



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación de la reacción en materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andigena* ante el ataque de tizón tardío (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary).

David Rodríguez Puertas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Palmira, Colombia

2021

Evaluación de la reacción en materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andigena* ante el ataque de tizón tardío (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary).

David Rodríguez Puertas

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ciencias Agrarias, línea de investigación protección de cultivos.

Director (a): Pedro Uribe Mejía
(Ph.D., Fitopatología)

Codirector (a): Herman Restrepo
Título (Ph.D., Fisiología vegetal)

Línea de Investigación: Protección de cultivos
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agropecuarias.
Palmira, Colombia
Febrero de 2021

Agradecimientos

Un agradecimiento especial, por el apoyo durante el desarrollo de la maestría a:

A la familia Rodriguez Puertas y Rodriguez Narváez.

Tatiana Luna por el amor y comprensión.

A Pedro Uribe y Herman Restrepo por acompañar el proceso de investigación y escritura.

Un agradecimiento especial a la Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria AGROSAVIA, por el tiempo concedido para la realización de los estudios, a los compañeros que de alguna u otra forma apoyaron con el cumplimiento de los objetivos.

A Maria Camila Ortega por el apoyo en el laboratorio

A todo el equipo del proyecto regalías papa, por permitir el desarrollo de esta investigación.

Al personal administrativo, profesores y auxiliares de la universidad Nacional de Colombia.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Nombre: David Rodriguez Puertas

Fecha 04/04/2022

Fecha

Resumen

Evaluación de la reacción en materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo andigena ante el ataque de tizón tardío (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary).

La papa (*Solanum tuberosum* L.) constituye una de las principales actividades agrícolas de la zona andina. El tizón tardío es considerada la enfermedad más devastadora de este cultivo y es vista como una amenaza para la seguridad alimentaria, su agente causal es el Oomycete *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, las pérdidas en la región Andina se estiman entre el 30 y el 100% del rendimiento a causa de la enfermedad. En esta investigación se evaluó la respuesta a la enfermedad de 4 materiales comerciales ampliamente sembrados en condiciones de campo, donde fue posible observar la alta susceptibilidad del material Diacol Capiro (100% de área afectada) con una disminución severa del 89% del rendimiento total. Además fue posible observar la pérdida de resistencia de la variedad ICA Única, reportada como altamente resistente en 2001 y que durante este estudio presentó niveles de daño cercanos al 75%, con una disminución del rendimiento del 49,88%, por otro lado, los materiales comerciales Pastusa Suprema y Superior presentaron el mejor comportamiento hacia la enfermedad tizón tardío, donde, el nivel de daño de los 2 materiales fue de alrededor 30% de área afectada, reducciones del rendimiento del 30.5% y 40.92% respectivamente. Es importante resaltar que la variedad Pastusa Suprema exhibió características de tolerancia a la enfermedad. Resultados que resaltan el papel fundamental de materiales como Pastusa Suprema y Superior, y su rol como pilares en el manejo integrado y sostenible de la enfermedad, a través de la siembra de variedades con características de resistencia a la enfermedad.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, Tizón tardío, *Phytophthora infestans*, Resistencia, Rendimiento, materiales comerciales

Abstract

Evaluation of the reaction of commercial potato materials *Solanum tuberosum* Andigena Group to late blight (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary).

Potato (*Solanum tuberosum* L.) are one of the main agricultural activities in the Andean region. Late blight is considered the most devastating disease of this crop and is seen as a threat to food security. Its causal agent is the Oomycete *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary; losses in the Andean region are estimated at between 30 and 100% of the yield due to the disease. In this research the response to the disease of 4 commercial materials widely planted in field conditions was evaluated, where it was possible to observe the high susceptibility of the Diacol Capiro material (100% of affected area) with a severe decrease of 89% of the total yield. It was also possible to observe the loss of resistance of the ICA Única variety, reported as highly resistant in 2001, which during this study showed damage levels close to 75%, with a yield reduction of 49.88%, where the damage level of the 2 materials was around 30% of the affected area, with yield reductions of 30.5% and 40.92%, respectively. It is important to highlight that the Pastusa Suprema variety exhibited characteristics of tolerance to the disease. These results highlight the fundamental role of materials such as Pastusa Suprema and Superior, and their role as pillars in the integrated and sustainable management of the disease, through the planting of varieties with disease resistance characteristics.

Keywords: *Solanum tuberosum*, Late blight, *Phytophthora infestans*, Resistance, Yield, commercial materials.

Contenido

Introducción.....	1
1. Estado del arte	10
1.1 Evolución, distribución y taxonomía de la papa	10
1.2 Habito de crecimiento de la papa	12
1.3 Importancia económica del cultivo	13
1.4 Tizón Tardío (<i>Phytophthora infestans</i>)	14
1.4.1 Relación hospedero patógeno	17
1.4.2 Resistencia Horizontal y vertical	18
1.4.3 Síntomas de la enfermedad.....	19
1.4.4 Efectos de la enfermedad en el rendimiento del cultivo	20
1.5 Mejoramiento genético.....	22
1.6 Materiales Colombianos	23
Referencias bibliográficas	25
2. Objetivos	31
2.1 General.....	31
2.2Específicos	31
3. Capítulo 1. Determinación de niveles de resistencia de genotipos comerciales de <i>Solanum tuberosum</i> Grupo andigena al tizón tardío.	33
3.1 Introducción	33
3.2 Materiales y Métodos	36
3.2.1 Pruebas de Campo.....	36
3.2.2 Monitoreo climático.....	36
3.2.3 Material vegetal	37
3.2.4 Tratamientos	38
3.2.5 Evaluación de incidencia y severidad	39
3.2.6 Cálculo de área bajo la curva de Progreso de la enfermedad.....	40
3.2.7 Cálculo de escala de severidad	41
3.2.8 Diseño Experimental y análisis estadístico	41
3.3 Resultados.....	42
3.3.1 Variables climáticas.....	42
3.3.2 Comparación resistencia entre materiales	49
3.3.3 Modelo de regresión lineal.....	53
3.4 Discusión	58
3.5 Recomendaciones y Conclusiones	64
Referencias Bibliográficas.....	65
4. Capítulo 2. Evaluación del comportamiento fisiológico y agronómico de genotipos comerciales de <i>Solanum tuberosum</i> Grupo andigena bajo presencia de tizón tardío.....	71
4.1 Introducción	71
4.2 Materiales y métodos	74
4.2.1 Pruebas de Campo.....	74
4.2.2 Monitoreo climático.....	74
4.2.3 Material vegetal	75
4.2.4 Diseño experimental y tratamientos	75

4.2.5 Manejo químico de la enfermedad.....	76
4.2.6 Determinación de materia seca MS.....	77
4.2.7 Índice de cosecha.....	78
4.2.8 Índice de área foliar.....	78
4.2.9 Rendimiento.....	78
4.2.10 Modelo de regresión cuadrático.....	79
4.2.11 Análisis estadístico.....	79
4.3 Resultados.....	80
4.3.1 Severidad de la enfermedad.....	80
4.3.2 Distribución de materia seca.....	86
4.3.3 Índice de área foliar.....	90
4.3.4 Rendimiento.....	92
5. Modelo de predicción severidad versus rendimiento.....	96
Discusión.....	101
Recomendaciones y Conclusiones.....	108
Referencias Bibliográficas.....	110
6. Discusión general.....	114

Lista de figuras

Figura 1 Precipitación (mm) y temperatura promedio (°C) durante el primer ciclo de evaluación.	43
Figura 2 Humedad relativa en % durante el primer ciclo de evaluación.....	43
Figura 3 Precipitación (mm) y temperatura promedio (°C) durante el segundo ciclo de evaluación.	44
Figura 4 Humedad relativa (%) durante el segundo ciclo de evaluación.....	45
Figura 5 Nivel de daño por tizón tardío (%) en 4 materiales comerciales de papa.	46
Figura 6 Nivel de daño por tizón tardío (%) en 4 materiales comerciales de papa.	47
Figura 7 AUDPC de 4 materiales comerciales de papa en interacción con Tizón Tardío.	50
Figura 8 Síntomas enfermedad tizón tardío en 4 variedades comerciales de papa, a. Diacol Capiro, b. ICA Única, c. Pastusa Suprema y d. Superior, 91 dds.....	51
Figura 9 Síntomas de Tizón tardío en 4 materiales comerciales a. ICA UNICA, b. Diacol Capiro, c. Pastusa Suprema y d. Superior, 91 días después de siembra.....	52
Figura 10 Clasificación de resistencia a <i>P. infestans</i> según escala de Yuen y Forbes 2009.	53
Figura 11 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad Diacol Capiro.....	55
Figura 12 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad ICA Única.	56
Figura 13 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad Pastusa Suprema.....	57
Figura 14 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad material comercial Superior.....	58
Figura 15 Síntomas del tizón tardío en la variedad comercial Diacol Capiro, A y B. Con manejo químico calendario, C y D Sin manejo químico de la enfermedad.....	83
Figura 16 Síntomas del Tizón tardío en la variedad ICA Única, A y B. Con manejo químico calendario, C y D, Sin manejo químico de la enfermedad.	84
Figura 17 Síntomas del Tizón tardío en la variedad Pastusa Suprema, A y B. Con manejo químico calendario, C y D, Sin manejo químico de la enfermedad.....	84
Figura 18 Síntomas del Tizón tardío en el material comercial Superior, A y B. con manejo químico calendario, C y D. sin manejo químico de la enfermedad.	85
Figura 19 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para variedad Diacol Capiro con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.	87
Figura 20 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para la variedad ICA UNICA con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.	87

Figura 21 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para la variedad Pastusa Suprema con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.	88
Figura 22 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para genotipo comercial Superior con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.	88
Figura 23 Ganancia de peso seco total de los diferentes tratamientos evaluados durante la etapa de tuberización en el municipio de Pasto.	90
Figura 24. Índice de área foliar para tratamientos evaluados en la presente investigación	91
Figura 25 Rendimiento (t/ ha) categorías primeras, segunda, tercera, riche y total, materiales evaluados con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.	93
Figura 26 Rendimiento total (t/ ha) materiales comerciales evaluados con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.	95
Figura 27 Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío en para la variedad Diacol Capiro.	98
Figura 28. Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío para la variedad ICA ÚNICA.	99
Figura 29 Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío para la variedad Pastusa suprema.....	100
Figura 30. Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío para el genotipo comercial superior.	101
Figura 31 Interacción de los genotipos, enfermedad tizón tardío, prácticas de manejo y condiciones ambientales frente al rendimiento comercial del cultivo.....	115

Lista de tablas

Tabla 1 clasificación taxonómica de papas comerciales.	12
Tabla 2 Principales países productores de papa, área (ha), rendimiento promedio (kg/ha) y producción total (ton).	13
Tabla 3 Clasificación taxonómica patógeno <i>P. infestans</i>	15
Tabla 4 materiales comerciales evaluados.	37
Tabla 5 Descripción de los tratamientos evaluados.	38
Tabla 6 . Escala de severidad Tizón tardío.	39
Tabla 7 . Variables con relación significativa.	54
Tabla 8 Tratamientos evaluados.	75
Tabla 9 Manejo químico de la enfermedad bajo un esquema de aplicaciones calendario.	77
Tabla 10 Distribución de materia seca por órgano (PSH, PST, PSR, PSTub) (g) en 4 genotipos de papa (<i>Solanum Tuberosum</i>) grupo <i>andigena</i> con y sin manejo químico del tizón tardío.	80
Tabla 11 índice de cosecha tratamientos evaluados.	89
Tabla 12 . Correlación variables severidad y rendimiento de las diferentes categorías comerciales.	96

Introducción

La papa es un tubérculo de gran importancia, producido en diferentes regiones del mundo, de gran relevancia en la dieta y seguridad alimentaria de alrededor de mil millones de personas alrededor del mundo (Martínez et al., 2004). La producción mundial de papa superó las 462'000.000 toneladas en 2019 (Faostat 2019). La papa es el tercer alimento en importancia, el arroz y el trigo ocupan los primeros lugares (Bertone et al., 2007; Campos & Ortiz, 2019). El consumo per capita del país es de aproximadamente 71 kg/persona/año, la producción nacional se usa para; consumo en fresco (90%) y la industria demanda un 10% de la producción nacional de papa (MADR, 2018a). En Colombia, el cultivo ocupa cerca de 132,161 hectáreas, con una producción nacional de 2,751,837 t/año, el rendimiento nacional en promedio es de 20,5 t/ha (Agronet, 2019). El sistema productivo papa genera alrededor de 264 mil empleos, 75 mil de ellos son empleos directos y alrededor de 189 mil son indirectos. El cultivo se encuentra establecido en 14 departamentos, los más importantes son Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia con el 80 a 90% de la producción nacional (MADR, 2019).

En el departamento de Nariño, el cultivo ocupó un área sembrada de aproximadamente 17,199 hectáreas, con una producción de 358,153 t/año y un rendimiento promedio departamental de 20,755 kg/ha (Consolidado agropecuario, 2016). Finalmente, la producción departamental del tubérculo se distribuye a través de diferentes canales de venta como lo son plazas públicas o satélites, galerías, mercados terminales, supermercados, minoristas, vendedores de barrio y venta en otras ciudades (Gómez, 2008).

El cultivo de la papa a nivel mundial es susceptible a varios problemas de tipo sanitarios, dentro de estos problemas vale la pena resaltar los reportados por Weingartner y Hooker (2001) quienes reportan enfermedades cuyos agentes causales son bacterias, hongos, Oomicetes, nematodos virus, viroides y fitoplasmas. En el país, según los reportes de Buriticá (1999) quien se encargó de realizar un inventario donde relaciona las enfermedades de papa, con sus agentes causales, en el estudio se destaca la presencia de enfermedades como gota causada por el Oomicete (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary), tizón temprano (*Alternaria solani* (Ell. and Mart)), la roña polvosa (*Spongospora subterranea* f sp. *subterranea*) y rizoctoniasis (*Rhizoctonia solani* Khun).

La enfermedad conocida popularmente como gota o lancha de la papa, causado por el Oomiceto *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, es quizás el problema sanitario más devastador, que limita al cultivo de la papa. Su importancia es bien conocida por su papel en la hambruna irlandesa de la década de 1840, causando pérdidas casi que totales de cultivos, lo que causó una hambruna de tal magnitud que generó la muerte de alrededor de 1 millón de personas y el desplazamiento forzado de otro millón de personas.

Hoy en día, la enfermedad sigue siendo muy importante en el sistema productivo papa a nivel mundial (Sparks et al., 2014), puesto que si las condiciones ambientales y climáticas son favorables para el ataque del patógeno y los materiales o genotipos son susceptibles, la reducción en el rendimiento puede ser hasta del 100% si no se aplica alguna estrategia de protección (Barquero et al., 2005). La enfermedad tiene una gran importancia económica ya que reduce en promedio la producción mundial de papa en aproximadamente 16%, lo que representa una pérdida de 7,200 millones de dólares estadounidenses por año (Stefanczyk et al., 2017).

El tizón tardío de la papa es un desafío difícil para manejar, particularmente para los agricultores de escasos recursos que pueden tener un acceso limitado a los fungicidas apropiados y un conocimiento limitado del manejo de la enfermedad (Sparks et al., 2014). El control se ha basado en aplicaciones frecuentes de fungicidas (basadas en el calendario), generando la aparición de variantes resistentes a algunos ingredientes activos (Kessel et al., 2018). Esta situación ha generado que la enfermedad se ha vuelto cada vez más problemática en muchas partes del mundo, ya sea por un manejo deficiente que lleva a la aparición de cepas más agresivas de *P. infestans* (Shakya, et al., 2015), o quizás por factores asociados a cambios en el clima, en regiones altamente sensibles al cambio climático como la región de los Andes en América Latina (Shakya et al., 2015).

En Colombia, las regiones productoras se encuentran ubicadas en lugares donde existen condiciones ambientales óptimas para la ocurrencia y desarrollo de la enfermedad tizón tardío (García et al., 2008) y esto, unido a la siembra de materiales comerciales susceptibles a la enfermedad, la convierte en una limitante para la producción sostenible del tubérculo en el país. A nivel del departamento de Nariño y para el país también, existe la necesidad de entender que está pasando con esta enfermedad, como se está propagando, que cepas están predominando, que daños está causando y por ende es necesario trabajar en su monitoreo, comenzando con la evaluación de la calidad y durabilidad de los fungicidas usados para el control de la enfermedad; así como en la evaluación de la resistencia al

patógeno de variedades comerciales sembradas en el país. Al igual que lo que se hace en muchos países, es importante continuar con los programas de desarrollo de variedades resistentes al patógeno, estrategia reconocida mundialmente como la más efectiva para el manejo de esta enfermedad (Haesaert et al., 2015; Liljeroth et al., 2016; Kessel et al., 2018), En este último caso, en países como Colombia, el desarrollo y la adopción de cultivares resistentes ha sido lento por razones que incluyen la baja tasa de multiplicación de la papa, la falta de sistemas de semillas funcionales en los países en desarrollo y la naturaleza efímera de la resistencia en la mayoría de los cultivares que han sido liberados (Andrade-Piedra et al., 2005).

El uso de materiales comerciales de papa con características de resistencia a la enfermedad puede desempeñar un papel clave en el control sostenible del tizón tardío, sin embargo, cuando estas variedades son ampliamente utilizadas, la degradación de la resistencia puede ocurrir como resultado de la adaptación del patógeno (Pacilly et al., 2018). Sin embargo, los niveles actuales de resistencia favorecen la reducción del riesgo de ataque, y existe la posibilidad de que los avances tecnológicos referentes a técnicas de mejoramiento genético aumenten el nivel y/o la durabilidad de la resistencia al tizón tardío (Sparks et al., 2014). En cuanto al manejo químico de la enfermedad, también existe la posibilidad de lograr avances al reducir los costos de estas aplicaciones y mejorar en la inocuidad de estos compuestos para mitigar el efecto adverso hacia el medio ambiente, e incorporar otras prácticas agronómicas de tipo cultural para que contribuyan en el manejo del tizón tardío, como podría ser el ajuste de las fechas de siembra para evitar condiciones que favorezcan el tizón, y rotación integral de lotes de cultivo (Garretta et al., 2011).

En el departamento de Nariño los principales materiales sembrados son: Diacol Capiro (27,2%), Superior (14,5%), ICA Única (11,7%), Parda Pastusa (10,9%), Papa criolla tipo Phureja (9,3) y Pastusa Suprema (8,9%) (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2019), materiales que por su naturaleza diferencial en cuanto a susceptibilidad y resistencia al patógeno, juegan un papel crucial en el impacto de la enfermedad en el departamento, creando condiciones donde el riesgo de pérdida de rendimiento en el cultivo es mayor o menor dependiendo de las proporciones de siembra de los materiales. Además de identificar el grado de dependencia de los materiales evaluados al manejo químico y a la intensidad de este, necesaria para la obtención de los rendimientos esperados de acuerdo con el material de siembra. Considerando la necesidad de entender el contexto de la enfermedad en la zona productora del municipio de Pasto, surge la idea de esta

investigación, “Evaluación de la reacción de materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andígena* ante el tizón tardío *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary”.

Referencias bibliográficas

Andrade-Piedra J., Hijmans R., Forbes G., Fry W., and Nelson R. 2005. Simulation of the Potato Late Blight in the Andes. I: Modification and Parameterization of the LATEBLIGHT Mod. Ecology and Epidemiology. Vol. 95, No. 10. DOI: 10.1094/PHYTO-95-1191. The American Phytopathological Society.

Barquero M., Gómez L., Brenes A. 2005. Resistencia al tizón tardío *Phytophthora infestans* en clones promisorios de papa en Costa Rica. Agronomía Costarricense 29(3): 31-45. ISSN:0377-9424. 2005.

Bertone, M; E. Illanes; R. Monte y E. Rodríguez. 2007. Métodos de mejoramiento genético en papa. En: <http://agro.uncor.edu/~mejogeve/Papa.pdf>. 9 p.; Consulta: septiembre de 2009.

Buriticá, P. 1999. Directorio de patógenos y enfermedades de las plantas de importancia económica en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Instituto Colombiano Agropecuario, ICA. Medellín. 329 p.

Campos, H. y Ortiz, O. (Eds.). (2019). The Potato Crop: Its Agricultural, Nutritional and Social Contribution to Humankind. Springer Nature. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-28683-5>.

Consolidado Agropecuario Departamental de Nariño. 2016. Gobernación de Nariño - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y Universidad Sergio Arboleda.

Faostat 2019. FAO Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>

García H, Marín M, Jaramillo S., Cotes J. 2008. Sensibilidad de aislamientos colombianos de *Phytophthora infestans* a cuatro fungicidas sistémicos. Agronomía Colombiana 26(1), 47-57.

Garretta K, Forbes G, Savary S, Skelsey A, Sparks A, Valdivia C, van Bruggene A, Willocquet L, Djurlif A, Duveillerg E, Eckerstenf H, Pandeh S, Vera C and Yuen J. 2011. Complexity in climate-change impacts: an analytical framework for effects mediated by plant disease, *Plant Pathology* (2011) 60,15–30, Doi: 10.1111/j.1365-3059.2010.02409.

Gómez, M. (2008). La papa, su comercialización y el caso especial frente a la comunidad de Pasquilla. (Trabajo de especialización). Escuela Superior de Administración Pública, Bogotá D.C., Colombia. Recuperado de [http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/a6890%20%20la%20%20papa,%20%20su%20%20comercializaci%C3%B3n%20%20y%20%20el%20caso%20%20especial%20%20frente%20%20a%20%20la%20%20comunidad%20%20de%20%20pasquilla%20\(pag%2048%20-%201.427%20kb\).pdf](http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/a6890%20%20la%20%20papa,%20%20su%20%20comercializaci%C3%B3n%20%20y%20%20el%20caso%20%20especial%20%20frente%20%20a%20%20la%20%20comunidad%20%20de%20%20pasquilla%20(pag%2048%20-%201.427%20kb).pdf).

Haesaert G., Vossen J., Custers R c, De Loose M., Haverkort A., Heremans B., Hutten R., Kessel G., Landschoot S., Van Droogenbroeck B., Visser R., Gheysen G., 2015. Transformation of the potato variety Desiree with single or multiple resistance genes increases resistance to late blight under field conditions. *Crop Protection* 77 (2015) 163-175.

Jiang R., Li J., Tian Z., Du J., Armstrong M., Baker K., Tze-Yin Lim J., Vossen J, He H., Portal L., Zhou J., Bonierbale M., Hein I., Lindqvist-Kreuzer H., and Xie C. 2018. Potato late blight field resistance from QTL dPI09c is conferred by the NB-LRR gene R8, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 69, No. 7 pp. 1545–1555, 2018 doi:10.1093/jxb/ery021

Kessel G., Mullins E., Evenhuis A., Stellingwerf J., Cortes V., Phelan S., van den Bosch., Förch T., Goedhart P., van der Voet H., Lotz L., 2018. Development and validation of IPM strategies for the cultivation of cisgenically modified late blight resistant potato. *European Journal of Agronomy* 96, 146–155.

Liljeroth E., Lankinen A., Wiik L., Burra D., Alexandersson E., Andreasson E. 2016. Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials, *Crop Protection* 86 (2016) 42-55.

Martínez, H; C. Barrios y X. Acevedo. 2004. Características y estructura de la cadena de la papa en Colombia. Documento de trabajo No. 3. Ministerio de agricultura y desarrollo rural. Observatorio Agrocadenas. Bogotá. 15 p.

Pacilly F., Hofstede G., Edith T., van Buerenc L., Geert J., Kessel., Jeroen G., 2018. Simulating crop-disease interactions in agricultural landscapes to analyze the effectiveness of host resistance in disease control: The case of potato late blight, *Ecological Modelling* 378 (2018) 1–12.

Portal Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano (Agronet), Recuperado de <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3#>

Shakya SK, Goss E, Dufault N, van Bruggen A. 2015. Potential effects of diurnal temperature oscillations on potato late blight with special reference to climate change. *Phytopathology*. 2015 Feb;105(2):230-8. doi: 10.1094/PHYTO-05-14-0132-R.

Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2019). Estrategia de ordenamiento de la producción cadena productiva de la papa y su industria. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Papa/Documentos/20190331%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.

Sparks A., Forbes A., Hijmans R., Garrett K- 2014. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight. *Global Change Biology* 20, 3621–3631, doi: 10.1111/gcb.12587.

Stefanczyk E., Sylwester S., Brylinska M., Sliwka J. 2017. Expression of the potato Late Blight resistance gene Rpi-phu1 and *Phytophthora infestans* effector in the compatible and incompatible interactions in potato. *Phytopathology* 107:740-748, <http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-09-16-0328-R>.

Weingartner, D. y W. Hooker. 2001. Diseases of Potato (*Solanum tuberosum* L.). En: <http://www.apsnet.org/online/common/names/potato.asp>. 5p.; Consulta: Agosto de 2009.

1. Estado del arte

La siguiente revisión bibliográfica, tiene como objetivo contextualizar al lector en aspectos relacionados con; evolución, distribución, taxonomía de la papa, hábito de crecimiento de la especie, importancia económica del cultivo, problemas sanitarios, tizón tardío, relación hospedero patógeno, síntomas de la enfermedad, resistencia horizontal y vertical, variedades colombianas y control de la enfermedad, de esta manera se busca abordar la problemática tizón tardío, la cual constituye la enfermedad más limitante del sistema productivo a nivel mundial.

1.1 Evolución, distribución y taxonomía de la papa

Las papas tipo Andígenas son cultivares tetraploides nativos seleccionados por los agricultores a través del tiempo (*Solanum tuberosum* L. subsp. *andígena* Hawkes) ($2n = 4x = 48$), que durante mucho tiempo han sido el alimento básico más importante en las zonas altas de la cordillera de los Andes (2000-4000 msnm) (Sukhotu, Kamijima & Hosaka 2005). La papa cultivada pertenece al género *Solanum*, este género contiene alrededor de 1500 a 2000 especies. En general, las especies *Solanum* portadoras de tubérculos se agrupan en la sección *Petota*, esta sección se subdivide en dos subsecciones, *Patata* y *Estolonífera* (Hawkes 1990). *Patata* contiene solamente individuos que forman tubérculos (*S. tuberosum*, perteneciente a la serie *Tuberosa*) (Machida 2015).

Solanum tuberosum L. es una importante especie de cultivo que se produce en más de 100 países, en 2017 la producción mundial de papa se estimó entre 388 a 392 millones de toneladas, lo que equivale a un crecimiento del 1,8% con respecto al año 2016 (Duarte et al., 2019, Boletín Econopapa No.32). La papa (*Solanum* L. sect. *Petota*), crece desde Estados Unidos hasta el sur de Chile (Rodríguez 2010). La mayor diversidad genética de *Solanum tuberosum* L. se encuentra en la zona andina de América del Sur, el centro primario de domesticación del cultivo se ubicó, alrededor de la frontera entre Perú y Bolivia, lugar donde existe la mayor diversidad de la especie (Pumisacho & Sherwood 2002).

Al parecer la evolución de las especies de papa, que dieron origen a la papa cultivada actualmente, se dio a partir de papas diploides (Pumisacho & Sherwood 2002), *Solanum stenotomum* Juz. et Buk. es una de las 7 especies de papas cultivadas y se cree que es la especie diploide más primitiva que se cultiva desde Bolivia hasta Perú (Sukhotu et al., 2005). Sin embargo, las papas cultivadas son taxonómicamente difíciles dada su ploidía y no hay un consenso claro entre los diferentes taxónomos, quienes las han clasificado de manera muy diferente.

Para la clasificación e identificación ha sido de gran importancia el nivel de ploidía de papas cultivadas, Bukasov (1939) citado en Solanaceae source) fue el primero en contar los cromosomas de las papas cultivadas y descubrió diploides, triploides, tetraploides y pentaploides y utilizó estos datos para especular sobre sus orígenes híbridos, la dinámica evolutiva de hibridación continua, llevó a Huamán y Spooner (2002) a reconocer todas las poblaciones locales de papas cultivadas como una sola especie, *S. tuberosum*, con los ocho grupos de cultivares. El alto flujo de genes, entre variedades cultivadas y silvestres del grupo *Solanum tuberosum* subespecie *andígena*, con especies con diferente grado de ploidía, se da debido a la estrecha relación taxonómica (OCDE, 1997).

Las papas del grupo Andígena (*S. tuberosum* L. subsp. *Andígena* Hawkes) o grupo Andígena, constituyen un grupo importante de cultivares tetraploides y altamente polimórficos, seleccionados por agricultores andinos, y se caracterizan principalmente por la formación de tubérculos subterráneos (Sukhotu et al., 2005). El proceso de domesticación y posterior selección de materiales para la siembra modificó y atenuó los tetraploides iniciales de *S. stenotomum*, ampliando su diversidad y su adaptabilidad, existiendo hoy día materiales cultivados que son diploides ($2n=24$ cromosomas), triploides ($2n=36$), tetraploides ($2n=48$), pentaploides ($2n=60$) o hexaploides ($2n=72$) (Rodríguez 2010). Algunos de estos materiales pertenecen a otros grupos como Phureja, que es predominantemente diploide.

Aunque la evolución de la papa hoy día cultivada parece clara, el tratamiento taxonómico de esta todavía está en discusión; Machida (2015) reconocieron 21 especies. Hawkes (1990) declaró que hay siete especies de papa cultivadas, mientras que Ochoa (1999) identificó solo nueve especies y 141 taxones intraespecíficos, la última clasificación fue propuesta por Spooner et al. (2007), quienes genotiparon 742 variedades locales y progenitores silvestres con marcadores SSR en cloroplastos, y sugirieron la reclasificación de papas cultivadas en las siguientes 4 especies: *S. tuberosum*, con dos grupos de

cultivares (el grupo *Andigenum*; diploides, triploides y tetraploides y el grupo *Chilotanum* (tetraploides) principalmente originarios de Chile y *S. ajanhuiri* (diploide); *S. juzepczukii* (triploide); y *S. curtilobum* (pentaploide) (Machida 2015).

Según reportes Spooner et al., (2007) La clasificación taxonómica de papas cultivadas se muestra a continuación en la tabla 1:

Tabla 1 clasificación taxonómica de papas comerciales.

Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magliophyta</i>
Clase	<i>Magnoliopsida</i>
Subclase	<i>Asteridae</i>
Orden	<i>Solanales</i>
Familia	<i>Solanaceae</i>
Género	<i>Solanum</i>
Especie	<i>Tuberosum</i>
Nombre científico	<i>Solanum tuberosum</i>

Fuente: Spooner et al., (2007).

1.2 Hábito de crecimiento de la papa

La papa es una planta herbácea, su hábito de crecimiento puede ser arrojado, rastrero o erecto. El fenotipo de la papa puede variar debido a factores ambientales y climáticos (Luján, 1996), La planta puede alcanzar hasta los 100 cm de altura, según el genotipo, está compuesta por varios tallos herbáceos de color verde claro, erectos a semi erectos o decumbentes, con pequeños apéndices laterales o alas, presenta ramificaciones laterales y hojas compuestas imparipinnadas (Lozano et al., 2002), cada tallo representa una unidad productiva que bajo condiciones ideales podría producir hasta 8 tubérculos (Parra y Ortiz, 2017). Los tubérculos son el órgano de interés económico para esta especie, estos corresponden a tallos modificados formados a partir de los estolones y corresponden a los órganos de reserva de la planta (Pineda, 2006).

1.3 Importancia económica del cultivo

La papa es el tercer cultivo en importancia mundial, después del arroz y el trigo. En la tabla 2, se muestran los datos más representativos de su producción:

Tabla 2 Principales países productores de papa, área (ha), rendimiento promedio (kg/ha) y producción total (ton).

País	área cosechada (ha)	Rendimiento (kg/ha)	Producción (Ton)
China	5'765.144	17.197,7	99'147.000
India	2'179.000	22.306,1	48'605.000
Rusia	1'889.208	15.662,6	29'589.976
Ucrania	1'323.200	16.783,7	22'208.220
Estados Unidos	415.010	48.233,4	20'017.350
Polonia	329.323	27.850,3	9'171.733
Belorrusia	275.997	23.242,1	6'414.755
Francia	173.486	42.321,6	7'342.203
Países bajos	160.791	45.972,0	7'391.881

Fuente: (Faostat 2017).

Según el reporte estadístico de la FAO para el 2012, Colombia es el segundo país productor de papa más importante en Suramérica, siguiendo a Perú con una cantidad producida de 1'847.145 t/año (Prieto et al., 2014). En el año 2017, en Colombia el cultivo de papa ocupó 149.060 ha, con una producción nacional de 2'819.026 t, el rendimiento promedio del país está en 18,91 t/ha (Faostat 2017). Los cultivos de papa se encuentran distribuidos principalmente en las regiones frías de la zona Andina, bajo diversas condiciones biofísicas, económicas y sociales (Villareal *et al.* 2007).

