con base a lo reportado en distintos estudios (Rodríguez *et al.*, 2021).

Componente	Juárez-Montiel <i>et al.</i> (2011)	Valverde <i>et al.</i> (2012)	Patel (2016)	Valdez-Morales <i>et al.</i> (2016)	Aydoğduy Gölüküü (2017)	Méndez-López <i>et al.</i> (2019)
<b>Proteína total<sup>1</sup></b>	10-15	10-16	10-16	10-25	12	12-16
<b>Ácidos grasos<sup>1</sup></b>						
Ácido oleico	41-46	25-29	44	47	42	43
Ácido linoleico	27-34	29-48	48	39	27	27
Ácido palmítico	14-18	13-19	15	29	15	15
Ácido araquidónico	2-4	1-8	1-2	2	3	3
<b>Carbohidratos<sup>2</sup></b>						
Glucosa	140	53-231	143		71	
Fructosa	60	19-138	71		9	n.r <sup>5</sup>
Glicerol	9	n.r <sup>5</sup>	9	n.r <sup>5</sup>	4	
<b>Compuestos fenólicos<sup>3</sup></b>						
Ácido gálico		2-3	2-3	3		
Ácido ferrúlico	n.r <sup>5</sup>	514-544	530	514	n.r <sup>5</sup>	n.r <sup>5</sup>
Ácido cafeico		26-27	26-27	26		
Ácido p-cumárico		10-11	10-11	11		
Ácido o-cumárico		4-5	4-5	5		
<b>Minerales<sup>4</sup></b>						
Zinc					3	3
Sodio					12	12
Magnesio					263	263
Calcio	n.r <sup>5</sup>	n.r <sup>5</sup>	n.r <sup>5</sup>	n.r <sup>5</sup>	19	19
Fosforo					342	342
Hierro					3	3

1: g·100 g<sup>-1</sup> de pesos seco; 2: mg·g<sup>-1</sup> de peso seco; 3: µg·g<sup>-1</sup> de peso seco; 4: mg·kg<sup>-1</sup> de peso seco; 5: No reportado.

El huitlacoche posee una composición química que le confiere atributos nutricionales notables, ya que es rico en proteínas, ácidos grasos, minerales, fibra y carbohidratos. Entre los minerales se encuentran el fósforo, el magnesio, y el calcio entre otros; y es capaz de producir vitaminas del complejo B (riboflavina, niacina y ácido fólico) además de importantes cantidades de ácido ferúlico,

quercetina, ergosterol, ácido linoleico y oleico; sumado a esto, se ha determinado que contiene 18 de los 20 aminoácidos que componen a las proteínas; destaca su gran contenido de lisina (27.2%) seguido de serina, glicina, ácido aspártico y glutámico (Valverde *et al.*, 2015).

Huitlacoche se ha caracterizado como un hongo nutracéutico de alta calidad ya que contiene  $\beta$ -glucanos, azúcares libres y sustancias antimutagénicas, además de utilizarse para enriquecer otros alimentos. Por su extraordinario sabor y excepcional calidad, se consume principalmente en México, Centroamérica y Estados Unidos (Valverde *et al.*, 2015).

Los requerimientos recomendados por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés) para el mantenimiento humano se basan en el balance de la ingesta diaria. Aunque los requerimientos varían dependiendo de la edad, el sexo, el peso, la talla y el nivel de actividad física, el contenido de proteínas, grasas y otros nutrientes, aportados por el consumo del hongo del maíz, se encuentra dentro de los niveles recomendados para una dieta saludable. Al tener bajos niveles de grasa, pero un alto contenido de proteína, aminoácidos y ácidos grasos esenciales, el huitlacoche es considerado como un alimento funcional. Por sí mismo, el huitlacoche no contiene todos los compuestos necesarios para la dieta humana, pero tiene una composición nutricional complementaria a la del maíz e incluso lo ha posicionado como una fuente alternativa de proteínas para las dietas vegetarianas (Rodríguez *et al.*, 2021).

### **2.3. Interacción biotrófica maíz-*Ustilago maydis***

Los hongos son organismos eucariotas simples que se desarrollan de forma general por crecimiento polar. Además cada tipo de hongo tiene diversas formas para desarrollarse. El caso de los hongos fitopatógenos han desarrollado diferentes estrategias para hacer frente al entorno de la planta y poder desarrollarse en ella (Pérez, 2008).

La aparición del hongo en el maíz depende de las condiciones ambientales que conducen a la infección del carbón y a la asociación entre la etapa en el desarrollo del hospedero durante el periodo de la infección y el tejido de la planta en la cual forman las agallas (Carrillo, 2003).

Al existir una alta interacción genotipo-ambiente entre maíces y cepas de *U. maydis* llegan a presentar diferentes comportamientos, lo que dificulta establecer las condiciones específicas para dicha interacción (Maldonado, 2019).

El pato sistema maíz-huitlacoche ha coevolucionado desde la época prehispánica hasta continuar en la actualidad de manera equilibrada la alta interacción genotipo-ambiente, entre maíces y cepas de *U. maydis* llegan a presentar diferentes comportamientos entre ambientes, lo que dificulta establecer las combinaciones específicas para dicha interacción (Martínez *et al.*, 2005).

La interacción entre *U. maydis* y el maíz está dada debido a las condiciones en las que el maíz se desarrolla y comparten características en cuanto a requerimientos edafoclimáticos, por lo cual en el caso del maíz se adapta a una múltiple gama de ambientes agroecológicos, pero es esencialmente un cultivo de clima cálido, cultivado en las regiones tropicales y subtropicales (Lim, 2013).

#### **2.4. Diversidad genética de cepas**

La formación de las agallas en las plantas depende de la cepa de *U. maydis* y del genotipo del maíz. México es el centro de origen y distribución del maíz, por tal razón tiene la mayor variabilidad genética de *U. maydis* existente en el mundo; este hecho constituye una gran ventaja desde el punto de vista científico. Cuando se secuenció el genoma de *U. maydis*, se reveló la presencia de un número significativo de genes codificantes para la producción de enzimas de secreción, ordenados en 12 grupos de tres a seis genes cada uno los que muy probablemente

representan islas de patogenicidad distribuidas en todo el genoma (Salazar *et al.*, 2021).

La variabilidad genética es la base del proceso genético, ya que es la habilidad genética para variar, lo cual implica que se debe tener la capacidad para responder a variaciones ambientales y cambios en los objetivos de selección. En general se tienen dos tipos de variabilidad genética, la continua y la discontinua. La variabilidad continua se presenta cuando en una especie determinada, las diferencias entre sus individuos son graduales y son provocadas por el ambiente que afecta solamente al fenotipo y por ello no son heredables (Burd, 2009).

Mientras que la discontinua o mutación, es brusca y no se debe a cuestiones de herencia, es decir, es espontánea y se da en el seno de una población. Se puede deducir que la variación es la materia prima donde la selección actúa, y que tiene como resultado de estos dos procesos la evolución (Ayala *et al.*, 2000).

Recientemente se realizó un estudio en el cual se hizo el aislamiento y caracterización de las cepas de más de 100 materiales genéticos de huitlacoche recolectadas en 42 zonas geográficas de nueve estados de México (Chiapas, Guanajuato, Hidalgo, México, Morelos, Puebla, Querétaro, Tlaxcala y Veracruz). Se comprobó la existencia de correlación positiva entre el origen de la cepa con el índice de severidad y con la variedad de maíz; además, se identificó a los maíces blancos como los más susceptibles al huitlacoche. También se encontró correlación entre el color de las agallas, la textura y el tamaño, ya que entre más oscuras eran más blandas y grandes. Esta caracterización detectó una alta diversidad genética entre las cepas lo cual hace suponer la existencia de subespecies, razas o biotipos de *U. maydis*, tal como se aprecia en el propio maíz (Cruz *et al.*, 2021).

## **2.5. Sintomatología de la enfermedad**

Los síntomas de la enfermedad son principalmente la formación de tumores, aunque también ocurren clorosis, distorsiones y enanismo de la planta y acumulación de

antocianinas. La inducción de tumores probablemente involucra fitohormonas y citocininas como ocurre en algunas infecciones de plantas producidas por bacterias fitopatógenas; sin embargo, su naturaleza no ha sido aún determinada. Las teliosporas germinan rápidamente en un medio nutritivo e incluso en agua, aunque se ha descrito que la presencia de disacáridos favorece el proceso. La germinación de la teliospora se inicia con la formación de un tubo germinativo denominado promicelio. El núcleo de la espora migra hacia el promicelio y en este punto ocurre la meiosis. A partir del promicelio se forman cuatro basidiosporas en forma acropétala las cuales geman para reiniciar el ciclo de vida (Herrera, 2008).

Se caracteriza por clorosis, disminución de crecimiento y formación de tumores que pueden desarrollarse en hojas, espiga, tallos mazorcas e incluso raíces, debido a la proliferación celular del meristemo de los tejidos (Tamayo, 2009).

## **2.6. Importancia del maíz**

El cultivo de maíz en México ocupa el 57% de las superficies reservadas para el cultivo de granos básicos y oleaginosas, donde más de 2.5 millones de agricultores se dedican al cultivo de maíz (Ripusudan, 2001).

