

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS



Propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L.
variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Por:

JENNIFER ELIZABETH LÓPEZ MORALES

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

**Propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad
Norteña, a partir de segmentos nodales.**

POR:

JENNIFER ELIZABETH LÓPEZ MORALES

TESIS

**Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
para obtener el título de:**

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por:



Dra. Elda Barbarita Companioni González
Director Principal Interno



Dr. Aroldo Cisnero Peña
Director Principal Externo



Dra. Sonia Ramirez Barrón
Co-Asesor Interno



M. C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS BÁSICAS

**Propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad
Norteña, a partir de segmentos nodales.**

POR:

JENNIFER ELIZABETH LÓPEZ MORALES

TESIS

**Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito
para obtener el título de:**

INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA

Aprobada por:



Dra. Elda Barbarita Companioni González
Director Principal Interno



Dr. Aroldo Cisnero Peña
Director Principal Externo



Dra. Sonia Ramírez Barrón
Co-Asesor Interno



M. C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2024

Derechos de Autor y Declaración de no plagio

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y 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, gráficas, mapas o datos sin citar al 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 el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.



Jennifer Elizabeth López Morales
Autor Principal



Dra. Elda Barbarita Companioni González
Director Principal Interno

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia principalmente a mis padres y hermano por todo el apoyo que me dieron en todo el transcurso de mi licenciatura, por alentarme todos los días a seguir luchando por mis sueños y todos los sacrificios los cuales valieron la pena, ellos son mi inspiración para ser mejor cada día. Mi más sincero reconocimiento a ellos porque me brindaron el soporte emocional y económico para poder concentrarme en los estudios y no abandonarlos.

Al Lic. Adonay Ventura por impulsarme a seguir adelante, por escucharme, ayudarme y estar a mi lado en momentos complicados. Gracias por creer en mi cuando yo misma dudaba, por cada palabra de aliento, por todo el cariño y amor incondicional que me has brindado y sobre todo por ayudarme a crecer como persona y como profesionista.

A mis amigos, la Ing. Ruth López y Ing. Ximena Mata por ser las mejores amigas que pude haber encontrado en una ciudad desconocida donde compartimos grandes aventuras, por todo el apoyo, consejos, risas y sobre todo por todo el cariño que me brindaron durante toda la carrera y por no dejarme sola en momentos difíciles tanto como emocionales como académicos. A la Ing. María Guadalupe por todo el cariño, consejos y regaños. Por cada canción alegre que ponía para despejarnos del trabajo en el laboratorio, por toda esa alegría que transmitía y todas las palabras de aliento para seguir mejorando en nuestro proyecto de investigación, gracias por ser parte de esta etapa en mi vida. Al Ing. Alex Omar por ayudarme en todo el proceso de la tesis, por su compañía y apoyo durante el trabajo en el laboratorio, así como sus consejos y chistes para alegrar el día. A la Ing. Daniela Ontiveros por ser la mejor vecina, amiga y compañera por sus consejos y palabras de alientos cuando más lo necesitaba, así como todo el cariño que me brindo. A la Ing. Lorena Bárcenas que, aunque era la más pequeña me dio mucho cariño y apoyo, se convirtió en una amiga muy querida. Para finalizar quiero agradecer a la Dra. Fernanda Morales quien ha sido mi mejor amiga desde los 12 años, quién ha estado junto a mí en los momentos más importantes de mi vida sin importar la distancia, gracias por todas esas video llamadas que me alegraban el día, gracias por ser mi confidente, amiga y psicóloga, quién me enseñó el valor de la lealtad sin importar la distancia y el tiempo.

Gracias a todos porque cada uno de ustedes me enseñó a ser mejor cada día y sobre todo gracias por ser mi familia foránea, siempre los llevaré en mi corazón.

A la Dra. Barbarita Companioni le agradezco por su paciencia, dedicación, apoyo, consejos y correcciones ya que sin su ayuda no hubiese podido lograr mi objetivo, usted fue una guía tanto académica como en mi vida, gracias por alentarme a ser mejor académicamente, por la confianza que me brindó y por creer en mí. La llevaré siempre en mi memoria para tener un futuro exitoso.

Por último, quisiera agradecerle a la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro" por haberme exigido aun cuando creía que ya no podía, me enseñó el valor de la responsabilidad y la dedicación, pero al mismo tiempo me ha permitido obtener mi tan ansiado título. Doy gracias a Dios por permitirme cumplir ese sueño que se veía tan lejos pero hoy está aquí.

DEDICATORIA

A mi madre Cecilia del Carmen por enseñarme a luchar por mis sueños, a mi padre José Artemio por enseñarme a confiar en mí misma, a mi hermano Cristian por motivarme a ser mejor cada día, a mi novio Adonay por su apoyo incondicional, a mi abuela Sara por darme tanto amor, a mi abuelo Tomas que, aunque él ya no está conmigo estaría muy orgulloso de mí y a mi morita por su compañía en infinitas noches de desvelos.

A mi abuelo Isidro que me enseñó a ser valiente en la vida, a mi abuela Alicia que me enseñó a ser respetuosa con todas las personas, a mi tía Paulina que me enseñó a salir de mi zona de confort, a mi madrina Doris por enseñarme a ser una guerrera en la vida, a mi tío Carlos por enseñarme a ser gentil con todos, a mi tía Irma por alentarme a no ser conformista, por ultimo a mis primos Alexis, Ximena, Evelyn, Indira, Nely y Ángel por su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

	Contenido	Página
1.0	INTRODUCCIÓN	14
2.0	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Taxonomía, origen y botánica del cultivo <i>Solanum tuberosum</i> L.	
2.2	Importancia económica del cultivo <i>Solanum tuberosum</i> L.	
2.3	Descripción de las variedades de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) mexicanas: Norteña y Fianna.	
2.4	Métodos de propagación de <i>Solanum tuberosum</i> L.	
2.5	Utilización de las técnicas biotecnológicas para la producción de plantas <i>in vitro</i> y microtubérculos de <i>Solanum tuberosum</i> L.	
3.0	MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.0.1	<i>Generalidades de los experimentos.</i>	
3.1	Establecimiento <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
3.1.1	<i>Efecto de la concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.</i>	
3.2	Multiplicación <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
3.2.1	<i>Efecto de 6- bencilaminopurina (6-BAP) y el ácido indolacético (AIA) en la fase de multiplicación in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña.</i>	
3.2.2	<i>Efecto de la concentración de sacarosa en el crecimiento de brotes in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña.</i>	
3.3	Enraizamiento <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
3.3.1	<i>Influencia de la concentración de ácido indolbutírico en el enraizamiento in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña.</i>	
3.4	Aclimatación de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
4.0	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1	Establecimiento <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
4.1.1	<i>Efecto de la concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.</i>	

4.2	Multiplicación <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
4.2.1	<i>Efecto de 6- bencilaminopurina (6-BAP) y el ácido indolacético (AIA) en la fase de multiplicación in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña.</i>	
4.2.2	<i>Efecto de la concentración de sacarosa en el crecimiento de brotes in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña.</i>	
4.3	Enraizamiento <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
4.3.1	<i>Influencia de la concentración de ácido indolbutírico en el enraizamiento in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña.</i>	
4.4	Aclimatación de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	
5.0	CONCLUSIONES	43
6.0	RECOMENDACIONES	
7.0	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción morfológica de <i>Solanum tuberosum</i> L.....	17
Cuadro 2. Desglose de las diferentes concentraciones hormonales probadas en el experimento.....	27
Cuadro 3. Aclimatación de plántulas de <i>Solanum tuberosum</i> L. Supervivencia, incremento en la altura de las plántulas y en la longitud de la raíz principal	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Morfología floral de la planta de <i>Solanum tuberosum</i> L	17
Figura 2. Morfología de la variedad Norteña	21
Figura 3. Morfología de la variedad Fianna	22
Figura 4. Proceso de micropropagación de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.)	24
Figura 5. Proceso de microtuberización de papa (<i>Solanum tuberosum</i> L.) mediante método convencional	25
Figura 6. Plantas donadoras (etapa 0 de la micropropagación en el cultivo) de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña. Tubérculos – semillas certificados	27
Figura 7. Secciones realizadas a brotes de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña durante la etapa de multiplicación <i>in vitro</i> en el cultivo	29
Figura 8. Esquema desarrollado para el establecimiento <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP)	32
Figura 9. Efecto de la concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.	32
Figura 10. Brotes <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones 6-bencilaminopurina (BAP) y el ácido indolacético (AIA) en la multiplicación <i>in vitro</i> del cultivo	34
Figura 11. Efecto de 6-bencilaminopurina y el ácido indolacético en la multiplicación <i>in vitro</i> de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña	35
Figura 12. Brotes <i>in vitro</i> de variedades de <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones de sacarosa en la etapa de multiplicación <i>in vitro</i> del cultivo.	36
Figura 13. Efecto de la concentración de sacarosa en la multiplicación de brotes <i>in vitro</i> en <i>Solanum tuberosum</i> L. variedad Norteña.	37

Figura 14. Brotes *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones de AIB en el enraizamiento *in vitro*.39

Figura 15. Influencia de la concentración de ácido indolbutírico en el enraizamiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. 40

Figura 16. Plántulas de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña durante la etapa de aclimatación en el cultivo. 42

RESUMEN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) ocupa el tercer lugar de importancia como cultivo alimenticio humano después del arroz y el trigo. En México se produce en seis entidades federativas principales. Sin embargo, el cultivo se ha visto limitado porque como especie de propagación vegetativa es susceptible a numerosas enfermedades. Lo cual representa un efecto negativo en el rendimiento y la calidad comercial en el cultivo. El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo general establecer un protocolo para la propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales. Para ello, la investigación se desarrolló en el Laboratorio de Micropropagación de Plantas, del Instituto Mexicano del Maíz "Dr. Mario E. Castro Gil", perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Como material vegetal se utilizaron tubérculos – semilla de una variedad mexicana de papa proveniente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Saltillo, Coahuila, México (INIFAT). La variedad se identificó con el nombre de Norteña. Como resultados se logró un protocolo para la propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales. Se logró la mayor respuesta en el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña en la concentración con 0.5 mg. L⁻¹ de BAP, con marcadas diferencias significativas al resto de los tratamientos. Por ello, se evidenció la factibilidad del establecimiento *in vitro* de la papa variedad Norteña a partir de segmentos nodales. El tratamiento con la combinación de 0.8 mg. L⁻¹ de BAP y 0.2 mg. L⁻¹ de AIA mostró los mejores resultados significativos para número de nudos por tallo secundario, altura del brote y el número de hojas por brote. Lo cual evidenció que hubo una respuesta diferencial de los explantes a la concentración y tipo de combinación de los reguladores de crecimiento vegetal bajo condiciones *in vitro* del cultivo de la papa var. Norteña. Se demostró la calidad de las plántulas obtenidas en el protocolo de micropropagación de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña en la etapa de aclimatación con un 100 % de supervivencia.