Los principales departamentos productores de papa en Colombia son; Cundinamarca con una participación en la producción nacional de 46,41%, Boyacá 22%, Nariño 19,84% y

Antioquia con el 3,77% (Agronet 2019). En el departamento de Nariño existe un área sembrada de aproximadamente 17,199 hectáreas, con una producción de 358,153 t/año, el rendimiento promedio del departamento es de 20,755 kg/ha (consolidado agropecuario 2016), producción distribuida en 21 municipios productores situados todos en el área andina del departamento (Ñústez 2011). De estos 21 municipios 8 tienen áreas de producción de papa superiores a 1000 ha, representando el 74,61% del área total de papa del departamento, de acuerdo con el área sembrada los principales municipios productores son: Túquerres (3052 ha), Pasto (2600 ha), Pupiales (1400 ha) e Ipiales (1000 ha) (Consolidado Agropecuario 2016).

La siembra de papa en el país se concentra en pocas variedades, según Fedepapa (2018), trece variedades son sembradas ampliamente en el país, los 4 materiales comerciales más importantes por área sembrada son Superior, Diacol Capiro, Parda Pastusa y criollas. Estos requerimientos del mercado contribuyen a la pérdida progresiva de la diversidad del recurso genético, además de la pérdida de autonomía de las comunidades campesinas (Tinjacá y Rodríguez, 2015).

1.4 Tizón Tardío (*Phytophthora infestans*)

El tizón tardío, lancha o Gota, causado por *Phytophthora infestans*, sigue siendo el problema sanitario más limitante en la producción de papa en la mayoría de las áreas de cultivo en el mundo (Liljeroth et al 2016; Kessel et al., 2018). Este organismo, es un Oomicete (Raigosa et al., 2009), clasificado dentro del clado monofilético SAR, subgrupo Stramenopila (Prieto et al., 2014). *P. infestans* es un patógeno hemibiotrofo que inicialmente requiere células huésped vivas; Después de una breve fase biotrófica, el patógeno causa una necrosis extensa en las hojas y los tallos que pueden destruir por completo la capacidad fotosintética de la planta en un corto período de tiempo (Haesaert et al., 2015).

Algunas características generales del grupo de los Oomicetes son: la pared celular de esta clase de organismos contienen celulosa, no contienen quitina como la mayoría de hongos verdaderos, los Oomicetes producen micelio no septado (ausentes de paredes transversales), resultando en una condición multinucleada (llamada cenocítica); presentan cresta mitocondrial tubulares vesiculadas, producen oósporas (espora sexual de reposo) y zoosporas (espora asexual), los núcleos de las células vegetativas son típicamente

diploides, la reproducción sexual ocurre vía producción de gametangios (Oogonios y Anteridios) (Forbes, et al., 2014).

Según Birch & Whisson (2001), la clasificación taxonómica de este patógeno es la siguiente (tabla 3):

Tabla 3 Clasificación taxonómica patógeno *P. infestans*

Reino:	Chromista
Phylum	Oomycota
Orden	<i>Peronosporales</i>
Familia	<i>Peronosporaceae</i>
Género	<i>Phytophthora</i> ,
Especie	<i>Phytophthora infestans</i>

Fuente: Birch & Whisson (2001).

Esta enfermedad se caracteriza por ser policíclica, es decir, con varios ciclos de producción de inóculo durante un mismo cultivo (Forbes et al., 2014). En condiciones ideales, *P. infestans* puede completar una generación (de inoculación a esporulación) en 4-5 días, Por lo tanto, con un período de crecimiento de aproximadamente 150 días, un campo de papa susceptible, con condiciones climáticas y ambientales ideales para el crecimiento y desarrollo del tizón tardío permitiría la ocurrencia de 30 generaciones del patógeno (Haltermann & Middleton 2012).

Sobrevive en forma de micelio en los tubérculos de papa o en los restos de material vegetal infectado, el inóculo primario, proveniente de la reactivación de micelio presente en residuos de cosecha, bajo condiciones favorables es diseminado por el viento, neblina o lluvia (Agrios, 2005). La mayoría de las infecciones son iniciadas por esporangios asexuales, órganos reproductivos del organismo que contienen las zoosporas, el esporangio puede germinar directa o indirectamente dividiendo su citoplasma multinucleado en zoosporas mononucleadas, la producción de zoosporas es crucial porque aumenta el rango de colonización más allá de donde aterrizan los esporangios, las zoosporas pueden nadar unos pocos centímetros a través del suelo húmedo, lo que conduce a la infección del tubérculo, además de viajar más lejos a través de la lluvia o el agua de riego (Leesutthiphonchai et al., 2018). Una vez la zoospora llega al huésped y típicamente a la

hoja, forma un quiste (pierde los flagelos de movilidad) y comienza a formar un tubo germinativo, el cual penetra la epidermis de la hoja a través de la formación de un apresorio, el ingreso en tubérculos ocurre principalmente a través de las yemas, heridas y aberturas naturales como las lenticelas, después de la penetración, el patógeno forma una estructura hifal especializada denominada haustorio, la cual es la encargada de penetrar en la célula y absorber los nutrientes del interior de esta (Leesutthiphonchai et al., 2018).

Al ser *P. infestans* un organismo hemibiotrofo, la extracción de nutrientes ocurre en el apoplasto durante la mayor parte del ciclo de la enfermedad, el estadio terminal de la infección está asociado con la esporulación y necrosis del huésped (Leesutthiphonchai et al., 2018). Al cabo de unos días después de haberse producido la infección, emergen nuevos esporangios a través de las estomas de las hojas, muchos de estos esporangios son diseminados nuevamente por el viento, lluvia o neblina, creando infecciones secundarias que le dan una característica policíclica a esta enfermedad (Forbes et al., 2014). Los periodos de incubación, latencia y la esporulación dependen de muchos factores, dentro de los que vale la pena mencionar la temperatura, humedad relativa del ambiente, los genotipos del huésped y las cepas o razas del patógeno que participan en la interacción con el hospedero (GiLB, Global initiative on late blight).

Otra estructura de importancia del patógeno son las oosporas, estas esporas de paredes gruesas son el resultado de la reproducción sexual entre los tipos de apareamiento A1 y A2 (Leesutthiphonchai et al., 2018). Las oosporas pueden persistir durante años en el suelo, sobreviviendo a la congelación y a los fungicidas. En regiones del norte de Europa y México donde la reproducción sexual de *P. infestans* es frecuente, las oosporas son una fuente importante de inóculo, las enfermedades causadas por oosporas tienden a ocurrir más temprano en la temporada que las epidemias causadas por esporangios, y a menudo aparecen en las partes subterráneas de la planta (tubérculos), donde la detección por exploración es más difícil (Leesutthiphonchai et al., 2018).

Según reportes de Prieto et al., (2014) desde que se reportó la enfermedad por primera vez en Colombia y desde entonces se ha encontrado, que a pesar de la ausencia del tipo de apareamiento A2 y la condición clonal del patógeno, *P. infestans* presenta una variación genética apreciable dentro de cada linaje (Raigosa et al., 2009). En Colombia se reporta la presencia de un sólo haplotipo mitocondrial (IIa) y el tipo de apareamiento A1, lo que sugiere la imposibilidad de reproducción de tipo sexual y la ocurrencia de un solo linaje genético, posiblemente EC-1, presente en los cultivos de papa en las zonas productoras del país

(Silva et al., 2009; Prieto et al., 2014). Dada la plasticidad del genoma de *P. infestans*, se favorece la variabilidad en genes de virulencia que le permiten infectar variedades de papa resistentes o nuevos hospederos, lo cual puede también estar sucediendo en las poblaciones colombianas (Prieto et al., 2014). Este patógeno presenta altos niveles de virulencia sobre diversas plantas solanáceas, en las zonas altoandinas del país, *P. infestans* es considerado como una seria amenaza para la seguridad alimentaria (Silva et al., 2009).

1.4.1 Relación hospedero patógeno

En la naturaleza, los microorganismos interactúan con las plantas a una escala enorme, sin embargo, la mayoría de los microorganismos no pueden causar enfermedad en las plantas, porque carecen de las herramientas adecuadas para evitar o superar las defensas del huésped (Chen & Halterman 2017). Las respuestas de resistencia a las enfermedades en las plantas son complejas, según lo afirmado por Burbano (2020), las defensas basales del huésped, como el engrosamiento de la pared celular, la producción de especies reactivas de oxígeno y la síntesis inducida de compuestos antimicrobianos, están mediadas por receptores de reconocimiento de patrones extracelulares (PAMPs) que reconocen y responden a los patrones moleculares asociados a los patógenos (Chen & Halterman 2017).

Las plantas tienen varios mecanismos de defensa, el primero consiste en la inmunidad a las enfermedades y depende principalmente de la detección o reconocimiento de patrones moleculares asociados a patógenos (PAMPs) ubicados en la superficie celular de la planta (Leesutthiphonchai et al., 2018). Los PAMPs son elicitores microbianos genéricos, como la quitina y la flagelina que al ser reconocidos por receptores de reconocimiento (PRRs) se activan las defensas de la planta (Burbano 2020). Ejemplos de PAMPs de Oomicetos son el ácido araquidónico y la transglutaminasa Pep-13 presente en la pared celular (Leesutthiphonchai et al., 2018). Si existe reconocimiento de la presencia de PAMPs se da inicio a una cascada de señales que conducen al desarrollo de la inmunidad activada por el reconocimiento de la presencia de un microorganismo (Burbano 2020). La detección de un PAMP en un organismo no hospedero causa inmunidad activada por patrón (PTI), en la cual la activación del gen de defensa conduce a la producción de sustancias antimicrobianas (Leesutthiphonchai et al., 2018). La planta también reconoce las moléculas resultantes del daño producido por la infección del patógeno, es decir, los patrones

moleculares asociados al daño (DAMP), tales como fragmentos de la pared celular del huésped (Burbano 2020).

Muchos patógenos, incluyendo *P. infestans*, superan la PTI al suministrar efectores de bloqueo que reconocen e inactivan las respuestas del PTI, causando enfermedad, durante la coevolución del patógeno y del hospedero las plantas han desarrollado capacidades para detectar algunos de estos efectores, que nuevamente lleva a inmunidad al patógeno, sistema que se denomina inmunidad desencadenada por el efector (ETI) que por lo general trae procesos de muerte celular programada de las plantas (Burbano 2020).

Estudios sobre el genoma de *P. infestans* muestra que este organismo tiene un arsenal de efectores a su disposición y que es supremamente efectivo en su uso, tiene varias estrategias para silenciar cada uno de estos mecanismos de defensa (Leesutthiphonchai et al., 2018). Los efectores del patógeno, pueden bloquear las respuestas de defensa de las plantas, como la producción de enzimas, las plantas secretan proteasas de serina, proteasas de cisteína, y β -1,3-glucanasas en el apoplasto para combatir patógenos, y como una contra defensa *P. infestans* secreta inhibidores de tales enzimas, un ejemplo es el inhibidor de la cisteína proteasa EPIC1, Interesantemente EPIC1 producido por *P. infestans* funciona mejor contra las proteasas de la papa y el tomate (Leesutthiphonchai et al., 2018).

1.4.2 Resistencia Horizontal y vertical

La resistencia hacia patógenos se ha fundamentado en las teorías de gen por gen de Flor y las teorías de Van der Plank (Burbano 2020); la teoría de Flor concepto interacción gen por gen desarrollado en la década de los 50, esta teoría plantea que para cada gen del hospedero que confiere resistencia (genes R) hay un gen correspondiente que confiere patogenicidad (Avr) (Burbano 2020). Van der Plank en 1963 describió los conceptos de resistencia horizontal y vertical (Rubio et al., 2016): La resistencia vertical hace referencia a la interacción de los hospederos de manera diferencial con los diferentes linajes genéticos de un patógeno, capaces de reducir la producción de inoculo efectivo según la raza, pero no presenta este mismo efecto sobre otras razas (Burbano 2020). La resistencia de tipo vertical es específica según la raza, es regida por genes mayores, estos genes confieren un alto nivel de resistencia a través de respuesta hipersensible (HR) de la planta huésped,

este tipo de resistencia se rompe fácilmente por la evolución de nuevas razas virulentas del patógeno, (Xuan et al., 2018).

La resistencia horizontal no es específica para la raza del patógeno, es dada por la presencia de un grupo de genes R, disminuye los índices de crecimiento y tasas de reproducción para todas las razas del patógeno (Burbano 2000). los genotipos con resistencia horizontal se caracterizan por una disminución de la esporulación durante todo su ciclo debido a la acción conjunta de varios genes menores (Rubio et al., 2016). Xuan et al., (2018) indica la dificultad de separar la resistencia horizontal y vertical debido a la asociación de respuestas (incluyendo la reacción hipersensible) y factores que controlan los dos tipos de resistencia, además reporto la existencia de efectos residuales de resistencia después de que los genes R han sido vencidos, generando respuesta de defensa atenuadas que afectan el crecimiento y desarrollo del patógeno.

Actualmente y apoyados en las teorías anteriormente mencionadas y conociendo que los genes R involucrados en todos los tipos de resistencia, el nuevo enfoque aplicado es la generación de variedades las cuales tienen una combinación de varios genes mayores y menores, lo cual se denomina piramidación de genes, obteniendo variedades más resistentes y donde esta resistencia es más duradera (Rubio et al., 2016).

1.4.3 Síntomas de la enfermedad

Cuando el patógeno es capaz de superar los mecanismos de defensa de la planta, se presentan síntomas y signos de la enfermedad, principalmente en las hojas, tallos y tubérculos, las lesiones se hacen visibles pocos días después de la inoculación, el tiempo exacto depende de la temperatura y de la genética del huésped y del patógeno. En condiciones óptimas (18-22°C y HR del 80%), y con un cultivar de papa susceptible, las infecciones pueden ser visibles en menos de 3 días (GiLB, Global initiative on late blight). En las hojas los síntomas inician como pequeñas manchas irregulares de color verde pálido, localizadas generalmente en los bordes del ápice de los folíolos, bajo condiciones ambientales óptimas de temperatura y humedad relativa, estas pequeñas manchas

irregulares crecen rápidamente dando lugar a lesiones necróticas grandes de color marrón a negro, rodeadas de un halo amarillo (Cardona et al., 2016).

En el envés de las hojas, se genera una estructura algodonosa blanca, casi translúcida, donde se encuentran la mayoría de los esporangios (Torres 2002). Según reportes de Leesutthiphonchai et al., (2018) la esporulación requiere alta humedad y es suprimida por la luz, por lo tanto, ocurre principalmente durante la noche, esto mejora la supervivencia de los esporangios, al existir condiciones de alta humedad relativa y baja radiación UV; los esporangios liberados son esparcidos por el viento o el agua, con la ayuda del viento, los esporangios viajan de 10 a 20 km en menos de 3 horas, la dispersión a larga distancia se ve favorecida por su forma alargada que reduce el arrastre (Leesutthiphonchai et al., 2018).

En los tallos la lesión se suele ver como manchas oscuras, ubicadas generalmente en el tercio superior de la planta, éstas lesiones causan que el tallo se pueda quebrar con la fuerza del viento, decapitando los folíolos del tercio alto de la planta, reduciendo el área foliar considerablemente (Cardona et al., 2016). En los tubérculos, se observan depresiones superficiales e irregulares (Jaramillo, 2003).

1.4.4 Efectos de la enfermedad en el rendimiento del cultivo

El crecimiento y desarrollo están determinados por la interacción genotipo y ambiente, resultado de la interacción entre fotosíntesis, respiración, transporte de asimilados y manejo agronómico aplicado; que se traduce como la acumulación irreversible de materia seca, (Jerez et al., 2017). El rendimiento es la producción del órgano de interés económico obtenida por unidad de superficie y se expresa comúnmente en toneladas por ha, el rendimiento es influenciado fuertemente por la cantidad de plantas y el potencial productivo de cada material en concreto, en interacción con un conjunto de condiciones climáticas y de manejo que serán determinantes en el rendimiento final del cultivo.

El peso y el tamaño de cada tubérculo individual se definen mediante una interacción de factores que incluyen la densidad de la planta, el número de tallos por planta, el número de tubérculos por tallo y la tasa y duración del crecimiento del cultivo (Oliveira & Derrick 2021). El proceso de producción es una función integral de las plantas basada en la fotosíntesis, la respiración y el crecimiento, un papel importante en la productividad lo representa la

partición del carbono entre los órganos, que está controlado por un sistema de retroalimentación que forma un sistema común de fuente-vertedero (Golovko & Tabalenkova 2019).

El desarrollo vegetativo exuberante se traduce en un alto índice de área foliar importante que, en caso de ser elevado, genera la capacidad a la planta para producir mayor cantidad de foto asimilados, capacidad de cobertura del suelo para combatir malezas, existe una gran interacción entre la tuberización y el desarrollo del follaje de la planta, por lo tanto, cuando esta última es alta se espera una mayor productividad del cultivo (Golovko & Tabalenkova 2019). En el caso de la papa, la capacidad de la hoja (fuente) para convertir la Radiación Fotosintética Activa (PAR) en carbohidratos, y la capacidad de almacenamiento de los tubérculos (sumidero) afectan el crecimiento potencial de los tubérculos individuales e influyen en la distribución final del rendimiento, una fuente se puede definir como "tejidos vegetales que son productores netos de carbono, generalmente tejidos fotosintéticos verdes", en una planta de papa, estos órganos corresponden a hojas y tallos (Golovko & Tabalenkova 2019).

Una de las principales consecuencias de la presencia y ataque de un patógeno es la reducción en el rendimiento final, la cual se puede determinar cómo; la diferencia existente entre el rendimiento actual y el rendimiento potencial alcanzable, el cual se puede obtener bajo condiciones óptimas de cultivo, complementado con un manejo integrado eficiente; manejo de la nutrición, selección correcta de variedades, control de plagas y enfermedades, entre otros. La pérdida también puede ser cuantificada a través de reducción en cantidad, calidad, o en ambos atributos del rendimiento (Romero et al., 2012).

Para lograr mayores rendimientos, es importante asegurar la llegada de fotoasimilados suficientes a los tubérculos (Oliveira & Derrick 2021). La acumulación de materia seca en la planta está directamente relacionada con el área foliar, por lo tanto, se espera que si existe un desarrollo foliar adecuado, la distribución y acumulación de materia seca a los diferentes órganos de la planta sea el adecuado, generando rendimientos deseables del producto de interés económico del cultivo (Soto et al., 2018), considerando lo anterior, es fundamental proteger el cultivo durante estas etapas de mayor susceptibilidad a la pérdida de follaje, puesto que el ataque de *P. infestans* reduce el área foliar, modificando la capacidad para absorber la luz, principalmente por medio de las hojas (Santos et al., 2010). Según reportes de Carvajal, (2010) la eficiencia con la que se utilice la radiación solar, dependerá de un desarrollo adecuado de la parte foliar, por lo tanto, es fundamental realizar

planes de manejo del tizón tardío que garanticen tasas fotosintéticas ideales y por ende altos rendimientos.

Algunos estudios reportan que en México, centro de origen del patógeno *P. infestans*, donde se evaluaron 2 variedades con diferentes grados de susceptibilidad al patógeno (Alpha y Zafiro), con y sin manejo químico de la enfermedad, donde fue posible observar que en la variedad susceptible (Alpha) alcanzó 100% de severidad, como consecuencia hubo un aumento del número de tubérculos de tercera categoría, en la variedad medianamente resistente (Zafiro) sin manejo químico de la enfermedad, la categoría predominante fue la de segunda, los 2 materiales con manejo químico completo alcanzaron los mayores rendimientos, donde la variedad Zafiro presentó menor porcentaje de reducción de la producción a causa de la enfermedad, es importante resaltar que la relación cuantitativa entre la severidad del tizón tardío y el rendimiento en papa, puede ser descrito a través de modelos de regresión lineal, por lo tanto, el grado de severidad de la enfermedad está directamente relacionado con el crecimiento de los tubérculos, afectando negativamente la obtención de tubérculos de primera categoría, aumentando la producción de tubérculos de segunda y mucho más el de tercera, generando pérdidas totales de producción significativas (Romero et al., 2012).

1.5 Mejoramiento genético

Anteriormente la búsqueda de resistencia se enfocó a la resistencia vertical o monogénica, con buenos resultados, sin embargo, los materiales liberados con este tipo de resistencia perdieron esta característica y resultaron susceptibles al ataque de *P. infestans*, tiempo después de su liberación (Barquero et al., 2005). Actualmente se busca la obtención de materiales con resistencia horizontal o poligénica, ya que ofrece mayor durabilidad de la resistencia contra diversas variantes o linajes del patógeno.

El desarrollo de nuevas técnicas de mejoramiento genético como la fusión de protoplastos, ha permitido incorporar genes de interés de una manera más sencilla y rápida que con los métodos tradicionales de mejoramiento genético (Barquero *et al.*, 2005; Forbes, et al., 2014). Se ha logrado introducir de una forma más eficiente genes de resistencia en genotipos comerciales de papa, empleando como fuente de resistencia materiales silvestres. En la actualidad se está experimentando con la reducción de la carga

cromosomal de variedades comerciales, para transfórmalas en diploides (Jansky et al., 2016).

La reinvencción del cultivo de la papa facilitada por la reducción de ploidía, donde es más fácil captar esa diversidad genética disponible entre variedades sembradas y materiales silvestres, uno de los beneficios más importantes de trabajar a nivel diploide es que es posible reproducir y fijar rasgos bajo control genético recesivo, mientras que es casi imposible fijar alelos recesivos a nivel tetraploide (Jansky et al., 2016), las ganancias genéticas se obtienen más fácilmente a nivel diploide, esto facilita los procesos de selección genotípica recurrente, junto a la capacidad de combinación, facilitaran a los mejoradores obtener híbridos superiores a nivel tetraploide, también se beneficiará la producción de líneas endocriadas para introducir combinaciones de genes y explotar la heterosis (Jansky et al., 2016). La técnica consiste en hacer el mejoramiento genético de la papa a nivel diploide, con herencia de tipo simple y exponer una población segregante (F2 tradicionalmente) a la presión de selección deseada, bajo estas circunstancias el tamizaje de la progenie es más eficiente que a niveles altos de polodia (Shilmiller *et al.*, 2012).

1.6 Materiales Colombianos

Al ser la resistencia genética un pilar para el manejo de esta enfermedad los diferentes programas de mejoramiento de papa han incluido trabajos en la búsqueda y obtención de resistencia a este problema sanitario, en la papicultura colombiana predominan las variedades mejoradas, que permiten obtener mayores rendimientos por área cultivada, buenas características para consumo y adaptación a las diferentes regiones productoras (Chen & Halterman 2017). En el país existen registradas como variedades, materiales con diversos fondos genéticos, con características variadas de resistencia y susceptibilidad al patógeno, algunos de estos materiales comerciales, los cuales cuentan con diferente gado de adopción por parte del productor y que vale la pena resaltar son; Betina, Pastusa Suprema, Esmeralda, Rubí, Punto Azul, Roja Nariño y Única.

La mejor evidencia de la resistencia a *Phytophthora infestans* es la variedad Pastusa Suprema, liberada en el año 2002 por el programa de mejoramiento de la Universidad Nacional de Colombia, los genes de resistencia a la enfermedad vienen de la especie

silvestre mejicana *Solanum stoloniferum* (4n) y pudieron ser utilizados mediante la estrategia de cruzamientos puente usando *S. phureja* (Ñústez 2011). Otra de las variedades comerciales de amplio interés, no por sus características frente a *P. infestans*, si no por su alta aceptación comercial es la variedad Diacol Capiro o R12, cuyos Parentales son; CCC 751 (ssp. *tuberosum*) x Tuquerreña (CCC 61 ssp. *Andigena*), esta variedad fue liberada en el año 1968. Actualmente, se considera la variedad mejorada más susceptible a la “gota” (*P. infestans*), por otro lado, es la variedad más importante usada en procesos agroindustriales (Ñústez 2011).

La variedad Ica Única, originaria del cruce entre Clon *neotuberosum* ssp adg) x Masal de polen (variedades nativas colombianas, liberada en el año 1995, moderadamente resistente a gota, excelente calidad culinaria para consumo en fresco, tubérculo de piel clara (Ñústez 2011). Además de la existencia de clones sin registro como variedad, tal es el caso del clon Superior el cual cuneta con amplia aceptación por parte de los productores del departamento de Nariño, generando la necesidad de estudiar el comportamiento y características de este material.

Buscando evaluar la interacción y reacción de los 4 materiales comerciales de papa, se realizó una evaluación en campo donde se verificó el estado actual de la resistencia hacia el patógeno *P. infestans*, además de analizar el efecto de condiciones climáticas contrastantes, en la ocurrencia y desarrollo de epidemias del tizón tardío en el municipio de Pasto, con el objetivo de analizar las condiciones climáticas influyentes en la aparición de síntomas, y usar estos materiales en planes de manejo de la enfermedad, en los cuales se reduzca el uso de plaguicidas de síntesis química, aumentando la siembra de variedades con características de resistencia a la enfermedad.

Referencias bibliográficas

- Agrios, G. 2005.** Plant Pathology. 5th edition. Elsevier Academic Press. New York. 992 p.
- Aldabe, L., & Dogliotti, S. (2009).** Bases fisiológicas del crecimiento y desarrollo del cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L). Recuperado el septiembre de 2009, de http://www.fagro.edu.uy/~cultivos/hortalizas/Repartido_Fisiologia_Papa.pdf.
- Barquero M., Gómez L., Brenes A. 2005.** Resistencia al tizón tardío *Phytophthora infestans* en clones promisorios de papa en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3): 31-45. ISSN:0377-9424. 2005.
- Betancourth C., Sañudo B., S., Flórez C., Castro B., Arteaga F., Salazar C. 2020.** Vulneración del cultivo de papa ante problemas sanitarios emergentes en Nariño. Editorial: Editorial Universidad de Nariño. ISBN versión digital: 978-958-5123-15-1
- Birch P., Whisson S. 2001.** Pathogen profile *Phytophthora infestans* enters the genomics era. *MOLECULAR PLANT PATHOLOGY* (2001) 2(5), 257–263.
- BOLETÍN ECONOPAPA No.32**, departamento de Sistemas de Información y Estudios Económicos Federación Colombiana de Productores de Papa - Fondo Nacional de Fomento de la Papa. Volumen 2/Número 32 Publicación: 1ra quincena julio de 2017. Consultado en:<https://fedepapa.com/Boletines/QUINCENALES/BOLET%C3%8DN%20ECONOPAPA%2>
- Burbano O., 2020.** Resistencia de plantas a patógenos: una revisión sobre los conceptos de resistencia vertical y horizontal. *Revista Argentina de Microbiología*. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.04.006>
- Buriticá, P. 1999.** Directorio de patógenos y enfermedades de las plantas de importancia económica en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Instituto Colombiano Agropecuario, ICA. Medellín. 329 p.
- Cardona L., Castaño J., Ceballos N, 2016.** EPIDEMIOLOGÍA DEL TIZÓN TARDÍO *Phytophthora infestans* (MONT.) DE BARY EN QUINCE INTRODUCCIONES DE TOMATE SILVESTRE. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 19(1): 45-54, 2016.
- Carvajal M. 2010.** Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Chen Y., Halterman D.A 2017. Determination of virulence contribution from *Phytophthora infestans* effector IPI-O4 in a resistant potato host containing the RB gene. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 100 (2017) 30 – 34.

Duarte H, Zambolim L; Machado F; Hitor, Pereira R, Rodrigues F, 2019. Comparative epidemiology of late blight and early blight of potato under different environmental conditions and fungicide application programs, *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 40, n. 5, p. 1805-1818, set./out. 2019, DOI: 10.5433/1679-0359.2019v40n5p1805.

Faostat 2017. FAO Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. Consultado en: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.

Fedepapa. (2018). El agricultor y su papel en el país. *Revista Fedepapa*. No. 43. Bogotá D.C. 48p. Disponible en: <http://fedepapa.com/wp-content/uploads/2017/01/REVISTA-43-OK.pdf>. Recuperado: 01 de marzo de 2018.

Forbes G., Pérez W., Andrade J. 2014. Evaluación de la resistencia en genotipos de papa *Phytophthora infestans* bajo condiciones de campo. Guía para colaboradores internacionales. Centro Internacional de la Papa (CIP). ISBN 978-92-9060-450-1.

GILB, Global initiative on late blight, consultado en: <https://research.cip.cgiar.org/confluence/display/GILBWEB>.

Golovko T and Tabalenkova G. N. 2019. Source–Sink Relationships in Potato Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2019, Vol. 66, No. 4, pp. 664–671. ISSN 1021-4437.

Haesaert G., Vossen J., Custers R c, De Loose M., Haverkort A., Heremans B., Hutten R., Kessel G., Landschoot S., Van Droogenbroeck B., Visser R., Gheysen G., 2015. Transformation of the potato variety Desiree with single or multiple resistance genes increases resistance to late blight under field conditions. *Crop Protection* 77 (2015) 163-175.

Hawkes, J.G. 1990. The potato: evolution, biodiversity and genetic resources. Belhaven Press, London. 1990 pp.viii + 259 pp. Ref.7 pp.

Huamán, Z. y D.M. Spooner. 2002. Reclassification of landrace populations of cultivated potatoes (*Solanum* sect. *Petota*). *Amer. J. Bot.* 89, 947-965.

Inostroza J., Méndez P., Sotomayor L., 2009. Manual de papa para la Araucanía manejo y plantación. Instituto de Investigación Agropecuarias, Ministerio de Agricultura Centro Regional Carillanca, BOLETIN INIA N° 193. ISSN: 0717-4829.

Instituto Agropecuario Colombiano ICA. 2011. Manejo fitosanitario del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* subsp. *andígena* y *S. phureja*) - Medidas para la temporada invernal. Bogotá D.C. Colombia, Código: 00.09.31.11

Jansky S, Charkowski A, Douches D, Gusmini G, Richael C, Bethke P, Spooner D, Novy R, De Jong H, De Jong W, Bamberg J, Thompson A, Bizimungu B, Holm D, Brown C, Haynes K, Sathuvalli V, Veilleux, R., Miller J, Bradeen J, Jiang J. 2016. Reinventing Potato as a Diploid Inbred Line-Based Crop. doi: 10.2135/cropsci2015.12.0740. crop science, vol. 56.

Jaramillo, S. 2003. Phytophthora infestans (Mont) de Bary. Monografía. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 140 p.

Jerez E., Martín R & Morales D. 2017. EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y COMPOSICIÓN POR TAMAÑO DE TUBÉRCULOS DE PLANTAS DE PAPA PARA SEMILLA. Cultivos Tropicales, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 102-110. *ISSN impreso: 0258-5936; ISSN digital: 1819-4087*

Kessel G., Mullins E., Evenhuis A., Stellingwerf J., Cortes V., Phelan S., van den Bosch., Förch T., Goedhart P., van der Voet H., Lotz L., 2018. Development and validation of IPM strategies for the cultivation of cisgenically modified late blight resistant potato. European Journal of Agronomy 96 (2018) 146–155.

Leesutthiphonchai W, Vu A., Ah Fong A., Judelson H. 2018. How does Phytophthora infestans evade control efforts? Modern insight into the late blight disease. Phytopathology, 1008:916-924, <https://doi.org/10.1094/phyto-04-18-0130-IA>.

Liljeroth E., Lankinen A., Wiik L., Burra D., Alexandersson E., Andreasson E. 2016. Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials, Crop Protection 86 (2016) 42-55.

Lujan, L. (1996). Historia de la papa. Obtenido de <http://www.bch.org.co/bioseguridad/admon/archivos/noticias/Lujan1996.pdf>

Machida R. 2015. Diversity of potato genetic resources. *Breeding Science* 65: 26–40.

Manual Técnico del Buenas Prácticas Cultivo de Papa bajo buenas prácticas Agrícolas,

descargadodehttps://www.academia.edu/25205620/Manual_T%C3%A9cnico_del_Cultivo_de_Papa_bajo.

Núñez C. 2011. Variedades Colombianas de papa. Universidad Nacional de Colombia, Fontagro, INIA España, Red latinpapa Iberoamericana de la innovación en mejoramiento y disseminación de la papa, ISBN 978-958-761-100-7.

Oliveira J & Derrick M. 2021. Assessing potato canopy growth and development at the individual leaf level to improve the understanding of the plant source–sink relations. *NEW ZEALAND JOURNAL OF CROP AND HORTICULTURAL SCIENCE*<https://doi.org/10.1080/01140671.2021.1879878>

Pacilly F., Hofstede G., Edith T., van Buerenc L., Geert J., Kessel., Jeroen G., 2018. Simulating crop-disease interactions in agricultural landscapes to analyse the effectiveness of host resistance in disease control: The case of potato late blight, *Ecological Modelling* 378 (2018) 1–12.