En México, el maíz forma parte de nuestra alimentación diaria, es el cultivo de mayor presencia en el país, constituye un insumo para la ganadería y para la obtención de numerosos productos industriales, por lo desde el punto de vista alimentario, económico, político y social es el cultivo agrícola más importante (Ripusudan, 2001).

Maíz significa literalmente “lo que sustenta la vida”. Botánicamente, el maíz *Zea mays ssp mays* pertenece a la familia Poaceae (gramíneas) y es una planta anual alta dotada de un amplio sistema radicular fibroso (Acosta, 2009).

El maíz es uno de los cereales utilizados por el hombre desde épocas remotas y una de las especies vegetales más reproductivas, tanto en producción global, como

en su productividad. Su centro de origen está en México desde la difusión a todo el mundo después del primer viaje de Cristóbal Colón a finales del siglo XV (Acosta, 2009).

El maíz es un pasto de la familia botánica Poaceae, al igual que el trigo, el arroz, la cebada, el centeno y la avena, comúnmente se les conoce como gramíneas. Este cultivo se originó mediante el proceso de domesticación que llevaron a cabo los antiguos habitantes de Mesoamérica, a partir de los "teocintles", gramíneas muy similares al maíz, que crecen de manera natural principalmente en México y en parte de Centroamérica. Se considera que las poblaciones de teocintle del centro del México o los que crecen en el trópico seco de la Cuenca del Balsas, pudieron ser los ancestros de los cuales se domesticó el maíz como planta cultivada (Carrillo, 2009).

El maíz es la forma domestica de una subespecie de teocintle *Zea mays* ssp. *parviglumis*, el cual es un pasto silvestre. El proceso de domesticación del maíz inició hace aproximadamente 10,000 años, muy asociada a la invención y desarrollo independiente de la agricultura en Mesoamérica, y continua en el presente con el manejo, cultivo y selección que hacen año con año los agricultores y sus familias de sus variantes de maíces nativos, asimismo con la interacción de este cultivo con sus parientes silvestres, los teocintles, en las regiones donde coinciden de manera natural (Carrillo, 2009).

El maíz se originó en una parte restringida de México y los tipos más desarrollados emigraron posteriormente hacia otros sitios de América. El lugar de origen del maíz se ubica en el Municipio de Coxcatlán, en el Valle de Tehuacán, Estado de Puebla, en el centro de México. Este valle se caracteriza por la aridez de su clima, con un promedio anual de lluvia muy reducido; alberga principalmente especies vegetales y animales propias de tierra caliente y seca. La región cuenta con numerosos endemismos, lo que la convierte un territorio único". Se encontraron restos arqueológicos de plantas de maíz, se estima datan de hace, aproximadamente,

ocho milenios. Indicios de los procesos que llevaron al pueblo nativo de este valle a dominar el cultivo de este cereal, han sido encontrados en la cueva de Coxcatlán, Ajalpan y otros sitios de la zona (Acosta, 2009).

Desde la perspectiva nutricional el maíz es superior a muchos otros cereales, excepto en su contenido de proteínas, razón por la cual se explica el interés de los gobiernos nacionales por el desarrollo de variedades de alta calidad proteínica denominados QPM (por sus siglas en inglés), que contribuyan a superar la desnutrición. (Acosta, 2009).

El maíz se caracteriza por tener una amplia variedad de usos; de todos los cereales, el maíz es el más importante en el mundo, debido a que actualmente existe una tendencia creciente por la diversificación en su uso, ya que puede utilizarse para consumo humano y pecuario, especialmente para la producción de pollo y cerdo; en la industria se utiliza para la producción de almidón, glucosa, dextrosa, fructuosa, aceites, botanas y etanol, entre otros. Se emplea también en la elaboración de algunas bebidas alcohólicas y otros productos utilizados como materia prima, entre otras, en las industrias minera, textil, electrónica, farmacéutica y alimentaria (FIRA, 2008).

El maíz tiene en su morfología, las características de todos los cereales, por lo que los rasgos de familia de las gramíneas, para esta especie, son los siguientes:

**RAIZ:** es fibrosa, blanca y cubierta de radículas capilares. Esta raíz se hunde muy poco en el terreno, pero se extiende a muchas distancias alrededor del cuello de la planta. Además de la raíz principal, el maíz arroja otras raíces en los nódulos de la caña que están más inmediatos al cuello.

**TALLO:** la caña del maíz o tallo es erecto, cilíndrico algo comprimido en la parte superior y nudoso o dividido de trecho en trecho por nudos muy marcados. La caña no es hueca o fistulosa como la de muchas gramíneas, sino que está llena de una

sustancia blanca, esponjosa, jugosa y formada de tubos muy delgados, llena de un jugo acuoso y dulce. Cuando la planta del maíz ha adquirido su desarrollo el tallo tiene desde una hasta cinco varas de elevación según sea la clase o variedad que se cultiva.

**HOJAS:** son alternas, nacen en los nudos de la caña y la envuelven con su base o parte inferior, las hojas son largas y aguzadas en la parte inferior, se levantan con dirección a la caña o se doblan tomando la figura de arco.

**FLORES:** tiene dos aparatos florales diferentes y que deben de ser separadamente examinados; la espiga o panoja colocada en el extremo superior de la caña y la mazorca, o verdadera espiga que nace siempre en los nudos de la misma caña, uno y otro aparato son esenciales para la fecundación y fructificación de la planta.

**Espiga:** es una especie de ramillete formado de muchas espigas. En cada uno de estas espigas se encuentran dos florecillas. La panoja no tiene aparato que la envuelva.

**Mazorca:** cuando se examina atentamente la estructura del olote o almacón de la mazorca, se nota que este olote está formado de un eje (especie de sustancia medular) y de una multitud de ramos adheridos a él, que formarían una panoja si estuvieran separados.

### 2.6.1. Taxonomía del maíz

Clasificación taxonómica de *Zea mays* (López, 1999)

Reino: Vegetal

División: Tracheophita

Clase: Angiospermae

Subclase: Monocotiledoneae

Grupo: Glumiflora  
Orden: Graminales  
Familia: Graminae  
Género: *Zea*  
Especie: *Zea mays*

## **2.7. Características de los maíces utilizados**

Los híbridos de maíz modernos tienen poca semejanza con el ancestro más lejano del maíz, el teocintle. Un híbrido de maíz se produce cuando el polen de una línea endogámica se usa para polinizar los estigmas de otra línea endogámica. Una vez que ocurre esto se produce la heterosis o vigor híbrido y las plantas producidas a partir de las semillas híbridas suelen ser más resistentes y con características mejoradas, lo que incluye mayor rendimiento del grano. Debido a su mayor uniformidad en la madurez los híbridos han ayudado a hacer posible la mecanización del campo. Además de un aumento en la producción, se han logrado otros beneficios mediante el uso de semillas híbridas ya que permiten un uso más eficiente del fertilizante, agua y maquinaria (Trinidad, 2008).

### **2.7.1. Faisán**

Es un híbrido que pertenece a la empresa Asgrow, es un maíz especialmente para Valles Altos, con un desempeño sobresaliente a través de los diferentes ambientes presentes en la zona tiene una excelente germinación, un ciclo intermedio-tardío, la planta alcanza una altura de 2.25 a 2.45 m, posee un color de grano blanco tiene la característica de adaptarse a condiciones de punta de riego, así como a temporal, los días de floración van de 90 a 110 días, la densidad de plantas recomendada para este híbrido de maíz es de 85 mil semillas/hectárea, es uno de los pocos híbridos de maíz que se ha adaptado a su establecimiento en parcelas con alturas que van desde los 2,500 hasta los 2,800, msnm alcanzando un rendimiento de 7 a

8 t·ha<sup>-1</sup> de grano. Se recomienda su uso para la producción de grano, forraje y paja (Monsanto, 2017).

### **2.7.2. Albatros**

Es un híbrido que pertenece a la empresa Asgrow, es un maíz especialmente para Valles Altos, planta robusta con una altura de 2.30 a 2.50 m, presenta calidad de grano, lo cual la hace ideal para grano y forraje, su ciclo es intermedio-tardío, posee un color de grano blanco, días de floración 95 a 100, la densidad de plantas recomendadas para este híbrido es de 80 mil semillas·ha<sup>-1</sup> (Vásquez, 2020).

### **2.7.3. Niebla**

Es un híbrido de la empresa Ceres, es un maíz con un rendimiento de grano de 10.39 t·ha<sup>-1</sup>, el rendimiento para forraje es de 15.9 t·ha<sup>-1</sup>, la planta presenta de 93-98 días de floración, la altura de la planta es de 2.56 m, en promedio. Presenta una fortaleza extra en periodo frío y falta de agua, una gran sanidad ya que es tolerante a las principales enfermedades (Valadez, 2015).

### **2.7.4. Euros**

Híbrido de maíz blanco muy vigoroso, adaptable y rústico. Su grano es blanco, ideal para la industria, 1.0 Kg de grano rinde 1.85 Kg de masa y hasta más de 1.5 Kg de tortilla. Presenta un alto rendimiento, excelente adaptabilidad, blancura y sanidad de grano. Los días de floración van de 62-79, la planta alcanza una altura de 2.50-2.75 m, posee un color de grano blanco dentado.