Palabras clave: papa, cultivo *in vitro*, plántulas, aclimatación.

1.0 INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) pertenece a la familia *Solanaceae*. Ocupa el tercer lugar de importancia como cultivo alimenticio humano después del arroz y el trigo. La producción de este tubérculo es constante en países desarrollados. Mientras que en países en desarrollo la producción ha incrementado rápidamente debido a su interés alimentario (CIP, 2021). Por su valor nutritivo, este cultivo aporta en 100 gramos de papa fresca un 78.0% de humedad, 2.1% de proteína, 18.5% de almidón, 1.0% de cenizas y 0.1% de grasas. Además, contiene minerales (560.0 mg de potasio, 50.0 mg de fósforo, 9.0 mg de calcio, 7.0 mg de sodio y 0.8 mg de hierro) y vitaminas (0.1 mg de Tiamina, 0.04 mg de Riboflavina, 20.0 mg de vitamina C y 1.5 mg de Niacina), lo cual coloca a la papa como uno de los cultivos estratégicos más importantes para contribuir a solucionar los problemas del hambre en el mundo (Castro *et al.*, 2012). En México se produce en seis entidades federativas principales. Estos son: Sonora, Estado de México, Puebla, Veracruz, Baja California Sur, Nuevo León, Jalisco, Chihuahua y Michoacán. Sin embargo, el cultivo se ha visto limitado porque como especie de propagación vegetativa es susceptible a numerosas presiones bióticas (causadas por bacterias, hongos, virus, viroides y plagas) que tienen efecto negativo sobre el rendimiento y la calidad comercial en el cultivo. Lo cual afecta la distribución internacional de su germoplasma. Por ello, resalta la necesidad de implementar técnicas biotecnológicas que permitan el desarrollo de metodologías eficientes para la conservación, protección y propagación de diferentes recursos genéticos de papa que satisfagan de forma adecuada los requerimientos propios en el cultivo. Así como los de producción para consumo y procesamiento.

En este sentido, en el país existen dos variedades comerciales importantes de papa: la variedad Norteña y Fianna. Las cuales presentan limitantes relacionadas con la obtención de un producto de alta calidad, problemas fitosanitarios y características que cumplen con las condiciones requeridas para la industria. Pese a que el cultivo de papa ha sido ampliamente estudiado, la producción de semilla de dichas variedades debe evolucionar hacia técnicas más eficientes, ya que esta es el medio a través del cual se lleva al agricultor todo el potencial genético de cultivares con características superiores (Velásquez, 2014). Donde el potencial genético de una variedad o clon se conserva con tubérculos-semilla libres de virus, en los que su calidad fitosanitaria repercute en el rendimiento del cultivo. Por ello, la producción de semilla prebásica es importante. Esto quiere decir que las semillas de buena calidad garantizan

mejores cosechas y son responsables de aumentos significativos en los rendimientos. Por lo que su producción y usos son prioritarios para un país o una región productora.

Basado en los planteamientos anteriores, la investigación recogida en el presente documento de tesis estuvo encaminado a la comprobación de la siguiente hipótesis: La propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. puede ser utilizada para la obtención de semilla de calidad para la siembra de productores en el cultivo.

Para el cumplimiento de la anterior hipótesis se propone los siguientes objetivos:

- **Objetivo general:** Establecer un protocolo para la propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.

Objetivos específicos:

1. Determinar las condiciones para el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.
2. Obtener la multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.
3. Lograr la aclimatación de plantas *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

JUSTIFICACIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) constituye un alimento que junto con el maíz, frijol, trigo y arroz forman parte de la dieta del mexicano. Sin embargo, la producción del tubérculo se encuentra afectada por la baja calidad fitosanitaria de la semilla, la cual constituye la principal fuente de inóculo primario para las enfermedades, principalmente para la enfermedad conocida como Punta Morada de la Papa (PMP) considerada después del tizón tardío, como la enfermedad más importante a nivel de la región y nacional.

2.0 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Taxonomía, origen y botánica del cultivo *Solanum tuberosum* L.

La papa es una planta dicotiledónea pertenece a la familia *Solanaceae*, género *Solanum* y sección *Petota*. Dentro de la sección *Petota* solo dos son cultivadas en todo el mundo (*Solanum tuberosum* ssp. y *tuberosum*). Dado que el resto están restringidas en los países andinos (Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia) donde encontramos millones de cultivos primitivos. Se tienen reportes que *Solanum tuberosum* se encontró por primera vez en el mundo en Sudamérica (Bolivia) entre los lagos Titicaca y Poopo hace 10,000 a 7,000 años (Quishpe, 2017). Esta especie es cultivada en zonas con climas templados. Sin embargo, toleran climas calientes; pero frescos con intervalo de altitud que va desde los 1,300 a 3,300 msnm. Se pueden adaptar a menos o mayor altitud de acuerdo a la especie cultivada. Por otra parte, se encuentran en suelos con textura arenosa con buen drenaje, y con estructura suelta que les permiten un buen crecimiento de raíces y tubérculos. Pero, en otras ocasiones suele adaptarse en suelos arcillosos con mayor materia orgánica, drenaje y buena estructura con un pH óptimo de 5.0 a 7.0. Dado que es sensible a suelos compactos por lo tanto debe de tener una profundidad mayor a 30 cm que les permita crecer los estolones y tubérculos (Reddy, 2018).

Por otro lado, teniendo en cuenta el comportamiento de la planta a nivel *ex vitro* se pueden describir cada uno de sus partes morfológicas en base a la literatura de las diferentes especies que existen en el cultivo *Solanum tuberosum* L., tanto de forma silvestres y cultivadas en campo. En el transcurso de los años encontramos diferentes características morfológicas que se han modificado dado a factores ambientales tales como: la temperatura, duración de la luz solar, humedad, fertilidad del suelo o en los lugares donde se encuentran. La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta herbácea con diferentes formas de crecimiento dependiendo de la especie donde encontramos plantas: rastreras (tallos que crecen horizontalmente sobre el suelo), decumbente (tallos que se arrastran pero que levantan el ápice), arrosetado o semiarrosetado (cuando las hojas se encuentran cerca de la base o en la base cerca del suelo), semi-erecto y erecto con tallos de 30 a 60 cm de largo. Todas ellas se pueden desarrollar a partir de una semilla o tubérculo. Cuando crecen de semillas forman raíces finas axonomorfa con ramificaciones laterales. Por otra parte, cuando crecen por tubérculos se forman raíces adventicias en la base de cada brote y en la parte subterránea crecen raíces en los nudos de cada tallo, de vez en cuando se forman

raíces en los estolones. Este cultivo forma raíces muy débiles lo cual requiere un suelo con buenas condiciones tanto físicas y químicas para su desarrollo (Reddy, 2018). En relación a su tallo son de color verde y a veces suelen ser de color marrón rojizo o morados, Los cuales pueden ser solidos o parcialmente tubulares debido a una desintegración celular de la medula, las yemas que se forman en los tallos a la altura de las axilas de las hojas se puede desarrollar y formar tallos laterales, estolones (se forman principalmente en especies silvestres), inflorescencias; y a veces tubérculos aéreos con hojas imparipinnadas de 10 a 25 cm de largo (Quishpe, 2017). A continuación, en la siguiente tabla se describe cada una de las partes morfológicas de la planta según (Morales, 2021) (Figura 1 y cuadro 1).

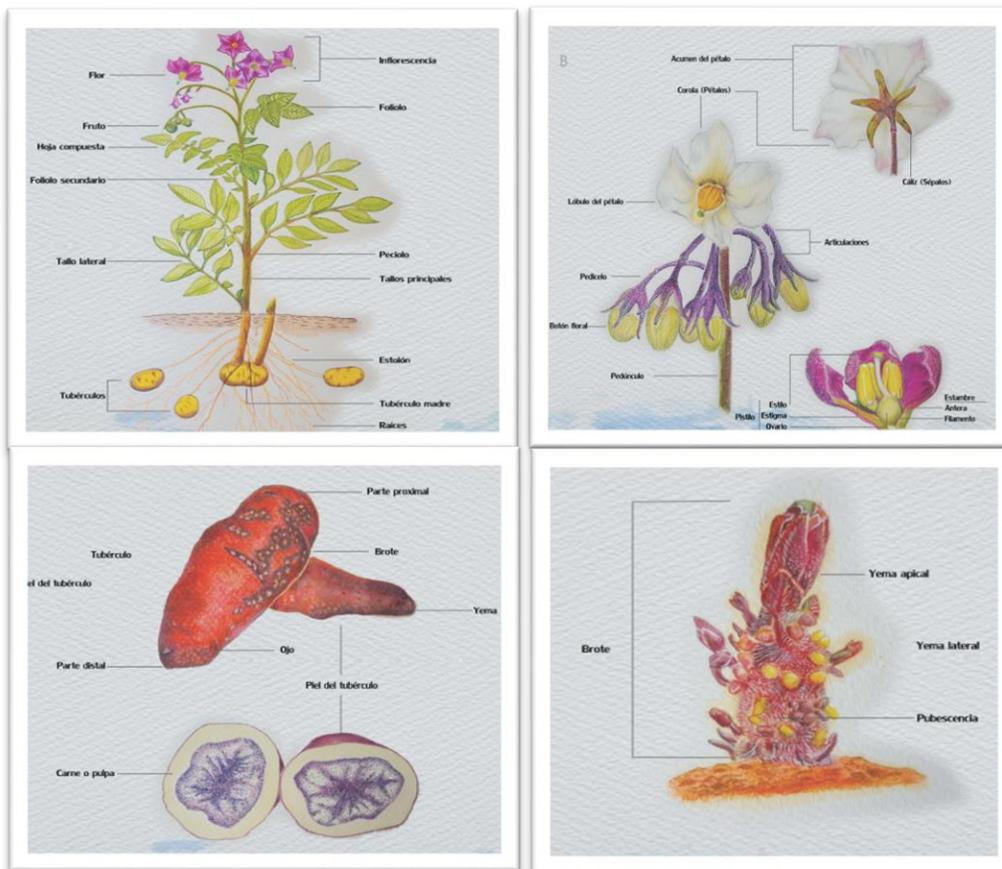


Figura 1. Morfología floral de la planta de *Solanum tuberosum* L. de acuerdo a Morales (2021).