Parra, M., & Ortiz, L. (2017). Identificación de CYP707A1 en la síntesis de ABA involucrada en la respuesta por estrés hídrico en un cultivo de papa criolla (*Solanum tuberosum* grupo *phureja*) irradiada con cobalto 60 (tesis de pregrado). Universidad distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá.

Pineda, L. 2006. Evaluación de la proteína total y el rendimiento de tubérculos en clones de papa criolla (*Solanum phureja*) cultivados en la zona de páramo en el departamento de Cundinamarca. Tesis de grado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 30 p.

Portal Red de información y comunicación del sector agropecuario colombiano (Agronet), Recuperado de

<https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=3#>

Prieto K., Mideros M., Restrepo S. 2014. Caracterización fenotípica y molecular de aislamientos de *Phytophthora infestans* obtenidos de cultivos de papa (*Solanum tuberosum*)

en el departamento de Nariño, Colombia, URL:
<http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto1201420.php?id=3806.pdf>

Pumisacho M & Sherwood S. 2002. EL CULTIVO DE LA PAPA EN ECUADOR, EDICIÓN 2002, INIAP-CIP. See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/260828128>.

Raigosa N., Amaya M., Jaramillo S., Lagos L., Marín M. 2009. VARIABILIDAD GENÉTICA DE AISLAMIENTOS COLOMBIANOS DE *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary EN SOLANÁCEAS CULTIVADAS EN COLOMBIA. Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín, Volumen 62, Número 1, p. 4761-4771, 2009. ISSN electrónico 2248-7026.

Rodriguez L. 2010. Origen y evolución de la papa cultivada. Una revisión. Agronomía Colombiana 28(1), 9-17.

Romero G., Lozoya H., Mora G., Fernández S., Grunwald N. 2012. Rendimiento de papa en función de epidemia por Tizón Tardío (*Phytophthora infestans* Mont de Bary) Rev. Fitotec. Mex. Vol. 35 (1): 69-78.

Rubio O., Cadena M., Flores R., 2016. Comparación de la resistencia horizontal y vertical contra el tizón tardío de la papa en Toluca. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.7 Núm.4 16 de mayo - 29 de junio, 2016 p. 755-766

Santos M., Segura M., Núñez C. 2010. Análisis de Crecimiento y Relación Fuente-Demanda de Cuatro Variedades de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín 63(1): 5253-5266.

Schillmiller, L., Charbonneau A, and R.L. Last. 2012. Identification of a BAHD acetyltransferase that produces protective acyl sugars in tomato trichomes. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 109:16377–16382 doi:10.1073/pnas.1207906109.

Silva B, Jaramillo J , Marín M., 2009. CARACTERIZACIÓN GENÉTICA DE AISLAMIENTOS DE PHYTOPHTHORA INFESTANS EN LAS ZONAS PRODUCTORAS DE PAPA DE LOS DEPARTAMENTOS DE ANTIOQUIA, BOYACÁ, CUNDINAMARCA Y NORTE DE SANTANDER (COLOMBIA). Actual Biol 31 (90): 5-20, 2009.

Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM) Proyecto GEFCIBIOGEM de Bioseguridad. CONABIO. Consultado en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/bioseguridad/pdf/20914_sg7.pdf.

Solanacea Source, A global taxonomic resource for the nightshade family, 2020. Consultado en: <http://solanaceaesource.org/content/solanum-curtlobum>

Soto A., Cotes J., Rodríguez D. 2018. Modelo de simulación del crecimiento y desarrollo de la papa criolla. Ciencia en Desarrollo, Vol. 9 No. 1 ISSN 0121 – 7488.

Spooner, D.M., J. Núñez, G. Trujillo, M. del R. Herrera, F. Guzmán y M. Ghislain. 2007. Extensive simple sequence repeat genotyping of potato landraces supports a major reevaluation of their gene pool structure and classification. PNAS 104(49), 19398-19403.

Sukhotu, T., O. Kamijima y K. Hosaka. 2005. Genetic diversity of the Andean tetraploid cultivated potato (*Solanum tuberosum* L. ssp. *andigena* Hawkes) evaluated by chloroplast and nuclear DNA markers. Genome 48, 55-66.

Tinjacá, R., y Rodríguez, M., (2015). Catálogo de papas nativas de Nariño, Universidad Nacional de Colombia y Universidad Mc Gill. Bogotá, D.C. 140p. ISBN: 978-958-775-386-8 Disponible en: http://www.seguridadalimentarianarino.unal.edu.co/sites/default/files/pdfcomponentes/C.Mej-Gen_Catalogo%20papas%20Nativas.pdf. Recuperado: 01 de abril de 2019.

Torres H. 2002. Manual de Las enfermedades más importantes de la papa en el Perú. Centro Internacional de la papa, ISBN 92-9060-212-0.2002.

Villareal, H; P. Porras; A. Santa, J. Lagoeyte y D. Muñoz. 2007. Costos de producción de papa en las principales zonas productoras de Colombia. Federación Colombiana De Productores De Papa. FEDEPA-PA. 38 p.

Xuan P., Vander P., Li C., Tang W. 2018. Combining Ability for Foliar Resistance to Late Blight [*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary] of Potato Cultivars with Different Levels of Resistance. American Journal of Potato Research (2018) 95:670–678

2. Objetivos

2.1 General.

Evaluar la reacción de materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andígena* ante el ataque de tizón tardío *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. Bajo condiciones de campo y su efecto en el rendimiento comercial del cultivo, en el municipio de Pasto.

2.2 Específicos

- Determinar niveles de resistencia en condiciones de campo de genotipos comerciales de *Solanum tuberosum* Grupo *andígena* al tizón tardío.
- Evaluar el comportamiento fisiológico y agronómico de genotipos comerciales de *Solanum tuberosum* Grupo *andígena* bajo presencia de tizón tardío.
- Predecir el impacto en rendimiento de materiales comerciales ante el ataque de tizón tardío en el municipio de Pasto.

Hipótesis de investigación

Durante la presente investigación se plantearon las siguientes hipótesis experimentales:

Ho: La respuesta agronómica y fisiológica ante el ataque del patógeno *P. infestans* es independiente del material comercial sembrado y del manejo químico en condiciones de campo en el municipio de Pasto.

H1: La respuesta agronómica y fisiológica ante el ataque del patógeno *P. infestans* es dependiente del material comercial sembrado y del manejo químico en condiciones de campo en el municipio de Pasto.

3. Capítulo 1. Determinación de niveles de resistencia de genotipos comerciales de *Solanum tuberosum* Grupo andigena al tizón tardío.

3.1 Introducción

La producción de papa (*Solanum tuberosum* L.) es una actividad agrícola de gran importancia en la zona andina (Carreño et al., 2007). Donde uno de los principales riesgos para la producción es la enfermedad conocida como gota, lancha o tizón tardío de la papa cuyo agente causal es *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, es el problema sanitario más devastador de este sistema productivo, y es un riesgo latente para la seguridad alimentaria de las diferentes regiones productoras del tubérculo y otras especies solanáceas (Silva et al., 2009, Romero et al., 2012, Xuan et al., 2018).

La Gota de la papa es la enfermedad que genera mayor impacto en la producción de este cultivo, es vista como un riesgo latente para la seguridad alimentaria, a nivel mundial, el agente causal se caracteriza por poseer una gran flexibilidad en su genoma, generando constantemente razas con altos niveles de virulencia (Silva et al., 2009). La gota de la papa ocasiona un impacto económico importante estimada en 1000 millones de euros en los 6 millones de hectáreas de papa cultivadas en la UE (Kessel et al., 2018). En Estados Unidos se estima que el gasto causado por la enfermedad es de 77.1 millones de dólares, invertidos principalmente en la aplicación de estrategias de manejo del tizón tardío, las pérdidas de cosecha se estiman alrededor de los 23 millones de dólares en este país (Seidl et al., 2015).

Las pérdidas en la región Andina están en el rango del 30 y el 100% del rendimiento comercial (Oyarzun, Taípe, & Forbes, 2001), el alto riesgo de pérdidas y la falta de acompañamiento técnico a los agricultores, ocasionan el uso de un control químico intensivo, tipo calendario, independiente de las características del genotipo cultivado (Pérez et al., 2015). En Colombia aparecen los primeros registros o descripciones de la enfermedad alrededor de 1571 y desde ese tiempo es la enfermedad más frecuente y agresiva en la zona altoandina del país (Carreño et al., 2007).

En el país la gota es altamente limitante debido a que las zonas productoras del tubérculo se ubican en regiones con características climáticas que permiten el desarrollo del patógeno y a la alta aceptación de materiales comerciales con características de susceptibilidad a la enfermedad, el manejo se ha basado principalmente en el uso de fungicidas químicos, esto implica que entre el 10 y el 30% de los costos de producción totales en el país corresponden a las aplicaciones sanitarias (Carreño et al., 2007; García et al., 2008), los agricultores de papa realizan hasta 18 aspersiones de fungicidas recomendado para controlar la gota en cada ciclo de cultivo (García et al., 2008). Esto implica altos costos monetarios y energéticos, además de que los fungicidas son perjudiciales para el medio ambiente y tóxicos para el hombre (Pacilly et al., 2019).

La resistencia varietal, es decir, la obtención y siembra de genotipos con características de resistencia, es la manera más sostenible de controlar la enfermedad, mitigando el impacto de las aplicaciones excesivas (Haesaert et al., 2015). El desarrollo y uso de variedades resistentes puede desempeñar un papel fundamental en el manejo sostenible de la enfermedad, al reducir la cantidad de aplicaciones de fungicidas en los sistemas convencionales de producción, mejorando la eficiencia del manejo químico de la enfermedad (Pacilly et al., 2018).

El desarrollo de variedades resistentes puede desempeñar un papel fundamental en el manejo sostenible de la enfermedad al reducir la cantidad de fungicidas en los sistemas convencionales de producción, mejorando la eficiencia del manejo químico de la enfermedad (Pacilly et al., 2018). En el caso del tizón tardío de la papa, Skelsey et al., (2010), demostraron que el despliegue de una variedad parcialmente resistente podía frenar la propagación de la enfermedad, estas frenan la epidemia en campo, pero no pueden prevenir completamente la infección, por lo tanto, Pacilly et al., (2018) afirman que

la estrategia más efectiva es aquella en la que se reduce la cantidad de variedades susceptibles de papa y el aumento en proporción de variedades resistentes a nivel de paisaje.

Existe una amplia diversidad genética disponible en los programas de mejoramiento de América Latina, como consecuencia de ello, existen materiales avanzados y variedades comerciales que permiten pronosticar una importante disminución en el uso de funguicidas una vez el área sembrada sea considerable (Huarte 2001). Desafortunadamente cuando la resistencia varietal se utiliza a gran escala, es muy probable que se dé la ruptura de esta debido a la evolución del patógeno y a la aparición de cepas con nuevos genes de virulencia (Pacilly et al., 2019). Además es importante considerar que los agricultores están fuertemente influenciados por actores como el comercio mayorista y minorista, la oferta de semilla de los diferentes materiales, situación que ha generado presión sobre la siembra de variedades resistentes a nivel mundial, lo que genera que se siga sembrando variedades susceptibles, prefiriendo asumir el costo del control de la enfermedad, a la posibilidad de sembrar variedades resistentes, entorpeciendo de esta manera el manejo integrado de la enfermedad (Pacilly et al., 2018).

Estudios recientes realizados en el departamento de Nariño por Martínez et al., (2021) identificaron que, la variedad Diacol Capiro, fue la más sembrada (38% del área en papa) durante los 2 semestres del año, esto se debe a que la variedad es ampliamente usada en la agroindustria, para transformación especialmente en papa chip, por lo tanto es válido reafirmar que uno de los principales factores que estimula la siembra de este material a pesar de ser altamente susceptible a diferentes problemas sanitarios, entre los que se encuentra la gota, es la inexistencia o poca adopción de materiales con características físicas y químicas, que se adapten a los requerimientos solicitados por la industria transformadora. Algunos de los materiales utilizados en el departamento y que vale la pena mencionar son Pastusa suprema (20% del área sembrada), ICA Única (16%) y Criolla Colombia (8%), opciones que podrían ser importantes en la lucha contra el tizón tardío, especialmente la variedad Pastusa Suprema.

Considerando el rol fundamental de la resistencia genética en el manejo sostenible de la enfermedad, es necesario realizar una aproximación al nivel de susceptibilidad o resistencia actual de materiales comerciales ampliamente sembrados en el departamento de Nariño, y el efecto de la interacción con el patógeno *P. infestans* causante de la enfermedad tizón tardío en condiciones de campo en el municipio de Pasto, buscando establecer estrategias MIPE eficientes y con el menor impacto, por lo tanto el objetivo de este capítulo es evaluar materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andígena* ante el ataque de tizón tardío *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary.

3.2 Materiales y Métodos

3.2.1 Pruebas de Campo.

La investigación se realizó en el Centro de Investigación Obonuco de AGROSAVIA, ubicado en el municipio de San Juan de Pasto, coordenadas 1°11'45,90" N, 77°18'5.70" W a una altura de 2766 m.s.n.m, los ensayos se realizaron en campo abierto, con manejo agronómico convencional hasta los 52 días después de siembra (**DDS**) y con inóculo natural, durante dos ciclos de evaluación; segundo semestre de 2018, donde se presentaron lluvias escasas y mal distribuidas, temperaturas superiores con relación al segundo ciclo de evaluación, condiciones típicas de efecto niño y primer semestre de 2019 donde se presentaron lluvias bien distribuidas y temperaturas más bajas con relación al primer ciclo de evaluación (efecto niña). Cada parcela experimental estuvo conformada por 4 surcos de 5 metros cada uno, se evaluaron 4 tratamientos, correspondientes a los materiales comerciales, y se establecieron 4 repeticiones para un total de 16 parcelas experimentales.

3.2.2 Monitoreo climático

El registro de los datos climáticos se realizó desde el establecimiento del cultivo hasta la cosecha, durante dos ciclos de evaluación (segundo semestre de 2018 y primer semestre

de 2019) se recolectaron y registraron usando una estación climática portátil marca Davis®, modelo Vantage pro2. La cual registra variables de precipitación, luminosidad, viento, humedad relativa y temperatura, la estación se programó para el registro de un dato cada media hora.

3.2.3 Material vegetal

Se evaluaron en condiciones de campo, cuatro materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andigena* identificadas como las más sembradas en el departamento de Nariño, las variedades evaluadas correspondieron a Diacol Capiro, ICA Única, Pastusa Suprema y Superior. La semilla con la cual se establecieron los lotes experimentales correspondió a semilla básica, producida bajo acompañamiento del ICA, organismo encargado de la certificación de semilla en el país, los materiales comerciales con un mayor grado de detalle se referencian en la tabla 4.

Tabla 4 materiales comerciales evaluados.

Variedad	Progenitores	Nivel de resistencia al momento de la liberación
Diacol Capiro	CCC 751 (<i>S. tuberosum</i>) x Tuquerreña (CCC 61 ssp. Andigena,	variedad mejorada más susceptible a la “gota” (<i>P. infestans</i>)
ICA Única	E-59-42 (<i>neotuberosum</i> ssp.) x Masal de polen (variedades nativas colombianas	moderadamente resistente a la “gota” (<i>P. infestans</i>)
Pastusa Suprema	Parentales: [(<i>S. stoloniferum</i> 230409) x <i>S. phureja</i> (CCC- 81)] x Var. Parda Pastusa:	La variedad presenta buena resistencia a la “gota” (<i>P. infestans</i>)

Clon Superior	No se conocen datos de progenitores	No se conocen datos de resistencia a <i>P. infestans</i>
----------------------	-------------------------------------	--

Fuente: Núñez, 2011

3.2.4 Tratamientos

Se establecieron parcelas experimentales, de los materiales Diacol Capiro (**DC**), Ica Única (**IU**), Pastusa Suprema (**PS**) y Superior (**S**), la distancia de siembra usada fue; 1,20 metros entre surcos por 0,30 metros entre plantas, la parcela experimental estuvo constituida por 4 surcos de 5 metros de largo.

El manejo agronómico aplicado fue estándar en los cuatro tratamientos, donde, prácticas como fertilización, manejo de plagas y enfermedades y labores culturales como aporque, se realizaron de manera similar en los 4 tratamientos hasta el día 52 después de siembra, a partir de este momento se suspendió la aplicación química, para el control de la enfermedad tizón tardío, la evaluación de incidencia y severidad se realizó en los 2 surcos centrales de cada parcela a través de las 4 repeticiones establecidas, la evaluación se realizó cada 7 o 14 días, situación que dependió de las condiciones ambientales presentes en la zona. En la tabla 5, se presenta con mayor detalle los tratamientos evaluados.

Tabla 5 Descripción de los tratamientos evaluados

Número de tratamiento	Descripción del tratamiento
1	Diacol Capiro sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de los 52 DDS.
2	ICA Única sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de los 52 DDS.
3	Pastusa Suprema sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de los 52 DDS.

4 Superior sin manejo químico para *P. infestans* a partir de los 52 DDS.

3.2.5 Evaluación de incidencia y severidad

La Severidad del tizón tardío se evaluó en 10 plantas por parcela experimental que se marcaron al inicio del ciclo vegetativo, el área enferma se determinó a partir del contraste entre el área con presencia de síntomas representativos de la enfermedad tizón tardío como: manchas de color café con apariencia húmeda y estructuras de color blanquecino en el envés de las hojas, en contraste con el tejido que aún se encuentra verde, esta evaluación se realizó cada 7 días, la escala de severidad a usar fue la propuesta por James *et al.*, 1971 y modificada en ensayos de Pérez & Forbes (2008), quienes ilustran niveles de severidad de 1%,10%, 25% y 50%, mediante la técnica de extrapolación se continuó construyendo el progreso de la enfermedad hasta niveles del 100% en el total de las plantas evaluadas (tabla 6).

Tabla 6 . Escala de severidad Tizón tardío.

Valores de la escala	Nivel de daño promedio (%)	Nivel de daño limites (%)	Síntomas
1	0	0	No se observan síntomas característicos de la enfermedad
2	5	1-5	Las plantas parecen sanas, sin embargo, se observan síntomas iniciales con cierta dificultad.
3	10	5-15	Las plantas parecen sanas, pero las lesiones son fácilmente vistas al observar de cerca
4	25	15-35	La gota es fácilmente vista en la mayoría de las plantas, alrededor del 25% del follaje presenta síntomas de la enfermedad.
5	50	35-65	La parcela luce verde, pero todas las plantas están afectadas, las hojas inferiores están muertas, alrededor del 50% del área foliar está afectada.

6	75	65-85	La parcela luce verde con manchas pardas. Alrededor del 75% de cada planta está afectada, las hojas de la mitad inferior están destruidas.
7	90	85-95	La parcela no está predominantemente ni verde ni pardo, solo las hojas superiores están verdes, muchos tallos presentan lesiones extensas,
8	97.5	95-100	Algunas zonas verdes, la mayoría de los tallos están lesionados o muertos.
9	100		

Fuente: James *et al.*, (1971) Modificada por Pérez & Forbes (2008).

3.2.6 Cálculo de área bajo la curva de Progreso de la enfermedad

En las etapas fenológicas comprendidas entre floración y senescencia, se realizó la evaluación de severidad, junto con la fecha de cada registro de evaluación en cada una de las parcelas experimentales establecidas. Con estos datos se procedió a calcular el AUDPC (Area under the disease progress curve), este cálculo permite estimar la cantidad de enfermedad a través del ciclo de cultivo, a partir de los niveles de severidad registrados durante el periodo de evaluación. Este, se expresa en porcentaje por día/semana/mes y la forma de interpretación es; entre más alto el valor AUDPC, más susceptible el genotipo evaluado, la fórmula usada para el cálculo de AUDPC se muestra a continuación:

$$ABCDE = \sum_{i=1}^{Ni-1} ((Yi + Yi + 1)/2) * (ti + 1 - ti)$$

Donde: Y_i : lectura inicial de severidad; Y_{i+1} : segunda lectura de severidad; T_{i+1} : tiempo inicial más uno; T_i : tiempo inicial.

3.2.7 Cálculo de escala de severidad

Basados en los datos obtenidos en la evaluación de severidad y usando la metodología propuesta por Yuen & Forbes (2009), se realizó el cálculo del valor de severidad y la clasificación en la escala propuesta, la variedad referente que se usó como susceptible fue la variedad Diacol Capiro, la fórmula usada fue la siguiente:

$$Sx = Sy \left(\frac{Dx}{Dy} \right)$$

Sy: valor de la escala de susceptibilidad, **Dy**: medida de la enfermedad observada (AUDPC o rAUDPC) testigo susceptible, y **Sx**: valor de la escala de susceptibilidad calculada, **Dx**: la medida de la enfermedad observada.

3.2.8 Diseño Experimental y análisis estadístico

Para la evaluación de la reacción de los materiales ante el ataque de *P. infestans* se estableció un diseño de bloques completos al azar, con 4 repeticiones, para un total de 16 parcelas experimentales, cada parcela experimental fue de 24 m², el experimento en total ocupó 384 m², el manejo químico de la enfermedad se suspendió a los 52 dds, periodo que coincide con la etapa fenológica de floración y tuberización. La evaluación de incidencia y severidad se realizó desde la suspensión del control químico, hasta la entrada en senescencia de las plantas en las diferentes parcelas evaluadas.

Para el análisis de la información se usaron los programas estadísticos SPSS y R- Studio, donde para la variable severidad, se realizó a través de métodos cuantitativos usando análisis de varianza.

Para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, para la variable AUDPC, se realizó un análisis de varianza con

comparación de medias a través del método Tukey en las variables que presentaron diferencias estadísticas. Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación entre variables, usando el método de Pearson, el cual se usa para correlacionar variables cuantitativas, para de esta manera seleccionar variables fuertemente correlacionadas, para realizar un modelo predictivo a través del uso de regresión.

3.3 Resultados

3.3.1 Variables climáticas

Con el registro de las variables climáticas fue posible evidenciar comportamientos diferenciales en las variables severidad e incidencia de la enfermedad con respecto a la humedad relativa, precipitación y temperatura, presentes durante los dos ciclos de evaluación.

Durante el primer ciclo de evaluación comprendido entre el 25 de junio al 10 de diciembre de 2018 (169 días de siembra a cosecha) (figura 1 y figura 2) se presentó una temperatura promedio de 12,87°C, con una temperatura máxima promedio de 19,15°C y mínima promedio de 6,6°C, precipitación acumulada de 260,85 mm mal distribuidos, los valores más altos de precipitación se presentaron después de 100 dds, y humedad relativa promedio de 80,13%. Durante este ciclo de cultivo la severidad no fue significativa ($p < 0,449$), sin embargo el % de incidencia si fue estadísticamente significativo ($p < 0,01$). Fue posible observar que el establecimiento y desarrollo de la enfermedad fue lento y poco agresivo, en consecuencia, a las condiciones ambientales adversas que se presentaron para el desarrollo de la enfermedad, especialmente; baja precipitación acumulada, distribución errática de lluvias, humedad relativa inferior al 80%, temperatura promedio cercana a 13 °C y temperatura máxima promedio cercano a 19°C, la cual fue más alta en comparación con el ciclo de evaluación 2.

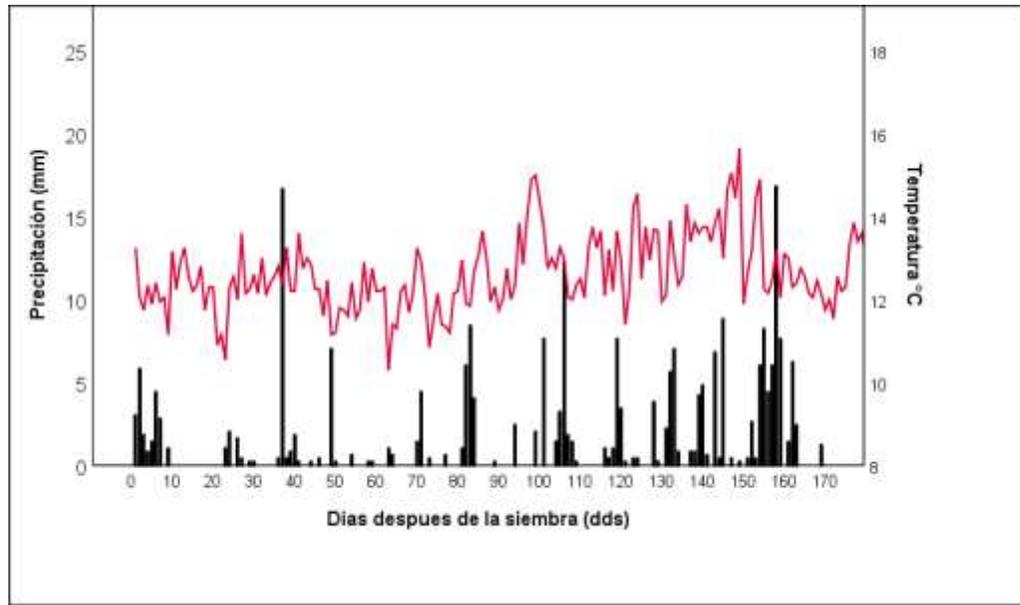


Figura 1 Precipitación (mm) y temperatura promedio (°C) durante el primer ciclo de evaluación.

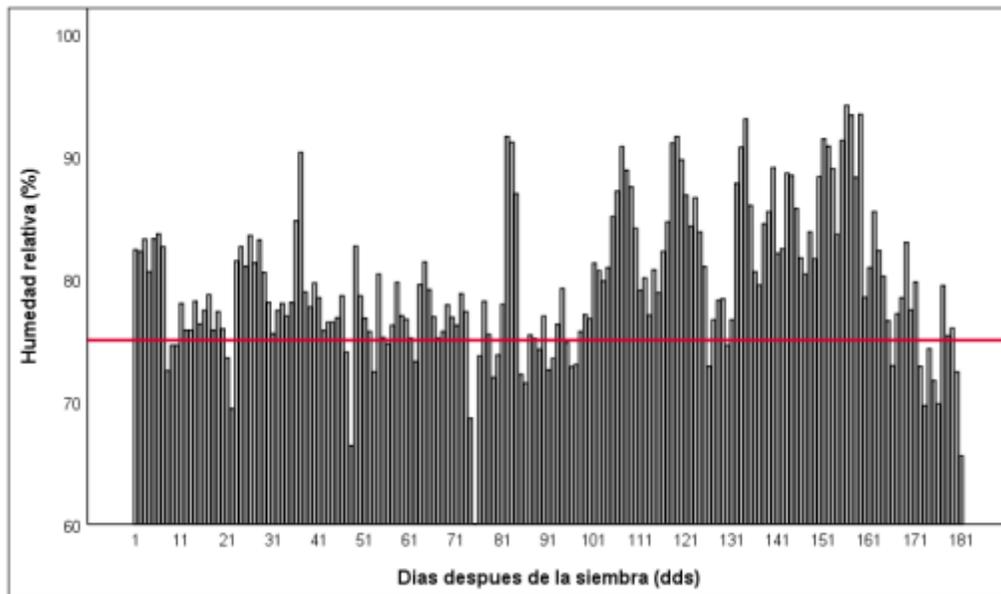


Figura 2 Humedad relativa en % durante el primer ciclo de evaluación.

El segundo ciclo de evaluación, periodo comprendido entre el 4 de marzo y el 22 de agosto de 2019, 166 días desde la siembra a la cosecha, se presentaron las siguientes condiciones ambientales (figura 3 y figura 4); temperatura promedio de 13,01°C,

temperatura máxima promedio de 19,06°C y temperatura mínima promedio de 7,13°C, precipitación acumulada de 340,04 mm, con lluvias bien distribuidas durante el desarrollo del experimento y una humedad relativa promedio del 78,82%, estas condiciones en conjunto fueron más favorables para el inicio y desarrollo de la enfermedad tizón tardío en los 4 cultivares evaluadas, donde para la variable incidencia y severidad se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,000$) durante este ciclo de evaluación.

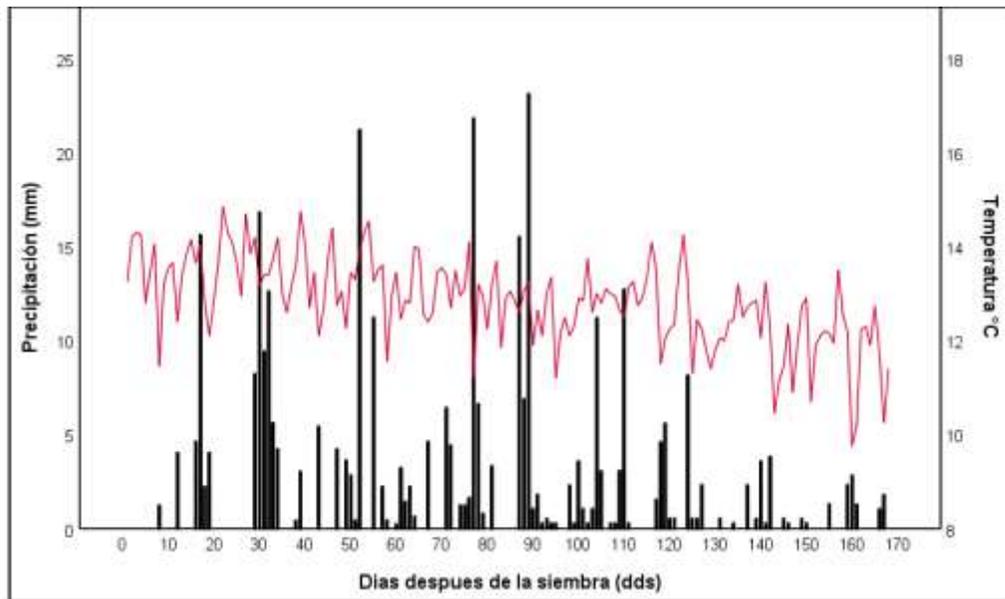


Figura 3 Precipitación (mm) y temperatura promedio (°C) durante el segundo ciclo de evaluación.

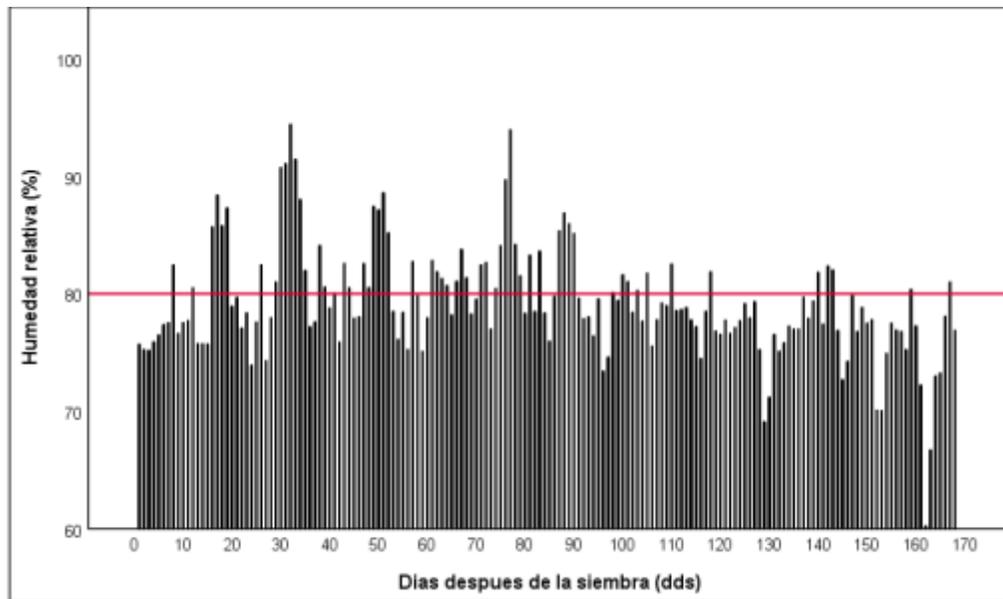


Figura 4 Humedad relativa (%) durante el segundo ciclo de evaluación

En la figura 5, es posible observar el desarrollo de la enfermedad, expresado en % de daño, durante el primer ciclo de evaluación, donde se evidenció un desarrollo lento de la epidemia, reflejado en un bajo nivel de daño, causado por la enfermedad en los 4 materiales evaluados. Se infiere que el desarrollo de la enfermedad, durante el primer ciclo de cultivo, se vio afectado, principalmente por la baja humedad relativa inferior a 80%, baja precipitación, mal distribuida durante los días de evaluación, es válido hacer énfasis en que la precipitación juega un rol muy importante en el desarrollo de la enfermedad ya que interactúa directamente con la humedad relativa, además de facilitar el movimiento y la entrada del patógeno a la planta debido a la generación de láminas de agua tanto en el suelo como en la hoja, favoreciendo el movimiento y metabolismo del patógeno, y por ende el desarrollo y evolución de la epidemia de tizón tardío.