Como todos los híbridos de UNISEM, Euros se obtuvo en el programa de mejoramiento para la producción de grano. Sin embargo, muchos productores le han visto cualidades forrajeras. Euros se ha sembrado en las principales zonas maiceras de Jalisco, Guanajuato, Hidalgo, Guerrero, Nayarit, la Comarca Lagunera, Durango, Chihuahua (excepto alturas mayores) (UNISEM, 2022).

### **2.7.5. Zarcos**

Es un híbrido que puede ser utilizado en el sector elotero, forraje, grano y hoja para tamal, su ciclo es intermedio, la altura de la planta alcanza de 2.50 a 2.60 m, posee un color de grano blanco, la densidad de plantas recomendadas para este híbrido son 75-80 mil·ha<sup>-1</sup> (Zarco, 2022).

### **2.7.6. A7573**

Es un híbrido perteneciente a la empresa Asgrow. El mejor adaptado para la producción de elote, calidad y mayor vida de anaquel, excelente sabor y textura, un ciclo intermedio, la planta alcanza una altura de 2.10 a 2.30 m, posee un color de grano blanco, la mazorca alcanza entre 1.20 a 1.40 m, tiene la característica de adaptarse a condiciones de riego, así como a temporal, los días de floración van de 75 a 85 días, la densidad de plantas recomendada para este híbrido de maíz es de 55 a 65 mil semillas·ha<sup>-1</sup>. Tiene larga vida de anaquel, así como excelente sabor y textura (ASGROW, 2022).

## **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. Localización geográfica y descripción del sitio de experimental**

El experimento se estableció en el municipio de Metepec, el cual se localiza al norte del Estado de Hidalgo, a una altitud sobre el nivel del mar de 2,140 metros, su localización geográfica es al norte con una latitud de 21° 08' 34" y al oeste una longitud de 98° 25' 11" (CONEVAL, 2005).

Colinda con los siguientes municipios; al norte con los Municipios de San Bartolo Tutotepec, Tenango de Doria y Agua Blanca, al sur con los Municipios de Tulancingo, Acaxochitlán y Acatlán, al oeste con los Municipios de Acatlán y Huasca de Ocampo, al este con el Estado de Puebla y con los Municipios de Tenango y Acaxochitlán (INAFED, 2000).

### **3.2. Características del lote del experimento**

El terreno donde se estableció el experimento se encuentra ubicado en el municipio de Metepec, Hidalgo, entre las calles Av. Insurgentes y Aldama, fue proporcionado por el productor José Alejandro Hernández Bustos. Dicho terreno, contaba con una superficie de 5,000 m<sup>2</sup> del cual solo fue utilizado 200 m<sup>2</sup> (Figura 3), ya que la otra parte se destinaria para la siembra de maíz cacahuazintle, el tipo de suelo es franco arcilloso, se contó con riego de agua almacenada en cisterna, la cual contaba con capacidad de 22,500 litros. En general se tuvo apoyo constante del productor para el uso de herramientas de labranza, así como acceso al terreno.



**Figura 3.** Ubicación geográfica del terreno donde se estableció el experimento.

### **3.3. Manejo del cultivo**

Para la preparación del terreno, se utilizó labranza convencional yunta, tirada por mulas, los surcos se establecieron a 90 cm entre surco y surco, con un largo de 4.0 metros por surco, el cultivo no fue abonado ni fertilizado debido a que con anterioridad el terreno ya presentaba fertilización con estiércol de bovino, lo que favoreció el desarrollo del cultivo, además cabe destacar que los riegos al cultivo en las primeras fases (siembra, emergencia y desarrollo vegetativo) se realizaron mediante aspersores cada 3er día, posteriormente se realizó riego cada ocho días por inundación mediante el uso de una bomba de 4”.

La siembra se realizó cada 30 cm de separación entre plantas, colocando dos semillas en cada orificio. Al llegar la planta a una altura de 15 cm se hizo raleo para dejar una planta en cada orificio.

A partir de la emergencia se inició a monitorear el desarrollo del cultivo, para aplicar las prácticas culturales debidas, en la fase (desarrollo vegetativo) se realizó un aporcado y al llegar a la fase de floración se realizó otro para mejorar la fijación de raíz de la planta. De igual manera en estas fases se realizó constante deshierbe mediante el uso de azadón para evitar competencia de nutrientes (Figura 4).



**Figura 4.** Representación gráfica del procedimiento de desarrollo del cultivo

El control de plagas como lo es gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* L. E. Smith) que se presentó, en la cuarta y sexta hoja verdadera se realizó mediante la aplicación de insecticida (ETICUS® Benzoato de emamectina 5%. GS, a la dosis comercial), además, de coadyuvante (CARRIER®) a una dosis de 1.0mL·L<sup>-1</sup> de agua, dicha aplicación se realizó mediante una mochila manual de 20 L de capacidad. Fue una solución eficaz para combatir esta plaga y que no afectara la producción.

### 3.4. Establecimiento del experimento

El experimento se estableció en el municipio de Metepec, Hidalgo, bajo un diseño de bloques completamente al azar, el día 10 de Abril de 2021, con cuatro repeticiones y seis tratamientos, considerados éstos a los híbridos de maíz (Faisán, Euros, Niebla, Zarcos y Albatros) el híbrido que fungió como testigo, fue el A7573, ya que se ha reportado en diversos estudios como un material con alta susceptibilidad a *U. maydis*, además se ha indicado que proporciona buenas

características organolépticas y alta calidad la producción de huitlacoche con este híbrido.

Cada parcela experimental por tratamiento, consistió de dos surcos de 4.0 m de largo, y la unidad experimental estuvo conformada del total de surcos de cada parcela experimental, es decir se evaluaron todas las plantas inoculadas y/o cosechadas con huitlacoche.

### **3.5. Selección de cepas y preparación e incremento del inculo**

El inculo fue preparado en el Laboratorio de Fisiología Vegetal del Departamento de Botánica en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, y fue trasladado hasta el sitio experimental, donde se llevó a cabo la capacitación para la correcta selección de los jilotes y del procedimiento para llevar a cabo la inoculación.

En el que se explicó que el inculo se prepara principalmente seleccionando una mazorca infestada del hongo por infección natural, las agallas que son útiles para este procedimiento son aquellas que se encuentran completas, grandes y que no presentan ningún daño como: podridas, abiertas o maltratadas por insectos o daño físico. Después se realiza esterilización en solución de hipoclorito al 2%, por cinco minutos, después se hace un secado con papel y con un bisturí se eleva el peridio, con ayuda de aza bacteriológica se toma la muestra de teliosporas y se hace un barrido sobre el medio de cultivo (PDA, Papa-Dextroza-Agar), una vez que la cepa se purifica se realiza el incremento sembrando en más cajas Petri con PDA. El incremento y preparación del inculo se realizó de igual forma en el laboratorio de Fisiología Vegetal, del Departamento de Botánica de la UAAAN.

La cepa provenía de una cepa comercial adquirida en un centro comercial, de la marca Monte Blanco®, adquirido en la Ciudad de Saltillo, Coahuila.

Posteriormente se acudió al área experimental, donde se mostró a un grupo de productores la forma correcta en que se debe de llevar a cabo la inoculación.

### 3.6. Procedimiento de inoculación

Se monitorearon los híbridos de maíz para evitar que se pasara la floración femenina, al momento de apreciarse en la parcela aproximadamente el 1% de estigmas expuestos se llevó a cabo la inoculación: para lo cual se fueron seleccionando jilotes con una longitud aproximada de 10 cm y con los estigmas expuestos de 1.0 a 3.0 cm, antes de que fueran polinizados; fueron inoculados todos los jilotes con estas características, con 3.0 mL de inóculo, repartido en 2 inyecciones de 1.5 mL cada una, con una jeringa semi-automatizada (Figura 5).



**Figura 5.** Inoculación de *U. maydis* por inyección en jilotes de maíz.

Una vez realizado el proceso anterior se eliminó la hoja basal del jilote, para que quedará marcada y de esta forma se facilitará la identificación y monitoreo del crecimiento y desarrollo del hongo y también para facilitar la cosecha.

### 3.7. Variables a evaluar

Para la evaluación del experimento se consideraron cinco variables, las cuales se describen a continuación:

**Grosor de la mazorca:** se midió el ancho o diámetro de la mazorca mediante la ayuda de un vernier digital, en mm.

**Largo de la mazorca:** se obtuvo a partir de medir el largo de la mazorca, desde la base hasta la punta de cada una de las mazorcas cosechadas, con ayuda de una regla milimétrica, la medida se consideró en cm.

**Peso de mazorca:** se desgranaron las agallas de la mazorca y se pesaron en una báscula analítica y se registró el dato en gramos (g). Se eliminó el material que no presento agallas.