Cuadro 1. Descripción morfológica de *Solanum tuberosum* L. de acuerdo a Morales (2021).

Descripción morfológica	
Tubérculo	Son tallos modificados que sirve de almacén de la planta de papa este contiene dos extremos el basal o extremo ligado al estolón y el extremo expuesto (apical).
Brote	Son de color blancos, pero si se expone a la luz se tornan verdes. En el extremo basal se forman tallos subterráneos presentando lenticelas mientras que por el extremo apical se forman las hojas y parte del tallo dando crecimiento del mismo.
Hojas	Se distribuyen en forma de espiral sobre el tallo estas están compuestas por raquis centrales y foliolos. Cada raqui contiene varios pares de foliolos.
Inflorescencia	El pedúnculo de la inflorescencia se divide en dos ramas y cada una de estas ramas se subdivide de otras dos ramas, presentando una inflorescencia "cimosa". De estas ramas salen los pedicelos que en su punta se encuentran los cálices. Cada pedicelo tiene una coyuntura o articulación donde se desprende del tallo las flores o los frutos.
Flor	Las flores de la papa son bisexuales y poseen las cuatro partes de una flor: cáliz, corola, estambres y pistilo.
Fruto	Son de forma esférica, ovoides o cónicos, son de color verde algunos presentan puntos blancos, pigmentados o franjas.
Semilla	Son planas, ovaladas y pequeñas (1.000 a 1.500 semillas/gramo). Están envueltas por una capa (testa) que protege al embrión y un tejido nutritivo (endosperma). Es conocida como semilla verdadera o botánicas. El número de semilla por fruto es de 200 dependiendo de la fertilidad.

2.2 Importancia económica del cultivo *Solanum tuberosum* L. en México.

La papa se encuentra en el tercer lugar de importancia como cultivo alimenticio humano después del arroz y el trigo. La producción de este tubérculo es constante en países desarrollados. Mientras que en países en desarrollo la producción ha incrementado rápidamente debido a su interés alimentario (Rodríguez, 2014). Se consume por más de mil millones de personas en todo el mundo. En el mundo más del 50% de la producción de papas se procesa en productos alimenticios, balanceado de engorde de ganado o es transformado en almidón para la industria, solo el 40% se consume fresca (CIP, 2021).

En México este cultivo ocupó el lugar 18 en el 2016 debido a la cantidad de espacio sembrado (64,466 hectáreas sembradas) donde se obtuvo el 0.42% de superficie agrícola sembrada en México. Esta producción se basó en áreas de riego y temporal en la mayor parte del territorio mexicano. Donde se logró una producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) de 1,796,813 toneladas. En el cual el 72.8% fue

producción en la modalidad de riego; y el 27.2% en modalidad temporal. En el cual se ha presentado un incremento anual de crecimiento en un 2% (SAGARPA, 2018). En este sentido, en el año 2016 el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) se produjo en 22 estados de la república. Sin embargo, solo seis entidades federativas reunieron 69.5% de la producción en México. Los principales estados productores de papa fueron: Sonora (25.36%), Estado de México (9.8%), Puebla (9.2%), Veracruz (7.9%), Baja California Sur (5.1%), Nuevo León (5.0%), Jalisco (3.4 %), Chihuahua (2.8%) y Michoacán (2.7%). Los mismos ordenados por orden de importancia en los cultivos (SIAP, 2018). Por otro lado, en ese mismo año se obtuvo una ganancia de 10,823,003 pesos ocupando el sexto lugar en México. Pero como primeros lugares y superando el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en cuanto a ganancias fue el maíz, jitomate, chile verde, sorgo, trigo y frijol. En cuanto el precio de las toneladas de papa de ese mismo año a diferencia del 2015 hubo una disminución del 10.8% en modalidad de riego. Mientras que en la modalidad temporal hubo una disminución del 8.3%. En el país según al consumo de papa (*Solanum tuberosum*) la disponibilidad de dicho tubérculo aumentó en 4.75%. Es decir, de pasar a 1,818,835 toneladas en 2007 a 1,905,275 toneladas en 2016. Estos volúmenes de las importaciones de este cultivo aumentaron en el cual se presentó una tasa media anual de crecimiento en un 5.22% de 2007 a 2016. Por otro lado, el consumo de la papa (*Solanum tuberosum* L.) ha sido mayor con respecto a su producción del cultivo tanto así que para el periodo del 2007 a 2016 el consumo promedio anual fue de 1.74 millones de toneladas, dando como resultado un déficit de 92 mil toneladas debido al incremento en la población a lo largo del periodo.

En México el consumo de la producción en el cultivo es del 55% de dicha producción es consumida en fresco. Así como el 16% es para la selección de semilla y el 29% es para las industrias que tienen convenios previos para la comercialización las cuales son empresas internacionales (Barcel y Sabritas) que abarcan el 70% del total en ventas nacionales (CONPAPA, 2016). En los momentos actuales el principal productor de papa (*Solanum tuberosum* L.) lo constituye el Estado de México bajo modalidad de temporal debido a sus condiciones climáticas y geográficas tiene un eficaz desarrollo los cultivos de papa. En este sentido, en el año 2016 el estado tuvo una producción de 175,325 toneladas de papa. El cual aporta a la producción total a nivel nacional es decir un 9.76% con un valor de 885,450 mil de pesos. Por otra parte, este cultivo es producidos en 27 municipios de 125 que conforman el Estado de México. La comercialización la realizan en dos modalidades: la primera consiste en vender directamente

el producto con la población es decir en diferentes centrales de abastos utilizando el método de oferta y demanda para asignar un precio al producto y la segunda modalidad consiste en intervención de intermediarios es decir compran toda la parcela de la producción y ellos venden los productos a centrales de abastos (SIAP, 2018). Sin embargo, México en la actualidad no alcanza los niveles de consumo del tubérculo como en países europeos y asiáticos donde el consumo es aún mayor.

2.3 Descripción de las variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) mexicanas: Norteña y Fianna.

Las principales variedades de papa que se comercializan en México son: Alpha, Atlantic, FL1867 (conocida como Red Lady), Fianna, Cesar, Giant y Norteña estas pertenecen al mismo grupo debido a similitudes ya que tienen cascara lisa y pulpa de color blanco o amarillo (SEDAR, 2019). A continuación, se describen algunas de las características de las variedades mexicanas: Fianna y Norteña. Las cuales son de interés para el propósito de la investigación que se presenta en este documento de tesis. La variedad de papa norteña (*Solanum tuberosum* L.) tiene como origen la cruce de dos variedades que son la Atzimba (*Tuberosum andigenum*); y el clon 55-22-3 (*Tuberosum*) utilizando el método de selección clonal o Pedigree a partir de 1985 y finalizando en 1992 obteniendo una genealogía de "2750815" y la variedad "Norteña" demostrando un mejor rendimiento con calidad para el comercio del producto (INIFAP, 1999).

Las principales características que se obtuvieron de la variedad Norteña fue el follaje denso es decir arbustiva, característica de *Tuberosum* con tallos gruesos y fuertes con presencia de pigmentación. Por otra parte, presenta flores blancas con fructificación moderada obteniendo tubérculos redondos lisos amarillos y de igual forma con pulpa amarilla produciendo entre 8 a 12 tubérculos por planta (Figura 2). Pero para llegar a la madurez esta variedad es tardía ya que la alcanza a los 140 días en comparación a otras variedades con una producción que varía de 35 a 40 ton/ha antes de llegar a la etapa de madurez. Sin embargo, si llega a etapa de madurez esta producción puede aumentar en un 20% más y tomando en cuenta con la cuestión de calidad presenta 56 a 50 de color en base al sistema Agrtron (sistema de clasificación según el color del producto) y de 18 a 20.3% de sólidos por lo tanto la hace aceptable para la comercialización e industrias. En cuanto a enfermedades en esta variedad se destaca por su alto grado de tolerancia para el desarrollo del tizón tardío ya que presentaba solo un 15% de daño foliar. En

comparación a la variedad Alpha que presenta un 100% de infección. Por otro lado, la variedad norteña presenta resistencia a Rizoctonia (*Rhizoctonia solani*) y a Esclerotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) (Pijuango,2020). La papa variedad Norteña es cultivada en mayo en el sureste de Coahuila y Nuevo León, se recomienda sembrar la semilla-tubérculo que tengan de 28 a 35 mm de diámetro con una distancia de 20 cm entre plantas y las semillas-tubérculo de 35 a 55 mm de diámetro con una distancia de 30 cm entre plantas. Actualmente dicha variedad a resuelto la problemática debido a que en dicho estado (Coahuila) ha presentado cuatro años de sequía. Sin embargo, esta variedad tuvo resistencia a dicho problema. Pero este no es la única problemática que presenta este cultivo las principales son vectores tales como: paratryoza y pulgones. Pero enfermedades fungosas (Vanguardia, 2024).



Figura 2. Morfología de la variedad Norteña según Mendoza (2021).

Mientras que la variedad Norteña tiene como origen mexicano, la variedad Fianna se originó en Holanda donde la planta crece de forma erguida (semi-erecto) con follaje medio a denso con flores de color blanco a comparación de los brotes que son de color rosa (Figura 3). Esta variedad muestra resistencia a PLRV (virus del enrollamiento de la hoja en papa) así como buena tolerancia a *Phytophthora infestans* y Virus

PVY (Virus de la papa Y, blanqueamiento de las nervaduras de hojas jóvenes). Los tubérculos son ovalados o alargados con diámetros grandes con texturas lisas o suaves de color amarilla con una pulpa de color amarillo claro con un rendimiento alto y maduración semitardía. En la actualidad, la variedad Fianna representa la variedad más sembrada en México debido a que esta tiene una alta adaptación en las regiones donde las cultivan. Las utilizan para el consumo fresco y para las industrias (NIVAP, 2024).



Figura 3. Morfología de la variedad Fianna (NIVAP, 2024).

2.4 Métodos de propagación de *Solanum tuberosum* L.

El tubérculo de la papa se considera como la semilla unitaria tradicional y su calidad refleja las condiciones en que se ha desarrollado el cultivo incluyendo su estado fitosanitario. En muchos países, la imposibilidad de producir semilla básica de modo estable ha incrementado la importación de ésta en cantidades significativas (Sharma *et al.*, 2015). La papa se propaga vegetativamente por tubérculos-semillas ya sea completo o por trozos, este tiene la capacidad de formar brotes y por ende desarrollar plantas idénticas a la variedad original ya que es una planta que se reproduce de forma asexual; y de esta manera asegura

la conservación de características varietales durante generaciones sucesivas. Sin embargo, debido a su forma de propagación asexual está sometida a un alto riesgo de contaminación por virus, hongos, bacterias e insectos, durante el período de cultivo y almacenamiento. También al emplear el material vegetativo por ciclos repetidos puede ocasionar degeneración del cultivo por la acumulación de enfermedades, especialmente virales (Jaramillo, 2018). La papa como cultivo puede ser propagada por semilla botánica pero esta vía se emplea fundamentalmente con fines de mejoramiento genético. El valor potencial del cultivo de tejidos en la producción de papa ha sido ampliamente reconocido a nivel mundial. Esta tecnología se emplea en muchos países para obtener semilla libre de patógenos y por el consecuente beneficio para los productores (Sharma *et al.*, 2015).