La variable temperatura promedio en °C, presentó un pico alto de temperatura entre los días 80 a 100 después de siembra, donde el valor promedio estuvo cerca de 14 °C, es importante resaltar que las condiciones ambientales presentes en conjunto representan una condición típica de época niño, donde se presentó baja precipitación y temperaturas superiores, condiciones adversas para el desarrollo de la epidemia de tizón tardío.

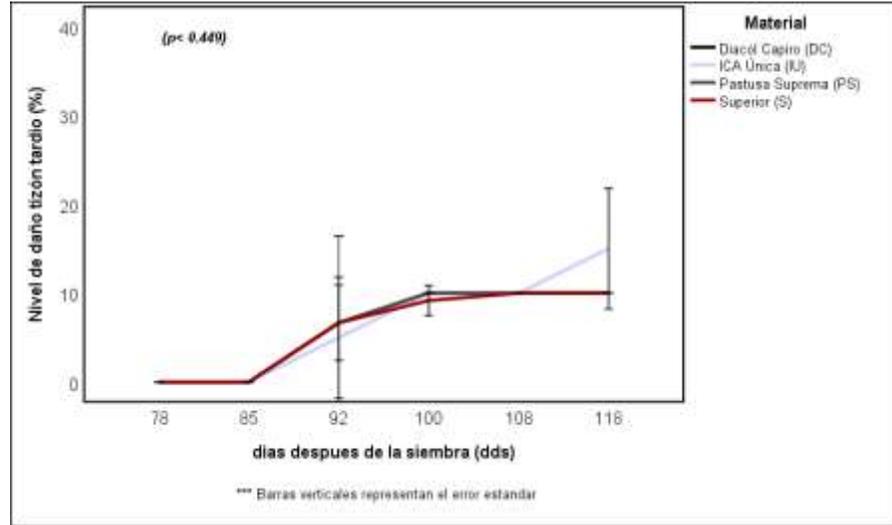


Figura 5 Nivel de daño por tizón tardío (%) en 4 materiales comerciales de papa.

En la figura 6, y considerando los datos de las figuras 3 y 4, referentes a condiciones climáticas presentes durante el ciclo 2 de evaluación (primer semestre de 2019), se puede observar que se presentaron condiciones de mayor humedad relativa durante la mayor parte del ciclo de evaluación, la cual fue superior a 80% durante tiempos prolongados, además se presentó una precipitación más alta y mejor distribuida en comparación con el ciclo 1 de evaluación, acompañado de temperatura máxima y promedio, inferior a la que se presentó durante el ciclo 1 de evaluación. Condiciones que en conjunto favorecieron el desarrollo de la enfermedad, reflejado en un mayor nivel de daño, presente en los 4 materiales evaluados. Considerando el comportamiento diferencial del nivel de daño, en los 2 ciclos de evaluación, podemos afirmar que la precipitación y temperatura, juegan un rol fundamental en la ocurrencia y evolución de epidemias del tizón tardío, variables con mayor variabilidad entre los dos ciclos de evaluación.

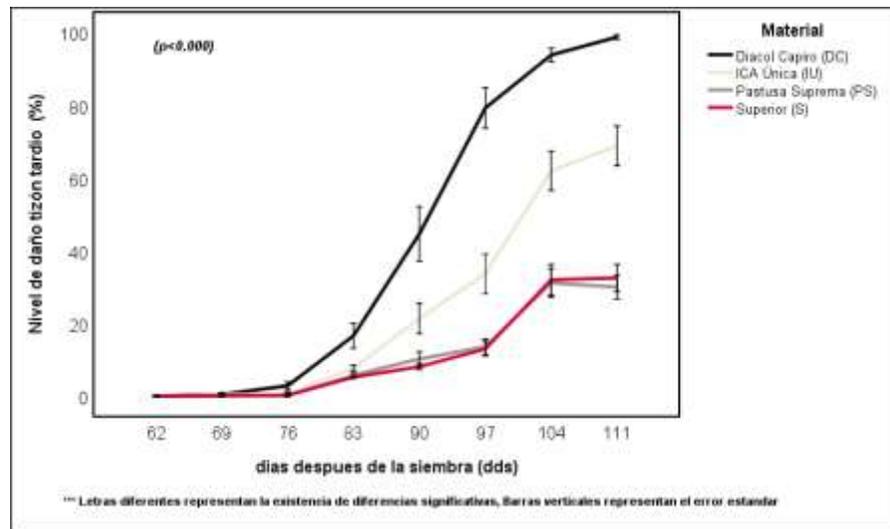


Figura 6 Nivel de daño por tizón tardío (%) en 4 materiales comerciales de papa.

Por otra parte, el conjunto de condiciones climáticas presentes durante el segundo ciclo de evaluación, permitieron observar un mejor desarrollo de la epidemia, para el caso de la variedad Diacol Capiro, la cual fue la primera en presentar plantas con síntomas de la enfermedad hacia el día 62 dds, 10 días después de la suspensión del tratamiento químico de la enfermedad, el nivel de incidencia en esta variedad aumento considerablemente desde los 69 a 90 dds, momento en el cual el 100% de las plantas presentaron síntomas de la enfermedad tizón tardío. Para la variable severidad fue posible observar que esta variedad presentó un nivel de daño del 100% (9 en la escala) aproximadamente a los 110 dds, el periodo de mayor avance de la enfermedad se dio entre los días 76 a 104 dds, donde paso de un 5 a un 90% de plantas afectadas por la enfermedad, importante resaltar que el periodo de mayor crecimiento de síntomas coincidió con un periodo de baja temperatura (inferior a 13°C), presencia de lluvias y humedad relativa superior al 80%. Las condiciones climáticas que favorecen el desarrollo de la enfermedad tizón tardío en la zona andina son temperaturas moderadas entre 12 a 18 °C, alta humedad relativa, niebla, lluvias y sol intenso, así como la presencia constante de inóculo resultado de la siembra escalonada de papa durante todo el año, además de la siembra de variedades susceptibles al ataque del patógeno (Revelo, Andrade-Piedra, & Garcés, 1997; Liljeroth et al 2016; Kessel et al., 2018).

En cuanto a la variedad ICA Única, durante el primer ciclo de evaluación (Figura 5), se presentaron condiciones adversas para el desarrollo de la enfermedad, el mayor % de plantas con síntomas 43,75% se presentó a los 108 dds. Para el ciclo de evaluación 2 (figura 6), se evidenciaron las primeras plantas con síntomas 69 dds, el número de plantas enfermas aumento considerablemente entre los días 76 a 97 dds, alcanzando valores de 100% de plantas con síntomas de la enfermedad Tizón tardío. Durante el ciclo de evaluación 2, presentó un nivel de daño de 6 (75 % de área afectada) 111 dds, el periodo de mayor aumento del nivel de daño se dio entre los días 83 a 104 dds, pasando de 10 a 60% de área afectada, este aumento del nivel de daño coincidió con las temperaturas promedio más bajas presentes durante el periodo de evaluación, acompañado de lluvias y humedad relativa cercana al 85%, condiciones que favorecen el desarrollo de la epidemia para esta variedad.

El clon Superior, presentó un comportamiento muy similar a Pastusa Suprema, donde; durante el ciclo 1 de evaluación (Figura 5), la mayor incidencia de la enfermedad 48,43% se presentó 118 dds, para el segundo ciclo de evaluación (Figura 6), los primeros síntomas, se presentaron 69 dds, donde se dio un crecimiento vertiginoso entre el día 76 y 97 después de la siembra, en esta última fecha se logró observar el 100% de las plantas con síntomas característicos de la enfermedad. En el segundo ciclo de evaluación a los 135 días se alcanzó el valor máximo de porcentaje de área afectada con un 45%, el periodo de mayor crecimiento al igual que en Pastusa Suprema fue 83 a 104 dds, pasando de 5 a 30% de área afectada.

Después de analizar el efecto de las condiciones climáticas prevalentes en C.I Obonuco durante los 2 ciclos de evaluación, podemos afirmar el rol preponderante del clima en la interacción entre *P. infestans* y materiales comerciales ampliamente sembrados en el departamento de Nariño, en conjunto, la condición climática identificada para la ocurrencia de eventos relacionados con el ciclo de la enfermedad como; entrada en contacto, penetración, establecimiento, reproducción, entre otros, se vieron favorecidos por la presencia de humedad relativa superior al 80%, constante durante varios días, precipitación semanal acumulada de 40 mm, bien distribuidos, y el factor que tal vez se considera más influyente para el desarrollo de la epidemia es la temperatura, se pudo establecer que en conjunto con las condiciones mencionadas anteriormente, sumado a

temperaturas promedio inferior a 13°C, durante varios días y máximas cercanas a 16°C, son condiciones que se consideran como predisponentes para la ocurrencia de la enfermedad tizón tardío, considerada la más limitante en el sistema productivo papa, a nivel mundial (Shakya et al., 2015).

3.3.2 Comparación resistencia entre materiales

La susceptibilidad y la resistencia de las plantas a los patógenos están estrechamente relacionadas, pero la cuantificación de cualquiera de ellas depende de diferentes supuestos, el AUDPC es una variable que estima la cantidad de enfermedad a lo largo del ciclo de cultivo, el AUDPC se expresa en porcentaje por días (es decir, la acumulación diaria del porcentaje de los valores de infección) y se interpreta directamente sin transformación, cuanto más alto es el AUDPC, más susceptible es el clon o variedad, (Yuen & Forbes 2009, Forbes et al., 2014).

Por otro lado, fue posible observar la no existencia de diferencias estadísticas durante el primer ciclo de evaluación entre los materiales evaluados ($p < 0,355$), sin embargo, es válido resaltar que la variedad Diacol Capiro presentó los valores más altos de AUDPC (376,25), en comparación con los otros materiales comerciales evaluados durante el primer ciclo de cultivo, ICA Única (257,5), Pastusa Suprema (276,25) y Superior (232,5).

Esta situación cambió en el segundo ciclo de evaluación ($p < 2e-16$), en la figura 7, donde letras diferentes sobre cada barra representan la existencia de diferencias estadísticas entre los tratamientos, las barras verticales delgadas representan el error experimental y la barra gruesa el valor obtenido para la variable AUDPC, se puede observar como la variedad Diacol Capiro presentó el mayor AUDPC con valores de 1855,87, la variedad ICA Única con 1068,15, mientras que la variedad Pastusa Suprema 497,43, el clon Superior presentó un valor de 491,75. Por lo tanto, se puede concluir que el desarrollo de la epidemia de la enfermedad Tizón tardío es más severa en la variedad Diacol Capiro, seguido de ICA Única y el crecimiento y desarrollo más lento lo presentan los materiales Pastusa Suprema y Superior con valores mucho más bajos que el presentado por las variedades Diacol Capiro e ICA Única, cuando se presentaron condiciones ambientales propicias para el desarrollo de la epidemia, como fueron las condiciones presentes durante el primer semestre de 2019.

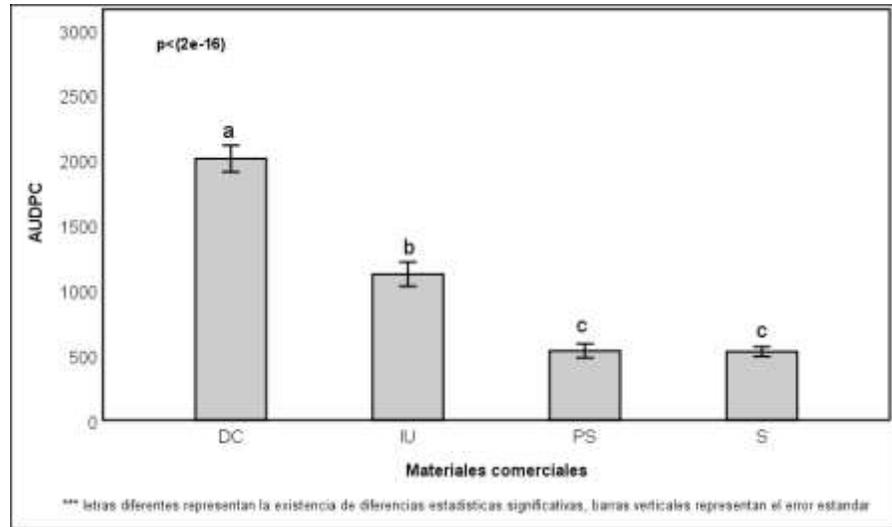


Figura 7 AUDPC de 4 materiales comerciales de papa en interacción con Tizón Tardío.

Teniendo en cuenta la información anteriormente discutida, contrastando el desarrollo de la epidemia y AUDPC obtenido en el segundo ciclo de evaluación, a partir del registro de severidad en diferentes días de evaluación, se puede observar un comportamiento diferencial del patógeno *P. infestans* en interacción con los diferentes genotipos de papa evaluados en el municipio de Pasto.

En la figura 4 se puede ratificar visualmente lo observado en las figuras anteriores, ya que es evidente el desarrollo diferencial de la epidemia de tizón tardío causada por una cepa local de *P. infestans*, la figura 8 muestra el grado de daño presente en las diferentes variedades, es evidente que el daño es mayor en las parcelas de Diacol Capiro y menor en Pastusa Suprema y Superior, evidenciando un efecto de la genética del huésped sobre el desarrollo de la epidemia, a los 91 días después de siembra se ve que la parcela de Diacol Capiro prácticamente presenta un 100% de daño, los materiales comerciales Pastusa Suprema y Superior presentaron el menor nivel daño (10% a los 91 dds), la variedad ICA Única presentó un comportamiento intermedio entre Diacol Capiro y Pastusa Suprema-Superior, con un nivel de daño cercano al 20%. En la figura 8 y 9, es posible observar una expresión diferencial de síntomas presentes en las diferentes parcelas de evaluación, las cuales presentan diferentes grados de avance de la enfermedad, en Diacol Capiro e ICA Única, la enfermedad afectó hojas y tallos, mientras que en Pastusa Suprema

y Superior el daño a los 91 dds solo estaba presente en las hojas, por lo tanto es válido inferir que la velocidad de crecimiento y colonización del patógeno en el huésped varía de acuerdo a la genética del hospedero, frenando de cierta manera el avance de la enfermedad.



Figura 8 Síntomas enfermedad tizón tardío en 4 variedades comerciales de papa, **a.** Diacol Capiro, **b.** ICA Única, **c.** Pastusa Suprema y **d.** Superior, 91 dds.



Figura 9 Síntomas de Tizón tardío en 4 materiales comerciales **a.** ICA UNICA, **b.** Diacol Capiro, **c.** Pastusa Suprema y **d.** Superior, 91 días después de siembra.

La susceptibilidad y la resistencia de las plantas a los patógenos son polos opuestos de la respuesta de la planta a un estímulo causado por el patógeno, una de las maneras más comunes para cuantificar esta respuesta es usando el porcentaje de área afectada por el patógeno y extender esto en tiempo calculando el área bajo la curva de progreso de la enfermedad (AUDPC), estas cifras pueden utilizarse para calcular la susceptibilidad, la susceptibilidad de una planta puede ser utilizada para hacer inferencias sobre su resistencia (Yuen & Forbes 2009).

La escala de susceptibilidad, por lo tanto, es una simple transformación de la medida de la enfermedad, una ventaja relacionada es que el desarrollo cero de la enfermedad representa el nivel más alto de resistencia en teoría y en la práctica, mientras que la susceptibilidad es más abierta, al menos en teoría. Así, la línea de regresión desarrollada a partir de un análisis de susceptibilidad ascendente pasaría por el origen, donde la enfermedad cero representa el nivel más alto de resistencia, si se escogen cuidadosamente los genotipos de referencia, los cultivares más susceptibles pueden recibir una medida de 9, la interpretación de la escala propuesta es que los números ascendentes representan una susceptibilidad creciente (Yuen & Forbes 2009).

Para el caso de este experimento, los resultados observados, sobre todo durante el segundo ciclo de evaluación, indican que la variedad Diacol Capiro, presenta altos niveles de susceptibilidad, ratificando lo expuesto por Núñez (2011), quien considera a Capiro, como la variedad colombiana mejorada más susceptible a *P. infestans*, considerando la escala propuesta de Yuen & Forbes (2009) y los resultados del segundo ciclo de evaluación, donde fue posible observar la aparición y avance de síntomas característicos de la enfermedad, en la figura 10 se puede observar la clasificación de susceptibilidad que obtuvieron los diferentes materiales evaluados durante la presente investigación.

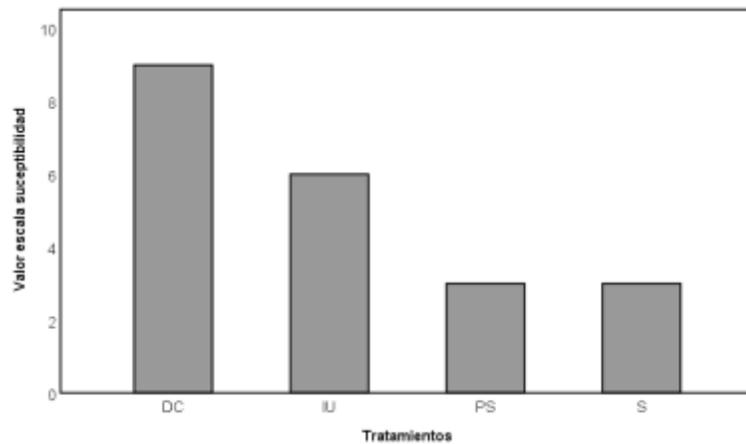


Figura 10 Clasificación de resistencia a *P. infestans* según escala de Yuen y Forbes 2009.

3.3.3 Modelo de regresión lineal

Una vez analizados los datos obtenidos durante los 2 ciclos de evaluación, y considerando que la expresión de la enfermedad durante el primer ciclo de evaluación no fue severo y tardío en los 4 materiales evaluados, se decide profundizar en el análisis del segundo ciclo de evaluación, donde si fue posible y evidente la expresión diferenciada de la enfermedad entre los 4 materiales y la existencia de diferencias estadísticamente significativas en variables como AUDPC, Severidad e incidencia con respecto al material de siembra, por lo tanto se decide hacer análisis por variedad de acuerdo al comportamiento diferencial ante la enfermedad en los 4 materiales evaluados.

Por lo tanto y con el objetivo de determinar la influencia de ciertas variables climáticas en la ocurrencia y desarrollo de la enfermedad en los diferentes materiales evaluados se realizó una prueba de correlación usando el método de Pearson. Usando este criterio, se seleccionó como significativa la relación existente entre la severidad de la enfermedad y la temperatura promedio (°C), inferencia realizada principalmente por el valor R calculado entre las variables, situación que se puede observar con mayor detalle en la tabla 6.

Tabla 7. Variables con relación significativa.

Variedad	Variabes correlacionadas	Valor (R)	p-value
Diacol Capiro (DC)	Severidad-Temperatura promedio °C	-0.70*	2.2e-16**
	Incidencia- Temperatura promedio °C	-0.80**	2.2e-16**
ICA Única (IU)	Severidad-Temperatura promedio °C	-0.68*	2.2e-16**
	Incidencia- Temperatura promedio °C	-0.83**	2.2e-16**
Pastusa Suprema (PS)	Severidad-Temperatura promedio °C	-0.68*	2.2e-16**
	Incidencia- Temperatura promedio °C	-0.80**	2.2e-16**
Superior (S)	Severidad-Temperatura promedio °C	-0.68*	2.2e-16**
	Incidencia- Temperatura promedio °C	-0.79*	2.2e-16**

* asociación moderada Significativo * p-value < 0,05

**asociación alta significativo ** p-value <0,01

Por lo tanto y considerando la información anteriormente descrita, especialmente el valor p-value, es posible reafirmar la existencia de interacción significativa entre la severidad, con la temperatura promedio, factor ambiental considerando como relevante en la ocurrencia de epidemias del Tizón tardío en el municipio de Pasto, con estas variables se procedió a realizar un modelo predictivo de tipo cuadrático, el cual permite realizar una predicción de como la fluctuación de la temperatura, genera ese avance del nivel de severidad, situación que se constituye en un factor determinante en la ocurrencia de epidemias de esta enfermedad. Este tipo de análisis se usa para predecir un amplio rango

de fenómenos, dentro de los que se incluye la ocurrencia y evolución de epidemias de diferentes problemas sanitarios en diferentes sistemas productivos, Figura 11, es posible observar el modelo de regresión, ajuste y significancia para la variedad Diacol Capiro variedad comercial ampliamente sembrada y que durante este estudio demostró características de susceptibilidad bajo las condiciones ambientales presentes durante el ciclo 2 de evaluación.

En la figura 11, se puede observar claramente que existe un ajuste medio entre los datos, representada en el cálculo del coeficiente de determinación o R^2 , el cual fue de 0.66, la selección del modelo se da al evaluar y comparar el R^2 y el error estándar de estimación, que para este modelo en específico estas variables presentaron el mayor R^2 y el menor error estándar, comparación realizada entre modelos.

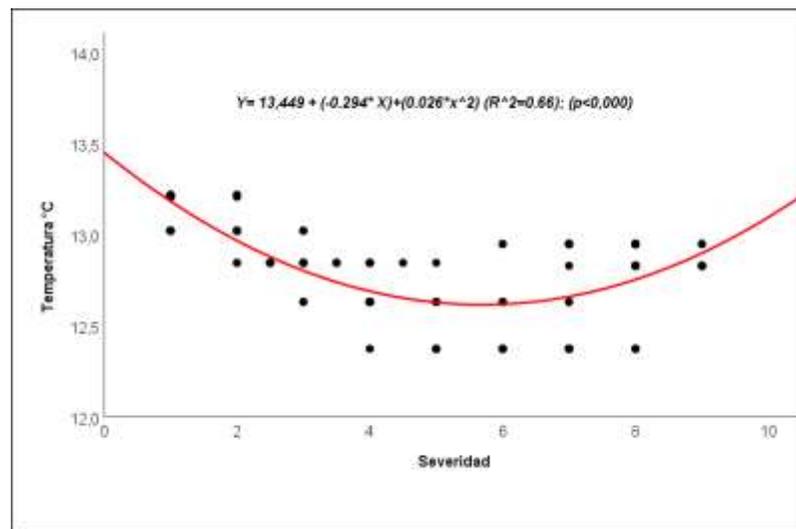


Figura 11 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad Diacol Capiro

Considerando la información anteriormente descrita, donde se puede observar que temperaturas cercanas a 13°C , generan un aumento en la velocidad de aparición de síntomas y aumento de la severidad en el genotipo Diacol Capiro, por lo tanto, se recomienda monitorear estrictamente la variable Temperatura $^{\circ}\text{C}$ promedio, cuando esta presenta valores de 13°C es necesario verificar la presencia de variables como humedad relativa superior a 80% y presencia de precipitación bien distribuida, si estas condiciones están presentes, se debe aumentar el rigor del monitoreo en campo y muy probablemente recurrir a un plan de aplicaciones iniciando con fungicidas de tipo protectantes (Cordoba

et al., 2021), que frenen o aplacen la presencia de síntomas en la variedad Diacol Capiro, donde si las condiciones se mantienen y hay aparición de síntomas, sería necesario iniciar con un plan de aplicación donde el fungicida usado sea de tipo curativo y sistémico, resaltando la necesidad de mantener los niveles de la enfermedad en 0%, debido al rápido y devastador avance de los síntomas en esta variedad (Cordoba et al., 2021).

En la figura 12, es posible observar el modelo de regresión para la variedad ICA Única, la cual vale la pena resaltar presentó características de susceptibilidad moderada a la enfermedad, la cual presentó un nivel de daño inferior a Diacol Capiro, la cual se considera significativa, por lo tanto y considerando los datos obtenidos, al igual que en la variedad Diacol Capiro se recomienda iniciar planes de monitoreo estricto para determinar la existencia de condiciones de HR superior al 80%, situación que indiquen la necesidad de iniciar planes de aplicación de fungicidas de tipo protectantes, hasta la aparición de los primeros síntomas, donde se requerirá cambio a un fungicida de tipo curativo.

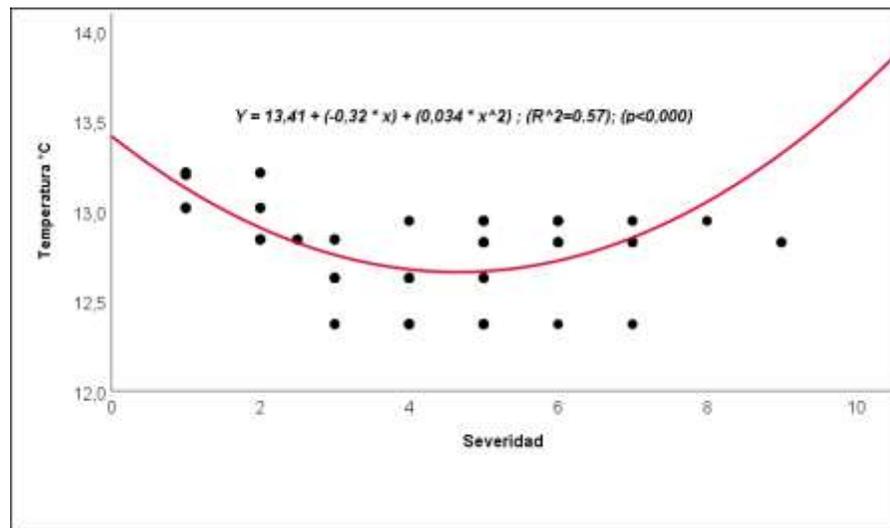


Figura 12 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad ICA Única.

En la figura 13, podemos observar el modelo de regresión calculado para la variedad Pastusa Suprema, variedad que mostró características de resistencia y donde fue posible observar un efecto diferente de la temperatura en el desarrollo de la epidemia, donde bajo las mismas condiciones ambientales, la aparición de síntomas y el crecimiento de estos síntomas fue mucho más lento, donde el mayor crecimiento se dio cuando la temperatura alcanzó valores cercanos a 12,5°C, es posible inferir que en este material, se podría

requerir menor temperatura, en conjunto con las demás variables climáticas, necesarias para la ocurrencia y avance de la enfermedad Tizón Tardío, es necesario iniciar planes de monitoreo bajo las mismas condiciones mencionadas anteriormente, donde si la temperatura se acerca a 12.5°C, durante varios días, con condiciones de alta humedad, se recomienda el inicio de un plan de aplicación de fungicidas protectantes, donde se sugiere que la frecuencia de aplicación requerida, va a ser mucho mayor, logrando el objetivo de mantener los niveles de la enfermedad, en niveles de alrededor del 5%, como nivel tolerable de enfermedad para este material en concreto.

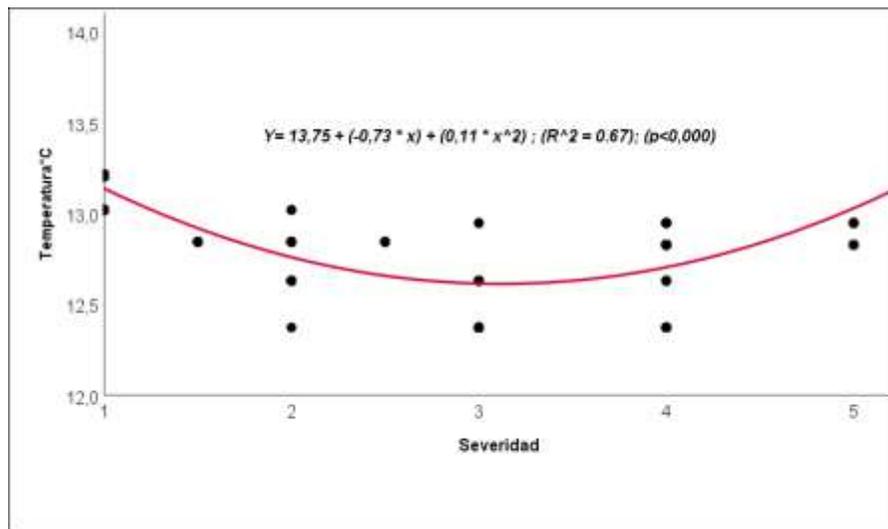


Figura 13 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad Pastusa Suprema.

En la figura 14, podemos observar el modelo de regresión calculado para el material comercial superior, donde es importante resaltar que el comportamiento de este fue similar al de la variedad Pastusa Suprema, resaltando la necesidad de condiciones climáticas más específicas o diferentes, para que exista un desarrollo de la enfermedad, por lo tanto Pastusa Suprema como Superior, se convierten en opciones y pilares fundamentales en el manejo del tizón tardío, bajo las condiciones climáticas de la zona productora de Pasto, donde es válido resaltar que el avance de la enfermedad en estos 2 materiales fue mucho menor al encontrado en Diacol Capiro e ICA Única.

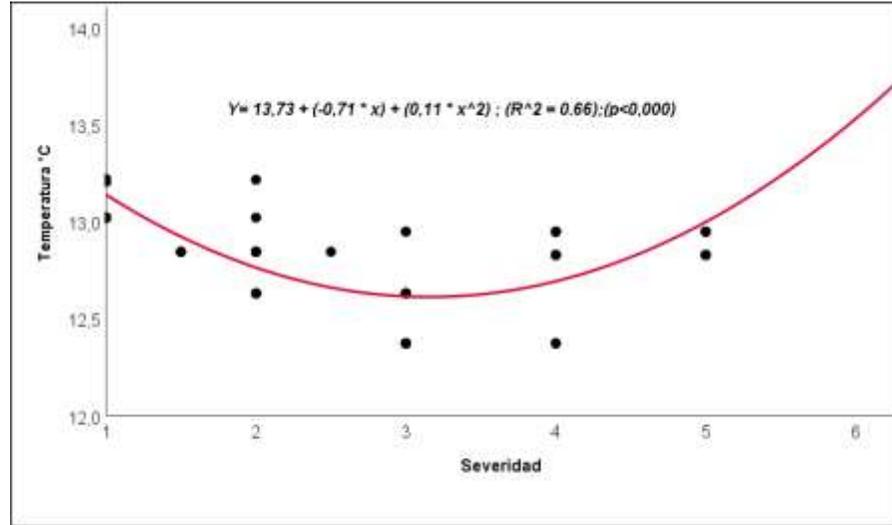


Figura 14 Modelo de predicción de severidad según temperatura para variedad material comercial Superior.

3.4 Discusión

El registro y posterior análisis de variables climáticas deben constituir un pilar fundamental en la toma de decisiones técnicas enfocadas con el manejo agronómico y sanitario del cultivo (Kessel et al., 2018), variables climáticas como la humedad relativa, precipitación y la temperatura, son factores relevantes para el buen desarrollo de la epidemia de Tizón Tardío, en estudios realizados por Sparks et al., (2014), se observó que para la cepa US-8 de *P. infestans*, se presentó un pico de formación de lesiones cuando la temperatura se ubicó alrededor de 12°C, el mayor número de lesiones se observó a 15,5°C para la cepa US-23, para ambas cepas, una pequeña fluctuación de 5°C en la temperatura alrededor de la misma media aumentó el número de lesiones (Shakya, Goss, Dufault & Buggen 2015).

Aunque la temperatura media durante un período de 24 horas es, por ejemplo, de 15°C para los procesos que duran más de un día, la media real durante el período de esporulación e infección (generalmente menos de 12 h por la noche) es inferior a 15°C, una temperatura media de 24 horas de 15°C con una amplitud diaria de 5°C da como resultado una temperatura nocturna más cercana a la temperatura constante óptima, mejorando la esporulación y la infección (Shakya et al., 2015), a temperaturas más altas,

se requieren períodos más largos de humedad relativa para que se produzca la infección, situación que fue posible observar durante el primer ciclo de evaluación donde a temperaturas superiores y humedad relativa inferior a 80% durante varios días, no se presentaron síntomas de la enfermedad, debido a que la combinación de estos dos factores, generan una condición desfavorable para el patógeno, con base en estos resultados y considerando lo expuesto por Shakya et al., (2015) la tasa de crecimiento de la lesión se ve afectada por las temperaturas diurnas más que por las nocturnas, en condiciones de alta temperatura durante el día las lesiones sufren un proceso de desecación, afectando la tasa de crecimiento de la lesión, además de procesos de incubación y esporulación.

El control del tizón tardío durante los últimos 50 años se ha basado principalmente en el uso de fungicidas, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo, los límites económicos y ambientales de los programas de fumigación sistemática y frecuente se han alcanzado y se está fomentando un cambio hacia estrategias basadas en aplicaciones razonadas de plaguicidas combinadas con control genético (materiales resistentes) (Andrison, Pelle & Ellissèche 2006). Se espera que la resistencia varietal pueda desempeñar un papel importante en el control de la enfermedad (Forbes 2012; Shepers et al., 2009, Kessel et al., 2018). Sin embargo, la resistencia no es lo suficientemente alta como para evitar la necesidad de proteger la mayor parte de la superficie plantada de papa con aplicaciones regulares de fungicidas (Kessel et al., 2018).