**Porcentaje de incidencia:** esta variable se registró en base a los valores 1 cuando había presencia del hongo y 2 cuando no había presencia del hongo en ninguna expresión morfológica. Posteriormente se obtuvo el porcentaje según el número de mazorcas con incidencia y con respecto al total de mazorcas que fueron evaluadas.

**Porcentaje de severidad:** la variable se tomó con base al porcentaje de cubrimiento de la mazorca por el hongo (agallas), considerando como escala de 0, 25, 50, 75 y 100%, sin embargo la denotación fue 1, 2, 3, 4 y 5, repectivamente.

### 3.8. Análisis estadístico

Debido a la naturaleza de los datos de algunas variables como Severidad e Incidencia, que como tal no corresponden a valores que se ajusten a una curva de normalidad, se realizó una transformación con el logaritmo natural, sobre la base de datos, para posteriormente ejecutar un análisis de varianza, bajo el diseño de

bloques al azar, una vez identificadas las variables con diferencias estadísticas ( $\alpha \leq 0.01$ ,  $\alpha \leq 0.05$ ,  $\alpha \leq 0.10$ ), se procedió a realizar un comparación de medias de Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ) y un análisis de correlación entre variables.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis de varianza

El análisis de varianza arrojó diferencias estadísticas altamente significativas, en el 100% de las variables evaluadas en mazorcas: grosor, largo, peso, incidencia y severidad (Cuadro 2), entre los híbridos de maíz a prueba. Los coeficientes de variación se encontraron entre 12.09 a 47.33%, estos valores son aceptables en el análisis de varianza, para datos de campo, según Castillo (2007).

Según menciona Leal (1996) se realiza el análisis para probar la hipótesis principal del trabajo a fin de detectar diferencias entre los tratamientos tanto para el porcentaje de incidencia como para el porcentaje de infección.

**Cuadro 2.** Cuadrados medios del análisis de varianza, para las variables obtenidas en la evaluación de la susceptibilidad de híbridos de maíz a *U. maydis*. Metepec, Hidalgo, México, 2021.

FV	gl	Variables obtenidas en mazorca				
		Grosor (mm)	Largo (cm)	Peso (g)	Incidencia del patógeno	Severidad de la infección
Híbridos de maíz	5	2691.09***	35.64***	128714.59***	0.15***	1.52***
Bloques	3	1557.99**	5.17 <sup>NS</sup>	17078.99 <sup>NS</sup>	0.005 <sup>NS</sup>	0.20 <sup>NS</sup>
Error	423	411.55	9.66	9507.55	0.04	0.13
Total corregido	431					
CV (%)		27.62	17.74	12.09	35.02	47.33
R <sup>2</sup>		0.09	0.04	0.14	0.03	0.12
Media		73.44	17.52	80.78	1.85	2.16

FV: Fuente de variación; CV (%): porcentaje del coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinación; gl: grados de libertad del error; \*\*\*: diferencias altamente significativas a una confiabilidad del 99% ( $\alpha \leq 0.01$ ); \*\*: diferencias significativas a una confiabilidad del 95% ( $\alpha \leq 0.05$ ); <sup>NS</sup>: diferencias no significativas.

### 4.2. Comparación de medias

Con el análisis de comparación de medias, se corroboran las diferencias estadísticas reportadas en el análisis de varianza, además se pueden apreciar las diferencias entre los tratamientos, en este caso entre los híbridos de maíz puestos a prueba para determinar la adaptación a las condiciones de Metepec, Hidalgo, México y para la susceptibilidad de los genotipos a una cepa patogénica de *U.*

*maydis*. Se encontró que el híbrido Faisán cuenta con los valores más altos en el 60% de las variables evaluadas, a pesar de ser una variedad que en esta zona no es usada comúnmente, se puede deducir que puede ser un híbrido apropiado para introducirlo en la producción de huitlacoche a mayor escala; los valores obtenidos en este híbrido rebasan incluso a los obtenidos en el testigo, el genotipo A7573 (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Comparación de medias de Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ), entre las variables evaluadas para determinar la susceptibilidad de híbridos de maíz a *U. maydis*. Metepec, Hidalgo, México, 2021.

Híbrido de maíz	Variables obtenidas en mazorca				
	Grosor (mm)	Largo (cm)	Peso (g)	Incidencia	Severidad
<b>Faisán</b>	74.950 ab	17.318 b	<b>146.81 a</b>	<b>1.905 a</b>	<b>2.653 a</b>
<b>Albatros</b>	74.798 ab	<b>16.806 b</b>	86.57 bc	1.869 ab	2.245 ab
<b>Niebla</b>	77.160 a	17.626 ab	43.32 cd	<b>1.698 b</b>	<b>1.803 c</b>
<b>Zarcos</b>	<b>66.631 b</b>	17.208 b	110.50 ab	1.869 ab	2.386 ab
<b>Euros</b>	<b>81.394 a</b>	17.326 b	58.99 cd	1.833 ab	<b>1.883 c</b>
<b>A7573</b>	65.740 b	<b>18.854 a</b>	<b>38.54 d</b>	<b>1.942 a</b>	2.107 ab

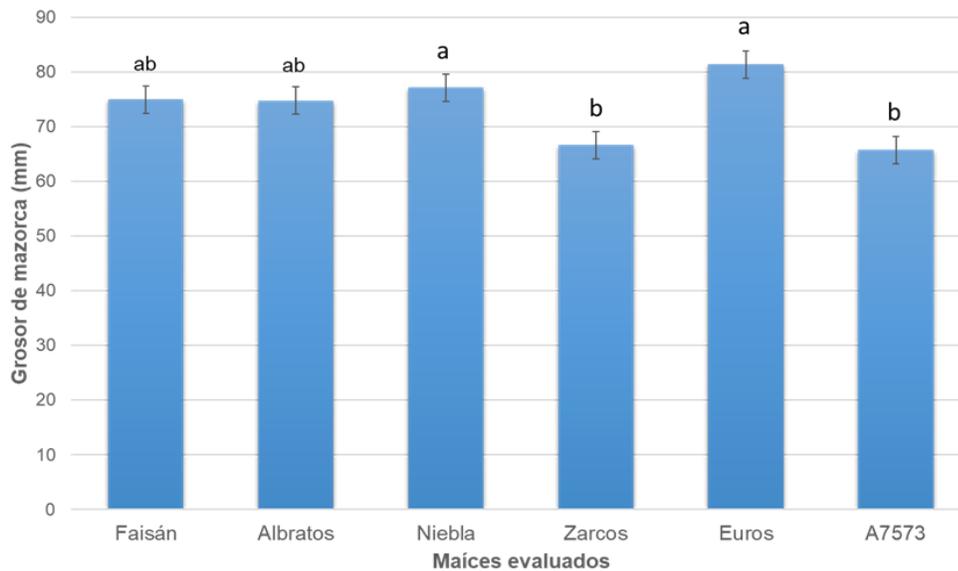
Valores con la misma letra, indica que no existen diferencias significativas entre las medias.

Lo cual concuerda con lo mencionado por Maldonado (2019) donde expresa que los híbridos utilizados rebasaron los valores obtenidos por el testigo. Debido a las condiciones climáticas y por lo cual la expresión del patógeno presento mayor incidencia y severidad.

#### 4.2.1. Grosor de mazorca

Para la variable grosor de mazorca, la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha \geq 0.05$ ), mostró diferencias estadísticas entre los maíces evaluados. Cabe mencionar que esta variable es un elemento relacionado con el rendimiento del maíz, y por lo tanto, para el huitlacoche también es un indicativo del grado de expresión del hongo, de tal manera que los híbridos Euros y Niebla presentaron los valores promedio más altos en grosor de mazorca (89.40 y 77.16 mm,

respectivamente) (Figura 6); este resultado se atribuye a que fueron estos los dos maíces que presentaron mayor desarrollo y crecimiento de las agallas por la infección del hongo inoculado. Los híbridos Zarcos y A7573 fueron los maíces con menor promedio de grosor de mazorca con 66.63 y 65.74 mm, respectivamente (Figura 6), manifestando menor afectación por la inoculación del huitlacoche y, por lo tanto, mayor tolerancia o resistencia a la infección por este patógeno.