2.6 Utilización de las técnicas biotecnológicas para la producción de plantas *in vitro* y microtubérculos de *Solanum tuberosum* L.

La propagación *in vitro* de la papa se establece mediante el subcultivo de yemas axilares. Se pueden obtener tanto plantas *in vitro* como microtubérculos (Agramonte, 1999; Struiky, 1999; Rokka *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2015; Hossain *et al.*, 2017). El cultivo de brotes es la técnica básica de la biotecnología de la papa. Permite el establecimiento rápido y eficiente de cultivos *in vitro* utilizando puntas de brotes como material de partida. Una vez establecidos, los brotes axénicos pueden proporcionar los explantes necesarios para otras técnicas como los cultivos de células, tejidos y órganos, el cultivo de protoplastos, la embriogénesis somática y la transformación (Hernández y Díaz, 2019). Pueden utilizarse para la producción de plantas (micropropagación) de tubérculos (microtubérculos) o de ambos. El almacenamiento de genotipos (bancos de genes) es otra aplicación importante que se consigue mediante el crecimiento sostenido (mínimo y lento) de los cultivos de brotes. En la criopreservación, el crecimiento se detiene completamente a la temperatura del nitrógeno líquido. El cultivo de puntas de meristemas es un componente importante en la erradicación de virus, utilizado solo o en combinación con la termoterapia (Niino y Valle, 2015).

La producción de tubérculos *in vitro* fue descrita por primera vez como una herramienta experimental para el examen de la tuberización de la papa y los problemas fitopatológicos (González y Chavarría, 2016; Gil *et al.*, 2019). Desde esa fecha se han utilizado diferentes términos para nombrarlos. Por

ejemplo: mini-tubérculos producidos *in vitro* (Lewis *et al.*, 1998), vitrotubérculos (Mandolino *et al.*, 1996). Pero se ha aceptado internacionalmente el uso del término microtubérculos (Wattimena, 1983). El empleo de plantas *in vitro* y microtubérculos en la producción de semilla de papa tiene ventajas con respecto a la semilla convencional ya que están libres de patógenos. Se obtiene un gran número en cortos periodos de tiempo, se reducen los costos de labores agronómicas en el mantenimiento de germoplasma en campo, entre otras ventajas. Además, pueden ser propagados en cualquier época del año, se facilita el intercambio de material genético y se reduce el riesgo de pérdidas genéticas al evitar la mezcla del material vegetal por cruzamiento. Sin embargo, se requiere personal especializado, infraestructura y equipamiento, con productos químicos de elevado costo (Perugorría, 2013). Por otra parte, en la producción de semilla de papa por métodos biotecnológicos en la siembra directa de plantas *in vitro* en campo se producen pérdidas en el traslado. En consecuencia, se elevan los requerimientos de atenciones culturales por personal altamente calificado, se han incrementado las pérdidas de tubérculos en las cosechas por daños o enfermedades, así como la conservación, debido principalmente a la alta presencia de microorganismos patógenos del suelo (Varela, 2018).

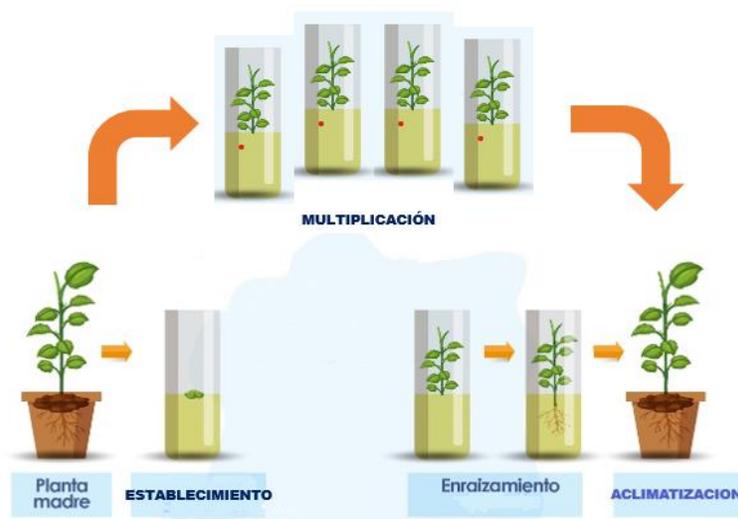


Figura 4. Proceso de micropropagación de papa (*Solanum tuberosum* L.) (Restrepo, 2018).



Figura 5. Proceso de microtuberización de papa (*Solanum tuberosum* L.) mediante método convencional (Correa, 2013).

3.0 MATERIALES Y MÉTODOS

3.0.1 Generalidades de los experimentos

La investigación se desarrolló en el Laboratorio de Micropropagación de Plantas, del Instituto Mexicano del Maíz “Dr. Mario E. Castro Gil”, perteneciente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México.

Material vegetal: A partir de tubérculos – semilla certificados se tomaron como material vegetal una variedad mexicana de papa proveniente del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Saltillo, Coahuila, México (INIFAT). La variedad se identificó con el nombre de Norteña.

Análisis estadístico de los datos: Se utilizó el utilitario *Statistical Package for Social Sciences (SPSS* para *Windows*, versión 20.0). Se comprobó la distribución normal de los datos según Kolmogorov-Smirnov; y la homogeneidad de varianzas según Levene. Luego se hicieron las pruebas ANOVA de un factor y Tukey ($p \leq 0.05$).

3.1. Establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

3.1.1 Efecto de la concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento in vitro de Solanum tuberosum L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.

Este experimento se realizó con el objetivo de determinar la mejor concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales. Para ello se sembraron los tubérculos – semilla de papa en el suelo con el interés de obtener las plantas donadoras para su posterior establecimiento *in vitro* en el cultivo. Las cuales se les realizó un manejo de fertilización y aplicación de fungicidas previo al proceso de establecimiento *in vitro* (Figura 6).

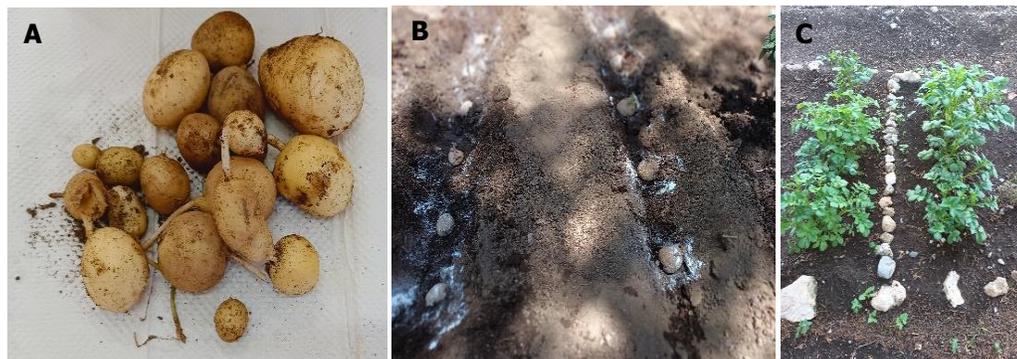


Figura 6. Plantas donadoras (etapa 0 de la micropropagación en el cultivo) de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. Tubérculos – semillas certificados (A), siembra y manejo de fertilización a los tubérculos – semillas (B) y plantas donadoras a los 25 días después de la siembra en el suelo (C).

Después de los 25 días de la siembra de los tubérculos semillas se tomaron los explantes para el establecimiento *in vitro*. Los cuales consistieron en segmentos nodales de las plantas seleccionadas de *Solanum tuberosum* L. en la etapa 0 de la micropropagación en el cultivo, con una longitud de 5.0 – 7.0 cm y con dos o tres yemas axilares. Posterior ello, se procedió al lavado de los explantes con detergente comercial y se enjuagaron con abundante agua. Se transfirieron a la campana de flujo laminar donde se realizó una inmersión en etanol al 70% (v/v) por dos minutos. Luego, se realizó la desinfección con hipoclorito de sodio (NaClO) al 1% con una gota de tween 20 durante 10 minutos; y seguido se realizaron tres enjuagues con agua destilada estéril. Los explantes fueron reducidos a un tamaño aproximado entre 1.0 a 1.5 cm, luego del proceso de desinfección y antes de su implantación en el medio de cultivo. Estos se colocaron en tubos de ensayos (100 x 125 mm) con 10 mL de medio de cultivo. El medio de cultivo basal fue compuesto por las sales de Murashige y Skoog (1962) (sales MS) suplementadas con tiamina (1.0 mg. L^{-1}), mioinositol (100 mg.L^{-1}) y sacarosa (20 g.L^{-1}). Diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (6-BAP) fueron adicionadas al medio de cultivo descrito con anterioridad para evaluar su influencia en la formación de nuevos brotes. Las concentraciones probadas fueron: 0 (tratamiento testigo), 0.3 y 0.5). Los cultivos se incubaron en condiciones de iluminación artificial (lámparas fluorescentes) con una DFFF de $80 \text{ mmol.m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y un fotoperíodo de 16 horas de luz y 8 horas de

oscuridad; con una temperatura de 25 ± 2 °C. Por otra parte, para la gelificación del medio de cultivo se utilizó Agar *Phytage*TM (Sigma-Aldrich) a razón de 4.0 g.L⁻¹. El pH del medio de cultivo se ajustó a 5.7 ± 1 . A los 35 días de cultivo, se evaluó el número de brotes por explantes y la presencia de contaminación microbiana en el medio cultivo.

3.2 Multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

3.2.1 Efecto de 6-bencilaminopurina y el ácido indolacético en la fase de multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

Con el propósito de lograr la proliferación de los brotes de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, se evaluó el efecto de 6-bencilaminopurina y el ácido indolacético en la fase de multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. Para ello se utilizaron brotes individuales con un par de hojas y una longitud de 0.3 cm. Los cuales fueron obtenidos a partir de los segmentos nodales en el medio de establecimiento *in vitro* (acápite 3.1.1); y fueron subcultivados de forma continua durante cuatro subcultivos cada 40 días. Posterior a este subcultivo se separó la yema apical de la plántula, y el resto se seccionó en segmentos aproximadamente de 10 – 15 mm de longitud que incluían una yema axilar (Figura 7). Por otro lado, diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP) y el ácido indolacético (AIA) fueron adicionadas al medio de cultivo descrito en el acápite 3.1.1, y suplementado con 30 g de sacarosa en esta etapa de la experimentación. Las concentraciones probadas se desglosan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Desglose de las diferentes concentraciones hormonales probadas en el experimento.