Las proteínas R son responsables del reconocimiento de las proteínas patógenas llamadas efectores, que conducen a la reacción hipersensible (HR) y a la prevención de la infección (Stefanczyk, Sylwester, Brylinska, & Sliwka 2017). Los efectores son secretados por los patógenos de plantas, reconociendo o inhabilitando los productos de los genes de resistencia (Chen & Halterman 2017). Sin los mecanismos de resistencia la planta no puede responder al ataque del patógeno y los mecanismos de infección y colonización del huésped quedan totalmente funcionales (Burbano 2020). En el caso de *P. infestans*, es importante resaltar que este tiene gran capacidad de adaptación, la cual reside en su genoma y su alta capacidad reproductiva, como resultado la adaptación es el mecanismo por el cual *P. infestans* supera en cortos periodos de tiempo los genes R (Kessel et al., 2018),

La aparición de formas modificadas de los efectores, hacen que el patógeno pueda evadir el reconocimiento por parte de los genes R debido a mutaciones simples, lo que resulta en proteínas con secuencias de aminoácidos modificadas (Stefanczyk et al., 2017). Un ejemplo de efector es el AVR2, un efector citoplasmático de *P. infestans*, el cual es la proteína de avirulencia que reconoce a los genes de resistencia del grupo R2 de solanáceas con origen centro americano (México). La sobreexpresión de la AVR2 en plantas de papa resulta en el aumento de la susceptibilidad a los aislamientos de *P. infestans* y, por consiguiente, AVR2 se considera un efector importante para *P. infestans* (Aguilera et al., 2018). Surgiendo la hipótesis de que las especies huésped desarrollan receptores inmunes que se dirigen a efectores importantes como el AVR2 durante la estrecha coevolución con el patógeno (Aguilera et al., 2018).

Los genes R individuales no han logrado proporcionar una resistencia duradera contra el tizón tardío, debido a que el patógeno tiene un genoma dinámico y rico en repeticiones (Kessel et al., 2018), que le permite evolucionar rápidamente y que se supere la resistencia del huésped mediante la aparición de nuevas razas del patógeno (Jiang et al., 2018). Las formas modificadas de los efectores pueden evadir el reconocimiento por parte de los genes R debido a mutaciones simples, lo que resulta en proteínas con secuencias de aminoácidos modificadas, tal estrategia de evasión está documentada para el efector Avr3a: la proteína Avr3aKI es normalmente reconocida por R3a; sin embargo, la forma alélica con dos cambios de aminoácidos (Avr3aEM) permanece invisible para el gen R correspondiente a una variante alélica con un codón de parada prematuro del efector Avr4 que codifica una versión truncada de la proteína Avr4 que también permanece no reconocida por plantas de papa con el gen R, generando los síntomas característicos de la enfermedad (Stefanczyk et al., 2017).

La resistencia horizontal, cuantitativa o poligénica, es controlada por rasgos cuantitativos (QTL) o por varios genes (Agris, 2005; Mosquera et al., 2008). La generación de genes R de resistencia cuantitativa involucra la duplicación de genes, asegurando de esta manera variación para la obtención de diversidad de genes (Mosquera et al., 2008). Este tipo de resistencia es fácilmente observable a través de diferentes reacciones como lo son: penetración, invasión del tejido del huésped y dificultad en la producción de estructuras reproductivas por parte del patógeno (Burbano 2020). La actuación de los genes es en

conjunto, por lo tanto este tipo de resistencia no es absoluta, pero si influye negativamente en el progreso de la enfermedad en sus diferentes etapas (Mosquera et al., 2008; Burbano 2020), el rendimiento de este tipo de resistencia depende en gran medida de los factores de patogenicidad poligénica, que tienden a evolucionar lentamente, como consecuencia, la resistencia monogénica o cualitativa, es altamente eficiente, pero de corta duración, mientras que la poligénica o cuantitativa, proporciona sólo una protección parcial, pero más duradera (Andrison et al., 2006).

La piramidación o apilamiento de los principales genes R, se considera una estrategia sostenible para mantener la resistencia durante más tiempo (Haesaert et al., 2015; Jiang et al., 2018), mientras que también se ha adoptado el despliegue de la resistencia cuantitativa o poligénica a la enfermedad en los programas de mejoramiento, la cual ha sido descrita como una resistencia horizontal, incompleta, de campo, duradera y de amplio espectro, sin embargo, fenotípicamente, todas las variedades con resistencia poligénica muestran síntomas de la enfermedad reducidos, pero no ausentes, se piensa que este tipo de resistencia podría ser más duradera ya que la presión evolutiva para adaptarse se reduce (Jiang et al., 2018).

Varios genes *R* que confieren resistencia provienen de especies de *Solanum* nativas de México principalmente (Aguilera et al., 2018). El Valle de Toluca en México es un centro de diversidad para *P. infestans* y se sugiere que es su centro de origen (Goodwin et al. 1992, Fry et al. 1993, Grunwald & Flier 2005 Citado por Aguilera et al., 2018). Los genes mexicanos de resistencia (*R*) incluyen *R1-R11* de *Solanum demissum*, *Rpi-blb1*, *Rpi-blb2* y *Rpi-blb3* de *Solanum bulbocastanum*, *Rpi-sto1* y *Rpi-pta* de *Solanum stoloniferum*, *Rpi-amr3* de *Solanum americanum*, *Rpi-mch1* de *Solanum michoacanum* y *Rpi1* de *Solanum pinnatisectum*, en papas de origen Peruano, se han identificado genes R diferentes a los mexicanos, Estos incluyen *Rpi-mcq1*, *Rpi-vnt1*, *Rpi-ber*, *Rpi-chc1*, *Rpi-tar1*, *Rpi-rzc1* de *Solanum mochiquense*, *Solanum venturii*, *Solanum berthaultii*, (Aguilera et al., 2018).

Haciendo un análisis del comportamiento de los diferentes materiales evaluados, podemos decir que materiales como Pastusa Suprema y Superior presentaron una reducción en el nivel de daño y en el avance de la enfermedad, en comparación con la variedad ICA Única y Diacol Capiro. Se pudo observar que la Variedad Pastusa Suprema, sigue conservando niveles de resistencia deseables hacia *P. infestans*, 17 años después de su liberación (Ñústez 2011; Barrientos & Ñústez (2014) , demostrando que la resistencia poligénica o

cuantitativa se convierte en una muy buena opción para reducir el impacto de la enfermedad en el sistema productivo, el clon Superior también constituye una opción para el manejo sostenible de la enfermedad, mostrando niveles de resistencia muy similares a los presentados por Pastusa Suprema, por lo tanto, los 2 materiales constituyen una opción eficiente para el manejo del tizón tardío en la zona productora del municipio de Pasto, optimizando el manejo químico de la enfermedad, contribuyendo con la sostenibilidad del cultivo de papa en la zona de estudio.

Es importante resaltar la degradación de la resistencia que se evidencio en la variedad ICA Única, la cual en reportes de Huarte (2001) era considerada una variedad con altos niveles de resistencia a la enfermedad tizón tardío, dentro de un conjunto de variedades de 5 países de América latina, situación que ha cambiado a través del tiempo y que fue posible evidenciar durante esta investigación donde se presentaron niveles altos de daño, cuando se presentaron condiciones ambientales favorables para el desarrollo de la enfermedad.

En el País según lo reportado por Raigosa et al., (2009), Silva, et al., (2009) y Prieto et al., (2014), está ausente el haplotipo mitocondrial (1a) y el tipo de apareamiento A2, en un número importante de muestras evaluadas, por lo tanto se infiere que la reproducción de tipo sexual no ocurre en el país, sugiriendo la existencia de un solo linaje clonal, generando niveles de variación muy bajos entre la población evaluada, según el resultado de análisis filogenéticos (Raigosa et al., 2009, Silva et al., 2009 y Prieto et al., 2014), por lo tanto y considerando este nivel bajo de variabilidad es válido inferir que el comportamiento ante la enfermedad de los materiales Pastusa Suprema y Superior serán similares en diferentes localidades del departamento, mientras que la variación dependerá principalmente a las condiciones climáticas imperantes en la zona de estudio.

Las variedades resistentes duraderas han tenido una adopción limitada debido a una difusión lenta, baja tasa de multiplicación de semilla y por qué los tubérculos son perecederos (Kessel et al., 2018). En los países industrializados existen industrias de producción de semillas muy desarrolladas que pueden multiplicar y distribuir rápidamente una nueva variedad, estos sistemas no existen en los países en desarrollo y las nuevas variedades generalmente se propagan de agricultor a agricultor, lo que es un proceso mucho más lento y no deseable (Forbes 2012).

También existe la presión de los procesadores para que se cultiven variedades específicas como es el caso de la variedad Diacol Capiro en el país, las cuales generalmente son susceptibles o altamente susceptibles a *P. infestans*, en los países en desarrollo, donde la enfermedad se maneja inadecuadamente por muchas razones (por ejemplo, alta presión de la enfermedad, los problemas de acceso a los fungicidas y el conocimiento inadecuado de los agricultores sobre la dinámica de la enfermedad), sumado a esto muchas de las variedades liberadas como resistentes al tizón tardío han perdido esta resistencia y se han vuelto susceptibles en periodos de tiempo relativamente cortos, esto debido a la evolución del patógeno (Forbes 2012).

Sin embargo y resaltando los resultados encontrados en este estudio, podemos evidenciar la existencia de materiales como Pastusa Suprema y Superior los cuales gozan de una amplia aceptación por parte de los agricultores, además presentan niveles de resistencia adecuados (3 en la escala de Yuen y Forbes (2009)), disponibles para ser sembrados en la zona productora del municipio de Pasto, sin embargo es necesario evaluar los materiales en diferentes localidades productoras de papa en el departamento de Nariño, con el objetivo de exponer los materiales a condiciones climáticas diferenciales, y al ataque de diferentes cepas de *P. infestans*, posiblemente presentes en el departamento de Nariño.

Se sugiere la importancia de realizar ensayos de reacción a *P. infestans* en diferentes localidades del departamento para confirmar la resistencia y susceptibilidad de los genotipos y realizar estudios poblacionales de *P. infestans* en zonas productoras del departamento de Nariño, además se sugiere la importancia de evaluar la interacción entre la genética del hospedero y el control químico, para determinar la relación beneficio costo de usar un material resistente además de evaluar la durabilidad de la resistencia de tipo cualitativo en programas de manejo químico sostenibles de la enfermedad.

Es importante realizar estudios de interacción hospedero-patógeno con diferentes cepas de *P. infestans*, buscando determinar la existencia de diferencias en la interacción y posterior desarrollo de la enfermedad, además es importante realizar una evaluación poblacional de *P. infestans* en el departamento de Nariño, con el objetivo de identificar posibles cepas más virulentas o con resistencia a algún ingrediente activo ampliamente usado para el manejo del patógeno, incluyendo este factor en la toma de decisiones de manejo de la enfermedad.

3.5 Recomendaciones y Conclusiones

La temperatura constituyó un factor fundamental para la ocurrencia y desarrollo de la epidemia de tizón tardío en el municipio de Pasto, las condiciones climáticas que se consideraron importantes para el inicio y desarrollo de la enfermedad fueron; Temperatura promedio inferior a 13°C, Humedad relativa entre 80 a 85% y precipitación acumulada semanal superior a 25 mm, bien distribuidos, si se presentan estas condiciones, es necesario iniciar el plan de monitoreo para tomar las decisiones de manejo más adecuadas, considerando además el nivel de resistencia y susceptibilidad de los materiales sembrados.

Los resultados permitieron observar claramente la ausencia del tipo de resistencia vertical o monogénica, los materiales que mostraron características de resistencia correspondieron al tipo de resistencia horizontal o poligénica, esto se concluye debido a que todos los materiales evaluados presentaron síntomas característicos de la enfermedad, sin embargo se evidencian diferencias significativas entre los diferentes materiales evaluados, reflejados principalmente en el % de daño, el AUDPC, donde se concluye que la variedad Diacol Capiro presenta características de alta susceptibilidad a la enfermedad, la variedad ICA Única es moderadamente susceptible y Pastusa Suprema y clon Superior presentaron resistencia moderada a la enfermedad, bajo las condiciones del lugar de evaluación.

Los materiales comerciales Pastusa Suprema y Superior, presentaron un comportamiento aceptable ante el ataque de la enfermedad, bajo condiciones ambientales adecuadas, para el desarrollo de la epidemia de Tizón Tardío en el municipio de Pasto, considerando este resultado es válido proponer estos materiales para ser trabajados en sistemas de producción orgánica y en planes alternativos de manejo de la enfermedad, donde el pilar fundamental lo debe constituir la resistencia genética de los cultivares a sembrar.

Se concluye que es necesario la adopción de materiales como Pastusa Suprema y Superior que permitan mitigar el daño ocasionado por la ocurrencia de epidemias del Tizón Tardío, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema productivo papa, además es

sumamente importante la creación de programas masivos de producción de semilla certificada, que contribuyan a la difusión de materiales con características de resistencia, además de que los agricultores puedan contar con semilla de buena calidad, evitando el riesgo de que la semilla esté contaminada con patógenos y se convierta en el inóculo inicial de la epidemia, de esta manera se podrá disminuir el riesgo sanitario por diferentes problemas patológicos, entre los que se encuentra el Tizón Tardío.

Referencias Bibliográficas

Agrios, G. 2005. Plant Pathology. 5th edition. Elsevier Academic Press. New York. 992p.

Aguilera C, Champouret N, Rietman H, X. Lin, Wouters D, Chu Z., Jones J, Vossen J, Visser R, Wolters P, and Vleeshouwers V., 2018. Two different R gene loci co-evolved with Avr2 of *Phytophthora infestans* and confer distinct resistance specificities in potato., *STUDIES IN MYCOLOGY* 89: 105–115 (2018). available online at www.studiesinmycology.org.

Andrивon D, Pellé R, and Ellissèche D., 2006. Assessing Resistance Types and Levels to Epidemic Diseases from the Analysis of Disease Progress Curves: Principles and Application to Potato Late Blight . *Amer J of Potato Res* (2006) 83:455-461.

Barrientos J., Núñez C., 2014. Difusión de seis nuevas variedades de papa en Boyacá y Cundinamarca (Colombia) entre 2003 y 2010, *REVISTA COLOMBIANA DE CIENCIAS HORTÍCOLAS* - Vol. 8 - No. 1 - pp. 126-147, enero-junio 2014.

Burbano O., 2020. Resistencia de plantas a patógenos: una revisión sobre los conceptos de resistencia vertical y horizontal. *Revista Argentina de Microbiología*. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.04.006>.

Carreño N., Vargas A., Bernal A., Restrepo S. 2007. Problemas fitopatológicos en especies de la familia Solanaceae causados por los géneros *Phytophthora*, *Alternaria* y *Ralstonia* en Colombia. Una revisión. *Agronomía Colombiana* 25(2), 320-329, 2007.

Forbes G. 2012. Using Host Resistance to Manage Potato Late Blight with Particular Reference to Developing Countries. *Potato Research* (2012) 55:205–216.

Forbes G., Pérez W., Andrade J. 2014. Evaluación de la resistencia en genotipos de papa *Phytophthora infestans* bajo condiciones de campo. Guía para colaboradores internacionales. Centro Internacional de la Papa (CIP). ISBN 978-92-9060-450-1.

García H, Marín M, Jaramillo S., Cotes J. 2008. Sensibilidad de aislamientos colombianos de *Phytophthora infestans* a cuatro fungicidas sistémicos. *Agronomía Colombiana* 26(1), 47-57.

Haesaert G., Vossen J., Custers R c, De Loose M., Haverkort A., Heremans B., Hutten R., Kessel G., Landschoot S., Van Droogenbroeck B., Visser R., Gheysen G., 2015. Transformation of the potato variety Desiree with single or multiple resistance genes increases resistance to late blight under field conditions. *Crop Protection* 77 (2015) 163-175.

Huarte, M. 2001. *Levels of resistance to late blight available in Latin America. Pages in: Proceedings of the International Workshop on Complementing Resistance to Late Blight (Phytophthora infestans) in the Andes. February 13-16, 2001, Cochabamba, Bolivia: GILB Latin American Workshops 1. E.N. Fernández- Northcote, ed.*

Jiang R., Li J., Tian Z., Du J., Armstrong M., Baker K., Tze-Yin Lim J., Vossen J, He H., Portal L., Zhou J., Bonierbale M., Hein I., Lindqvist-Kreuze H., and Xie C. 2018. Potato late blight field resistance from QTL dPI09c is conferred by the NB-LRR gene R8, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 69, No. 7 pp. 1545–1555, 2018 doi:10.1093/jxb/ery021

Kessel G., Mullins E., Evenhuis A., Stellingwerf J., Cortes V., Phelan S., van den Bosch., Förch T., Goedhart P., van der Voet H., Lotz L., 2018. Development and validation of IPM strategies for the cultivation of cisgenically modified late blight resistant potato. *European Journal of Agronomy* 96 (2018) 146–155.

Mosquera T, Fernández C, Martínez L, Acuña A y Cuéllar D. 2008. Genética de la resistencia de la papa (*Solanum tuberosum*) a patógenos. Estado de arte. *Agronomía Colombiana* 26(1), 7-15.

Nústez C. 2011. Variedades Colombianas de papa. Universidad Nacional de Colombia, Fontagro, INIA España, Red latinpapa Iberoamericana de la innovación en mejoramiento y disseminación de la papa, ISBN 978-958-761-100-7.

Oyarzun, P., Taípe, J., & Forbes, G. 2001. *Phytophthora infestans* su actividad y particularidades en el Ecuador. Estado Actual del Manejo Integrado del Tizón (MIP-Tizón) en Países Andinos. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/8223/1/T-UC-0004-53.pdf>

Pacilly F., Hofstede G., Edith T., van Buerenc L., Geert J., Kessel., Jeroen G., 2018. Simulating crop-disease interactions in agricultural landscapes to analyse the effectiveness of host resistance in disease control: The case of potato late blight, *Ecological Modelling* 378 (2018) 1–12.

Pacilly F., van Bueren E., Groot J., Hofstede G., 2019. Moving perceptions on potato late blight control: Workshops with model-based scenarios. *Crop Protection* 119 (2019) 76–87.

Pérez W. Arias R. Anticona R. Orrego R. Ortiz, O. Forbes G. Andrade. 2015. Decision Support System prototypes for control late blight designed for use of. Consultado en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/8223/1/T-UC-0004-53.pdf>.

Pérez W., Forbes G. 2008. El tizón Tardío de la papa. Centro internacional de la papa CIP. ISBN 978-92-9060-343-6. Lima-Perú.

Prieto K., Mideros M., Restrepo S. 2014. Caracterización fenotípica y molecular de aislamientos de *Phytophthora infestans* obtenidos de cultivos de papa (*Solanum tuberosum*) en el departamento de Nariño, Colombia, URL: <http://biblioteca.uniandes.edu.co/acepto1201420.php?id=3806.pdf>

Raigosa N., Amaya M., Jaramillo S., Lagos L., Marín M. 2009. VARIABILIDAD GENÉTICA DE AISLAMIENTOS COLOMBIANOS DE *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary EN SOLANÁCEAS CULTIVADAS EN COLOMBIA. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*,

Volumen 62, Número 1, p. 4761-4771, 2009. ISSN electrónico 2248-7026. ISSN impreso: 0304-2847.

Schepers, H.T.A.M., Evenhuis, A., Spits, H.G., 2009. Strategies to control late blight in potatoes in Europe. *Acta Hort.* 834, 79–82 (ISHS 2009).

Seidl J., Frost K., Rouse D., Gevens A. 2015. Effect of temperature on growth and sporulation of US-22, US-23 and US-24 clonal lineages of *Phytophthora infestans* and implications for late Blight Epidemiology. *Phytopathology*. 2015 Apr;105(4):449-59. doi: 10.1094/PHYTO-03-14-0064-R+

Shakya SK, Goss E, Dufault N, van Bruggen A. 2015. Potential effects of diurnal temperature oscillations on potato late blight with special reference to climate change. *Phytopathology*. 2015 Feb;105(2):230-8. doi: 10.1094/PHYTO-05-14-0132-R.

Silva B, Jaramillo J., Marín M., 2009. CARACTERIZACIÓN GENÉTICA DE AISLAMIENTOS DE *PHYTOPHTHORA INFESTANS* EN LAS ZONAS PRODUCTORAS DE PAPA DE LOS DEPARTAMENTOS DE ANTIOQUIA, BOYACÁ, CUNDINAMARCA Y NORTE DE SANTANDER (COLOMBIA). *Actual Biol* 31 (90): 5-20, 2009

Skelsey, P., Rossing, W.A.H., Kessel, G.J.T., Van Der Werf, W., 2010. Invasion of *Phytophthora infestans* at the landscape level: how do spatial scale and weather modulate the consequences of spatial heterogeneity in host resistance? *Phytopathology* 100, 1146–1161.

Sparks A., Forbes A., Hijmans R., Garrett K. 2014. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight. *Global Change Biology* 20, 3621–3631, doi: 10.1111/gcb.12587

Stefanczyk E., Sylwester S., Brylinska M., Sliwka J. 2017. Expression of the potato Late Blight resistance gene *Rpi-phu1* and *Phytophthora infestans* effector in the compatible and incompatible interactions in potato. *Phytopathology* 107:740-748, <http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-09-16-0328-R>.

Chen Y., Halterman D.A. 2017. Determination of virulence contribution from *Phytophthora infestans* effector IPI-O4 in a resistant potato host containing the RB gene. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 100 (2017) 30 - 34.

Yuen J and Forbes G. 2009. Estimating the Level of Susceptibility to *Phytophthora infestans* in Potato Genotypes. doi:10.1094/PHYTO-99-6-0782, 2009 The American Phytopathological Society.

Xuan P., Vander P., Li C, Tang W. 2018. Combining Ability for Foliar Resistance to Late Blight [*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary] of Potato Cultivars with Different Levels of Resistance. *American Journal of Potato Research* (2018) 95:670–678

4. Capítulo 2. Evaluación del comportamiento fisiológico y agronómico de genotipos comerciales de *Solanum tuberosum* Grupo *andigena* bajo presencia de tizón tardío.

4.1 Introducción

El tizón tardío o gota causado por el Oomiceto *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, es considerado el factor limitante biótico más costoso de la producción alimentaria mundial (Huarte, 2001; Cordoba et al., 2021). El desarrollo epidémico del tizón tardío de la papa en la zona tropical andina es único porque no hay un período de hibernación, las temperaturas relativamente constantes durante todo el año y las lluvias variables pero suficientes en cada mes permiten la siembra de papa en cualquier momento del año, la zona andina es un mosaico de cultivos en diferentes etapas de maduración, el cultivo continuo ha conllevado la posibilidad de que se produzca el inóculo aéreo en cualquier momento del año (Kromann et al., 2008). Sumado a esto la susceptibilidad de la mayoría de cultivares comerciales obligan al productor al uso intensivo de fungicidas cuyo costo representa entre el 8 y el 20% del valor comercial de la producción de papa (Oyarzun, Taípe, & Forbes, 2001).

La enfermedad puede aparecer en cualquier fase del desarrollo del cultivo, manifestándose con lesiones inicialmente en forma de pequeñas manchas negras, que crecen con rapidez, puede en pocas horas causar la defoliación y muerte de las

plantas, los daños, en caso de ataque, dependen del nivel de resistencia de la variedad utilizada y condiciones climáticas imperantes (Martínez Gonzales, Barrios Sanromá, Rovesti, & Santos Palma, 2006). El progreso de los síntomas causa una necrosis extensa en las hojas y los tallos que pueden destruir por completo la capacidad fotosintética de la planta en un corto período de tiempo (Haesaert et al 2015). Según Pacilly et al., (2016) la infección de *P. infestans* además de provocar la muerte del follaje, genera la pudrición del tubérculo en la fase de almacenamiento, lo que produce grandes pérdidas de rendimiento, el patógeno tiene un ciclo de vida relativamente corto, que en menos de 7 días produce grandes cantidades de nuevas esporas, que pueden generar nuevos ciclos de la enfermedad a nivel de zona (Pacilly et al., 2016).

Generalmente los patógenos que afectan la parte aérea de las plantas afectan directamente la tasa fotosintética, aumenta el gasto energético a través del uso de moléculas de ATP, para la producción de metabolitos de defensa (Dogliotti, Colnago, Galván & Aldabe 2011), la reducción de la tasa fotosintética afecta directamente el crecimiento, el cual hace referencia a un incremento irreversible de materia seca o volumen, cambios en tamaño, masa y forma, como función del genotipo y el ambiente, dando como resultado un aumento cuantitativo del tamaño y peso de la planta (Gardner, Brent Pearce, & Mitchel, 1985; Soto, Cotes & Rodríguez 2018).

El rendimiento comercial del cultivo depende de la tasa de asimilación neta, la cual determina la tasa de crecimiento de los tubérculos, si no existen limitantes hídricos, nutricionales o factores reductores del área foliar, esta depende de la radiación interceptada por el cultivo, la temperatura y la concentración de CO₂ (Dogliotti et al., 2011). La producción y acumulación de materia seca en los tubérculos, es por tanto el resultado de la eficiencia del follaje del cultivo en la interceptación y uso de la radiación solar disponible durante el ciclo de crecimiento (Carvajal, 2010). Por lo tanto, la cantidad de radiación interceptada depende de la radiación disponible y del índice de área foliar (IAF), en cultivos de papa con un IAF de 3 a 4,5 se intercepta entre el 87 y 96% de la radiación incidente (Dogliotti et al., 2011).

El concepto de enfermedad hace referencia a un desajuste en diversas funciones fisiológicas de las plantas causado por factores bióticos y abióticos (Agrios 2005; Forbes et al., 2014). Estas funciones comprenden división celular, diferenciación y desarrollo,

absorción de agua y minerales del suelo y su transporte en la planta, fotosíntesis y la translocación de los productos fotosintéticos hasta los órganos vertedero, el metabolismo de los compuestos sintetizados y finalmente, el almacenamiento de las reservas alimenticias necesarias para la reproducción (Maldonado & Corchuelo 1993; Soto et al., 2018). Las plantas presentarán enfermedad cuando una o varias de sus funciones sean alteradas por los organismos patógenos o por determinadas condiciones del medio ambiente, (Agrios 2005). Si existe la presencia de factores bióticos y abióticos que generen interrupción del crecimiento en etapas de llenado del tubérculo, se acortara el periodo de crecimiento de este, obteniendo bajo rendimiento, expresado a través del índice de cosecha (IC), donde es posible observar un menor crecimiento de los tubérculos, debido a la reducción del IAF (Dogliotti et al., 2011).

Por lo tanto, es fundamental proteger el cultivo durante las etapas de mayor susceptibilidad a la pérdida de follaje, puesto que el ataque de *P. infestans* reduce el área foliar y por ende altera la capacidad para captar la luz, principalmente por medio de las hojas, y en menor medida por los tallos (Santos, Segura, & Núñez, 2010). Esto a su vez puede tener un efecto negativo sobre los rendimientos, ya que se puede generar una respuesta de compensación en la que la planta redistribuye parte de los fotosintatos para producir hojas nuevas, con el fin de equilibrar el daño generado por la pérdida de tejidos fotosintéticamente activos, lo que implica una posible reducción en la distribución de fotosintatos hacia los tubérculos (Santos et al., 2010).

Cuando la enfermedad afecta el follaje, ocasiona un daño indirecto, ya que al reducirse las funciones fotosintéticas hay una disminución en el rendimiento, según reportes de Carvajal (2010), la severidad de una enfermedad, y las perdidas en rendimiento se relacionan cuantitativamente a través de modelos matemáticos, como modelos lineales, donde es posible observar que durante la etapa de tuberización y llenado, bajo una fuerte ataque del patógeno en dos variedades comerciales, se observó un efecto negativo sobre la calidad del tubérculo (mayor producción tubérculos de tercera categoría), más que sobre la cantidad de tubérculos producidos (Romero et al., 2021).

Considerando la importancia de la enfermedad tizón tardío y su influencia en el rendimiento comercial del cultivo, surge la necesidad de cuantificar la relación entre severidad al tizón tardío y el rendimiento comercial de genotipos de papa en las diferentes

categorías comerciales producidas, durante la etapa de tuberización y llenado del tubérculo, etapa del desarrollo donde se suspendió el control químico de la enfermedad para evaluar la relación entre el desarrollo epidemiológico de la enfermedad y el efecto en el rendimiento comercial de diferentes materiales registrados. El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento fisiológico y agronómico de genotipos comerciales de *Solanum tuberosum* Grupo *andígena* bajo presencia de tizón tardío.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Pruebas de Campo.

La investigación se realizó en el Centro de Investigación Obonuco de AGROSAVIA, ubicado en el municipio de San Juan de Pasto, coordenadas 1°11'45,90" N, 77°18'5.70" W a una altura de 2766 m.s.n.m, los ensayos se realizaron en campo abierto, con manejo agronómico convencional hasta los 52 días después de siembra (**DDS**) y con inóculo natural, durante dos ciclos de evaluación; segundo semestre de 2018 y primer semestre de 2019, donde se presentaron lluvias bien distribuidas y temperaturas más bajas con relación al primer ciclo de evaluación. Cada parcela experimental estuvo conformada por 4 surcos de 5 metros cada uno, se evaluaron 8 tratamientos, correspondientes a los materiales comerciales, con y sin manejo químico de la enfermedad durante la etapa de tuberización y llenado del tubérculo, se establecieron 4 repeticiones para un total de 32 parcelas experimentales. Los surcos bordes se usaron para realizar las evaluaciones destructivas y los 2 surcos centrales se usaron para evaluar el rendimiento comercial del cultivo.

4.2.2 Monitoreo climático

Los datos climáticos se recolectaron y registraron usando una estación climática portátil marca Davis®, modelo vantage pro2. La cual registra variables de precipitación, luminosidad, viento, humedad relativa y temperatura, la estación registró un dato cada media hora.

4.2.3 Material vegetal

Se evaluaron en condiciones de campo, cuatro materiales comerciales de papa *Solanum tuberosum* Grupo *andigena* identificadas como los más sembrados en el departamento de Nariño, los materiales evaluados correspondieron a Diacol Capiro (**DC**), ICA Única (**IU**), Pastusa Suprema (**PS**) y Superior (**S**). La semilla con la cual se establecieron los lotes experimentales correspondió a semilla básica, producida bajo acompañamiento del ICA, organismo encargado de la certificación de semilla en el país.

4.2.4 Diseño experimental y tratamientos

Con el objetivo de evaluar el impacto de la enfermedad tizón tardío en 4 materiales comerciales, ampliamente sembrados en el departamento de Nariño, se establecieron parcelas experimentales, de los materiales Diacol Capiro (**DC**), Ica Única (**IU**), Pastusa Suprema (**PS**) y Superior (**S**) con y sin manejo químico de la enfermedad durante la etapa de tuberización y llenado del tubérculo, la distancia de siembra usada fue; 1,20 metros entre surcos por 0,30 metros entre plantas. El manejo agronómico aplicado fue estándar en los cuatro tratamientos, donde, prácticas como fertilización, labores culturales como deshierbe y aporque, manejo de plagas y enfermedades, labores que se realizaron de manera idéntica en los 8 tratamientos hasta el día 52 después de siembra (**DDS**), a partir de este momento se suspendió la aplicación química, para el control de la enfermedad tizón tardío, en los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad, la evaluación de incidencia y severidad se realizó en los 2 surcos centrales de cada parcela a través de las 4 repeticiones establecidas, el rendimiento se evaluó en el total de la parcela, es decir 4 surcos. En la tabla 7, es posible observar con mayor detalle los tratamientos evaluados.

Tabla 8 Tratamientos evaluados.

Numero de tratamiento	Denominación del tratamiento	Descripción del tratamiento
1	DC Con manejo	Diacol Capiro con manejo químico para <i>P. infestans</i> durante todo el ciclo de cultivo.

2	IÚ Con manejo	ICA Única con manejo químico para <i>P. infestans</i> durante todo el ciclo de cultivo.
3	PS Con manejo	Pastusa Suprema con manejo químico para <i>P. infestans</i> durante todo el ciclo de cultivo.
4	S Con manejo	Superior con manejo químico para <i>P. infestans</i> durante todo el ciclo de cultivo.
5	DC Sin manejo	Diacol Capiro sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de 53 dds hasta la etapa de cosecha.
6	IÚ Sin manejo	ICA Única sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de 53 dds hasta la etapa de cosecha.
7	PS Sin manejo	Pastusa Suprema sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de 53 dds hasta la etapa de cosecha.
8	S Sin manejo	Superior sin manejo químico para <i>P. infestans</i> a partir de 53 dds hasta la etapa de cosecha.

La evaluación se estableció bajo un diseño de bloques completamente al azar con arreglo factorial 4^2 con 4 repeticiones, los factores fueron los 4 materiales comerciales con y sin manejo para gota en las etapas fenológicas de tuberización, llenado de tubérculos, hasta llegara a cosecha.