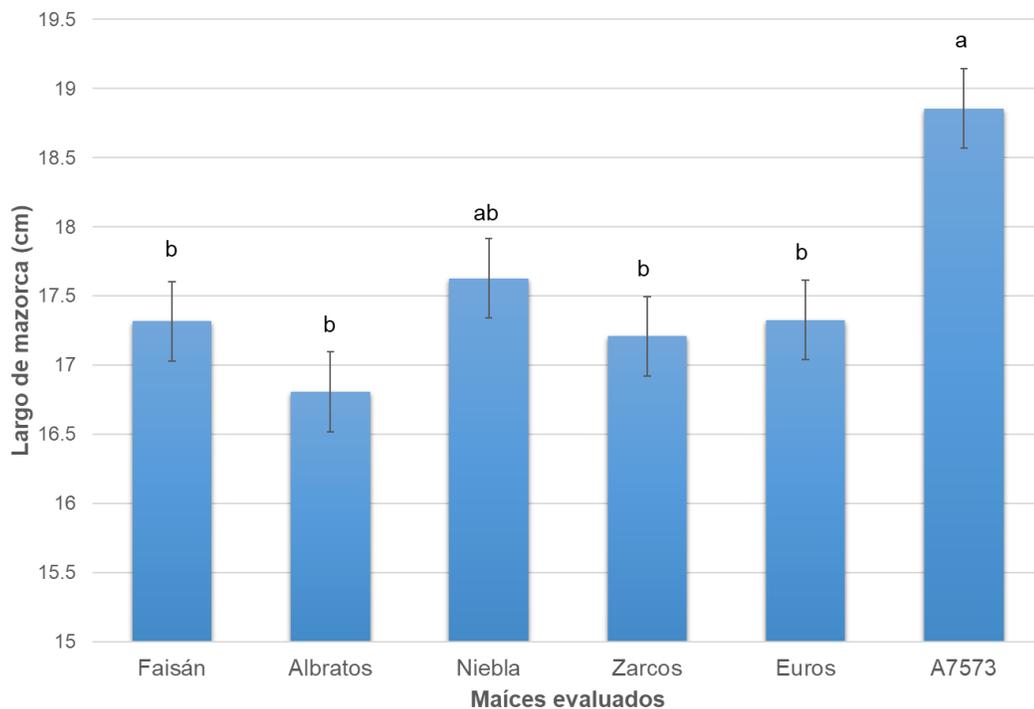
**Figura 6.** Promedio de grosor de mazorcas inoculadas con huitlacoche.

Según datos reportados por Ángeles *et al.* (2010), relacionados con la variable grosor en mazorcas indican que son variables que se encuentran relacionadas al rendimiento de grano en híbridos de maíz, por lo cual este autor reporta un promedio de 20.4 mm de ancho de mazorca, los cuales fueron significativos para rendimiento. Por otra parte, en la presente investigación, el valor promedio obtenido fue de 73.4 mm de ancho, valores más altos a los reportados en una mazorca sin incidencia de *U. maydis*, lo que indica que el hongo influye directamente en esta variable y que en la producción de huitlacoche es común encontrar mazorcas más grandes y abultadas por la hiperplasia e hipertrofia deformando el grano de elote y en consecuencia la formación de agallas. Estos resultados son de gran ayuda para la planificación de siembras, respondiendo positivamente a las demandas crecientes del huitlacoche fresco (Villanueva *et al.*, 2007)

Así mismo se pueden utilizar paralelamente tecnologías más eficientes como: labranza cero que ayuda a optimizar el tiempo en la preparación del terreno-siembra y el riego por goteo para una mejor distribución de humedad en los momentos clave de desarrollo del cultivo.

#### 4.2.2. Largo de mazorca

Para la variable largo de mazorca, la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha \geq 0.05$ ), mostró diferencias estadísticas entre los maíces evaluados. El híbrido A7573 expresó la mayor longitud de la mazorca con 18.85 cm. Por el contrario, el híbrido Albatros presentó mayor alteración en la longitud con el menor valor de 16.80 cm, esto indica que el patógeno, promueve acortamiento de mazorcas, ya que éste genotipo fue uno de los híbridos que presentó alta susceptibilidad a *U. maydis*, en el experimento (Figura 7).



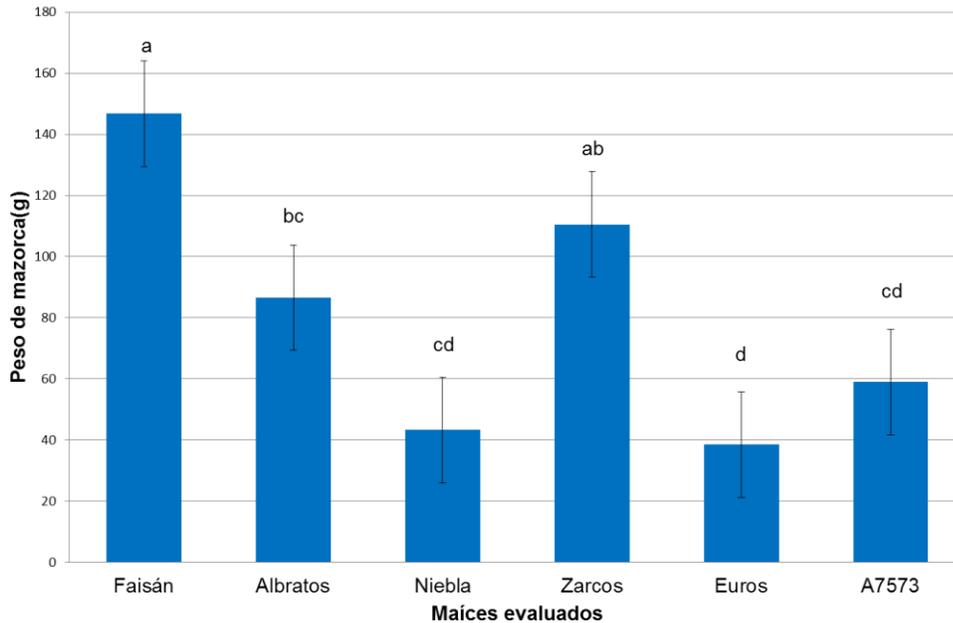
**Figura 7.** Medias de la longitud de mazorcas inoculadas con huitlacoche.

Al respecto Valadez *et al.* (2009) reportaron mazorcas de 10.0 a 17.0 cm de longitud en maíces criollos con adaptación a la zona del Bajío de México, en los que fueron evaluados, la susceptibilidad de dichos materiales para la producción de huitlacoche.

Se menciona por Gámez (2018) que el tipo de maíz no es un factor determinante para la cobertura de huitlacoche que todo será afectado por las condiciones climáticas, ambientales y la susceptibilidad que se presente en el genotipo. Lo cual coincide con el resultado obtenido en el cual la influencia de las condiciones ambientales repercute en las características morfológicas de determinado híbrido.

#### **4.2.3. Peso de mazorca**

Para la variable peso de mazorca, la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha \geq 0.05$ ), mostró diferencias estadísticas entre los maíces evaluados. El híbrido Faisán presentó los valores promedio más altos en peso de mazorca con 146.81 g (Figura 8), este resultado se atribuye a que este genotipo, fue de los maíces que presentaron mayor crecimiento de las agallas por la infección del hongo inoculado. Seguido de los híbridos Zarcos y Albatros que presentaron un peso promedio de 110.50 g y 86.57 g por mazorca, respectivamente. Por otra parte, el híbrido Euros fue de los maíces con menor promedio de peso de mazorca con 38.54 g (Figura 8), manifestando con este resultado, menor afectación por la inoculación de *U. maydis*, por lo que se entiende que no es un candidato para establecer la producción de huitlacoche con este híbrido en la región pues, presenta tolerancia o resistencia al patógeno, combinado con las interacciones del ambiente.



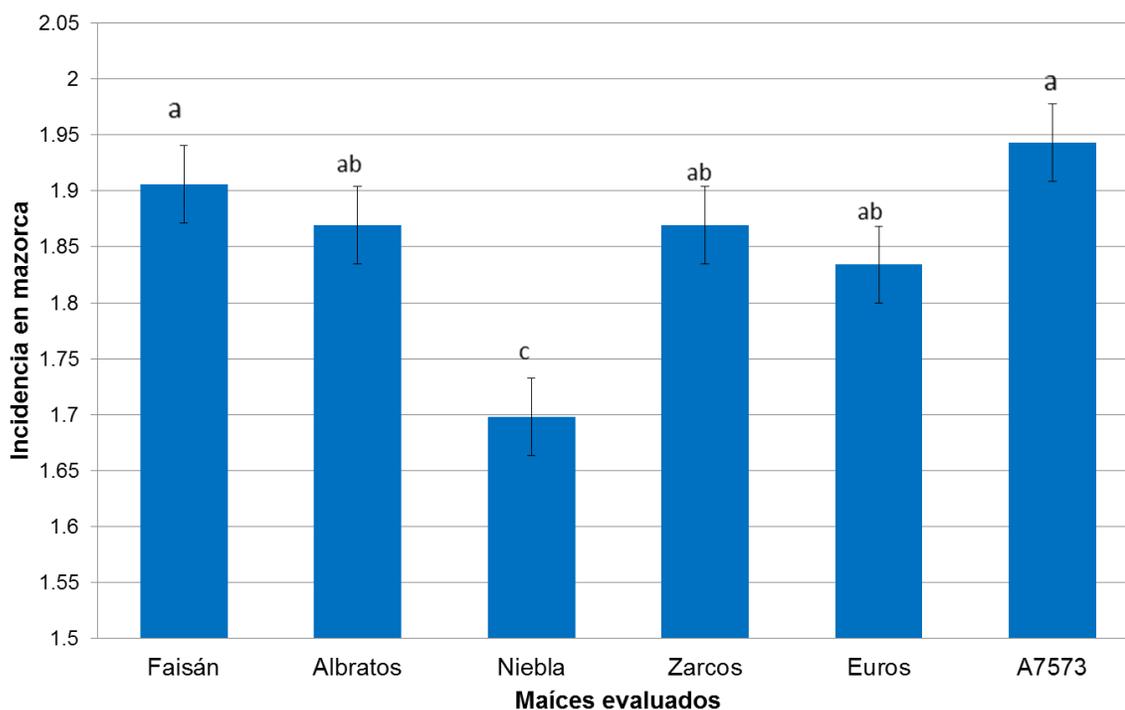
**Figura 8.** Medias del peso de mazorcas (g) inoculadas con huitlacoche

El rendimiento promedio que se obtuvo supera los obtenidos por Méndez *et al.* (2011), donde los mejores resultados en los híbridos evaluados fueron: Tromba con 131.20 g, D2020Y con 123.00 g; por lo que al comparar dichos resultados con los obtenidos en ésta investigación se asume que el híbrido Faisán supera con un 10.66% y 16.24%, respectivamente a estos dos híbridos, ya que presentó un promedio de 146.86 g.