Número de tratamientos	Concentraciones probadas (mg. L ⁻¹)
1:	0 de BAP + 0 de AIA
2:	0.3 BAP
3:	0.5 BAP
4:	0.8 BAP
5:	0.3 de BAP + 0.2 de AIA
6:	0.5 de BAP + 0.2 de AIA
7:	0.8 de BAP + 0.2 de AIA

Los cultivos se incubaron en condiciones de iluminación artificial y temperatura descritas en el acápite 3.1.1. Por otra parte, para la gelificación del medio de cultivo se utilizó Agar *Phytage*TM (Sigma-Aldrich) a razón de 4.0 g.L⁻¹. El pH del medio de cultivo se ajustó a 5.7 ±1. A los 40 días de cultivo, se evaluó en cada uno de los tratamientos los siguientes parámetros: número de nudos en tallo primario, número de nudos en tallos secundarios, altura del brote; y número de hojas por brote. En cada tratamiento se utilizaron cinco repeticiones. Cada repetición consistió en cinco brotes por frasco de cultivo.

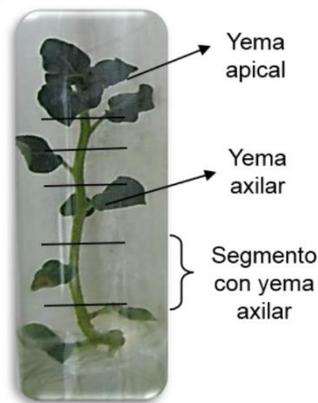


Figura 7. Secciones realizadas a brotes de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña durante la etapa de multiplicación *in vitro* en el cultivo.

3.2.2 Efecto de la concentración de sacarosa en el crecimiento de brotes *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

Con la finalidad de determinar el efecto de la concentración de sacarosa en el crecimiento de brotes *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. Se probaron diferentes concentraciones de sacarosa (0, 20 y 30 g. L⁻¹). Para ello se utilizaron brotes individuales de 6 - 8 cm de longitud provenientes de la etapa de multiplicación *in vitro* del cultivo. La composición del medio de cultivo fue similar al descrito en el acápite 3.1.1 pero, libre de hormonas. A los 40 días de cultivo, se evaluó en cada uno de los tratamientos los siguientes parámetros: número de entrenudos por brote, altura del brote, número de hojas por brote y número de brotes enraizados.

3.3 Enraizamiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

*3.3.1 Influencia de la concentración de ácido indolbutírico en el enraizamiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.*

En el siguiente experimento se utilizaron brotes individuales de 6 - 8 cm de longitud provenientes de la etapa de multiplicación *in vitro* del cultivo. Los brotes se subcultivaron en los siguientes tratamientos con diferentes concentraciones de ácido indolbutírico (AIB) (0, 0.1, 0.2, 0.3). Se determinó el efecto de diferentes concentraciones de AIB en la fase de enraizamiento *in vitro* de brotes de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. A las seis semanas de cultivo se evaluaron los siguientes parámetros: altura del brote (cm), número de nudos por brote, número de raíces por brote y longitud de la raíz principal por brote (cm). Se utilizaron cinco réplicas por tratamiento. Cada repetición consistió en cinco brotes por frasco de cultivo.

3.4 Aclimatación de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

Con el objetivo de determinar la supervivencia de las plántulas provenientes del cultivo *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña se procedió a la etapa de aclimatación del cultivo. Para ello plántulas de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña enraizadas con más de cuatro raíces por brote; y con una longitud superior a 10.02 cm fueron plantadas en contenedores de 32 cavidades que contenían sustrato (*peat moss* + termolita (proporción 1:1)). Esta etapa se desarrolló bajo condiciones de invernadero con una reducción de la intensidad de la luz solar del 70% durante los primeros 20 días de crecimientos de las plántulas; y de 35% durante los restantes 15 días en la etapa de aclimatación del cultivo. La humedad relativa se mantuvo superior al 85%, y el riego se realizó con microaspersores. Mientras que el régimen de riego fue establecido a 30 segundos cada 30 minutos durante las primeras semanas; y de un minuto por 60 minutos durante las semanas restantes. Luego, a partir de la tercera semana las plántulas fueron asperjadas dos veces por semana con una solución líquida de nutrientes compuesta por macro y microelementos. Al inicio y después de los 35 días de las plántulas en la etapa de aclimatación se evaluaron los siguientes parámetros: supervivencia (%), longitud de la raíz principal por plántula (cm) y altura de la plántula (cm).

4.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L.

4.1.1 Efecto de la concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.

Para iniciar con el proceso de la micropropagación *in vitro* de la papa var. Norteña, se hizo necesario como primer paso contar con una buena calidad de las plantas madres (Figura 8A), de donde posteriormente se tomaron explantes de alta calidad y pureza genética (Figura 8B), para luego de desinfectarlos y sembrados bajo condiciones asépticas en un medio de cultivo adecuado, obtener los brotes *in vitro* (Figura 8C). Procedimientos similares al desarrollado en este trabajo para el cultivo *in vitro* de la papa, han sido descritos con anterioridad por otros autores (Sharma *et al.*, 2015; Hossain *et al.*, 2017). Luego del establecimiento *in vitro* de los explantes y pasado un periodo de incubación de 35 días, se realizó la evaluación de los diferentes parámetros, siendo el porcentaje de respuesta de los explantes en base a la formación de nuevos brotes (Figura 9A), uno de los aspectos más importantes a considerar en la micropropagación; donde se puede observar que los explantes incubados en el medio de cultivo con 0.5 mg. L⁻¹ de BAP mostraron una mayor respuesta (Figura 9A), superando al 15%. Mientras que para el porcentaje de contaminación (Figura 9B), como factor negativo, también resultó ser superior en la misma concentración mencionada anteriormente. Con estos resultados podemos demostrar la factibilidad del inicio al cultivo *in vitro* de la papa variedad Norteña.

Los resultados obtenidos en este trabajo para la fase inicial del cultivo *in vitro* están en correspondencia con los publicados en la literatura científica para el cultivo de la papa en otras variedades comerciales (Agramonte, 1999; Rokka *et al.*, 2014).



Figura 8. Esquema desarrollado para el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones de 6-bencilaminopurina (BAP). Plantas donadoras (A), colecta de los explantes (B) y brote *in vitro* establecido a los 35 días después de la implantación del cultivo (C).

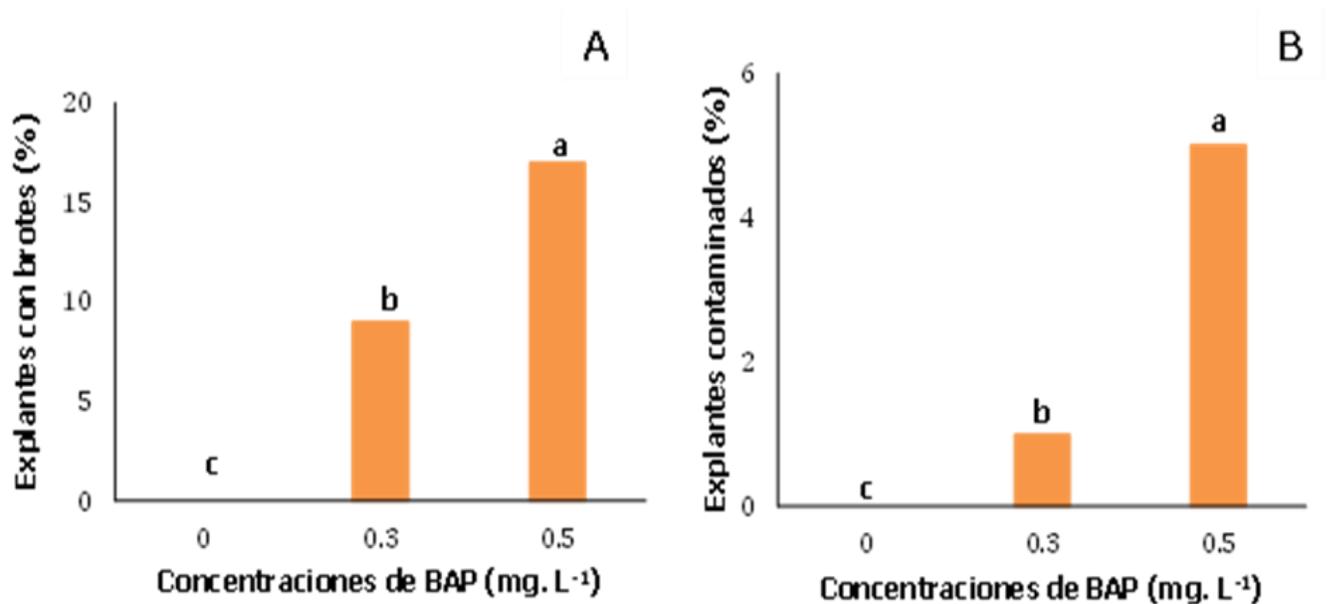


Figura 9. Efecto de la concentración de 6- bencilaminopurina (6-BAP) en el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales. Presencia de los explantes con brotes (A), y contaminación de los brotes (B).

4.2 Multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L.

4.2.1 Efecto de 6-bencilaminopurina y el ácido indolacético en la multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

En el proceso de la micropropagación, la fase de multiplicación juega un rol importante, dado que es en esta fase donde se logra la verdadera multiplicación exponencial del material vegetal de propagación o de una variedad. Se inicia con todo un manejo muy meticuloso del material *in vitro* (Figura 10A), seguido de la evaluación de la respuesta a la brotación de los segmentos nodales en presencia de un tratamiento control (sin reguladores del crecimiento, Figura 10B), hasta observar una respuesta diferencial entre los diferentes tratamientos compuestos de varias combinaciones y concentraciones de los reguladores del crecimiento vegetal (Figura 10C – H).