4.2.5 Manejo químico de la enfermedad

El manejo químico de la enfermedad se basó en un plan de rotación de productos comerciales y de ingredientes activos, se incluyeron en la evaluación los productos comúnmente usados en la zona y de fácil consecución en las casas comerciales de los diferentes municipios productores de papa del departamento de Nariño, en la tabla 8, es posible observar con mayor detalle el manejo químico de la enfermedad donde se considera la fecha, producto y dosis comercial aplicada, vale la pena mencionar que el manejo químico de plagas y enfermedades fue igual hasta el día 52 DDS, fecha en la que se suspendió el manejo químico en las parcelas sin manejo.

Tabla 9 Manejo químico de la enfermedad bajo un esquema de aplicaciones calendario.

Fecha de aplicación	Producto comercial	Ingrediente activo	Fabricante	Dosis/bomba 20 cc
16/04/2019:	Manzate®	Mancozeb	DuPont	50 gramos/bomba 20 litros
25/04/2019	Curathane®	Mancozeb + Cymoxanil	Dow Agrosiences	50 gramos /bomba de 20 litros
2/05/2019	Predostar®	Propamocarb + Metalaxil	Interoc Custer	50 cc /bomba de 20 litros
9/05/2019	Rhodax®	Fosetyl AI+Mancozeb	Bayer	50 gramos/bomba de 20 litros
16/05/2019	AmistarTop®	Azoxystrobin	Syngenta	25 cc/bomba de 20 litros
23/05/2019:	Trivia®	Fluopicolide+Propineb	Bayer	40 gramos/bomba de 20 litros
31/05/2019	Fungitox®	Chlorothalonil	Arysta	25 cc/bomba 20 litros
07/06/2019	Curzate®	Cimoxanil+Mancozeb	DuPont	50 cc/bomba 20 litros
14/06/2019	Ridomil Gold®	Metalaxil + Mancozeb	Syngenta	25 cc/bomba 20 litros

4.2.6 Determinación de materia seca MS.

Se procedió a realizar 4 muestreos destructivos con el fin de evaluar la acumulación de materia seca en los diferentes órganos de la planta tales como; Hojas, tallos, raíz y tubérculos en diferentes etapas fenológicas del cultivo, se realizó esta evaluación en 2 etapas de desarrollo fenológico, 1 en etapa de tuberización y 3 en llenado de tubérculos, las muestras se separaron en hojas, tallos, raíces y tubérculos, estas se secaron en horno eléctrico Mermmert® UN 750 plus a 60°C durante 3 días y las muestras se pesaron en balanzas de precisión Vibra® modelo AB3202 en el laboratorio de fitopatología del C.I Obonuco.

4.2.7 Índice de cosecha

A partir de los datos de materia seca se calculó el índice de Cosecha (IC) que indica la cantidad de materia seca acumulada en el órgano de interés económico, que en este caso es el tubérculo, en relación con la biomasa total, el cálculo se realizó siguiendo la propuesta de (Escalante & Kohashi, 2015), la ecuación es la siguiente:

$$IC = PST/PSP$$

donde: **PST** = peso seco del tubérculo y **PSP** = peso seco total de planta.

4.2.8 Índice de área foliar

La evaluación se realizó en paralelo a la evaluación de ganancia de materia seca, se evaluaron todos los tratamientos mencionados anteriormente, se tomarán hojas de las diferentes parcelas experimentales, las hojas se escanearon con una línea de referencia de 1 cm de longitud (papel milimetrado) colocado al lado de ubicación de las hojas, para el cálculo se empleó el software libre ImageJ (versión 1.45) este método se recomienda en (Guerrero, Quintero, & Naranjo, 2012).

El cálculo del índice de área foliar se realizó mediante la siguiente ecuación, propuesta por Campostrini y Yamanisi, (2001).

$$IAF = AF/AS$$

Donde, **IAF** = Índice de área foliar, **AF** = área foliar cm², **AS** = área de suelo cm².

4.2.9 Rendimiento

Se evaluó el rendimiento comercial en el total de la parcela experimental, a través de las 4 repeticiones establecidas, posteriormente se realizó la evaluación de rendimiento por calidad comercial correspondiente a; papa cero o muy grande (Mayor a 90 mm de diámetro ecuatorial), papa de primera (Entre 71-90 mm de diámetro ecuatorial), papa de segunda o pareja (Entre 51-70 mm de diámetro ecuatorial), papa de tercera (Entre 31-50 mm de diámetro ecuatorial) y riche o muy pequeña (Entre 15-30 mm de diámetro ecuatorial), se registró el peso en kg por clase en cada una de las parcelas experimentales.

4.2.10 Modelo de regresión cuadrático

Se realizó un análisis de correlación, a través del método de Pearson, la variable independiente fue la severidad y la variable dependiente el rendimiento en sus diferentes categorías comerciales. El resultado de esta evaluación permitió seleccionar las variables con mayor grado de correlación, para con estas, plantear un modelo de regresión cuadrático, buscando predecir, la influencia de la severidad de la enfermedad, sobre el rendimiento del cultivo, el modelo usado fue el siguiente:

$$Y = A + Bx + Cx^2 + e$$

4.2.11 Análisis estadístico

Para la evaluación de la reacción de los materiales ante el ataque de *P. infestans* se estableció un diseño de bloques completos al azar con arreglo factorial 4², con 4 repeticiones, para un total de 32 parcelas experimentales, cada parcela experimental fue de 24 m², el experimento en total ocupó 384 m², el manejo químico de la enfermedad se suspendió a los 52 dds, periodo que coincide con la etapa fenológica de floración y tuberización. La evaluación de incidencia y severidad se realizó desde la suspensión del control químico, hasta la entrada en senescencia de las plantas en las diferentes parcelas evaluadas.

Para el análisis de la información se usaron los programas estadísticos SPSS y R- Studio, donde para el análisis de las variables evaluadas, se realizó a través de análisis de varianza con comparación de medias a través del método Tukey en las variables que presentaron diferencias estadísticas significativas. Además se realizó un análisis de componentes principales para simplificar el número original de variables en pocas variables sintéticas, con alto poder explicativo.

4.3 Resultados

4.3.1 Severidad de la enfermedad

Las variables % de incidencia y severidad presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,000$ y $0,000$), ratificando la respuesta diferencial hacia el patógeno *P. infestans*, la cual es dependiente de la variedad comercial y del manejo químico de la enfermedad durante la etapa de tuberización y llenado de tubérculos, donde es importante resaltar que los tratamientos con manejo químico de la enfermedad presentaron niveles de daño cercanos a 0%, a excepción de Diacol Capiro que hacia el día 82 dds, presentó un nivel de daño cercano al 5%. Para los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad

En la tabla 9 es posible evidenciar la influencia de la presencia de la enfermedad en algunas variables fisiológicas básicas como; Peso seco (PS) de los diferentes órganos de la planta (hojas (H), tallos (T), raíces (R), tubérculos (Tub)) y rendimiento comercial, para cuantificar la pérdida potencial de rendimiento a causa de la presencia de la enfermedad y a la no aplicación de medidas de control oportunas como el manejo químico de la enfermedad, además de comprender como la presencia del Tizón tardío afecta la acumulación de materia seca en los diferentes órganos de interés en la planta y como esto afecta el rendimiento potencial del cultivo en la zona productora del municipio de Pasto.

Tabla 10 Distribución de materia seca por órgano (PSH, PST, PSR, PSTub) (g) en 4 genotipos de papa (*Solanum Tuberosum*) grupo *andigena* con y sin manejo químico del tizón tardío

DDS	Genotipo	Tratamiento	Valores promedio			
			PSH	PST	PSR	PSTub
63	Diacol Capiro	T-1	8,80 a	1,73 b	1,68 b	0 a
63	ICA Única	T-2	16,35 a	4,99 a	4,64 a	0 a
63	Pastusa Suprema	T-3	16,88 a	4,90 a	2,89 b	0 a
63	Clon Superior	T-4	11,82 a	2,98 ab	1,81 b	0 a
63	Diacol Capiro	T-5	9,38 a	2,0 b	1,78 b	0 a

63	ICA Única	T-6	11,49 a	3,2 ab	2,75 b	0 a
63	Pastusa Suprema	T-7	9,45 a	2,24 ab	1,65 b	0 a
63	Clon Superior	T-8	12,83 a	3,28 ab	2,36 b	0 a
94	Diacol Capiro	T-1	75,6 ab	37,55 ab	11,82 a	25,49 a
94	ICA Única	T-2	56,60 ab	35,00 ab	5,98 a	42,34 a
94	Pastusa Suprema	T-3	113,46 a	57,75 a	14,80 a	47,09 a
94	Clon Superior	T-4	89,65 ab	43,56 ab	10,46 a	52,92 a
94	Diacol Capiro	T-5	35,38 b	12,06 b	7,16 a	20,51 a
94	ICA Única	T-6	75,67 ab	40,3 ab	4,94 a	58,17 a
94	Pastusa Suprema	T-7	71,23 ab	33,60 ab	9,00 a	28,58 a
94	Clon Superior	T-8	67,73 ab	33,39 ab	9,74 a	50,38 a
119	Diacol Capiro	T-1	95,49 abc	51,32 abc	13,02 ab	245,13 ab
119	ICA Única	T-2	57,25 bcd	52,12 abc	8,86 b	252,47 ab
119	Pastusa Suprema	T-3	133,65 a	86,03 a	12,56 ab	429,67 a
119	Clon Superior	T-4	110,89 ab	74,87 ab	21,04 a	247,04 ab
119	Diacol Capiro	T-5	14,43 d	22,47 c	4,77 b	96,7 b
119	ICA Única	T-6	50,40 bcd	33,41 bc	5,44 b	230,95 ab
119	Pastusa Suprema	T-7	40,30 cd	40,30 bc	6,15 b	178,71 b
119	Clon Superior	T-8	68,77 abcd	50,31 abc	11,21 ab	278,52 ab

*** letras diferentes reflejan la existencia de diferencias estadísticas entre los tratamientos.

Teniendo en cuenta los resultados observados en la tabla 9, en cuanto a la variable peso seco de hojas, es posible ver que a los 63 y 94 dds no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.0931$ y 0.1906), es importante

mencionar que a los 94 dds, los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad, presentaron menor acumulación de materia seca en hojas, algo especialmente observado en la variedad Diacol Capiro sin manejo químico de la enfermedad, que presentó el valor promedio más bajo de acumulación de materia seca, posiblemente debido a la susceptibilidad que presenta esta variedad comercial, observándose que el avance de la enfermedad fue mucho más rápido, generando la pérdida de hojas debido al ataque del patógeno.

El análisis de la evaluación realizada a los 119 dds, indica que se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0.0184$). donde se observó que los tratamientos correspondientes a manejo químico de la enfermedad, presentaron los valores promedios más altos en la variable peso seco de hojas (57 a 133 g), mientras que los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad, presentaron los valores promedios más bajos en esta variable (14 a 68 gramos), es de resaltar que la variedad Diacol Capiro sin manejo químico de la enfermedad presentó el valor promedio más bajo de peso seco (14,43 gramos), con una diferencia considerable con el resto de los tratamientos, esto es consecuente con lo observado en campo (Figura 15), donde se puede ver claramente que este tratamiento fue severamente afectado por la enfermedad Tizón Tardío, reflejándose en la disminución considerable de materia seca en hojas, uno de los principales órganos afectados por la enfermedad.



Figura 15 Síntomas del tizón tardío en la variedad comercial Diacol Capiro, **A y B**. Con manejo químico calendario, **C y D** Sin manejo químico de la enfermedad.

En la variable peso seco de tallos, se pudo evidenciar la existencia de diferencias estadísticamente significativas a los 63 dds ($p < 0.05131$), a los 94 y 119 dds no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.3128$ y 0.2381), sin embargo, fue posible evidenciar que los valores más bajos de acumulación de materia seca en tallos se presentaron en los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad.

En cuanto a la variable peso seco de tubérculos, que resulta de interés, debido a que permite analizar cómo afecta la presencia de la enfermedad la acumulación de materia seca en el tubérculo, órgano de interés económico y principal órgano vertedero del cultivo, no existieron diferencias estadísticamente significativas a los 94 dds ($p < 0.677$), sin embargo se pudo determinar la presencia de diferencias estadísticas para esta variable a los 119 dds ($p < 0.022$), es importante resaltar que los tratamientos 5 y 6, correspondientes a las variedades Diacol Capiro e ICA Única sin manejo químico presentaron los valores más bajos de acumulación de materia seca en tubérculos, y los tratamientos 7 y 8 correspondientes a los materiales Pastusa Suprema y Superior sin manejo químico de la enfermedad presentaron valores cercanos a los presentados en los tratamientos con manejo químico de la enfermedad, resultados acordes a lo observado y discutido en el capítulo 1, donde la variedad ICA Única presentó un comportamiento intermedio entre los materiales comerciales Pastusa Suprema y Superior (Figura 16, Figura 17 y Figura 18), materiales con características de resistencia y Diacol Capiro la variedad más susceptible evaluada en este trabajo.

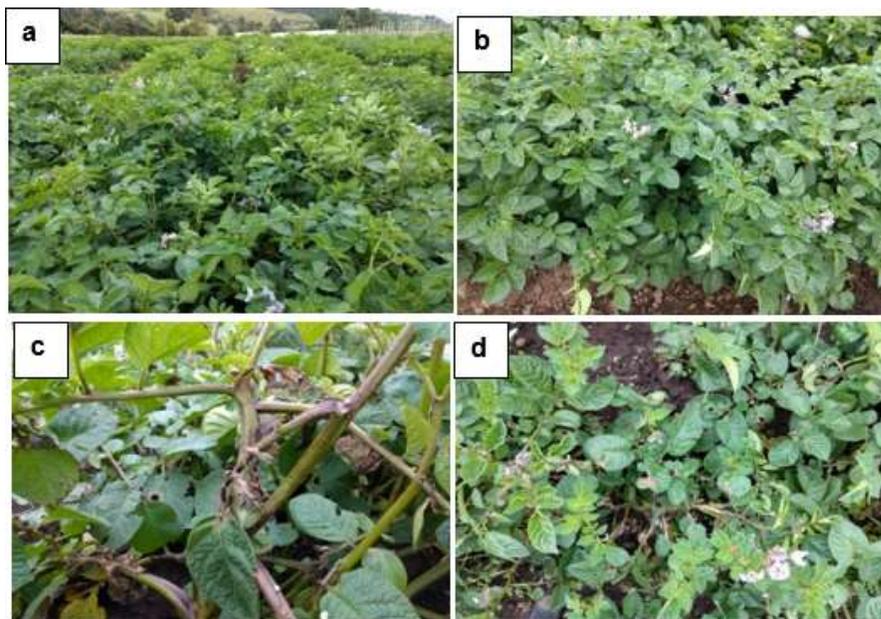


Figura 16 Síntomas del Tizón tardío en la variedad ICA Única, **A y B**. Con manejo químico calendario, **C y D**, Sin manejo químico de la enfermedad.



Figura 17 Síntomas del Tizón tardío en la variedad Pastusa Suprema, **A y B**. Con manejo químico calendario, **C y D**, Sin manejo químico de la enfermedad.

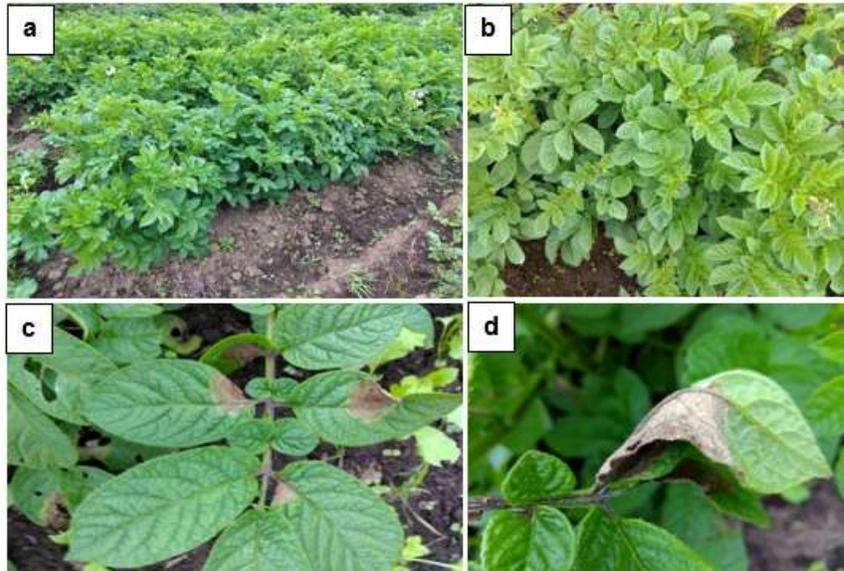


Figura 18 Síntomas del Tizón tardío en el material comercial Superior, **A y B.** con manejo químico calendario, **C y D.** sin manejo químico de la enfermedad.

Por lo tanto y considerando los resultados anteriormente observados, es importante profundizar en evaluaciones sobre el manejo de la enfermedad en los materiales comerciales Pastusa Suprema y Superior, ya que a pesar de que se suspendió la aplicación de fungicidas de síntesis química, durante las etapas de tuberización y llenado, consideradas etapas críticas en el cultivo de papa (Romero et al., 2012), estos 2 materiales presentaron los niveles más bajos de área afectada por la enfermedad, reflejado, en una aceptable capacidad de realizar el llenado de tubérculos, contemplando el hecho de que el patógeno *P. infestans* estuvo presente en la planta, y a que fue posible evidenciar síntomas de la enfermedad, los cuales progresaron a través del tiempo, de forma más lenta, en comparación con Diacol Capiro e ICA Única donde el progreso de la enfermedad fue más acelerado en el tratamiento sin manejo químico de la enfermedad, por lo tanto y considerando el hecho de que estos dos genotipos lograron realizar llenado de tubérculos de forma muy similar a los tratamientos con manejo químico de la enfermedad, es válido sugerir la existencia de tolerancia en estos genotipos y por esta razón es válido proponer evaluaciones de relación beneficio/costo donde el objetivo sea evaluar la suspensión o reducción de las aplicaciones de agroquímicos en los planes de aplicaciones sanitarias durante estas etapas fenológicas, en estos genotipos en concreto.

4.3.2 Distribución de materia seca

La distribución de materia seca a los diferentes órganos de la planta expresado en %, no fue significativo a los 64 dds ($p < 0.281, 0.464$ y 0.588) para hojas, tallos y raíces. A los 94 dds no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.815, 0.268, 0.822$ y 0.664) para hojas, tallos, raíces y tubérculos respectivamente. Esta situación cambia a los 119 dds, donde para tallos y raíces no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.835$ y 0.358), fue posible evidenciar diferencias ($p < 0.0021$ y 0.017) para las variables % distribución MS hojas y tubérculos respectivamente, donde los resultados coinciden con lo observado en campo, hacia los 119 dds, fue posible evidenciar las diferencias en la interacción genotipo*manejo químico, donde debido a los diferentes grados de susceptibilidad de los materiales evaluados se presentó una afectación severa en Diacol Capiro, donde se perdió el 100% del follaje, situación reflejada en el resultado de esta evaluación, seguido de ICA Única, que presentó un nivel de daño cercano al 75% en la parte área, situación que generó principalmente la necrosis y pérdida de follaje, reflejado en el resultado de esta variable en concreto.

En la figura 19, figura 20, figura 21 y figura 22 correspondiente a la distribución de MS a los diferentes órganos de interés en los materiales comerciales evaluados, es importante resaltar que la variedad Diacol Capiro sin manejo químico de la enfermedad, presentó las mayores diferencias en cuanto a la distribución de MS en los órganos de interés, es importante resaltar que entre más alto sea el nivel de daño causado por la enfermedad y mayor sea la pérdida de follaje debido a los síntomas del tizón tardío, el % de distribución de MS hacia el tubérculo es mayor, en comparación con los diferentes órganos de la planta, esto se atribuye principalmente a la reducción de la parte área y reflejado en el aumento del % de acumulación de MS en los tubérculos.

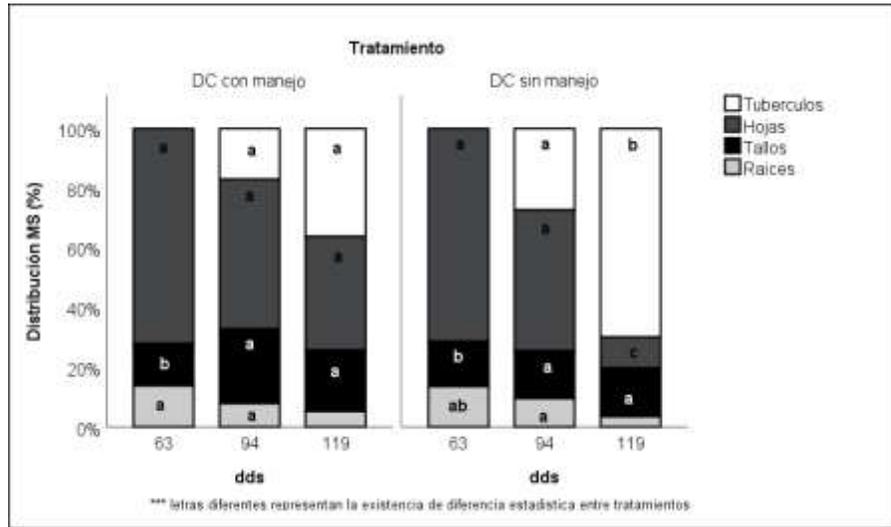


Figura 19 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para variedad Diacol Capiro con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.

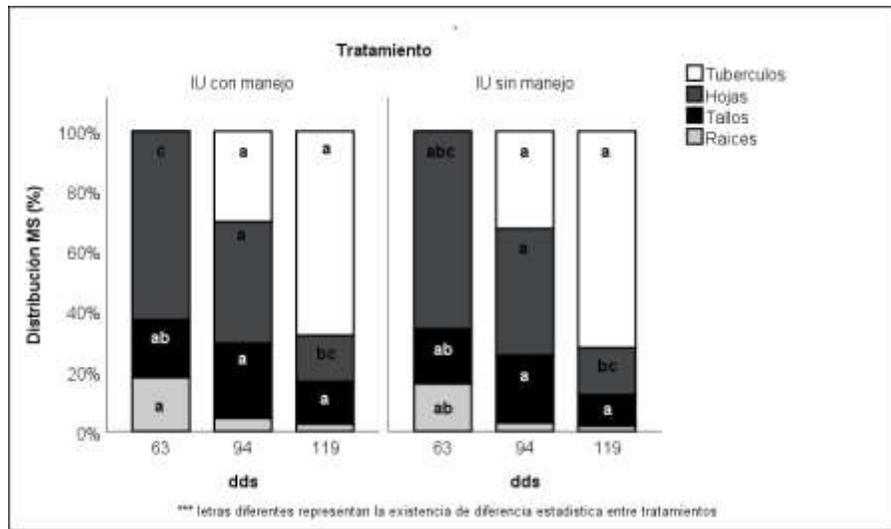


Figura 20 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para la variedad ICA UNICA con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.

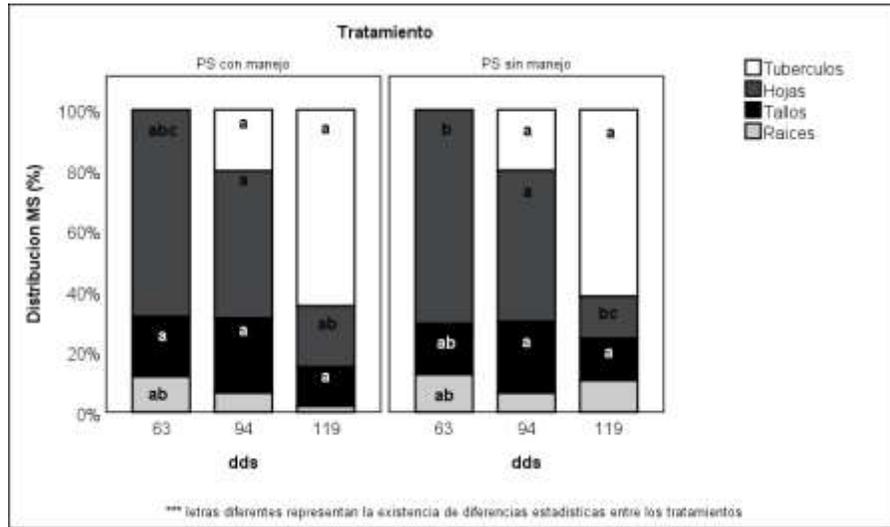


Figura 21 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para la variedad Pastusa Suprema con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.

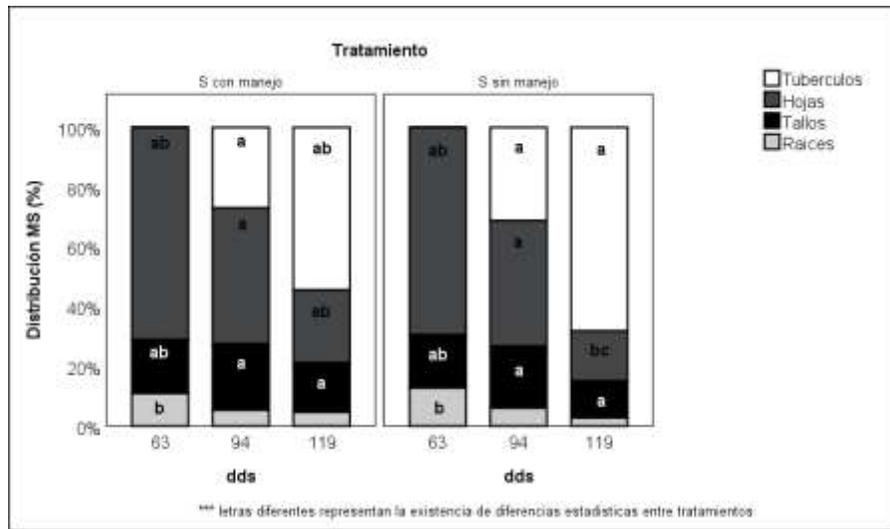


Figura 22 Distribución de materia seca a los diferentes órganos de interés para genotipo comercial Superior con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.

Una medida importante de productividad, derivada de la distribución de la materia seca en la planta o coeficientes de migración de materia seca es el índice de cosecha (Tabla 10), este índice es una medida de asignación de materia seca al órgano de interés económico, en este caso el tubérculo, en el muestreo correspondiente a los 119 dds, antes de que iniciara el periodo de senescencia, se presentó diferencias significativas ($p < 0.020$), por lo tanto es válido inferir el rol crucial de la aplicación de manejo integrado de enfermedades,

en la eficiencia de asignación de materia seca en órganos de interés económico, reflejado en mejores ingresos para los productores de este cultivo, es importante resaltar que la presencia de la enfermedad, generó la reducción del índice de cosecha, debido a la pérdida de follaje y disminución en el peso de tubérculos, comportamiento que fue posible observar en materiales susceptibles, especialmente Diacol Capiro e ICA Única sin manejo químico de la enfermedad, tratamientos que presentaron los valores más bajos de índice de cosecha.

Tabla 11 índice de cosecha tratamientos evaluados.

Tratamiento	Valor IC (%)
IU con manejo químico	71,51 a
DC con manejo químico	70,24 a
PS con manejo químico	69,96 a
IU sin manejo químico	67,84 a
S con manejo químico	67,19 a
PS sin manejo químico	64,29 a
S sin manejo químico	51,97 ab
DC sin manejo químico	39,69 b

*** letras diferentes reflejan la existencia de diferencias estadísticas entre los tratamientos.

En la variable peso seco total de la planta, fue posible evidenciar que a los 64 y 94 dds, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0,0505$, $0,296$), sin embargo a los 119, si se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,0232$), observando un comportamiento diferencial entre las variedades, principalmente relacionadas con la fenología de cada material, sin embargo en la figura 23 podemos observar que las variedades sin manejo químico de la enfermedad presentaron los valores más bajos de acumulación de materia seca total a los 119 dds, situación que cambio al final de la etapa de llenado de tubérculos de los diferentes materiales en evaluación, ya que los materiales comerciales Pastusa Suprema y Superior sin manejo químico de la enfermedad, a los 152 dds no presentaron diferencias estadísticas en la prueba de comparación de medias de Tukey, en comparación con estos mismos genotipos con manejo químico de la enfermedad, estos resultados sugieren la existencia de tolerancia hacia la enfermedad Tizón Tardío del material Pastusa Suprema.

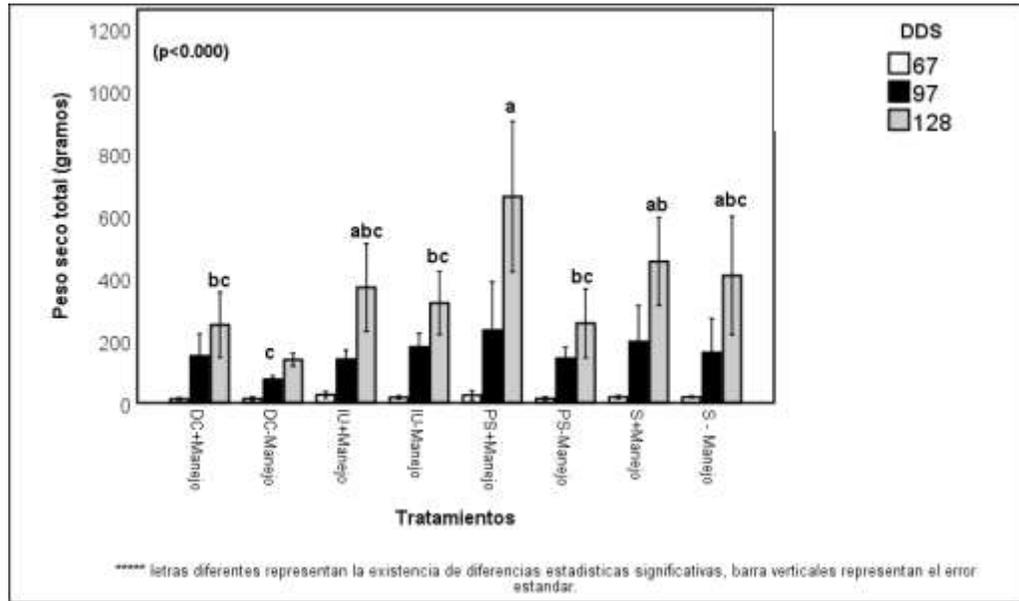


Figura 23 Ganancia de peso seco total de los diferentes tratamientos evaluados durante la etapa de tuberización en el municipio de Pasto.

Es de resaltar que a los 152 dds (cosecha) los genotipos ICA Única y Diacol Capiro sin manejo químico de la enfermedad presentaron los valores promedios más bajos de acumulación de materia seca total, reflejado en la baja acumulación de biomasa final en los tubérculos, resultados acordes a lo observado en campo ya que estos dos materiales presentaron los niveles más altos de severidad, afectando severamente el follaje, impidiendo la acumulación eficiente de biomasa en los tubérculos, órgano de interés económico, situación que perjudica seriamente el rendimiento comercial del cultivo.

4.3.3 Índice de área foliar

El índice de área foliar es una variable que relaciona el área foliar y el área ocupada por esta en el terreno, por lo tanto y asumiendo que las hojas y tallos son los órganos de la planta que en condiciones tropicales se ve seriamente afectada por la enfermedad Tizón tardío, podemos observar (Figura 24) que esta variable se ve seriamente afectada por el progreso de la enfermedad. Es posible inferir que a los 63 dds no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,35$) situación que se presentó

debido a que la epidemia se encontraba en sus primeros estados desarrollo, correspondiente a su fase biotrófica.

A los 94 dds se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos y el índice de área foliar ($p < 0,012$), situación que se dio, debido a que, en ese punto había una afección severa especialmente en la variedad Diacol Capiro, generando decapitación y ruptura de tallos.

Con el avance de la epidemia, a los 119 dds, fue posible evidenciar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,018$), situación que se adjudica al daño severo causado por *P. infestans* en variedades susceptibles como Diacol Capiro y en menor medida ICA ÚNICA, materiales como Pastusa Suprema y Superior, a pesar de presentar síntomas de la enfermedad y a que la epidemia avanzo considerablemente, la variable índice de área foliar no presento una afectación tan severa como en las otros materiales en los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad.