Maldonado (2019) menciona al respecto, que el rendimiento está relacionado directamente con el número de mazorcas infectadas por el hongo, ya que es claro que a mayor número de mazorcas infectadas y al alto porcentaje de cobertura el rendimiento de huitlacoche será mayor. Así mismo, destaca que el híbrido Euros en su estudio fue el que presentó el mayor promedio, lo cual difiere completamente del presente estudio, ya que por el contrario este híbrido fue el que presentó un promedio inferior a Faisán que dado el caso fue el de mejor promedio, por lo que las condiciones climáticas pueden darnos inferencia de estos resultados, como influyentes en la expresión del hongo, en cada genotipo.

#### 4.2.4. Incidencia del hongo en mazorcas

Para la variable incidencia del hongo en la mazorca, la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha \geq 0.05$ ), mostró diferencias estadísticas entre los maíces evaluados. Los híbridos A7513 y Faisán presentaron los valores promedio más altos en incidencia del hongo con 1.94 y 1.90, respectivamente, considerando que el valor de 1 es mazorcas sanas y dos, mazorcas con sintomatología por *U. maydis* y/o presencia de huitlacoche (Figura 9), este resultado se atribuye a que estos dos maíces fueron los que presentaron mayor susceptibilidad al patógeno inoculado y a las condiciones ambientales presentadas en la zona. EL híbrido Niebla fue de los maíces con menor promedio de incidencia del hongo en la mazorca con 1.698 (Figura 9), manifestando menor afectación por la inoculación del huitlacoche y mayor tolerancia.



**Figura 9.** Medias de la incidencia presentada en mazorcas inoculadas con huitlacoche.

Según los estudios realizados por Alaniz, (2016) mencionan que la incidencia de una enfermedad se expresa de forma diferente entre localidades, debido a las

condiciones ambientales que se llegan a presentar, por tal razón es importante continuar con estudios de susceptibilidad en el caso de *U. maydis* en diferentes regiones y con diferentes materiales adaptados a dichas regiones, ya que varía notablemente la expresión del patógeno. Esto concuerda, también con lo expresado por los postulados de Koch, para evaluar incidencia de patógenos, en donde hace referencia a considerar de forma determinante las condiciones ambientales que prevalecen durante la experimentación puesto que dan lugar a una mayor incidencia de la enfermedad.

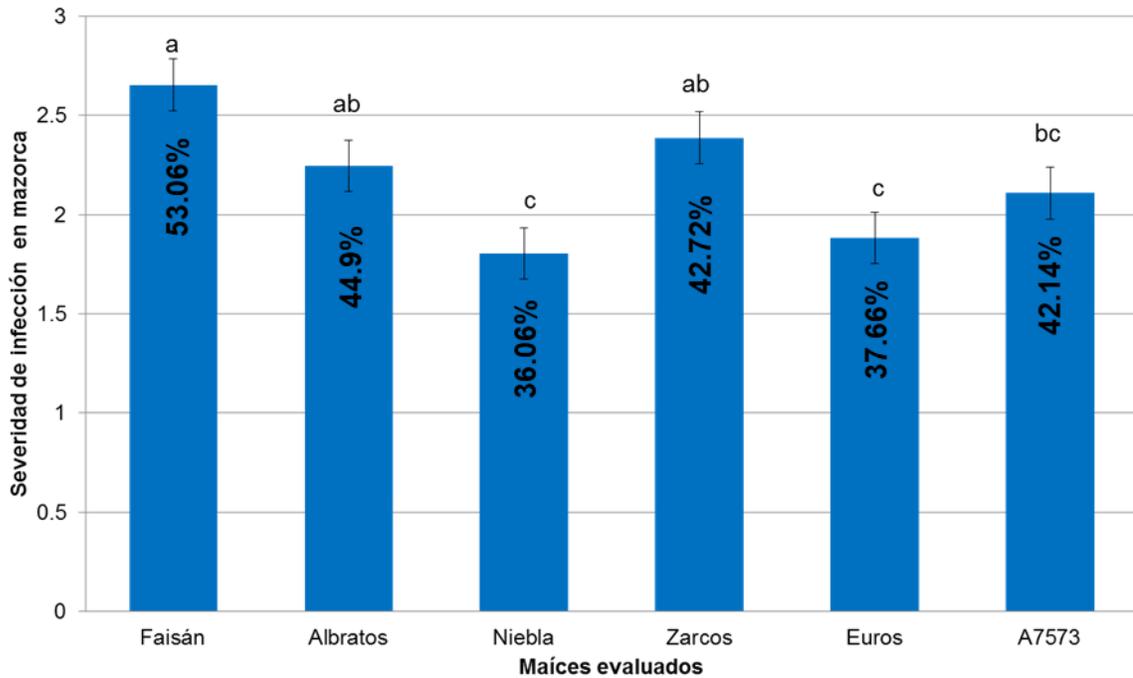
De igual manera De León (1974) refiere que las condiciones climáticas son relevantes para la expresión de la enfermedad e indica que la aparición del hongo puede ser grave en climas húmedos y templados más que en calurosos y húmedos.

Confirmando lo expuesto anteriormente y llegando a la misma conclusión Alaniz (2016), quien menciona que el genotipo susceptible en una región es uno de los factores que puede desencadenar la aparición repentina de epidemias si las condiciones ambientales le son favorables. Lo cual fue expresado en el presente trabajo ya que al observar el desarrollo del cultivo se pudo notar que el ambiente y/o condiciones climáticas es uno de los principales factores en la expresión máxima del patógeno.

#### **4.2.5. Severidad de la infección de *U. maydis* en mazorcas de maíz**

Para la variable severidad en mazorca, causada por la infección del patógeno *U. maydis*, la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey ( $\alpha \geq 0.05$ ), mostró diferencias estadísticas entre los maíces evaluados. El híbrido Faisán presentó los valores promedio más altos en severidad (2.65, 53%), lo cual se atribuye a que este genotipo tuvo una mayor infección por el patógeno. Seguido de los híbridos Albatros y Zarcos, con una severidad de 2.24 (44.8%) y 2.38 (47.6), respectivamente (Figura 10), este resultado se atribuye a que estos dos maíces de igual manera fueron los

que presentaron mayor crecimiento de las agallas por la infección del hongo inoculado, es decir mayor producción de huitlacoche.



**Figura 10.** Medias de la severidad de huitlacoche en mazorcas inoculadas con *U. maydis*.

El híbrido Niebla y Euros fueron los maíces con menor promedio, respectivamente (Figura 10), manifestando menor afectación por la inoculación del huitlacoche y mayor tolerancia o resistencia al patógeno. El presente comportamiento fue observado por Villanueva *et al.* (2007) al mencionar que aun disponiendo de la planta susceptible del hongo virulento y de la técnica de inoculación eficiente, las condiciones ambientales son determinantes en el sentido de favorecer o inhibir el desarrollo de la infección de *U. maydis* y la presencia de huitlacoche. Lo que igual se pudo observar por el testigo A7573 que no presento resultados favorables, al considerarse como uno de los genotipos, mayormente utilizado para la producción de huitlacoche, ya que para la región de estudio tuvo valores inferiores con respecto a otros híbridos como los que se presentaron en el genotipo Faisán.

A diferencia de lo reportado por Maldonado (2019) donde expresa que los híbridos Noble y Euros fueron los que presentaron mayor porcentaje de severidad, en el

presente trabajo para el híbrido Euros no fueron favorables las condiciones para la expresión del genotipo dando lugar a un bajo porcentaje.

### 4.3. Análisis de correlación entre variables

Como resultado del análisis de correlación entre las variables en estudio, se encontró que la incidencia y severidad correlacionan de forma positiva significativamente ( $p \leq 0.01$ ), con el peso de la mazorca, lo que indica que, a mayor peso, mayor incidencia y severidad del patógeno ( $r=0.273$  y  $r=0.818$ ; Cuadro 4), expresado en las mazorcas de maíz, también se encontró alta correlación positiva entre las variables severidad e incidencia ( $r=0.705$ ), lo que favorece los resultados encontrados en esta investigación.

**Cuadro 4.** Correlación entre variables evaluadas para determinar la susceptibilidad de híbridos de maíz a *U. maydis*. Metepec, Hidalgo, México, 2021.