En la figura 11, se ilustra el comportamiento individual de los principales parámetros de crecimiento y desarrollo de las vitroplantas bajo condiciones *in vitro*. Con la excepción del número de nudos en los tallos primarios (Figura 11A), donde no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tratamientos evaluados de concentraciones y combinación de los reguladores del crecimiento vegetal, los tres restantes variables evaluadas si mostraron diferencias en su comportamiento (Figura 11B – D). Donde el tratamiento con la combinación de 0.8 mg. L⁻¹ de BAP y 0.2 mg. L⁻¹ de AIA el que mostró los mejores resultados significativos para número de nudos por tallo secundario, altura del brote y el número de hojas por brote. Con la interpretación de estos resultados, claramente se puede inferir que hubo una respuesta diferencial de los explantes a la concentración y tipo de combinación de los reguladores de crecimiento vegetal bajo condiciones *in vitro* del cultivo de la papa var. Norteña. Siendo estos resultados comparables con los publicados anteriormente para el cultivo de la papa bajo condiciones *in vitro* (Rigato *et al.*, 2001; Hernández y Díaz, 2019). Xhulaj y Gixhari (2018) obtuvieron resultados similares para el número de nudos por tallos y en la altura de los brotes. Pero trabajando con diferentes variedades de papa.



Figura 10. Brotes *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones 6-bencilaminopurina (BAP) y el ácido indolacético (AIA) en la multiplicación *in vitro* del cultivo. Manejo de la técnica del cultivo *in vitro* en *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña (A); brotes *in vitro* (sin hormonas), 0.3 de BAP (C), 0.5 de BAP (D), 0.8 de BAP (E), 0.3 de BAP + 0.2 de AIA (F), 0.5 de BAP + 0.2 de AIA (G) y 0.8 de BAP + 0.2 de AIA (H).

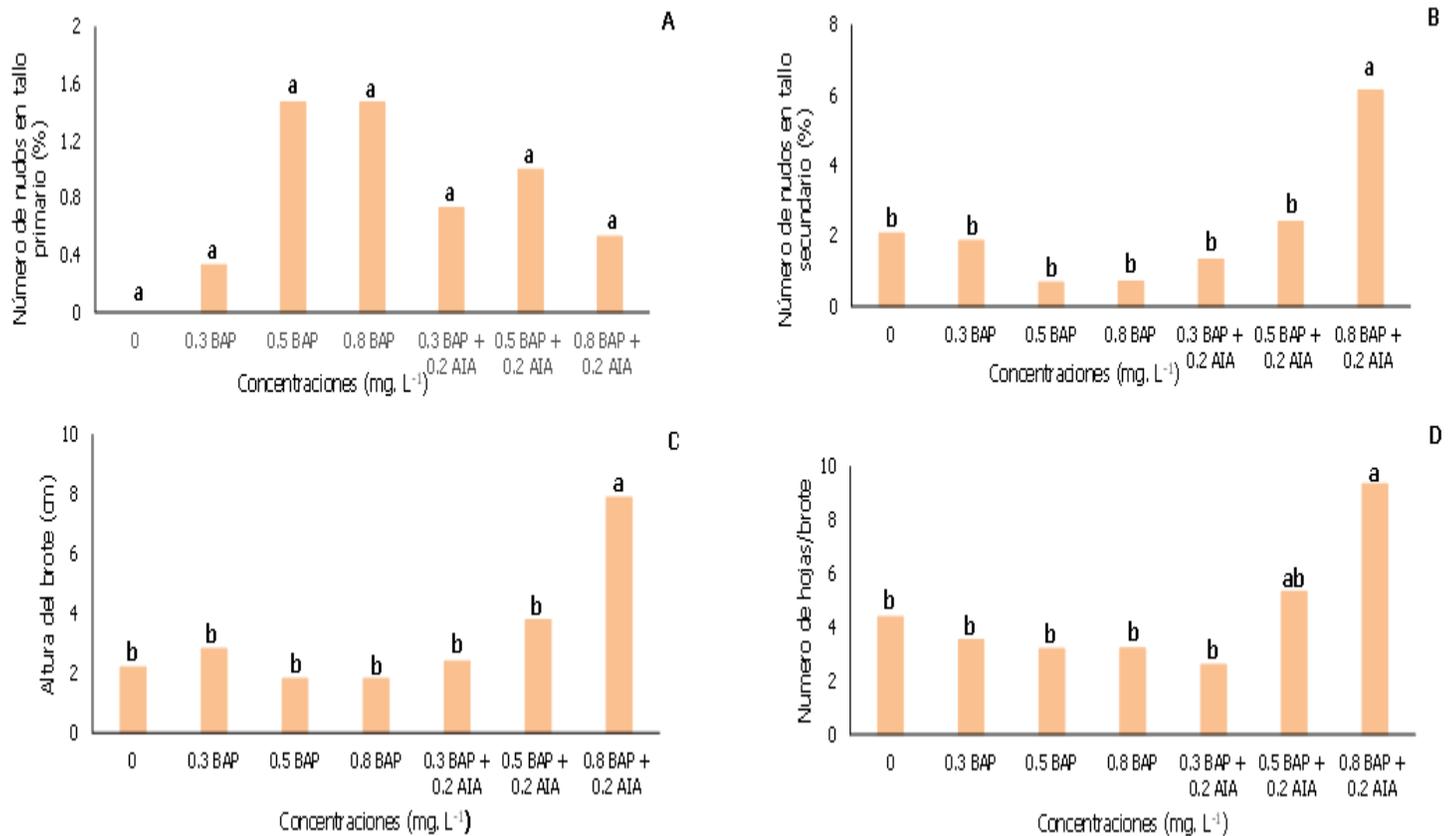


Figura 11. Efecto de 6-bencilaminopurina y el ácido indolacético en la multiplicación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. Número de nudos en tallo primario (A), número de nudos en tallos secundarios (B), altura (C) y número de hojas (D).

4.2.2 Efecto de la concentración de sacarosa en el crecimiento de brotes *in vitro* en *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

En la figura 12, se muestra una representación cualitativa del efecto que tuvo las diferentes concentraciones de sacarosa en el comportamiento de los brotes *in vitro*. La sacarosa constituye la principal fuente de carbono de los tejidos en crecimiento bajo condiciones *in vitro*, y en ausencia de esta, los tejidos se ven obligados a generar su propio sustento dado el autotrofismo que poseen los mismos. A pesar de observarse ésa manifestación en los diferentes tratamientos, si se nota un pequeño decrecimiento en la calidad del brote con la presencia de hojas amarillentas en ausencia de sacarosa

(Figura 12A), no siendo así para los brotes que si contaron con la disponibilidad de esa fuente de carbono para su metabolismo (Figura 12B, C). Particularizando en las variables evaluadas para los tratamientos con diferentes niveles de sacarosa (Figura 13). Se puede observar un comportamiento diferencial con diferencias estadísticamente significativas para el número de entrenudos por brotes, altura de los brotes y el número de hojas por brote (Figura 13A – C), dónde la concentración de sacarosa de 20 g. L⁻¹ fue la que tuvo un mejor desempeño con los valores más altos para esas tres variables antes mencionadas. Mientras qué, para el porcentaje del número de brotes enraizados (Figura 13D), no sufrió cambio significativo alguno y se mantuvo un comportamiento similar entre los diferentes tratamientos con y sin sacarosa.

Rigato *et al.* (2001) determinaron que plántulas creciendo autotróficamente tuvieron un aspecto morfológico distinto a las plántulas obtenidas bajo condiciones nutricionales *in vitro* normales, comparables con las descritas en este trabajo (Figura 12). Por otra parte, Araque–Barrera *et al.* (2018) determinaron que los porcentajes bajos de sacarosa (20 g. L⁻¹) en el medio de cultivo favorecen el crecimiento y desarrollo de los brotes de papas *in vitro* y los altos (80 g. L⁻¹) a la tuberización. Siendo el metabolismo del carbono uno de los factores claves que pueden afectar a los explantes al momento de desarrollar plantas *in vitro* completas y tener un comportamiento *ex vitro* adecuado (Subrahmanyawari *et al.*, 2024).



Figura 12. Brotes *in vitro* de variedades de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones de sacarosa en la etapa de multiplicación *in vitro* del cultivo. Brote *in vitro* testigo (A), brote *in vitro* con 20 g de sacarosa (B) y brote *in vitro* con 30 g (C) en la etapa de multiplicación.

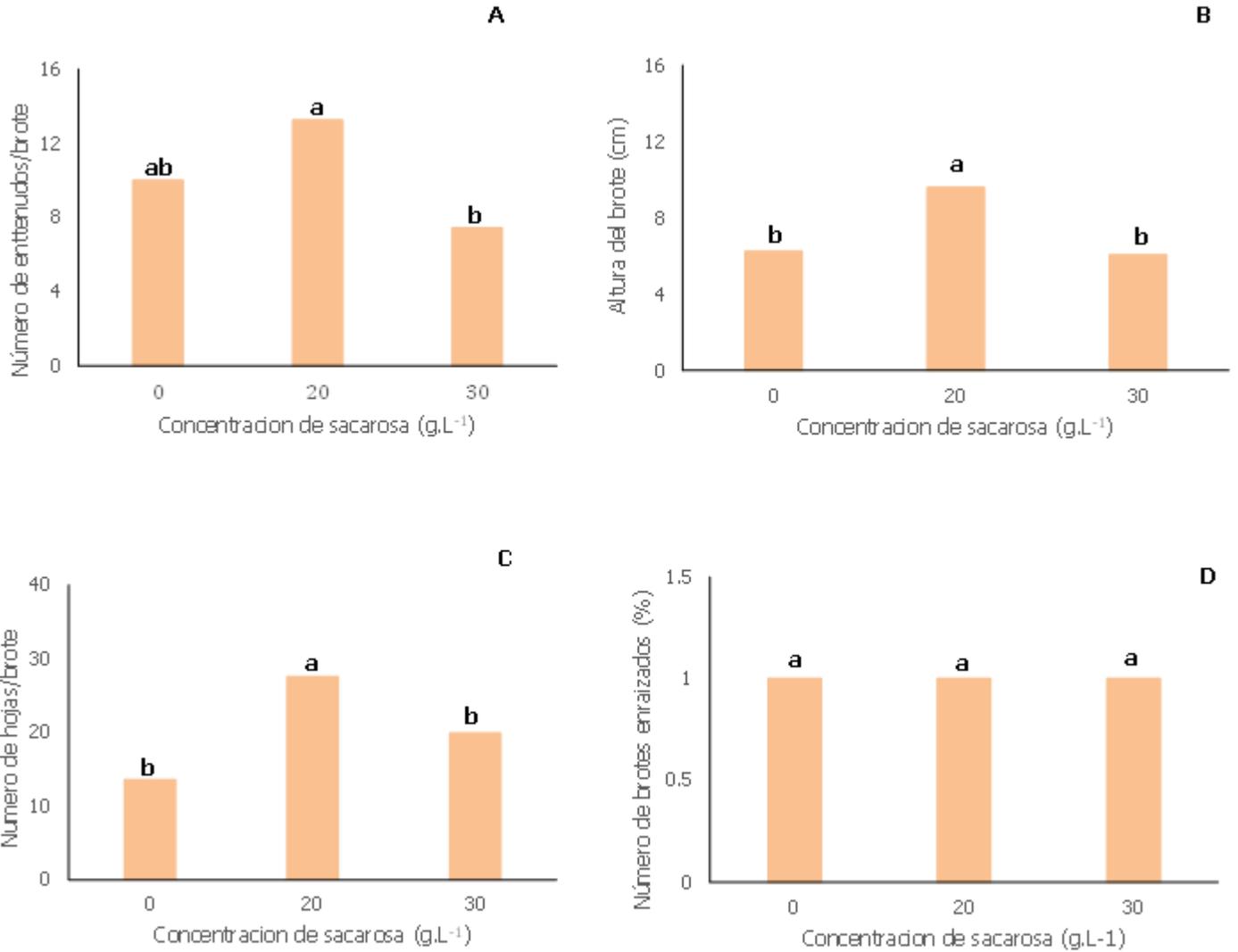


Figura 13. Efecto de la concentración de sacarosa en la multiplicación de brotes *in vitro* en *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. Número de entrenudos por brote (A), altura del brote (B), número de hojas por brote (C) y número de brotes enraizados (D).