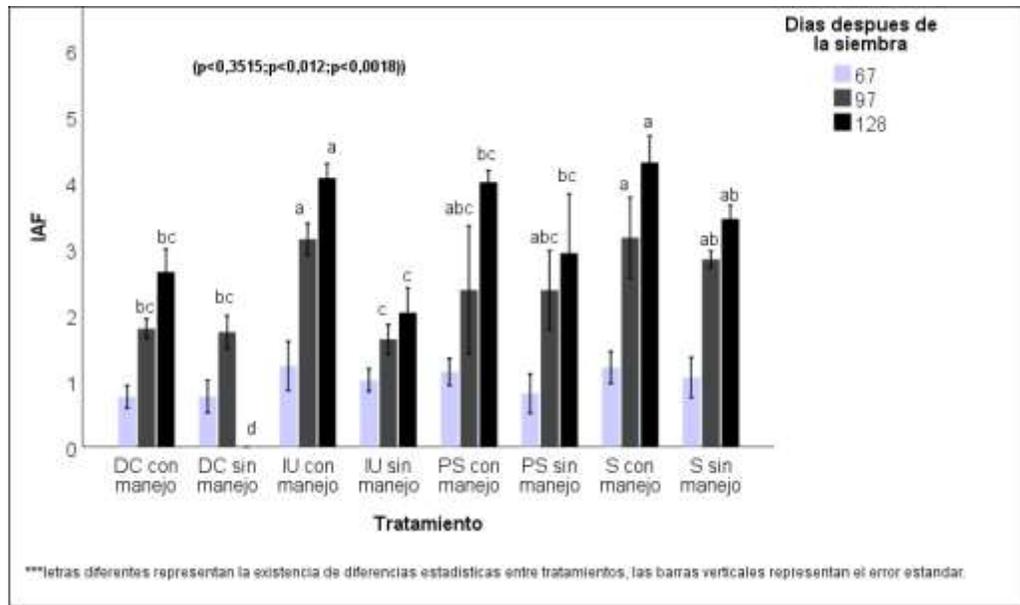


Figura 24. Índice de área foliar para tratamientos evaluados en la presente investigación

Por lo tanto y analizando la información anteriormente discutida, podemos ver que la presencia de la enfermedad genera una reducción considerable en el índice de área foliar,

a causa del ataque del patógeno, reduciendo considerablemente la superficie de captación de luz, afectando procesos como acumulación de materia seca en los diferentes órganos de la planta, afectando severamente el rendimiento del cultivo.

4.3.4 Rendimiento

Considerando, los resultados obtenidos durante esta investigación, es sumamente importante determinar la disminución en rendimiento comercial a causa de la presencia de la enfermedad tizón tardío, y como algunas variedades o materiales comerciales acarrear un mayor riesgo sanitario y de pérdida de rendimiento que otros materiales, factor sumamente importante y a considerar al momento de tomar la decisión sobre que material sembrar, de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona donde se piensa establecer el cultivo y a la presión que ejerce el patógeno sobre este.

Es importante resaltar que se presentaron diferencias significativas ($p < 0,0039$), ($p < 0,0018$) y ($p < 3.07e-05$) para rendimiento de la categoría primera, segunda y total (t/ha) entre los 8 tratamientos evaluados en la presente investigación. La variable rendimiento categoría tercera ($p < 0,0909$) no presentó diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

En la figura 25, podemos ver el rendimiento que obtuvo la variedad Diacol Capiro con y sin manejo químico de la enfermedad en la cosecha, distribuido en las diferentes categorías comerciales comúnmente usadas en la selección comercial de papa, la variedad Diacol Capiro sin manejo químico de la enfermedad durante la etapa de tuberización y llenado, no presentó producción de papa de primera y segunda categoría (100% de pérdida para estas categorías), para la categoría tercera se presentó una disminución del 76,83% en el tratamiento sin manejo químico de la enfermedad, el rendimiento total se vio seriamente afectado por los daños causados por el patógeno *P. infestans*, generándose una disminución de 89,06% con respecto a esta misma variedad con manejo químico calendario de la enfermedad, la alta susceptibilidad del material Diacol Capiro a la enfermedad Tizón Tardío, es un factor que pone en riesgo la sostenibilidad ambiental y

económica de la siembra de este material, debido a su alta susceptibilidad a *P. infestans*, patógeno común en las zonas productoras de papa en el país y en el departamento de Nariño.

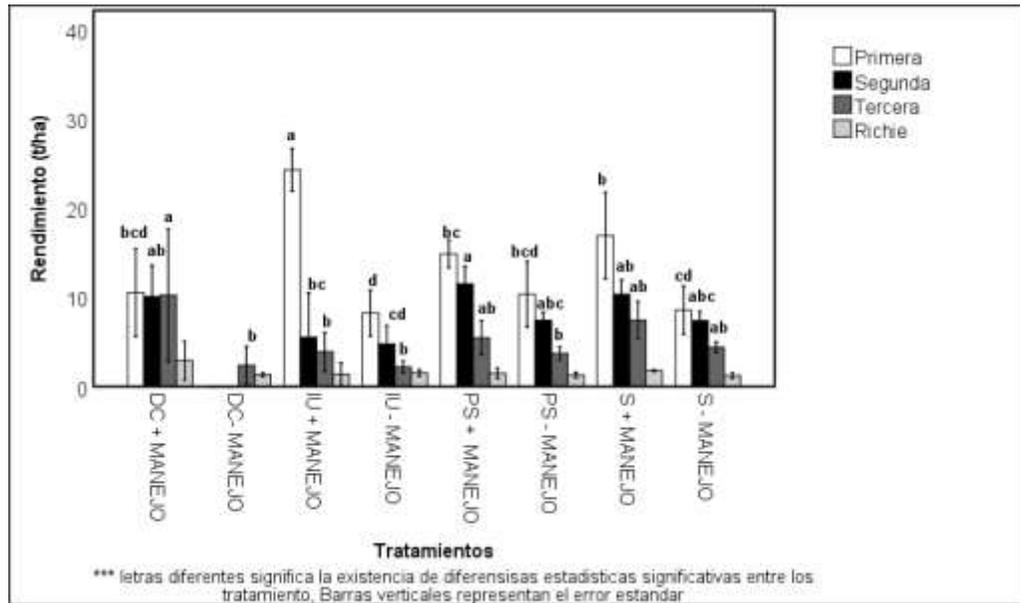


Figura 25 Rendimiento (t/ ha) categorías primeras, segunda, tercera, riche y total, materiales evaluados con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.

La variedad ICA Única, se vio seriamente afectada en su producción, por el desarrollo y evolución de la epidemia de la enfermedad tizón tardío en el municipio de Pasto, para los tubérculos de primera categoría se presentó una disminución del 66,11%, para tubérculos de segunda categoría se presentó una disminución de 13,51%, para los tubérculos de tercera categoría se presentó una reducción del 43,66%, esta disminución en la producción de tubérculos de diferentes categorías en la variedad ICA Única, genero una disminución en el rendimiento total de 49,88% expresado en t/ha, concluyendo que a pesar del alto nivel de daño, el principal efecto de la presencia de la enfermedad es la reducción del rendimiento de tubérculos de primera categoría, tubérculos que marcan en gran medida la rentabilidad económica del cultivo, asumiendo que la siembra de este material en épocas, de alta precipitación, humedad relativa superior al 80% y temperatura menor a 13°C, durante periodos prolongados de tiempo, generan un alto riesgos de ataque de la enfermedad y riesgo económico por disminución del rendimiento, es válido sugerir que la

siembra de este material debe estar acompañado de un monitoreo constante de las condiciones climáticas y visual para detectar síntomas de la enfermedad y proceder a tomar las medidas de control que se ajusten al nivel de daño y permitan de alguna manera romper la costumbre de las aplicaciones calendario, muy comunes en las zonas productoras de papa, independiente del material comercial sembrado y de las condiciones climáticas presentes en la zona de cultivo.

La variedad Pastusa Suprema con y sin manejo químico de la enfermedad presentó una reducción del 30,5% en tubérculos de primera categoría, 35,57% de reducción para tubérculos de segunda categoría y para tubérculos de tercera categoría se presentó una reducción de 32,25%, estas reducciones en cada una de las categorías generó una reducción total del rendimiento (t/ha) de 31,75%, asumiendo que debido a los resultados observados y obtenidos en cuanto a comportamiento del material frente a *P. infestans* y como la presencia de la enfermedad afecta el rendimiento del cultivo, podemos sugerir que la variedad Pastusa Suprema, presenta características de resistencia y tolerancia a la enfermedad, ya que se evidenció un nivel de daño considerablemente menor (30% de área afectada) en comparación al resto de materiales evaluados, los cuales presentaron niveles de daño superior al presentado por Pastusa Suprema sin manejo químico de la enfermedad, obteniendo rendimientos aceptables, considerando el ataque del patógeno en mención, por lo tanto es válido inferir que la siembra de esta variedad reduce considerablemente el riesgo de disminución del rendimiento comercial, debido a la presencia de la enfermedad tizón tardío, en la zona productora del municipio de Pasto.

El rendimiento comercial obtenido para el genotipo Superior con y sin manejo químico de la enfermedad, este material presentó una disminución de 49,44%, en el rendimiento de categoría primera, la categoría segunda presentó una reducción de 28,57% y la categoría tercera presentó una reducción de 40,92%, esta reducción en las diferentes categorías según diámetro del tubérculo, generaron una reducción en el rendimiento total (t/ha) de 39,64%, en comparación con Pastusa Suprema, material que presentó la menor reducción de rendimiento total, el clon Superior presentó un 10% más de pérdida en el rendimiento total en comparación con Pastusa Suprema sin manejo químico de la enfermedad y un 9% menos de pérdida en rendimiento, que el presentado por ICA Única sin manejo químico de la enfermedad.

En la figura 26 se puede observar la comparación de rendimiento entre los diferentes materiales evaluados, es importante resaltar, que la variedad Pastusa Suprema presentó un buen comportamiento en cuanto a la disminución del desarrollo y avance del daño causado por el patógeno *P. infestans*, reflejado en una disminución no tan severa del rendimiento, en comparación con los demás materiales evaluados sin manejo químico de la enfermedad, si bien no se hicieron pruebas multi-ambientes, es válido sugerir la necesidad de estas pruebas en diferentes localidades productoras del cultivo, sin embargo es válido resaltar que este material puede jugar un rol importante en el manejo sostenible de la enfermedad tizón tardío, en las zonas productoras del municipio de Pasto, donde se reportan alrededor de 1000 ha del cultivo establecidas en el municipio (Consolidado agropecuario departamento de Nariño 2016).

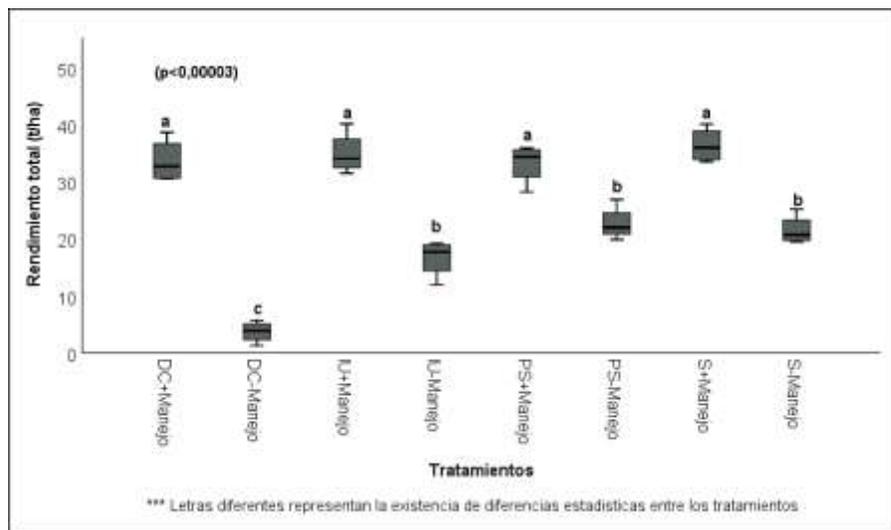


Figura 26 Rendimiento total (t/ ha) materiales comerciales evaluados con y sin manejo químico de la enfermedad tizón tardío.

5. Modelo de predicción severidad versus rendimiento

En la tabla 11 se puede observar claramente el alto nivel de relación existente entre las variables evaluadas, donde se presentan valores negativos para la mayoría de las interacciones, lo cual significa que la relación existente es de carácter inversamente proporcional entre el rendimiento potencial y el nivel de resistencia del material de siembra, reflejado en el nivel de daño causado por *P. infestans*, en el municipio de Pasto, ratificando que independientemente del genotipo la presencia y ataque de la enfermedad, afecta negativamente el rendimiento potencial del cultivo. Otro factor importante es la relación entre la severidad y el rendimiento de categoría comercial primera, segunda y total, variables relacionadas con el rendimiento económico del cultivo, los valores R de Pearson, fueron de (-0,81), (-0,73) y (-0,96), valores que muestran una relación casi perfecta, y que nos permite observar un efecto marcado y fuerte de los niveles de severidad, causados por el ataque del patógeno, en el rendimiento de la categoría primera, segunda y el rendimiento total.

Tabla 12. Correlación variables severidad y rendimiento de las diferentes categorías comerciales.

Variables	R de Pearson
Severidad-Rendimiento tubérculos primera categoría (Kg)	-0,8208**
Severidad-Rendimiento tubérculos Segunda categoría (Kg)	-0,6957*
Severidad-Rendimiento tubérculos Tercera categoría (Kg)	-0,5697*
Severidad-Rendimiento tubérculos Richie categoría (Kg)	-0,2581
Severidad-Rendimiento Total (Kg)	-0,8785**

Buscando corroborar la situación observada en la tabla 12, y la relación entre las variables de severidad y rendimiento en sus diferentes categorías, se realizó un análisis de componentes principales (PCA o ACP), usado para variables de tipo cuantitativo, el cual permite agrupar la información aportada por múltiples variables en pocos componentes, que para el caso de este estudio y según lo observado en la figura 27, es posible observar que dos factores o dimensiones tienen el mismo poder explicativo que el 100% de las variables originales. Para el caso específico de este estudio, la explicación de la varianza

de los resultados obtenidos se soporta en dos factores o dimensiones; dimensión 1 la cual explica el 53,15% y esta influenciada principalmente por las variables rendimiento de primera, segunda categoría (t/ha) y rendimiento total. La dimensión 2 explica el 29,95% y principalmente esta influenciado por la variable severidad.

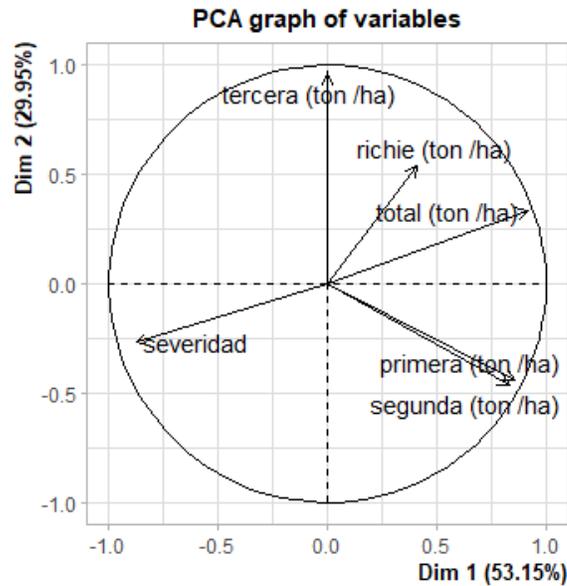


Figura 27. Contribución de las variables que aportan a la explicación de la varianza durante esta investigación.

Este método suele ser muy útil y es ampliamente usado antes de la aplicación de otras técnicas, como por ejemplo la regresión, en la figura 28, es posible observar que las variables que más están aportando son el rendimiento total, severidad, rendimiento de segunda y rendimiento de tercera, por lo tanto y considerando esta situación, se corrobora que el principal impacto de la presencia de la enfermedad, se da sobre el rendimiento de primera y segunda categoría, situación que impacta fuertemente el rendimiento total del cultivo, por lo tanto para el modelo de regresión cuadrática aplicado durante esta evaluación se decide trabajar con las variables severidad y rendimiento total.

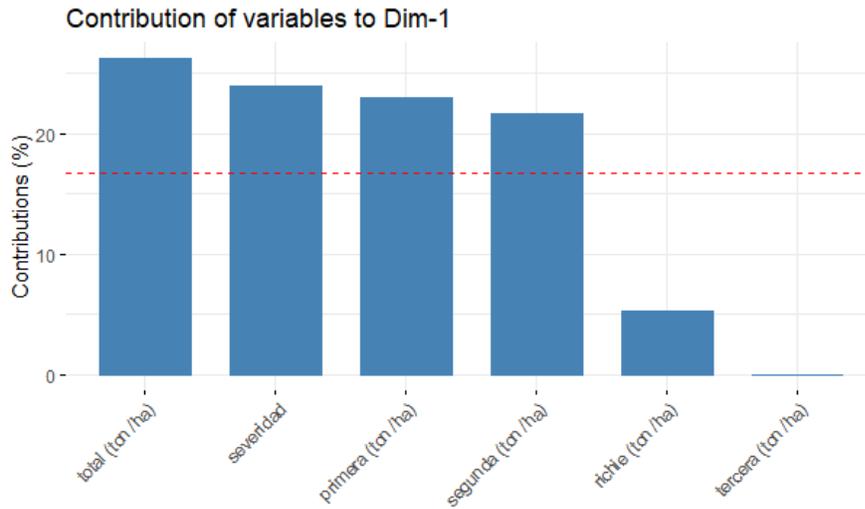


Figura 28 Contribución de las variables en la dimensión 1 (53,13% de aporte a la varianza de esta evaluación).

Buscando predecir el efecto de la severidad del ataque de un patógeno como *P.infestans*, en interacción con el grado de resistencia de los genotipos, y como este nivel de resistencia acarrea un nivel de riesgo diferente de disminución del rendimiento potencial, en las figuras 29, 30, 31 y 32, se puede observar como el nivel de avance de la enfermedad, es dependiente del material comercial, y como a su vez este nivel de resistencia pone en riesgo el rendimiento potencial y por ende la rentabilidad del cultivo.

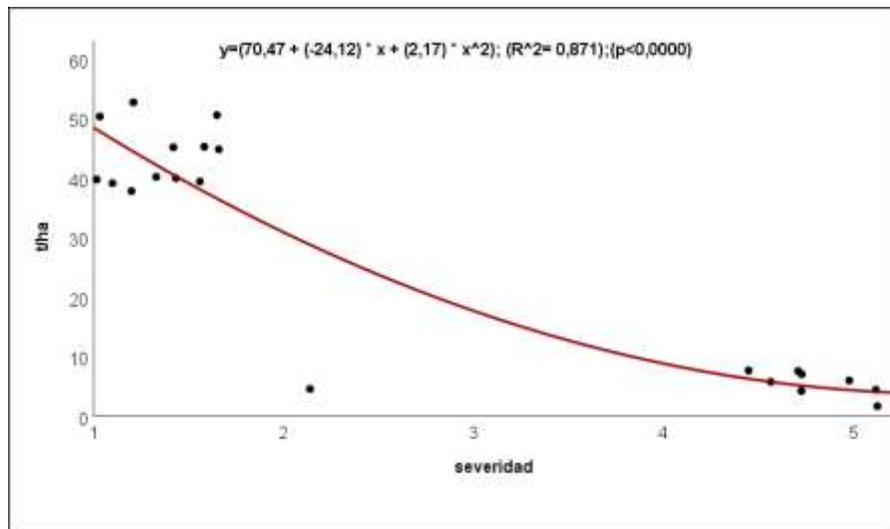


Figura 29 Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío en para la variedad Diacol Capiro.

En la figura 29, se puede observar que el material Diacol Capiro puede presentar reducciones severas en el rendimiento total (t/ha), donde la mayor influencia se da por la incapacidad en la producción de tubérculos de primera y segunda categoría, debido a la reducción del índice de área foliar, a causa del ataque severo de la enfermedad, las pérdidas en esta categoría, alcanzan valores de 100%, el cual reduce el rendimiento total aproximadamente en un 90%, por lo tanto, el riesgo de pérdida es alto, lo que genera una alta dependencia de la variedad Diacol Capiro a la aplicación de fungicidas, y al monitoreo estricto de la enfermedad bajo la presencia de condiciones climáticas ideales para la ocurrencia de la enfermedad.

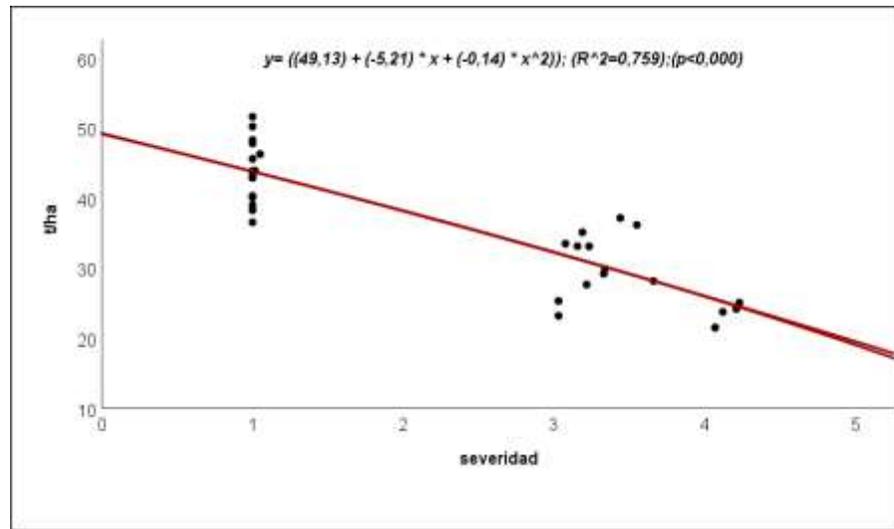


Figura 30. Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío para la variedad ICA ÚNICA.

En la figura 30, correspondiente a la variedad ICA Única, se puede observar menor riesgo de pérdida en el rendimiento en comparación con Diacol capiro, donde el nivel de daño superior al 25% del área foliar, generara pérdidas aproximadas del 75% en el rendimiento de tubérculos de primera categoría. El rendimiento total se verá afectado más severamente, con un nivel de daño entre 35 y 50%, se podrán presentar reducciones del 75% del rendimiento total (t/ha), demostrando que el riesgo de pérdida en el rendimiento es alto, se recomienda mantener el nivel de enfermedad en niveles de 0%, durante la etapa fenológica de tuberización y llenado del tubérculo ya que a partir del nivel de daño del 5%, se empiezan a generar reducciones en el rendimiento.

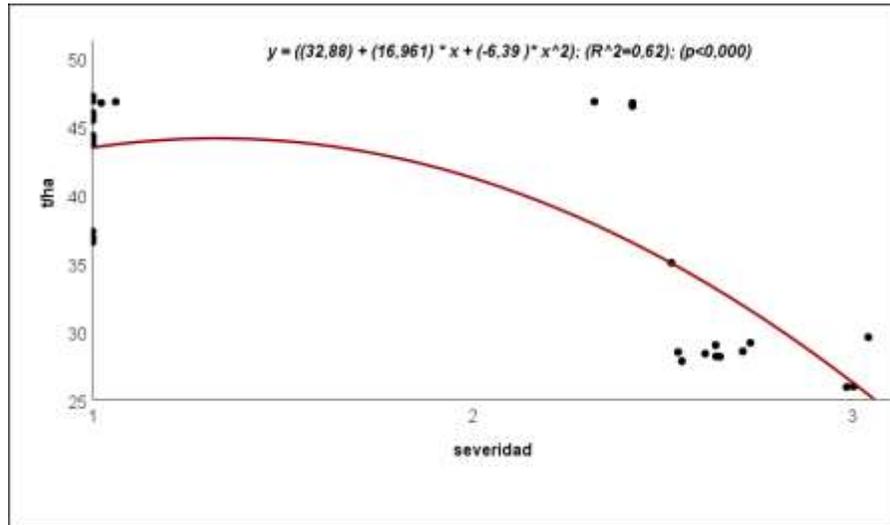


Figura 31 Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío para la variedad Pastusa suprema.

En la figura 31, modelo correspondiente a la variedad Pastusa Suprema, es posible observar que los niveles de pérdida en el rendimiento total (t/ha) fueron significativamente menores al presentado por las variedades Diacol Capiro e ICA Única, donde a niveles de enfermedad promedio de 10%, podrían llegar a presentar pérdidas promedio cercanas al 30%, a causa del menor nivel de daño, debido al desarrollo más lento de la epidemia en esta variedad. Se recomienda realizar evaluación con diferentes frecuencias y dosis de productos incluidos en el manejo químico de la enfermedad, evaluando el impacto ambiental, además de la rentabilidad económica del cultivo, se infiere que este material contribuye sustancialmente en la sostenibilidad del sistema productivo en la zona productora del municipio de Pasto y se sugiere la siembra de este en zonas de alta presión de la enfermedad, disminuyendo el riesgo de ocurrencia de epidemias severas y reducción del rendimiento potencial.

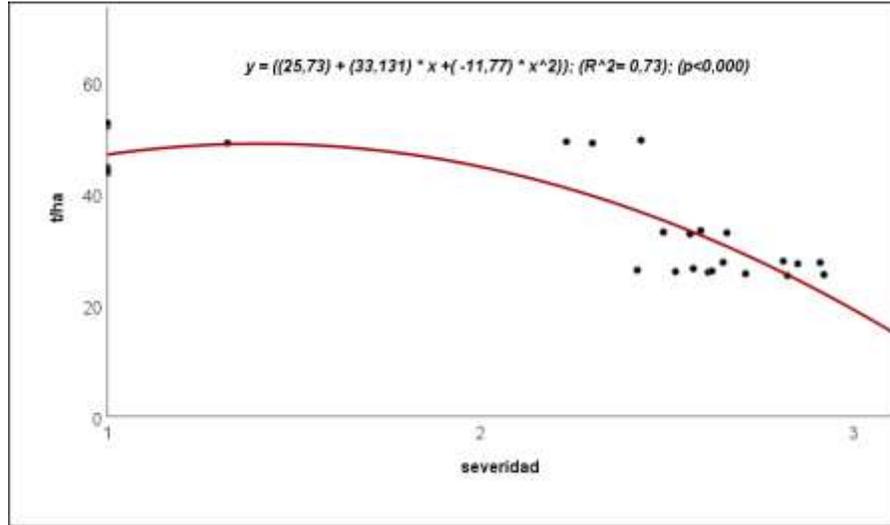


Figura 32. Predicción de rendimiento (t/ha) según nivel de severidad de tizón tardío para el genotipo comercial superior.

En la figura 32 es posible observar el modelo propuesto para el material comercial Superior, el cual es similar al de Pastusa Suprema con la diferencia que el nivel de pérdida fue más alto, en cerca de 10% al presentado por Pastusa Suprema, considerando el buen comportamiento de este material ante la presencia de *P. infestans*, presentando pérdidas no tan severas, en relación a materiales más susceptibles evaluados durante este trabajo, por lo tanto debido a las características de resistencia a la enfermedad, el riesgo de pérdida es aceptable y también se sugiere lo mismo que para la variedad Pastusa Suprema.

Discusión

El bajo nivel de daño en los tratamientos con manejo químico de la enfermedad permite evidenciar la eficiencia de los fungicidas de síntesis química en el control de la enfermedad tizón tardío. Se pudo observar que bajo un plan de aplicaciones calendario (práctica común en el departamento de Nariño) de los ingredientes activos en rotación usados durante este ensayo, fue posible mantener niveles de enfermedad muy bajos, cercanos a 0%, sin embargo es necesario discutir y profundizar sobre el costo ambiental y económico de la aplicación en exceso de fungicidas de síntesis química.

Como se esperaba, los tratamientos sin manejo químico de la enfermedad obtuvieron los niveles más altos de daño, la menor acumulación de biomasa y los rendimientos más bajos, es de resaltar el alto nivel de daño ocasionado por la enfermedad en la variedad Diacol Capiro y en consecuencia los bajos rendimientos obtenidos en este tratamiento, con pérdidas cercanas al 90% de la producción potencial alcanzable, comparado con el tratamiento con manejo químico de la enfermedad, estas pérdidas se adjudican al desarrollo severo de los síntomas de la enfermedad Tizón tardío en los órganos aéreos de las plantas, estos resultados permiten concluir y ratificar que esta variedad presenta características de alta susceptibilidad al tizón tardío, en la zona productora de papa del municipio de Pasto.

La variedad comercial ICA Única sin manejo químico de la enfermedad, presentó un nivel de daño menor al de Capiro, sin embargo este se considera importante, y la disminución en la producción causada por la enfermedad en este material se considera significativa (49,88% de la producción total) en comparación con esta misma variedad con manejo químico de la enfermedad, las características de susceptibilidad de estos 2 materiales y de la mayoría de variedades comerciales cultivadas a nivel mundial, situación que obliga a tratar frecuentemente con fungicidas, con una fuerte actividad oomicida, para proteger el cultivo (Haesaert et al., 2015).

La variedad Pastusa Suprema y Superior, presentaron niveles de daño entre 40 y 50% al final del ciclo de evaluación, generando una menor disminución en el rendimiento total (31,75% y 40,92% respectivamente), en comparación con estas mismas variedades, con manejo químico de la enfermedad, el rendimiento obtenido se considera aceptable, bajo los niveles de enfermedad presentes, especialmente para la variedad Pastusa Suprema, por lo tanto podemos inferir que este material presenta características de “Tolerancia a la enfermedad”, la cual se define como la capacidad de las plantas para producir una buena cosecha aun cuando están infectadas por un patógeno, resultado de las características hereditarias específicas de la planta hospedante que permite que el patógeno se desarrolle y propague en ella, mientras que la planta sobrevive para dar una buena cosecha (Betancourth et al., 2008).

Según reportes de Santos et al., (2010), los resultados de su investigación para Cundinamarca, son coincidentes con los resultados obtenidos en esta investigación, donde

la variedad Pastusa Suprema presentó una acumulación de biomasa mayor al resto de genotipos, probablemente situación que se dio, debido a una producción abundante de tubérculos, más una producción exuberante de follaje, característica de la variedad, sin embargo el mayor rendimiento comercial lo obtuvo la variedad ICA Única, quien se caracteriza por producir un número importante de tubérculos de categoría primera.

Dos de los factores esenciales en el rendimiento agrícola son la tasa fotosintética y el índice de cosecha de los cultivos, siendo este último el factor con mayor impacto en los rendimientos y particularmente, la forma como ocurre la partición de asimilados en las plantas (Soto et al., 2018). El crecimiento del follaje y la expansión del área foliar es muy rápido durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo, una vez se consumen las reservas del tubérculo madre, las hojas pasan a ser la fuente principal de foto-asimilados, los cultivos de papa en condiciones óptimas de crecimiento pueden llegar a cubrir totalmente el suelo en 40-45 días después de emergencia (Morales et al., 2011).

Romero et al., (2012) mostraron la importancia de la duración del follaje fisiológicamente activo en la producción de tubérculos de papa, inclusive severidades de la enfermedad en el rango de 90 y 100 % de daño al inicio de tuberización permitieron la formación de tubérculos, el periodo de mayor impacto en el rendimiento total y en la calidad de los tubérculos es cuando el inicio de la epifita ocurre en el período previo al inicio de tuberización (Romero et al., 2012). La traslocación de los carbohidratos y azúcares hacia los órganos de reserva, como son los tubérculos, está directamente relacionada con el área fotosintética de la planta, la cual se ve afectada por la presencia de un patógeno.

Según Morales et al., (2011) la eficiencia en el uso de la luz, está supeditada a la existencia de ciertas condiciones como la disponibilidad de agua, nutrientes, la cantidad de radiación la edad y estado del follaje, este IAF depende de la acumulación de materia seca durante la etapa vegetativa, entre más alta la biomasa foliar y el IAF con el que la planta llegue a tuberización, mayor será la cantidad de radiación interceptada durante la etapa de tuberización y llenado del tubérculo, presentándose un mayor potencial de rendimiento. Si se presenta una interrupción en el crecimiento en la etapa de tuberización y llenado, se acortará el periodo de crecimiento del tubérculo, generando disminuciones en el rendimiento. En el caso del ataque de *P. infestans* genera un bajo índice de cosecha, debido a que la planta es incapaz de aprovechar la gran cantidad de follaje producido

durante la etapa vegetativa, debido a la reducción de área foliar a causa del ataque severo del patógeno. Para el caso del cultivo de la papa un IAF de 3 a 4,5 intercepta aproximadamente 87 a 96% de la radiación incidente, por lo tanto, cultivos con mayor IAF tienen una tasa de crecimiento de los tubérculos mayor que cultivos con menor IAF (Morales et al., 2011; Soto et al., 2018).

Algunas de las conclusiones más importantes de Santos et al., (2010), fueron las importantes implicaciones en el manejo agronómico del cultivo, entre los que se debe tener en cuenta una frecuente y dedicada supervisión para toma de decisiones para manejo de tizón tardío, en la variedad susceptible Diacol Capiro, en el periodo de tuberización y llenado desde la semana 10 hasta la semana 18 periodo en el cual se presentan incrementos progresivos en el porcentaje de materia seca total asignado a tubérculos que le permiten alcanzar el mayor índice de cosecha, estas conclusiones se pueden extrapolar en la presente investigación a los diferentes materiales evaluados, donde este periodo es crítico para el rendimiento comercial del cultivo.