	Grosor	Largo	Peso	Incidencia	Severidad
Grosor	1				
Largo	-0.039	1			
Peso	0.084	-0.049	1		
Incidencia	-0.008	-0.027	0.273***	1	
Severidad	0.058	-0.08	0.818***	0.705***	1

\*\*\*: correlación positiva con significancia a ( $p \leq 0.01$ )

Lo reportado por Madrigal (2010) es que existieron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) entre híbridos para las variables el grado de severidad 4, el rendimiento del hongo, con el grado de severidad 4 y rendimiento por hectárea. La alta densidad produjo la mayor expresión en la mayoría de los caracteres evaluados. En rendimiento unitario de huitlacoche las medias fueron 3,592 Kg a 166,666 plantas·ha<sup>-1</sup> y 960.2 Kg·ha<sup>-1</sup> a 62,500 plantas·ha<sup>-1</sup>, como consecuencia mayores severidades en los grados 3, 4 y 5 (elotes con 50, 75 y 100 % cubiertos por agallas, respectivamente), lo que compensó al hecho de que la incidencia en alta densidad haya sido muy inferior (21.39%) que la baja densidad (55.61%). Por lo que, la alta

densidad superó en rendimiento a la baja densidad con base en mayor severidad y número unitario de plantas.

Todas estas pruebas se utilizaron para comparar las medias de los diferentes tratamientos, y contrastar la prueba de hipótesis de que al menos una es diferente (hipótesis alternativa). Adicionalmente, con la finalidad de evitar cometer el error tipo I, (rechaza la hipótesis nula cuando ésta es verdadera, es decir, que no hay diferencias entre todos los tratamientos según Gámez (2018).

En la actualidad el huitlacoche se ha vuelto un tema de enorme atractivo para muchas personas, desde campesinos hasta investigadores debido al gran potencial que ha tenido en los últimos años, lo cual hace del presente trabajo un instrumento importante para llevar a cabo un seguimiento y realizar más estudios en híbridos de la zona, cepas locales con la finalidad de encontrar un maíz con alta susceptibilidad y una cepa con alta virulencia, con el entendimiento de que será necesario proveer un ambiente adecuado para el desarrollo del hongo. Además de continuar con capacitaciones a pequeños productores para entrar con este cultivo al mercado.

Sería apropiado dar capacitaciones en la región de Metepec, para la producción de huitlacoche, debido a que los productores, no se encuentran familiarizados con el cultivo de este hongo; sin embargo, se requiere realizar un estudio a mayor escala y con mayor número de genotipos o híbridos; así mismo, sería conveniente la evaluación de cepas locales para medir el nivel de virulencia y patogenicidad, analizar combinaciones entre los genotipos más susceptibles con la cepa más patogénica, y tener en cuenta que las condiciones ambientales año con año son diferentes lo que obliga a que las evaluaciones sean constantes, ya que el comportamiento de los organismos varía como respuesta a estos cambios.

## V. CONCLUSIÓN

En las condiciones geográficas y ambientales del municipio de Metepec, Hidalgo, México, por medio de la inoculación inducida por inyección de esporas de *Ustilago maydis*, el híbrido de maíz Faisán presentó la mayor susceptibilidad al huitlacoche. Este híbrido presentó los valores más altos de incidencia y severidad, por lo que, se considera el maíz más apropiado para la producción comercial de este hongo en la zona de estudio.

Los híbridos Albatros y Zarcos presentaron un buen porcentaje de susceptibilidad con 44.9% y 42.7% respectivamente, sin embargo, el rendimiento que mostraron no es el más idóneo para ser considerados para la producción comercial de huitlacoche.

Se destaca que el método de inoculación, la cepa de *Ustilago maydis* aplicada y los maíces manifestaron resultados prometedores con miras a la transferencia de la tecnología para la producción de huitlacoche en el sitio de estudio.

## VI. LITERATURA CONSULTADA

- Acosta, R.(2009). El cultivo del maíz, su origen y clasificación. El Maíz en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 30(2): 00. Recuperado en 05 de mayo de 2022, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362009000200016&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362009000200016&lng=es&tlng=es).
- Agrios G.N. (2005). Fitopatología (5ta ed.) México. Editorial Limusa. Pp.273-285, 493-498.
- Aguayo.G, (2016). Producción natural de huitlacoche [*Ustilago maydis* (DC) Corda] en el estado de Aguascalientes. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. Sitio web: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342016000501043](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000501043)
- Alaniz. (2016). Resistencia de Variedades de Maíz a *Ustilago maydis*, En Dos Comunidades Del Estado De México. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/65661>
- Ángeles G., E.; Ortiz T., E.; López, P.A. & López R., G. (2010). Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista fitotecnía*, 33(4): 287-296. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=s01877380201000040000&ing=es&ting=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s01877380201000040000&ing=es&ting=es)
- ASGROW. (2022). El Elotero de México. 2022, de ASGROW Sitio web: [https://www.asgrow.com.mx/es-mx/productos/maiz/product-detail-template.html/a\\_7573-durango-saltillo.html](https://www.asgrow.com.mx/es-mx/productos/maiz/product-detail-template.html/a_7573-durango-saltillo.html)
- Astiz G. (2017). Histopatología de Ustilaginales (Carbones) en Poaceas De Los Géneros *Sorghum*, *Bromus* y *Glyceria*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de la Plata Sitio web: <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/59635/Tesis.pdf-DFA.pdf?sequence=3>
- Ayala F., J. (2000). Variation and evolution in plants and microanimals: Toward a new synthesis 50 years after Stebbins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97: 6941-6941-6944

- Burd, M. (2009). Adaptation and constraint: overview. *Encyclopedia of life Sciences*.  
<http://www.els.net> [04/sep/2009]
- Cabrera-Ponce, J. L., León-Ramírez, C. G., Verver-Vargas, A., Palma-Tirado, L. & Ruiz-Herrera, J. (2012). Metamorphosis of the basidiomycota *Ustilago maydis*: transformation of yeast-like cells into basidiocarps. *Fungal Genetics and Biology*, 49(10): 765-771. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2012.07.005>
- Cano E. A, & Romero. B. L. (2016). Valor económico, nutricional y medicinal de hongos comestibles silvestres. *Revista chilena de nutrición*, 43(1): 75-80. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182016000100011>
- Calderón F. (2010). *Ustilago maydis* D.C.(Corda), hongo de importancia social y económica en la región central de México [http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/319/Calderon\\_Fernandez\\_ML\\_DC\\_EDAR\\_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/319/Calderon_Fernandez_ML_DC_EDAR_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Carrillo, L. (2003). Hongos. Microbiología Agrícola. Recuperado de :<http://www.bionica.info/biblioteca/Carrillo2003Hongos.pdf>
- Carrillo T. (2009). El origen del maíz naturaleza y cultura en Mesoamérica. *Ciencias*, 92-93: 4-13 Universidad Nacional Autónoma de México, México <https://www.redalyc.org/pdf/644/64412119003.pdf>
- Castillo, M. L. E. (2007). Introducción al SAS para Windows. 3 Ed. Chapingo, Estados de México. Universidad Autónoma Chapingo. Pag. 196.
- CONEVAL (2005). Estimaciones del CONEVAL con base en el XII Censo de Población y Vivienda, 2000. II Conteo de Población y Vivienda 2005 y la ENIGH 2000 y 2005. [http://poblacion.hidalgo.gob.mx/pdf/perfiles/pp\\_municipios-Metepec.pdf](http://poblacion.hidalgo.gob.mx/pdf/perfiles/pp_municipios-Metepec.pdf)
- Cuevas M. (2016). "Los hongos: héroes y villanos de la prosperidad humana. Vol. 17(9). ISSN 1607-6079. [www.revista.unam.mx/vol.17/num9/art69/](http://www.revista.unam.mx/vol.17/num9/art69/)
- Salazar T. J.C.; Méndez L. A.; Álvarez H. R. & Sánchez V. M. (2021). El huitlacoche, alimento prehispánico vigente en México. Historia, aprovechamiento y técnicas de producción. Universidad Autónoma Chapingo km 38.5 carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México.