4.3 Enraizamiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

4.3.1 Influencia de la concentración de ácido indolbutírico en el enraizamiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

Una vez determinadas las condiciones de crecimiento, desarrollo y multiplicación de los brotes de papa bajo condiciones de crecimiento *in vitro*, se hace necesario completar las plántulas con todos sus sistemas vasculares. Es por ello, que se deben someter los brotes a un proceso de enraizamiento (Figura 14), dónde desarrollan sus raíces primarias en condiciones *in vitro* (Figura 14A), en un medio que puede estar libre de los reguladores del crecimiento vegetal (Figura 14B), o suplementado con alguno de los reguladores del crecimiento vegetal auxínico como el AIB (Figura 14C, D). En todos los casos se pueden observar plántulas completas con su parte caulinar y radicular.

En esta fase de enraizamiento, también fueron evaluados diferentes parámetros claves que identifican la eficiencia del proceso y la influencia que pueden tener los reguladores del crecimiento vegetal en el comportamiento de los brotes de papa *in vitro* (Figura 15). Todas las variables evaluadas mostraron un comportamiento estadísticamente significativo entre los tratamientos formulados con diferentes concentraciones de AIB y el control que fue formulado sin reguladores del crecimiento vegetal (Figura 15A – D). Siendo el tratamiento con 0.2 mg. L⁻¹ de AIB el que mostró los mayores valores para cada una de las variables evaluadas, sin dejar de reconocer que para el número de nudos por brotes quedo ligeramente por debajo del tratamiento con 0.1 mg. L⁻¹ de AIB, pero sin ser significativa esa diferencia. Al analizar el parámetro del número de nudos por brotes (Figura 15B), se puede apreciar un ligero efecto inhibitorio del regulador de crecimiento auxínico AIB, el cual no afectó a la altura total de los brotes (Figura 15A).

La emisión de raíces fue observada en todos los tratamientos, incluyendo el control sin regulador de crecimiento vegetal, mostrando una naturaleza bastante noble de respuesta al cultivo *in vitro* de la variedad mexicana Norteña, no obstante, estos resultados están en correspondencia con los obtenidos por Hajare *et al.* (2021), dónde refiere que sus mejores resultados fueron obtenidos con concentraciones bajas de AIB en combinación con AIA. A su vez, Subrahmanyeswari *et al.* (2024) plantean que para obtener una buena supervivencia de las plantas se hace necesario desarrollar una buena conexión vascular entre las raíces y el brote. Estos resultados son compatibles con los obtenidos por Xhulaj y Gixhari (2018), dónde obtuvieron el máximo resultado de enraizamiento en la variedad Bergerac con bajas concentraciones de reguladores del crecimiento auxínico.

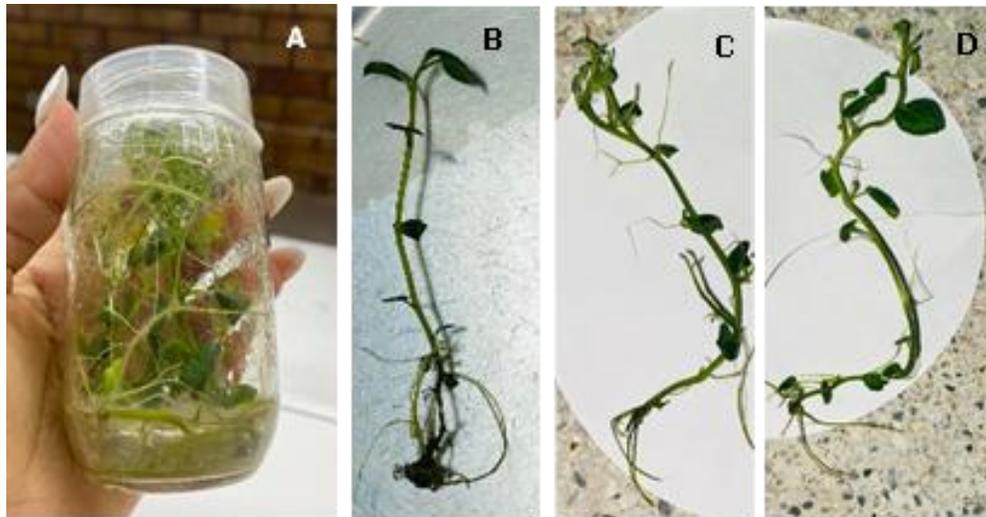


Figura 14. Brotes *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña utilizando diferentes concentraciones de AIB en el enraizamiento *in vitro*. Brote *in vitro* en la etapa de enraizamiento (A), brote *in vitro* testigo, (B) brote *in vitro* con 0.3 de AIB y (C) brote *in vitro* con 0.2 de AIB.

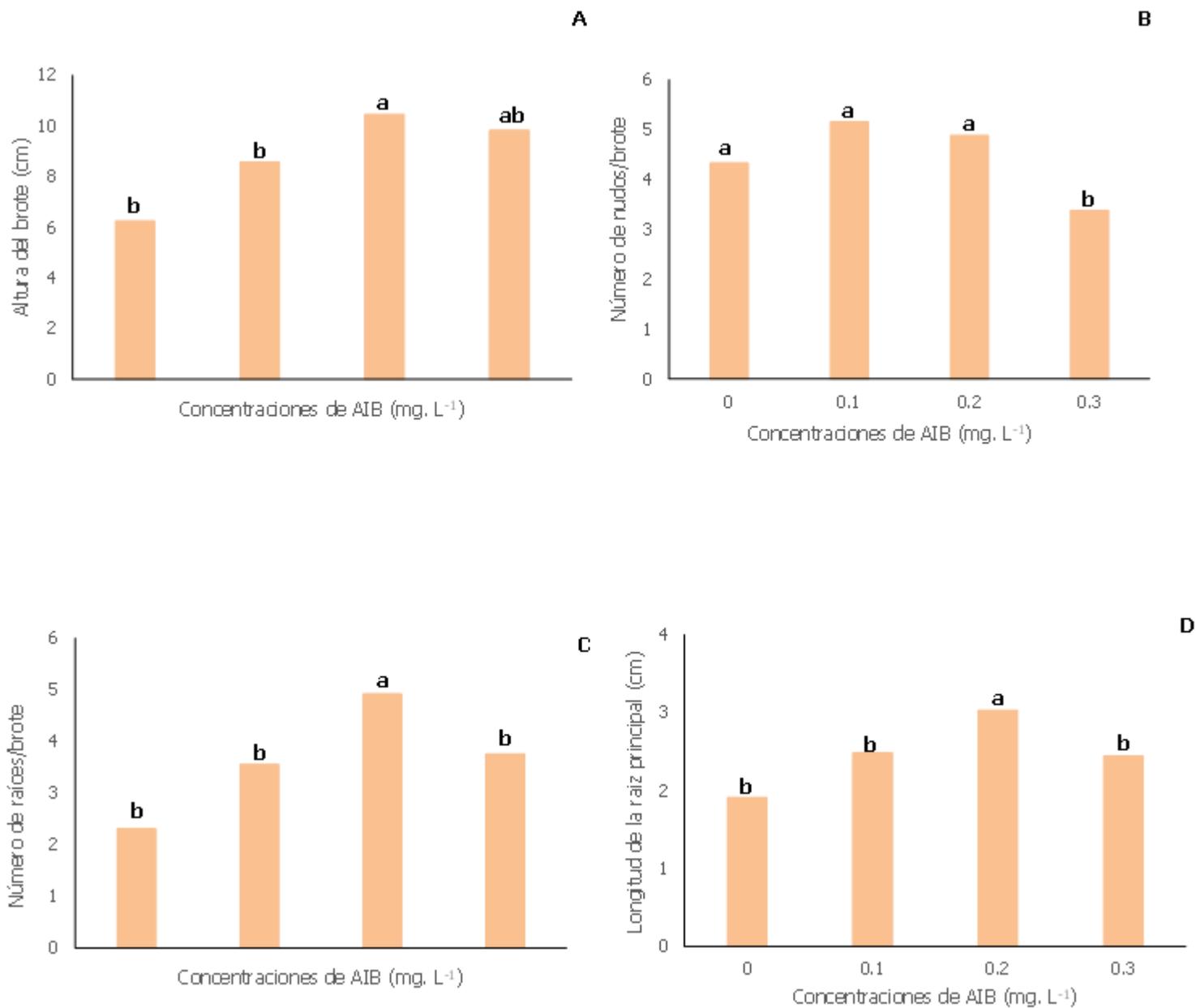


Figura 15 Influencia de la concentración de ácido indolbutírico en el enraizamiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña. Altura del brote (A), número de nudos por brote (B), número de raíces por brote (C) y longitud de la raíz principal por brote (D).

4.4 Aclimatación de plántulas de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña.

La aclimatación es el paso terminal para demostrar la calidad de las plántulas de papa que se producen bajo condiciones *in vitro*, es necesario aclimatar las vitroplantas, iniciando con la selección, el lavado y la clasificación del material vegetal (Figura 16A) que se va a sembrar en las casas de cultivo bajo condiciones semicontroladas y con alta humedad, para evitar la muerte de las vitroplantas. Después de un cierto periodo (35 días) de aclimatación de las vitroplantas (Figura 16B), se realiza la evaluación de ciertos parámetros, con el fin de comprobar la calidad que poseen las plántulas de papa mediante el cultivo *in vitro*. Inmediatamente, al periodo de aclimatación se pudo comprobar que el 100% de las vitroplantas sobrevivieron al proceso y se encuentran en fase listas para ser transferidas a campo (Figura 16B), dado su incremento en la altura de las plántulas y en la longitud de las raíces (Figura 16B; Cuadro 3).