Este caso se puede observar en los genotipos más afectados por la enfermedad, son los que presentaron menor rendimiento comercial, existe una correlación negativa entre los niveles de severidad y el rendimiento de tubérculos de primera, segunda y total (t/ha). Los genotipos susceptibles a la enfermedad no alcanzaron a desarrollar un buen número de tubérculos debido a la baja disponibilidad de hidratos de carbono y fotoasimilados necesarios para el engrosamiento y buen desarrollo del tubérculo; proceso que se ve afectado por el ataque del patógeno sobre el área foliar de las plantas, lo que influye directamente en el proceso de la fotosíntesis (Romero et al., 2012). Considerando lo anteriormente discutido se deben realizar prácticas culturales y de manejo dirigidas a retrasar el inicio de la epifita y retrasar las tasas reproductivas del patógeno, mediante la combinación de diversos factores, los más conocidos son aplicación de fungicidas y resistencia del huésped.

En países con cultivo intensivo de papa y clima templado y húmedo, los productores aplican de 12 a 15 veces por temporada de cultivo, en temporadas más húmedas el número de aplicaciones de fungicidas puede llegar hasta 20 o incluso más, la alta dependencia de los fungicidas en combinación con su aplicación frecuente conduce a una presión de selección significativa en las poblaciones de *P. infestans*, el origen de esta

capacidad de adaptación reside en el genoma del oomicete en combinación con su alta capacidad reproductiva (Haesaert et al., 2015). A pesar de las frecuentes aspersiones con fungicidas, el tizón tardío sigue causando grandes pérdidas económicas, El impacto ambiental generado por las estrategias de control químico del tizón tardío de la papa está directamente relacionado con los fungicidas específicos aplicados, el número de aplicaciones y las dosis utilizadas (Kessel et al., 2018).

Por razones medioambientales y para satisfacer las demandas de los consumidores a largo plazo, existe la necesidad de desarrollar métodos alternativos de control del tizón tardío (Liljeroth et al., 2016). Existen estrategias de manejo integrado de la enfermedad, las cuales están enfocadas en reducir el aporte de fungicidas, un ejemplo de estos métodos es el IPM 2.0 propuesto por Kessel et al., (2018). Esta estrategia fue diseñada para superar el control insuficiente de la enfermedad a través del uso de variedades resistentes debido a la alta capacidad de adaptación de *P. infestans*, este plan de manejo se basa en los principios del Manejo Integrado de Plagas y enfermedades.

Métodos alternativos y más sostenibles de manejo como la resistencia inducida, la cual es un método de control alternativo de la enfermedad, consiste en la aplicación exógena de compuestos no tóxicos o microorganismos que estimulan la defensa de las plantas, es un método de control que por sí solo puede no ser lo suficientemente eficiente como para controlar una enfermedad tan devastadora como el tizón tardío, pero puede desempeñar un papel si se combina con otros métodos como la resistencia genética (Liljeroth et al., 2016).

La estrategia de control IPM 2.0 para el tizón tardío se basa en la introducción de variedades de papa resistentes como base de la estrategia, la resistencia genética se complementa con fungicidas de bajo aporte para proteger los genes R, esta estrategia puede aplicarse con variedades de papa susceptibles, pero los beneficios son relativamente pequeños, los beneficios aumentan significativamente cuando la estrategia IPM2.0 usa variedades resistentes con genes R individuales (reducción del 80-90% de la entrada de fungicidas) (Kessel et al., 2018).

Según Liljeroth et al., (2016) el uso de inductores de resistencia como el Fosfito de Potasio es un alternativa viable para el control de la enfermedad, sin embargo, en cultivares

susceptibles, el tratamiento con fosfitos es poco efectivo, en cultivares de papa con un nivel relativamente alto de resistencia al tizón tardío, se encontraron resultados positivos en cuanto a la disminución en los niveles de severidad de la enfermedad, además de que la dosis de fungicidas aplicados por ciclo se reducen, sin aumentar significativamente la gravedad de la enfermedad generando una reducción del rendimiento. Lo anteriormente discutido permite concluir que es necesario trabajar en la búsqueda y monitoreo constante de fuentes y variedades con características de resistencia, con el objetivo de reducir el aporte de fungicidas por ciclo de cultivo, además de reducir el impacto negativo al ambiente, por lo tanto el uso de materiales resistentes se convierte en una estrategia que aporta en el ámbito económico y ambiental, contribuyendo con la sostenibilidad del sistema productivo, como una estrategia de vida de las comunidades locales, en el departamento de Nariño.

Durante esta investigación, las evaluaciones comprendieron la etapa entre la tuberización y el llenado del tubérculo, aunque es válido resalta que no hubo presencia de la enfermedad en tubérculos, es importante reconocer la importancia de la tuberización en el rendimiento comercial del cultivo, ya que, si ésta permanece libre del patógeno, se inducirá la formación de tantos tubérculos como la genética de la planta pueda expresar, bajo condiciones específicas de manejo, el desarrollo de esos tubérculos dependerá de los sucesos que ocurran posterior a esta etapa fenológica, correspondiente a llenado de tubérculos (Romero et al., 2012). La tasa de crecimiento de los tubérculos depende de la TAN presente en la etapa vegetativa, si no existen limitantes ambientales relacionadas con provisión de agua y nutrientes o factores reductores como enfermedades o plagas, el crecimiento de los tubérculos dependerá de la radiación interceptada por el cultivo, la temperatura y la concentración de CO₂ (Morales et al., 2011). Por lo tanto, es fundamental proteger y garantizar el buen desarrollo foliar, para garantizar una mayor producción de fotoasimilados y mayor acumulación de estos en los diferentes órganos de interés, especialmente en el tubérculo, órgano de interés económico en este sistema productivo en particular.

Según reportes de Oliveira & Derrick (2021), quienes afirman que el tiempo en el que el índice de área foliar permanece fisiológicamente activo es un factor influyente en el rendimiento final de los tubérculos. Según Golovko & Tabalenkova (2019), se ha

demostrado para muchos cultivos, incluida la papa, que la tasa de fotosíntesis en hojas individuales alcanza un máximo en algún momento antes de que termine la expansión de la hoja, encontrado una disminución continua en la tasa de fotosíntesis con la edad, además demostró que la madurez tardía del follaje se asoció con un aumento en la distribución del tamaño de los tubérculos a favor de los tubérculos de gran tamaño.

Los síntomas y la alta severidad de la enfermedad generan una reducción determinante en el rendimiento; esto se pudo observar en las variedades comerciales ICA Única y Diacol Capiro principalmente, las cuales presentaron altos niveles de daño y rendimientos bajos, reflejando claramente que el ataque de *P. infestans* al ocurrir principalmente en la parte aérea de la planta, afecta el rendimiento de los tubérculos en el cultivo de papa, el cual está determinado por la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el follaje, por la eficiencia con la cual la radiación interceptada es convertida en materia seca y por la proporción de acumulación de materia seca traslocada a los tubérculos (Betancourth et al., 2008).

El uso de variedades resistentes, además de un buen sistema de toma de decisiones, puede generar la reducción de la cantidad de fungicidas aplicados por ciclo de cultivo, garantizando un área foliar fisiológicamente activa por más tiempo, por lo tanto y a manera de conclusión podemos decir que materiales como Pastusa Suprema y Superior, podrían ser usadas en evaluaciones de métodos alternativos de manejo como el uso de fosfitos de potasio, incluido en planes de manejo apoyados en sistemas de predicción de eventos infecciosos, de esta manera se contribuirá en la sostenibilidad del cultivo eliminando las aplicaciones calendario, generando una reducción del impacto nocivo, por la aplicación de estas sustancias al medio ambiente, además de contribuir con la obtención de productos más inocuos, con menor carga de agroquímicos.

Considerando la gran capacidad de adaptación del patógeno *P. infestans* y la ruptura de la resistencia varietal de manera frecuente, es necesario realizar trabajos de monitoreo de la enfermedad más profundos, en variedades comerciales con características de resistencia al patógeno, ya que esta se suele romper a través del tiempo como es el caso de la variedad ICA Única, la cual se reporta con altos niveles de resistencia en trabajos de Huarte (2001), además de monitoreo a la población del patógeno, para detectar la aparición de variantes más virulentas o resistentes a algunos ingredientes activos, con la

necesidad de ajustar los planes de manejo aplicados. Por último, es importante resaltar que a pesar de que se siembren variedades resistentes, es importante, implementar un sistema de protección, de esta resistencia a través del uso de fungicidas o inductores de resistencia, para prolongar la expresión de estas características de resistencia a través del tiempo.

Recomendaciones y Conclusiones

Se recomienda la siembra de la variedad Pastusa Suprema, en zonas de alta presión de la enfermedad tizón tardío, ya que, durante esta investigación, fue posible evidenciar que la variedad influye negativamente en el desarrollo de la epidemia del tizón tardío, además de observar que a pesar de que se generó un nivel de daño considerable, el rendimiento presentó una reducción moderada, lo que permite reducir el riesgo por pérdida de rendimiento a casusa de la enfermedad.

Las variedades ICA Única y Diacol Capiro, debido a su susceptibilidad, presentaron pérdidas del 49 y 90% respectivamente para el rendimiento total, recomendando no sembrar estos materiales en zonas con alta presión de inóculo del patógeno *P. infestans* o con pronósticos de alta precipitación, humedad relativa y temperatura promedio inferior a 13°C, ya que se corre un riesgo muy alto de afecciones severas de la enfermedad y como consecuencia de este ataque, la reducción severa del rendimiento, acarreado pérdidas económicas severas para el productor.

Es importante diseñar planes de manejo, que preserven por mayor tiempo el follaje, en las variedades susceptibles, de esta manera, poder conservar la maquinaria fotosintética activa y trabajando por mayor tiempo, logrando la obtención de rendimientos comerciales competitivos y cercanos a los potenciales, para materiales con características de resistencia es necesario diseñar planes de manejo que eviten o retrasen la aparición de la enfermedad, ya que debido al lento crecimiento y desarrollo de la epidemia en estos materiales se podría llegar a reducir notablemente las aplicaciones de fungicidas en el cultivo, contribuyendo notoriamente con el impacto ambiental, además de mejorar la inocuidad del producto a través de la reducción de agroquímicos.

Es necesario usar con mayor amplitud el recurso genético disponible actualmente con características de resistencia a la enfermedad y que cumplan con los requerimientos nutricionales del mercado, desplazando a materiales como Diacol Capiro, que debido a su alta susceptibilidad, genera una alta dependencia a las aplicaciones calendario, generando mayores costos de producción e impactos ambientales más severos, además de afectar negativamente el producto final, debido a la carga química de este, por lo tanto los planes de mejoramiento genético deben seguir explorando las fuentes de resistencia disponibles y obtener variedades con características de resistencia, que permitan ampliar la oferta actualmente existente.

La producción o rendimiento final del cultivo es una consecuencia directa, de mantener el follaje el mayor tiempo posible, funcional y en las mejores condiciones, evitando la pérdida de este importante órgano, involucrado en la fotosíntesis, por lo tanto, la aparición de síntomas de tizón tardío siempre va a tender a reducir el rendimiento comercial por llenado y no por calidad, ya que en la mayoría de eventos infecciosos del patógeno en Nariño el tubérculo permanece cosméticamente intacto.

Los materiales evaluados, exhiben características de eficiencia fisiológica, medida a través del IC, el cual se ve favorecido por el manejo químico y reducido severamente ante ataque de la enfermedad, como fue el caso de Diacol Capiro, que presentó IC de 40% aproximadamente, debido a la escasa biomasa aérea, la cual se perdió debido a la enfermedad y el bajo rendimiento obtenido, por lo tanto la enfermedad afecta directamente la eficiencia fisiológica de las plantas de papa enfermas, reflejada en una menor captación de luz, menor producción de carbohidratos, menor translocación de foto asimilados al vertedero y una baja acumulación de biomasa en tubérculos.

Referencias Bibliográficas

Agrios, G. 2005. Plant Pathology. 5th edition. Elsevier Academic Press. New York. 992 p.

Betancourth C., Portilla E., Salas H. 2008. Evaluación de la reacción de nueve genotipos de papa (*Solanum tuberosum* subsp. andigena) al ataque de *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary. Agronomía Colombiana 26(3), 411-416, 2008.

Carvajal M. 2010. Investigación sobre la absorción de CO₂ por los cultivos más representativos, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

CAMPOSTRINI, E.; YAMANISHI, O.K. 2001. Estimativa da área foliar do mamoeiro utilizando o comprimento da nervadura central. Scientia Agrícola (Brasil). 58(1):39-42.

Consolidado Agropecuario Departamental de Nariño. 2016. Gobernación de Nariño - Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y Universidad Sergio Arboleda.

Córdova H., Cotrina G., Artica M., 2021. Herramientas Circulares en manejo del Tizón tardío de la Papa (*phytophthora infestans*) en variedades resistentes. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México. Volumen 5, Número 2. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i2.379 p. 1740

Dogliotti S., Colnago P., Galván G., Aldabe L. 2011. Bases Fisiológicas del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos hortícolas Tomate (*Lycopersicum sculentum*), Papa (*Solanun tuberosum*) y Cebolla (*Allium cepa*). Universidad de la República, Montevideo-Uruguay, Consultado en: https://olericultura.files.wordpress.com/2014/12/fisio-y-crec-papa_toma_ceb.pdf

Escalante-Estrada, J. A. S. y J. Kohashi-Shibata. 2015. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. México, D. F. ISBN: 9688391085.

Forbes G., Pérez W., Andrade J. 2014. Evaluación de la resistencia en genotipos de papa *Phytophthora infestans* bajo condiciones de campo. Guía para colaboradores internacionales. Centro Internacional de la Papa (CIP). ISBN 978-92-9060-450-1.

Gardner, F.P.; Brent Pearce, R; Mitchel, R.L. 1985. Carbon fixation by crop canopies. In: *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. Pp. 31-57.

Rincón N., Olarte M., Pérez J. 2012. Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín* 65(1): 6399-6405. 2012

Golovko T and Tabalenkova G. N. 2019. Source–Sink Relationships in Potato Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2019, Vol. 66, No. 4, pp. 664–671. ISSN 1021-4437.

Haesaert G., Vossen J., Custers R c, De Loose M., Haverkort A., Heremans B., Hutten R., Kessel G., Landschoot S., Van Droogenbroeck B., Visser R., Gheysen G., 2015. Transformation of the potato variety Desiree with single or multiple resistance genes increases resistance to late blight under field conditions. *Crop Protection* 77 (2015) 163-175.

Huarte, M. (2001). *Levels of resistance to late blight available in Latin America. Pages in: Proceedings of the International Workshop on Complementing Resistance to Late Blight (Phytophthora infestans) in the Andes. February 13-16, 2001, Cochabamba, Bolivia: GILB Latin American Workshops 1. E.N. Fernández- Northcote, ed.*

Kessel G., Mullins E., Evenhuis A., Stellingwerf J., Cortes V., Phelan S., van den Bosch., Förch T., Goedhart P., van der Voet H., Lotz L., 2018. Development and validation of IPM strategies for the cultivation of cisgenically modified late blight resistant potato. *European Journal of Agronomy* 96 (2018) 146–155.

Kromann P., Taipe A., Andrade-Piedra J., Munk L., Forbes G. 2008. Preemergence Infection of Potato Sprouts by *Phytophthora infestans* in the Highland Tropics of Ecuador. Plant Disease / Vol. 92 No. 4

Liljeroth E., Lankinen A., Wiik L., Burra D., Alexandersson E., Andreasson E. 2016. Potassium phosphite combined with reduced doses of fungicides provides efficient protection against potato late blight in large-scale field trials, Crop Protection 86 (2016) 42-55.

Maldonado G, Corchuelo G., 1993. DINAMICA DE CRECIMIENTO DE DOS VARIEDADES DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.). Agronomía Colombiana, 1993, Volumen X. Número 2: pág. 114 – 121.

Marquínez, X. y G. Corchuelo. 1998. Metabolismo y asimilación de foto asimilados en los cultivos. Revista Comalfi Vol. XXV 1-3: 59-80.

Martínez Gonzalez, E., Barrios Sanromá, G., Rovesti, L., & Santos Palma, R. (2006). *Manejo Integrado de Plagas. Manual Práctico.* Cuba.: Centro Nacional de Sanidad Vegetal (CNSV).

Morales S., Mora R., Rodríguez J., Salinas Y., Colinas M., Lozoya H. 2011. Desarrollo y rendimiento de papa en respuesta a la siembra de semilla–tubérculo inmadura. Rev. Chapingo Ser.Hortic vol.17 no.1 Chapingo ene./abr.

Oliveira J & Derrick M. 2021. Assessing potato canopy growth and development at the individual leaf level to improve the understanding of the plant source–sink relations. NEW ZEALAND JOURNAL OF CROP AND HORTICULTURAL SCIENCE <https://doi.org/10.1080/01140671.2021.1879878>

Oyarzun, P., Taipe, J., & Forbes, G. (2001). *Phytophthora infestans su actividad y particularidades en el Ecuador. Phytophthora infestans su Actividad y Particularidades en el Ecuador. Perfil de País. Consultado en*

https://nanopdf.com/download/phytophthora-infestans-su-actividad-y-particularidades-en-el_pdf

Pacilly F., Groot J., Hofstede G., Schaap B., van Bueren E, 2016. Analysing potato late blight control as a social-ecological system using fuzzy cognitive mapping. *Agron. Sustain. Dev.* (2016) 36: 35 DOI 10.1007/s13593-016-0370-1.

Porras PD, Herrera CA. (2015). Modelo productivo de la papa variedad Diacol Capiro para el departamento de Antioquia. Mosquera, Colombia: [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Romero G., Lozoya H., Mora G., Fernández S., Grunwald N. 2012. Rendimiento de papa en función de epidemia por Tizón Tardío (*Phytophthora infestans* Mont de Bary) *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 35 (1): 69-78.

Santos M., Segura M., Núñez C. 2010. Análisis de Crecimiento y Relación Fuente-Demanda de Cuatro Variedades de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* 63(1): 5253-5266.

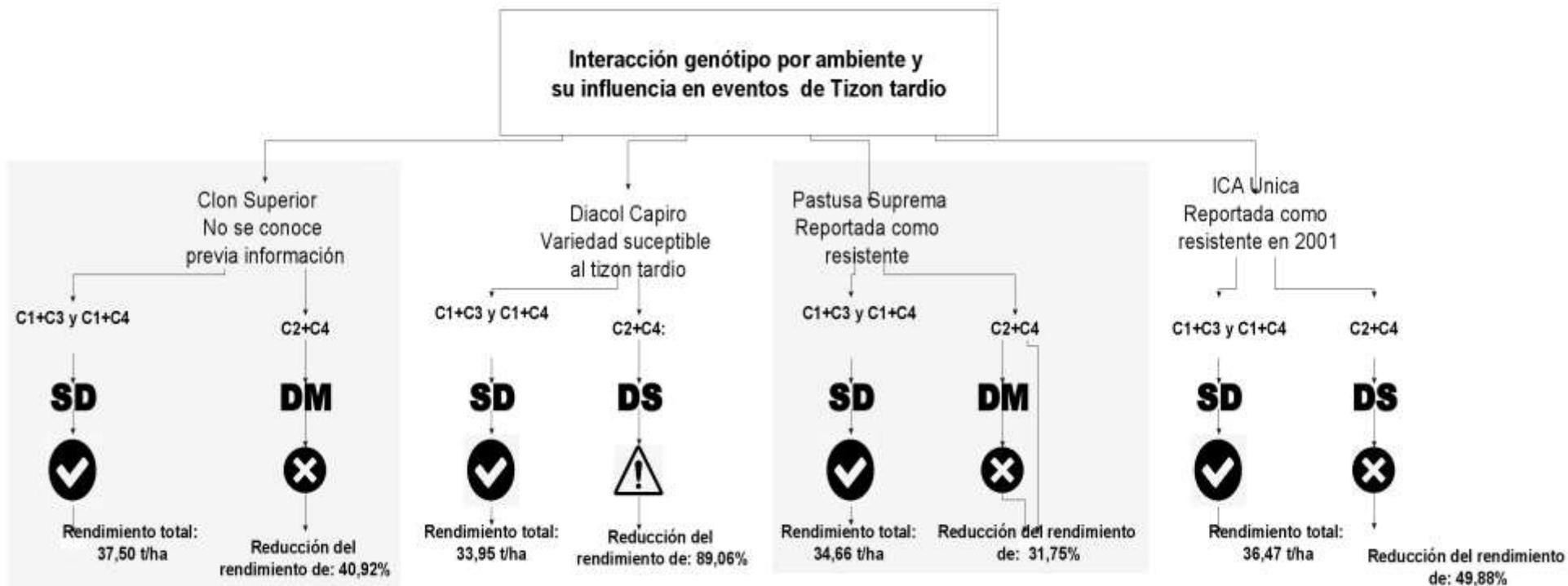
Soto A., Cotes J., Rodríguez D. 2018. Modelo de simulación del crecimiento y desarrollo de la papa criolla. *Ciencia en Desarrollo*, Vol. 9 No. 1 ISSN 0121 – 7488.

Stefanczyk E., Sylwester S., Brylinska M., Sliwka J. 2017. Expression of the potato Late Blight resistance gene Rpi-phu1 and *Phytophthora infestans* effector in the compatible and incompatible interactions in potato. *Phytopathology* 107:740-748, <http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO-09-16-0328-R>.

Seminario J., Seminario A., Domínguez A., Escalante B. 2017. Rendimiento de cosecha de diecisiete cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) del grupo *Phureja*. *Scientia Agropecuaria* vol.8 no.3 Trujillo.

6. Discusión general

Considerando los resultados obtenidos en la presente investigación y resumidos de manera general en la figura 32, haciendo énfasis en el gran número de factores involucrados en la interacción entre un genotipo y un patógeno, que en el caso específico de esta investigación correspondió a *P. infestans* organismo causante del tizón tardío, enfermedad más limitante en la producción de papa a nivel mundial, durante esta investigación fue posible observar el rol primordial del clima (temperatura, humedad relativa y precipitación) en la ocurrencia de epidemias del tizón tardío, factor que supero la influencia de la resistencia del hospedero y el manejo químico aplicado, esto se puede inferir debido a los comportamientos totalmente distantes en la curvas de severidad de la enfermedad, entre los dos ciclos de evaluación, donde en un primer ciclo (segundo semestre de 2018), se presentó una humedad relativa promedio de 80,13%, temperatura máxima, promedio y mínima de 19,15°C, 12,85°C y 6,6°C respectivamente, la precipitación acumulada fue de 260,85 mm, las lluvias fueron mal distribuidas, donde el mes con más precipitación se presentó en noviembre de 2018, al final del ciclo de evaluación, impidiendo de esta manera la expresión de la enfermedad, ya que coincidió con la etapa de senescencia del cultivo. A pesar de la suspensión de las aplicaciones de productos de síntesis química, a partir de la fase de tuberización y llenado del tubérculo hasta el final del ciclo de evaluación, no se presentaron diferencias estadísticas significativas entre el nivel de daño, AUDPC y valor escala de resistencia de Yuen & Forbes (2009) en los diferentes materiales evaluados, considerando las características de resistencia y susceptibilidad, donde materiales altamente susceptibles como Diacol Capiro expresan la denominada resistencia de campo, que se debe más que a los mecanismos de defensa de la planta, a la dificultad del patógeno por infectar y colonizar el hospedero, es válido considerar que durante este ciclo de cultivo el factor climático que jugó un rol limitante fue la precipitación al ser muy baja en los meses de evaluación, impidiendo principalmente entre otras acciones el movimiento de las zoosporas, y el desecamiento de estas debido a la condición de sequía presente durante la mayor parte de este ciclo de evaluación.



Biomasa adecuada;
 Reducción de la biomasa;
 Reducción severa de biomasa;
 SD: sin daño;
 MD: Daño medio a severo.

Figura 32 Interacción de los genotipos, enfermedad tizon tardío, prácticas de manejo y condiciones ambientales frente al rendimiento comercial del cultivo.

Durante el segundo ciclo de evaluación, las condiciones climáticas que se presentaron fueron: humedad relativa promedio de 78,82%, temperatura máxima, promedio y mínima de 19,06°C, 13,01°C y 7,13°C respectivamente, la precipitación acumulada fue de 340,04 mm bien distribuidos durante los meses de evaluación, condiciones que permitieron observar claramente la relación hospedero patógeno, en donde se pudo observar que en conjunto estas condiciones climáticas en ausencia de manejo químico, generan la aparición de síntomas en materiales con diferentes grados de resistencia, donde, la genética del huésped afecto la velocidad de avance de la enfermedad, debido principalmente a los recursos genéticos y a los mecanismos de defensa según el genotipo, que permitieron observar claramente la interacción diferenciada entre los materiales evaluados. Donde la variedad Diacol Capiro presentó la mayor susceptibilidad con 100% de área afectada por la enfermedad y AUDPC de 1855,87, seguido por la variedad ICA Única 75% de área afectada y AUDPC de 1068,15, Pastusa Suprema y el clon comercial Superior, presentaron un área afectada cercana a 45% para los 2 materiales y AUDPC de 497,42 y 491,75 respectivamente.

Durante el análisis de la información, fue posible observar más detalladamente la relación existente entre temperaturas promedio inferiores a 13°C, durante varios días, junto a precipitación constante, que facilita el movimiento y colonización del patógeno en el hospedero, situación que permitió observar síntomas característicos de la enfermedad y un crecimiento acelerado de las lesiones en los materiales susceptibles y medianamente susceptibles como fue el caso de Diacol Capiro e ICA Única, donde la enfermedad exhibió claramente su carácter policíclico, con la producción de nuevo inóculo, lo que generó que la infección avance rápidamente en el tiempo, situación que se pudo deber a la mayor eficiencia del patógeno para establecerse, colonizar y reproducirse en genotipos susceptibles a la enfermedad, situación que es diferente en genotipos con características de resistencia especialmente de tipo poligénico o horizontal, donde se afectan precisamente, variables como tasa de crecimiento de la lesión, reflejada en un menor nivel de daño, además de verse afectada la cantidad de inóculo secundario producido en estos materiales con características de resistencia, como fue el caso de Pastusa Suprema y el clon comercial Superior.

Es necesario establecer programas de monitoreo constante de resistencia de los materiales hacia la enfermedad, ya que es ampliamente reportada la pérdida o ruptura de la resistencia debido a la constante y rápida evolución del patógeno, la cual es considerada el arma estratégica con la cual se adapta fácilmente a los cambios en el ambiente, durante esta investigación fue posible evidenciar la pérdida de resistencia por parte de la variedad ICA Única, la cual en 2001 fue reportada dentro de un grupo de variedades de 6 países de Latinoamérica con características de resistencia hacia la enfermedad, por lo tanto y buscando el diseño de planes de manejo sostenibles donde se integren aspectos como resistencia del hospedero, condiciones climáticas ideales para la ocurrencia de eventos de la enfermedad, evolución del patógeno y aplicaciones sanitarias reducidas pero necesarias para la obtención de rendimientos ideales y ayudar a mantener la resistencia del hospedero por más tiempo.

La consecuencia directa de la presencia de la enfermedad en los diferentes materiales evaluados, fue la reducción de la biomasa en la parte aérea (hojas y tallos) situación que afectó la acumulación de biomasa en el tubérculo, incidiendo notoriamente en el rendimiento comercial obtenido, la reducción significativa de la biomasa aérea y del área foliar, conllevan a una reducción inherente en la capacidad fisiológica de la planta, debido a la reducción en la superficie de captación de luz, lo que impidió el llenado y la obtención de tubérculos de primera y segunda categoría cuando la susceptibilidad al patógeno es alta como fue el caso de la variedad Diacol Capiro sin manejo químico de la enfermedad, es importante mencionar que los tubérculos de esta categoría son los que determinan en gran medida el rendimiento total, por lo tanto las pérdidas ocasionadas en el total de la producción fueron altas de 89,06% donde solo se obtuvo tubérculos de tercera categoría y Richie. Por lo tanto es importante mencionar que este material es altamente dependiente a la aplicación de agroquímicos cuando las condiciones climáticas son ideales para la expresión de la enfermedad, además es posible inferir que existe una relación directamente proporcional entre el nivel de susceptibilidad reflejado en el nivel de daño y AUDPC, y el riesgo de disminución severa del rendimiento a causa de la enfermedad. Por lo tanto, cuando se siembre este material, es necesario establecer planes de monitoreo climático, cuando la condición climática sea similar a la presentada en el ciclo 2 de evaluación, correspondiente a condiciones típicas de invierno (alta precipitación, baja temperatura, alta humedad relativa, baja radiación solar), es necesario iniciar un plan de

aplicaciones, donde se considere el tipo de fungicida (preventivo, sistémico), que permita mantener los niveles de enfermedad por debajo del 5% de nivel de daño, para evitar que se presenten pérdidas considerables de hojas y tallos, que conlleven a una disminución significativa del rendimiento, dependiente del material.

La variedad ICA Única, presentó una reducción en su producción, marcada principalmente por la reducción en la producción de tubérculos de primera categoría, ya que la variedad se caracteriza por la alta producción de tubérculos de gran tamaño, donde al presentarse la afección por parte de la enfermedad, atacando principalmente la parte aérea de la planta, reduciendo la capacidad fotosintética de esta, imposibilitando, el llenado de esta clase de tubérculos (reducción de 66,11%), se puede decir que a pesar de que la disminución en el rendimiento total fue de 49,88%, esta no fue tan severa como la presentada por Diacol Capiro, esta reducción se considera significativa y podría poner en riesgo la sostenibilidad del cultivo, para este material bajo las condiciones climáticas presentes en el ciclo 2 de evaluación.

Los materiales Pastusa Suprema y Superior, presentaron comportamientos muy similares en cuanto al daño causado por enfermedad, sin embargo es importante resaltar que a pesar de que visualmente el daño era muy similar, la reducción del rendimiento en estos materiales fue diferente, donde Pastusa Suprema presentó una reducción del 30,5% en tubérculos de primera categoría, 35,57% de reducción para tubérculos de segunda categoría y para tubérculos de tercera categoría se presentó una reducción de 32,25% en el rendimiento, estas reducciones en cada una de las categorías genero una reducción total del rendimiento (t/ha) de 31,75%. Por su parte Superior presentó una disminución de 49,44%, en el rendimiento de categoría primera, la categoría segunda presentó una reducción de 28,57% y la categoría tercera presentó una reducción de 40,92%, esta reducción en las diferentes categorías según diámetro del tubérculo, generaron una reducción en el rendimiento total (t/ha) de 40,92%, esta información, nos permite inferir que a pesar de que el nivel de daño en estos 2 materiales fue muy similar, se presentan diferencias importantes en la reducción del rendimiento total, donde, podemos concluir que a pesar del nivel similar de resistencia de estos dos materiales, Pastusa Suprema exhibe características de tolerancia hacia la enfermedad, debida principalmente a la menor reducción del rendimiento comercial del cultivo.

Es importante resaltar que la reducción en el rendimiento del cultivo, independiente del material comercial, se da debido a la incapacidad de la planta por realizar el llenado de tubérculos de categoría primera, seguido de categoría segunda, la diferencia en la reducción de estas categorías, influye fuertemente en la reducción en el rendimiento total del cultivo, el cual va a ser más o menos severo de acuerdo al nivel de resistencia o susceptibilidad del material a sembrar, por lo tanto es importante mantener el nivel de daño en niveles bajos, inferiores a 5% en materiales susceptibles y resistentes, recomendando la siembra de estos materiales, los cuales generaran un aporte positivo a la sostenibilidad del MIPE, reduciendo muy seguramente la frecuencia en la aplicación de agroquímicos, siempre partiendo de la premisa de aplico a menos que; coincidan condiciones climáticas favorables para la ocurrencia de la enfermedad, acompañada del conocimiento de la resistencia del material, como pilar fundamental en la toma de decisiones de aplicación de fungicidas, análisis, que seguramente impactaran positivamente en los costos de producción del cultivo.

Por lo tanto y considerando el global de resultados presentes en esta investigación, es importante recomendar realizar evaluaciones constantes de materiales con características de resistencia a la enfermedad, que además cumplan con los requerimientos industriales y nutricionales, que permitan ampliar la base genética del cultivo, que contribuyan a través de la resistencia a reducir la expresión del patógeno a nivel de zona, que muy seguramente conllevara a la reducción en el número y frecuencia de aplicaciones, contribuyendo al aumento de la sostenibilidad del cultivo, medida desde los componentes ambiental y económico, reduciendo el riesgo de pérdidas en el rendimiento del cultivo, contribuyendo notoriamente en el sostenimiento y mejoramiento de las condiciones de vida de los pobladores de las diferentes zonas productoras del departamento.