- De León, C. (1974). Enfermedades del maíz: guía para su identificación en el campo. Folleto de información. México, D. F. México. CIMMYT. 77 pp.
- De La Rosa L. (1846). Descripción del Maíz. En Memorias sobre el cultivo del maíz (8-9). Museo Mexicano: Imprenta De La Sociedad Literaria.
- Ellingboe, M. H. (1961). Somatic Recombination in *Puccinia Graminis* Var. Tritic. *Phytopathology*, 51:13-14.
- Gómez D., V. (2018). Evaluación de inóculos de *Ustilago maydis* en maíces de la región de Acatzingo, Puebla para la Producción de Huitlacoche. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/8701/546918TL.pdf?sequence=1>
- Garces, A. (1996). Morfología y Clasificación de los Hongos. [http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/Facultad\\_de\\_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas Libros/Biologia/Morfologia y Clasificacion de los Hongos/Morfologia y clasificacion de los hongos libro.pdf](http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/Facultad_de_Ciencias/Publicaciones/Imagenes/Portadas_Libros/Biologia/Morfologia_y_Clasificacion_de_los_Hongos/Morfologia_y_clasificacion_de_los_hongos_libro.pdf)
- García M., A (.2016). Producción de huitlacoche, *Ustilago maydis* (D.C.) Corda en el estado de Aguascalientes. Tesis maestría. Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/>.
- Garcilazo R., Tello S. I.; Mata. G.; Parraguirre L. C.; Valencia M. D. A.; Romero A. O. (2020). Evaluation of Eight Genotypes of Corn for the Commercial Cultivation of Huitlacoche in Nopalucan, Puebla, Mexico Nova Scientia vol. 2 no. 4.
- González T. C. (2016). Producción de Huitlacoche por Inducción de la Infección en Maíz con *Ustilago maydis*, Bajo Condiciones Controladas. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional De Ciencias Biológicas, Disponible En: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx>
- INAFED. (2000). Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM13hidalgo/municipios/13035a.html>

- Leal C. M. A. (1996). Evaluación de Metodologías para la Inducción Artificial de Huitlacoche. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. <http://eprints.uanl.mx/6214/1/1080071991.PDF>
- Lim K. Y. (2013). Identification of medicinal mushroom species based on nuclear large subunit rDNA sequences. *Journal of Microbiology*, 44: 29-34.
- López O. F. (1999). Respuesta del Cultivo de Maíz a Diferentes Densidades de Población e Híbridos Bajo Riego por Goteo en la Región de Anahuac N. L. de Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Sitio web: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5465/T10182%20%20LOPEZ%20OVANDO,%20FRANCISCO%20%20TESIS.pdf?sequence=1>
- Martínez S. J. L. (2013). Análisis de la regulación del proteoma de *Ustilago maydis* por dimorfismo, pH y los genes MAPK y GCN5. Posgrado Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. <https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/851/1/TDIPICYTM3A62013.pdf>
- Martínez M., L.; A. Muños O.; J. A. Mejía C.; J. D. Molina G.; E. Zavaleta-Mejía; J. S. Sandoval I. & C. Villanueva V. (2005). Efectos genéticos e interacciones entre familias de maíz y aislados de huitlacoche (*Ustilgo maydis* D.C. Corda) Chapingo. *Serie Horticultura*, 11(1): 121-128.
- Méndez L. A; Salazar. T. J. C.; Álvarez. H. R. (2011). Híbridos de maíz elotero susceptibles al huitlacoche. Extensión al campo: *Agricultura y Agronomía*, 5 (19-20): 20-26. Consultado en: <https://www.researchgate.net/publicaation/326782453>.
- Paredes L, O.; Guevara. L. F.; Bello. P. L. A. (2001). Los alimentos mágicos de las culturas indígenas mesoamericanas. Fondo de Cultura Económica, México. pp. 197.
- Valverde. M. E.; Paredes L. O.; Pataky K. Y.; Guevara L. F. & Pineda T. S. (1995). Huitlacoche (*Ustilago maydis*) as a food source-biology, Composition, and Production. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 35(3): 191-229, DOI: [10.1080/10408399509527699](https://doi.org/10.1080/10408399509527699)

- Martínez, L.; Villanueva, C. & Sahagún, J. (2000). Susceptibilidad y resistencia del maíz al hongo comestible huitlacoche (*Ustilago maydis* Cda.) mejorando su virulencia. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 6: 241-248.
- Madrigal-Rodríguez, J.; Villanueva-Verduzco, C.; Sahagún-Castellanos, J.; Acosta Ramos, M.; Martínez-Martínez, L.; Espinosa-Solares, T. (2010). Ensayos de producción de huitlacoche (*Ustilago maydis* Cda.) hidropónico en invernadero *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(3): 177-182
- Maldonado R. J. (2019). Evaluación de patógenos de *Ustilago maydis* (D. C.) Corda en cinco híbridos de maíz mediante inoculación artificial. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/46185/K%2066086%20Maldonado%20Rodr%C3%ADguez%2C%20Jos%C3%A9.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Monsanto. (2017). Faisán. ASGROW México. Disponible en: <https://www.asgrow.com.mx/esmx/detalles.html/corn/valles%20altos%20altos/faisan>.
- Méndez L. A. (2011). Híbridos de maíz elotero susceptibles al huitlacoche. Extensión al campo: agricultura y agronomía. <https://www.researchgate.net/publication/326782453>.
- Martínez. A.; Corrales. G. J. J.; Espinosa. S. T.; García. G. P. G. & Villanueva V. C. (2008). Cambios postcosecha del hongo comestible huitlacoche (*Ustilago maydis* (D. C.) Corda)
- Pimentel-González, M. E.; Rodríguez-Huezo, R. G.; Campos-Montiel, A.; Trapala-Islas A. D. & Hernández-Fuentes. (2011). Influencia de la variedad de maíz en las características fisicoquímicas del huitlacoche (*Ustilago maydis*).
- Rodríguez-Flores, E., Cifuentes-Blanco, J., Arreguín-Espinosa, R. & Rodríguez Bustamante, E. (2021) La inclusión del huitlacoche, plaga para algunos y alimento para otros, en la biodiversidad y la soberanía alimentaria de México. En: González Martínez, T.M. y Ávila Akerberg, V. (eds.) *Biodiversidad y soberanías alimentarias en América Latina* (pp. 61-71) ISBN 9781792328626, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca.

- Ruiz H. J. (2008). *Ustilago maydis*: ascenso de un hongo mexicano de la gastronomía local al mundo científico. *Nova Scientia*, 1: 118-135.
- Ribes R. M. A. (2012). *Ustilago Maydis*. Disponible en: <http://www.micobotanicajaen.com/Revista/Articulos/MARibesR/CastillaLaMancha001/Ustilago%20maydis%2020804%2002.pdf>
- Ripusudan L. (2001). El maíz en los trópicos mejoramiento y producción. 2001, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Disponible en: [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=os79dx6BcmsC&oi=fnd&pg=PA45&dq=MAIZ+PDF&ots=OUAVhJ\\_3i&sig=IY0Fv8ArdflnU\\_IFqKfgkKpOvls#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=os79dx6BcmsC&oi=fnd&pg=PA45&dq=MAIZ+PDF&ots=OUAVhJ_3i&sig=IY0Fv8ArdflnU_IFqKfgkKpOvls#v=onepage&q&f=false)
- Ruiz H. (2008). *Ustilago maydis*: ascenso de un hongo mexicano de la gastronomía local al mundo científico. *Nova Scientia*, 1(1): 118-135. Universidad de la Salle Bajío León, Guanajuato, México <https://www.redalyc.org/pdf/2033/203315665007.pdf>
- Sánchez-Vega, M., Méndez-López, A., Salazar-Torres, J. C., Leal-Robles, A. I., Martínez-Amador, S. Y. & Pérez-Pérez, J. E. (2019). Diversity of Insect Pests Damaging Quality of “Huitlacoche” (Corn Smut) at Saltillo, Coahuila, México. *Southwestern Entomologist*, 44(3): 627-636. <https://doi.org/10.3958/059.044.0308>
- Tamayo, O, M, C (2009). Caracterización del gen *ape3*, codificante de una aminopeptidasa de *Ustilago maydis* (tesis de maestría). ENCB. IPN. Mexico.pp.1-14.
- Trinidad (2008). Bases para una política de I&D e innovación de la cadena de valor del maíz Disponible en:<https://tesis.ipn.mx>
- Brefort, T., Doehlemann, G., Mendoza-Mendoza, A., Reissmann, S., Djamei, A. & Kahmann, R. (2009). *Ustilago maydis* as a Pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, 47: 423-445.
- UNISEM. (2022). Euros de UNISEM Disponible en: <https://semillastodoterreno.com/maices/euros>

- Vázquez-Carrillo A.; Martínez-Gutiérrez B.; Zamudio-González A.; Espinosa-Calderón M.; Tadeo-Robledo A. & Turrent-Fernández. (2020). Estabilidad de rendimiento y características fisicoquímicas de grano de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas* Sitio web: Dialnet-EstabilidadDeRendimientoYCaracteristicasFisicoquim-7696814.pdf
- Valadez R., H. A. Sánchez R., E. Sandoval C., J. H. Hernández S. & R. Torres F. (2015). Evaluación agronómica de 22 híbridos de maíz (*Zea mays*) en la Región de Valles Altos del Estado de Puebla. SNICS Disponible en : [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/675834/5\\_Seminario\\_Cartel\\_Evaluaci\\_n\\_Agron\\_mica\\_de\\_22\\_h\\_bridos\\_de\\_maiz.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/675834/5_Seminario_Cartel_Evaluaci_n_Agron_mica_de_22_h_bridos_de_maiz.pdf)
- Valdez, (2009). Procedimientos tecnológicos para la producción masiva de huitlacoche. CINVESTAV Irapuato. SINNCO. pp.10-37.
- Villanueva, V. C.; Sánchez, R. E. & Villanueva, S. E. (2007). El huitlacoche y su cultivo. Ed. Mundi Prensa, México. 96 p.
- Zarco. (2022). Disponible en : <https://semillaszarco.com.mx/sistema/index2.php?shot=productos.php>