Figura 16. Plántulas de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña durante la etapa de aclimatación en el cultivo.

Procedimiento en el lavado, clasificación del material vegetal y siembra de las plántulas (A) y plántulas después de 35 días en la etapa de aclimatación del cultivo (B).

La aclimatación es un paso crítico final del proceso de la micropropagación, donde las plantas vuelven a estar en contacto con los diferentes factores que provocan el estrés biótico y abiótico, por eso se recomienda implementar las técnicas culturales de cuidado para prevenir posibles contaminaciones por los agentes patógenos de la papa (Subrahmanyeswari et al., 2024). Estos resultados están en concordancia a los obtenidos por Xhulaj y Gixhari (2018) para las vitroplantas de la variedad *Excuisita* donde todas las plántulas sobrevivieron a la aclimatación, y son superiores a los obtenidos (82%) por Hajare et al. (2021) para una variedad de consumo en Etiopía.

Cuadro 3. Aclimatación de plántulas de *Solanum tuberosum* L. Supervivencia, incremento en la altura de las plántulas y en la longitud de la raíz principal.

Variedad	Supervivencia (%)	Incremento en la altura de las plántulas (cm)	Incremento en la longitud de la raíz principal (cm)
Norteña	100	6.4	10.8

5.0 CONCLUSIONES

1. Se logró un protocolo para la propagación *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña, a partir de segmentos nodales.
2. Se logró la mayor respuesta en el establecimiento *in vitro* de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña en la concentración con 0.5 mg. L⁻¹ de BAP, con marcadas diferencias significativas al resto de los tratamientos. Por ello, se evidenció la factibilidad del establecimiento *in vitro* de la papa variedad Norteña a partir de segmentos nodales.
3. El tratamiento con la combinación de 0.8 mg. L⁻¹ de BAP y 0.2 mg. L⁻¹ de AIA mostró los mejores resultados significativos para número de nudos por tallo secundario, altura del brote y el número de hojas por brote. Lo cual evidenció que hubo una respuesta diferencial de los explantes a la concentración y tipo de combinación de los reguladores de crecimiento vegetal bajo condiciones *in vitro* del cultivo de la papa var. Norteña.
4. Se demostró la calidad de las plántulas obtenidas en el protocolo de micropropagación de *Solanum tuberosum* L. variedad Norteña en la etapa de aclimatación con un 100 % de supervivencia.

7.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agramonte D. 1999. Métodos biotecnológicos para la producción de semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.). Tesis de doctorado, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
2. Araque–Barrera EJ, Bohórquez–Quintero M de los A, Pacheco–Díaz JE, Correa–Mora LY, Urquijo–Ruiz JS, Castañeda–Garzón SL, Pacheco–Maldonado JC (2018). Propagación y tuberización *in vitro* de dos variedades de papa. Ciencia en Desarrollo 9(1): 21–31.
3. Castro J, Agramonte D, Alvarado Y, de Feria M, Pugh T. 2012. Empleo de métodos biotecnológicos en la producción de semilla de papa. Biotecnología Vegetal 12 (1): 3-24.
4. Centro Internacional de la Papa (CIP). 2021. Boletines de Información Técnica. Departamento de Capacitación y comunicaciones del CIP. 415 p.
5. Confederación Nacional de Productores de Papa de la República Mexicana (CONPAPA). 2016. <https://www.conpapa.org.mx/>.
6. De Agricultura y Desarrollo Rural, S. 2019. La papa un alimento con historia y cultura. gob.mx. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-papa-un-alimento-con-historia-y-cultura>
7. Gil E, López E, Mostacero J, de la Cruz J. 2019. Papas nativas con potencial antioxidante, cultivadas en el norte del Perú. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas 18 (3): 289-324. <https://blacpma.ms-editions.cl/index.php/blacpma/article/view/90>
8. González D, Chavarría M. 2016. Micro tuberización del cultivar de papa (*Solanum tuberosum* L.) Banba en Biorreactores Económicos de Inmersión Temporal. Tesis pregrado. Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua. <https://repositorio.una.edu.ni/3396/1/tnf01g643mc.pdf>
9. Hajare ST, Chauhan NM, Kassa G (2021). Effect of growth regulators on *in vitro* micropropagation of potato (*Solanum tuberosum* L.) Gudiene and Belete varieties from Ethiopia. The Scientific World Journal, 2021 (1), Article ID 5928769, <https://doi.org/10.1155/2021/5928769>

10. Hernández, A., & Díaz, H. (2019). Inducción *in vitro* de callo embriogénico a partir del cultivo de anteras en "papa amarilla" *Solanum goniocalyx* Juz. & Bukasov (*Solanaceae*). *Arnaldoa*, 26(1), 277-286.
11. Hossain SM, Hossain MM, Haque MM, HaqueMM, Sarkar MD. (2017). Varietal evaluation of potato microtuber and plantlets in seed tuberproduction. *Journal of Agronomy* 2017: 1-5;doi: 10.1155/2017/7520297
12. Jaramillo, S. (2018). Multiplicación rápida de semilla de papa libre de virus por medio de cultivo de tejidos
13. Lewis, CE, JRL Walker, JE Lancaster, AJ Conner. (1998). Upregulation of antocyanin, flavonoid and phenolic acid biosynthesis a potato minitubers *in vitro*. *Aust J Plant Physiol* 25: 915- 922
14. Niino, T., & Arizaga, M. V. (2015). Cryopreservation for preservation of potato genetic resources. *Breeding Science*, 65(1), 41–52. doi:10.1270/jsbbs.65.41
15. NIVAP. (2024). Fundación Consultiva Holandesa de la Patata (NIVAP). <https://www.europotato.org/organisations/view/Nederlands%2BPotato%2BConsultative%2BFoundation%2B%2528NIVAP%2529>
16. Parga, T. V. M.; Fernández, E. J. y Sánchez, V. I. (1999). Monserrat: nueva variedad de papa tolerante al Tizón Tardío y excelente calidad. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Saltillo. Coahuila, México. 5 p. (Folleto Técnico Núm. 4)
17. Perugorría M. (2013). Desarrollo de una técnica para micropropagación de especies leñosas en biorreactores. (Tesis Maestría). Universidad de la República. URUGUAY.
18. Pijuango Laine Roberth Alexis. (2020). "Adaptabilidad de papas nativas (*Solanum spp.*), procedentes de la provincia de Chimborazo, en el Cantón Cotacachi". Universidad Técnica del Norte Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales.
19. Quishpe Torres, R. G. (2017). Caracterización morfológica de dos clones de papa (*Solanum tuberosum* L.), en la provincia de Pichincha e Imbabura (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

20. Ranalli, P.; Bassi, F.; Ruaro, G.; Di Candilo, M.; Mandolino, G. (1996). Microtuber and minituber production and field performance compared with normal tuber. *Potato Research* 37: 383-391.
21. Reddy BJ, Mandal, R., Chakroborty, M., Hijam, L. y Dutta, P. (2018). Una revisión sobre la papa (*Solanum tuberosum* L.) y su diversidad genética. *Revista Internacional de Genética*, ISSN, 0975-2862.
22. Rigato S, González A, Huarte M (2001). Producción de plántulas de papa a partir de técnicas combinadas de micropropagación e hidroponía para la obtención de semilla prebásica. *Revista Latinoamericana de la Papa* 12: 110–120.
23. Rodríguez RB. (2014). Respuesta de cultivares de patata a la salinidad y potencial efecto protector del metil jasmonato frente al estrés salino. En TDX (Tesis Doctorals en Xarxa). Disponible en línea: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=98003>
24. Rokka VM, Kamarainen-Karppinen T, Virtanen E, Pirttilä AM (2014) Bioreactor technologies for mass propagation of potato: future prospects. En: Mérillon J M (ed). *Bulbous Plants Biotechnology*, pp. 37–49. CRC Press, Florida; doi: 10.1201/b16136-4
25. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA). (2018). <https://www.gob.mx/agricultura>
26. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquería (SIAP). (2018). Cierre de la producción agrícola por estado.
27. Sharma-Thomas S, Abdurahman A, Ali S, Andrade-Piedra JL, Bao S, Charkowski AO, Crook D, Kadian M, Kromann P, Struik PC, Torrance L, Garrett KA, Forbes GA (2015). Seed degeneration in potato: the need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology* 65: 3-16; doi: 10.1111/ppa.12439
28. Sharma-Thomas S, Abdurahman A, Ali S, Andrade-Piedra JL, Bao S, Charkowski AO, Crook D, Kadian M, Kromann P, Struik PC, Torrance L, Garrett KA, Forbes GA. (2015). Seed degeneration in potato: the need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology* 65: 3-16; doi: 10.1111/ppa.12439
29. Spooner, DM. (2013). *Solanum tuberosum* (patatas). *Brenner's Encyclopedia of Genetics*, 2, 481-483.

30. Struiky PC, Lommen WJM. (1999). Improving the field performance of micro-minitubers. *Potato Research* 42:559-568; doi: 10.1007/bf02358172
31. Subrahmanyeswari T, Bandyopadhyay S, Gantait S (2024). Direct regeneration-mediated *in vitro* propagation and microtuberization of potato: An appraisal of the past ten-year period. *South African Journal of Botany*, 172: 768–778. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.07.058>.
32. Varela, F. (2018). Etapas de micropropagación | No. 124 | 2018 | TecnoAgro. <https://tecnoagro.com.mx/no.-124/etapas-de-micropropagacion>
33. Variedades de papa producidas en Coahuila combaten el hambre en ejidos del país. (2024). vanguardia.com.mx. <https://vanguardia.com.mx/coahuila/variedades-de-papa-producidas-en-coahuila-combaten-el-hambre-en-ejidos-del-pais-NF11509510>
34. Velásquez J. (2014). Producción de tubérculo semillas de papa en la estación experimental Santa Catalina del INIAP y su relación con el sector semillero nacional. Estación Experimental Santa Catalina, INIAP. Ecuador. pp. 1-8.
35. Wattimena, GA. (1983). Micropropagation as an alternative technology for potato production in Indonesia. Ph.D. tesis. Univ Wisconsin-Madison. 202 pp.
36. Xhulaj, D, Gixhari B. (2018). *In vitro* micropropagation of potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars. *Agriculture and Forestry*, 64 (4): 105–112. DOI: 10.17707/AgricultForest.64.4.12